

JOURNAL INTERNATIONAL

Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement

ISSN(electronic): 1737-9350

ISSN (printed): 1737-6688

Volume III - Numéro 1 - Avril 2018

Eau-Environnement-Climat'2018



**Gestion des Ressources en Eau
Water Resources Management**

Rédacteur en Chef : Pr Nouredine Gaaloul

Publié par :

L'Association Scientifique et Technique pour l'Eau et
l'Environnement en Tunisie (ASTEETunisie)

"وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ"

سورة الأنبياء آية 30

Et fait de l'eau toute chose vivante

(Al-Anbiya 30)

Comité Scientifique International

<i>Noureddine Gaaloul</i>	<i>Université de Carthage -IRESA- INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Hamadi Habaieb</i>	<i>Université de Carthage -IRESA- INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Zouhaier Nasr</i>	<i>Université de Carthage -IRESA- INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Taoufik Hermassi</i>	<i>Université de Carthage -IRESA- INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Mohamed Hachicha</i>	<i>Université de Carthage -IRESA- INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Zohra Lilli</i>	<i>Université de Carthage -IRESA- INAT (Tunisie)</i>
<i>Mohamed Mecherqui</i>	<i>Université de Carthage -IRESA- INAT (Tunisie)</i>
<i>Jamila Tarhouni</i>	<i>Université de Carthage -IRESA- INAT (Tunisie)</i>
<i>Bouhamdi Samia</i>	<i>Université Tunis El Manar – IRVT (Tunisie)</i>
<i>Sihem BenAbdallah</i>	<i>Université de Carthage - CERTE (Tunisie)</i>
<i>Sonia Dhaouadi</i>	<i>Université de Carthage - FSBizerte (Tunisie)</i>
<i>Mohamed Habib Sellami</i>	<i>Université de Jendouba -IRESA- ESIER (Tunisie)</i>
<i>Hechmi Belaid</i>	<i>Université de Jendouba -IRESA- ESIER (Tunisie)</i>
<i>Béchir Hamrouni</i>	<i>Université d'El Manar - FSTunis (Tunisie)</i>
<i>Adel Kharroubi</i>	<i>Université de Gabès - ISSTEG (Tunisie)</i>
<i>Ahmed Kettab</i>	<i>ENP, (Algérie)</i>
<i>Azzedine Hani</i>	<i>Université de Annaba (Algérie)</i>
<i>Larbi Djabri</i>	<i>Université de Annaba (Algérie)</i>
<i>Saadane Djerfi</i>	<i>Université de Annaba (Algérie)</i>
<i>Beloulou Laroussi</i>	<i>Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)</i>
<i>Foufou Amar</i>	<i>Université Skikda (Algérie)</i>
<i>Mohammed Achite</i>	<i>Université de Chlef (Algérie)</i>
<i>Abdelhalim Yahiaoui</i>	<i>Université de Bechar (Algérie)</i>
<i>Mohamed Bessenasse</i>	<i>Université de Saad Dahlab- Blida (Algérie)</i>
<i>Abdessamad Merzouk</i>	<i>Université de Tlemcen (Algérie)</i>
<i>Benabadji Noury</i>	<i>Université de Tlemcen (Algérie)</i>
<i>Belkacem Bekkoussa</i>	<i>Université Mustapha Stambouli de Mascara (Algérie)</i>
<i>Guendouz Abdelhamid</i>	<i>Université de Blida I (Algérie)</i>
<i>Guergazi Saâdia</i>	<i>Université de Biskra (Algérie)</i>
<i>Nadia Machouri</i>	<i>Univ. Mohammed V (Maroc)</i>
<i>Ali Essahlaoui</i>	<i>Université Moulay Ismail Meknes (Maroc)</i>
<i>El Ouali Abdelhadi</i>	<i>Université Moulay Ismail Meknes (Maroc)</i>
<i>Abdelmajid Moumen</i>	<i>Université Nadour (Maroc)</i>
<i>Mhamed Amyay</i>	<i>Université de Fès (Maroc)</i>
<i>Abdelaziz Abdallaoui</i>	<i>Université Moulay Ismail (Maroc)</i>
<i>Saeid Eslamian</i>	<i>Université de Isfahan (Iran)</i>
<i>Diop Ngom Fatou</i>	<i>UCAD FST (Sénégal)</i>
<i>Sousou Sambou</i>	<i>Univ. Cheikh Diop (Sénégal)</i>
<i>Gnamba Franck Maxime</i>	<i>UFR STRM (Cote d'Ivoire)</i>
<i>Soro Nagnin</i>	<i>UFR STRM (Cote d'Ivoire)</i>
<i>Koussouhon A. Leonard</i>	<i>FLLAC/ UAC (Congo)</i>
<i>Moumtaz Razack</i>	<i>Université de Poitiers (France)</i>
<i>Martin Philippe</i>	<i>Université d'Avignon (France)</i>

Préface



L'eau est un aliment, un bien économique, un facteur de production et un espace vital. Elle est à ce titre un élément essentiel de tout développement. L'accroissement de la population mondiale s'accompagne notamment d'une demande accrue d'aliments, d'énergie et d'eau. Les conflits d'usage de l'eau sont exacerbés par le gaspillage et la contamination de cette ressource. La pénurie, mais aussi les crues et la pollution croissante de l'eau, posent de plus en plus de problèmes majeurs au développement économique et social d'un grand nombre de pays.

La gestion intégrée et durable de l'eau dans ce contexte de changement climatique est l'un des principaux défis à relever dès à présent. Le dérèglement climatique introduit de nouvelles contraintes et exacerbe celles auxquelles sont déjà confrontés les gouvernements et les sociétés dans le domaine de l'eau. Ces contraintes concernent aussi bien la disponibilité de l'eau, les variations et les phénomènes climatiques extrêmes, que l'incertitude sur la ressource qui ira en augmentant.

D'ici 2050, plus de 40% de la population mondiale sera soumise à un stress hydrique prononcé, et près de 20% exposée aux inondations. D'un point de vue économique, les actifs menacés par les inondations représenteraient près de 45 000 milliards USD en 2050. D'un autre côté, la consommation en eau va augmenter de façon exponentielle dans les 30 prochaines années, ce qui entraînera une situation plus difficile à l'avenir vu notre mode actuel de consommation et d'utilisation de l'eau. L'augmentation de la demande en eau et en aliments se situerait entre 40 à 50% pour alimenter et nourrir les 2 milliards de personnes supplémentaires dans le monde.

Il est généralement admis que notre climat est en train de changer et que le processus pourrait s'accélérer au cours du 21^{ème} siècle. Le terme changement climatique ne signifie pas seulement «réchauffement climatique»; il est également probable que les événements climatiques extrêmes se multiplient à l'avenir.

Le réchauffement de la planète est aujourd'hui une certitude entraînant un dérèglement du climat affectant le cycle de l'eau et les ressources en eau. Le changement climatique impacte quatre secteurs particuliers : l'eau ; les écosystèmes, aussi bien en eau douce qu'en milieu marin ; les rendements des cultures ; la santé par l'accroissement des risques de maladies hydriques. Un secteur de l'eau performant garantit l'accès à de l'eau potable salubre et à des installations sanitaires appropriées, des services d'assainissement durables et efficaces, l'endigement des maladies hydriques et la préservation des ressources en eau pour les générations futures. C'est pourquoi la recherche de solutions pour une gestion durable des ressources en eau est prioritaire pour un grand nombre de gouvernements et d'entreprises du secteur privé ainsi que pour la population civile.

L'effet du changement climatique est mis en évidence sur les paramètres hydroclimatiques, notamment les pluies, les températures et les débits des cours d'eau : baisse des précipitations, baisse des débits et tendance des températures vers les extrêmes. Au-delà, les actions anthropiques ont aussi contribué à ce changement : déboisement, mauvaise exploitation des sols et de l'eau, augmentation démographique, etc. mais leurs impacts hydrologiques, dans certains cas, n'ont pas été précisément mesurés.

Le changement climatique est un des problèmes globaux majeurs de notre temps, et les scientifiques ont solidement établi la réalité du phénomène, ses origines anthropiques et la nécessité de prendre des mesures d'atténuation et d'adaptation. C'est parce que le climat, et plus largement les écosystèmes naturels, dépendent amplement de l'organisation des activités sociales que les scientifiques du climat se doivent d'échanger avec les sciences sociales tant en amont, pour penser l'agenda de leurs recherches, qu'en aval pour comprendre les usages publics dont leurs résultats font l'objet.

La réutilisation des eaux usées est aujourd'hui un levier sous-exploité face aux enjeux de déficit en eau et de dégradation des milieux et des conditions sanitaires. Le débat est concentré sur les questions importantes qui sont débattues actuellement au niveau international sur l'utilisation des eaux usées traitées. L'intérêt analytique réside dans le fait de confronter l'idéal d'une approche intégrée de la gestion de l'eau avec les conditions pratiques locales et d'examiner les motifs d'action des acteurs dans le secteur de l'eau. L'agriculture est un secteur qui depuis longtemps valorise les eaux usées brutes, en dehors de toute planification. Aujourd'hui, au Nord comme au Sud, la réutilisation des eaux usées pour l'agriculture intéressent les politiques et décideurs locaux. Des projets de traitement des eaux incluant un volet réutilisation agricole émergent et le besoin de faire évoluer les cadres légaux, réglementaires et institutionnels se font ressentir en même temps que la nécessité d'accompagner et renforcer les capacités de l'ensemble des acteurs. Les expériences en réutilisation des eaux usées montrent que des efforts supplémentaires doivent également être réalisés en matière d'éducation et de participation des communautés locales et des usagers finaux des eaux usées.

La bonne gestion des ressources en eau nécessite d'impliquer tous les acteurs intéressés par une approche participative. Si la connaissance de la ressource est importante, l'exploitation (construction des différents ouvrages au sein d'un Etat ou un bassin versant transfrontalier, etc.) doit être contrôlée. Ailleurs, la baisse pluviométrique entraîne une surexploitation des nappes souterraines, ce qui n'est guère sécurisant pour la ressource, voire son potentiel

Nouredine Gaaloul
Professeur de l'Enseignement Supérieur Agricole (INRGRF)
Président de l'ASTEE Tunisie
Président et Coordinateur E²C-2018

Sommaire

Gestion des Ressources en Eau		9
Application des cartes SOM pour la classification des paramètres géochimiques des sédiments de la Mer Rouge		10
Kaoutar El Azhari, Abdelaziz Abdallaoui, Hamid Zineddine		
Salinity study under a wheat crop at the irrigated perimeter of Lakhmess		15
Amor Boughdiri, Gouider Tibaoui, Hajer Jejjli, Ahmed Saidi, Oumeima Ben Romdhane, Slim Slim		
Evaluation des écosystèmes d'eau douce de Tunisie		21
Noura Slimani, Eric Guilbert, Moncef Boumaïza		
Vulnérabilité des populations face aux risques d'inondations dans les grandes villes d'Afrique de l'ouest : Cas de Cotonou au Bénin et d'Abidjan en Côte d'Ivoire.		26
Adjakpa Tchékpo Théodore, N'guessan Bi Vami Hermann, Kadjegbin Toundé Gislain Roméo		
Évaluation des facteurs physiographiques et leurs impacts sur les ressources en eau dans les bassins versants d'Essaouira (Essaouira, Maroc)		30
Zakaria Ouzerbane, Mostafia Boughalem, Abdellah El Hmadi, Ali Essahlaoui, Abdessamad Najine, Tahar Aïfa, Fadwa Redouani, Abdelhadi El Ouali		
Apport de la télédétection et des SIG dans la cartographie des zones favorables à l'implantation de forages d'eau à gros débits dans la région de Daloa.		39
Labe Simplicie, Jourda Patrice, Salye M. Bachir, Youan Ta Marc, Lasm Théophile, Kouadio Boyossoro Hélène		
Qualité de l'eau de robinet dans la ville de Biskra en Algérie- étude de cas		44
Boukharouba Khadidja, Daoud della		
La qualité physico-chimique des eaux du Complexe Terminal (CT) dans la région d'Oued Righ (Sud-Est d'Algérie)		50
Belksier Mohamed Salah, Bouselsal Boualem, Abour Fella		
Simulation numérique des écoulements turbulents à surface libre : Application aux coursiers d'évacuateurs de crues		59
Fatiha Lebdiri, Abdelghani Seghir, Ali Berreksi		
Contribution de la télédétection à l'étude de la fracturation, et de la mise en place du système hydrogéologique de la zone des sources, Haut Bassin de l'Oum Er Rabiaa (Moyen-Atlas, Maroc).		62
Amine Tahiri, Fouad Amraoui, Mohamed Sinan		
Cartographie de la susceptibilité aux inondations par la méthode de l'analyse multicritère et SIG : Cas de la wilaya d'Oran Nord-Ouest de l'Algérie		67
Zine el abidine roukh, Abdelmansour najji		
Caractérisation géochimique de l'aquifère de Complexe Terminal de El-Oued (SE Algérie)		74
Bouselsal Boualem, Belksier Mohamed Salah		
Effets de l'érosion hydrique dans la commune d'Attécoubé, Abidjan Côte d'Ivoire		81
Brou Etienne N'dri, Kadio Hilaire Niamke, Kouadio Boyossoro Hélène		
Modélisation du transport solide et étude analytique de quantification de l'envasement dans le barrage de l'oued Siliana		85
Mohamed Habib Sellami, Kochta Mohamed		
Devenir des sources hydriques dans les villages kabyles		90
Sadjia Halit, Abderrezak Iddir		
Hydrogeological Modelling using Gardenia Model in the Koda catchment, Mali.		96
Oumou Diancoumba, Nouredine Gaaloul, Hamadoun Bokar, Adama Toure, Taoufik Hermassi, Zoubeida Bargaoui, Nelly .C. Kelome		
Apport de la modélisation pour l'aide à la décision sur la stratégie d'irrigation des cultures -résultats préliminaires		102
Nesrine Kalboussi, Sébastien Roux, Bruno Cheviron, Jérôme Harmand, Alain Rapaport, Carole Sinfort		
Évaluation de la contamination mercurielle des eaux de surface Cas du barrage de Zit-Emba, wilaya de Skikda, nord-est algérien.		108
Mohamed Zine Belhadj, Abderrahmane Boudoukha		
État de la ressource en eau superficielle au Nord-Ouest de l'Algérie		116
Célia Kebir, Hanane Lamari		

Aléa inondation et cartographie des zones inondables dans la région d'Ain Temouchent- Algérie	120
Mostafia Boughalem, Zakaria Ouzerbane, Hafida Boucherit, Aminata Kone, Ahmed Kettab	
Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur l'évolution des paramètres physico-chimiques des eaux du système aquifère de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest Algérien)	125
Laouni Benadela, Laouni Gaidi, Belkacem Bekkoussa	
Evaluation des flux souterrains par l'utilisation des isotopes du carbone, application aux aquifères karstiques des Monts de Tlemcen (Nord-Ouest Algérien)	134
Habib Azzaz, B. Bekkoussa, A. Hamimed, M. Zaagane	
Prediction of monthly stream flow using the hybrid discrete wavelet transform with support vector machine based on particle swarm optimization.	139
Yazid Tikhamarine, Souag-Gamane Doudja, Soumia Mellak	
Modélisation hydrologique des tributaires de la lagune aghien à la périphérie de la ville d'abidjan en Côte d'Ivoire	144
Amidou Dao, Ehouman Serge Koffi, Djibril Noufe, Gneneyougo Emile Soro, Jean Thierry Koffi, Seydou Diallo, Bamory Kamagate, Droh Lanciné Gone	
Approche à l'étude physico chimique des eaux de surface dans une région aride (Nord-est Algérien)	154
Nawel Boussaada, Nabila Hammad	
Modélisation du phénomène de cavitation dans les conduites fermées	161
Wahiba Mokrane, Ahmed Kettab	
Surveillance des caractéristiques physico-chimiques et sédimentologiques de trois sources d'eau de la nappe Metline-Ras Jebel-Rafraf.	167
Sonia Dhaouadi, Salsabil Rajeb	
Evaluation de la qualité des eaux souterraines, Cas de la source Tahabort (Tamanrasset, Algérie)	174
Bouhoreira Abdelaziz, Labed Brahim, Laghnaj Abd Alfatah, Sagueni Zineb	
Cartographie et étude de l'évolution de la qualité physicochimique des eaux de sources. Cas de la région de Taher (wilaya de Jijel, Nord-Est algérien)	178
Chine Amal, Debieche Taha-Hocine, Mayache Boualem	
Modélisation du transport du cadmium et du plomb au niveau des sédiments confinés du lac sud de Tunis à l'aide du code HydroGéoSphère	185
Tesnim Ben Dekhil, Farouk Ben Abelhani	
Application des méthodes statistiques à l'étude hydrochimique des eaux de la Haute et Moyenne Soummam (Algérie)	192
Hanane Lamari, Mohamed Mesbah, Célia Kebir, Mohamed El Hocine Cherchali	
Caractérisation de la sécheresse: cas du bassin versant Seybouse	197
Dounia Mrad, Sabri Dairi , Sofiane Boukhari, Yassine Djebbar	
Approches multicritères pour l'étude de l'intrusion marine : Cas de la nappe de Collo, Nord Est Algérien	201
Djabri Larbi, Bouhsina S, Hani A, Chaffai H, F.Z. Trabelsi	
Accuracy evaluation of direct runoff estimate using HEC-HMS model within a semi-arid watershed: a case study of Bouregreg River, Morocco	209
Siham Elaryf, Hassan Rahali	
Quelques aspects de la propagation des crues de références dans le bassin de Derna : cas de la crue d'hiver de 1987 (Bassin d'Oum Er-Rbia, Maroc)	218
Lahlou Nadia, El Ghachi Mohamed, El Khalki Yahya	
Gestion irrationnelle des ressources en eau dans le Sud algérien (Cas de la vallée de M'Zab)	224
Rachid Zegait, Boualem Remini , Chikh Ouled Belkhir	
Les palmeraies périurbaines de Biskra face à la problématique de l'eau agricole	233
Ammar Foufou	
Apport combiné de la télédétection et de la géophysique à l'identification des réserves en eau souterraine de la localité de Belle ville (Centre-ouest Côte d'Ivoire).	244
Kouassi Eric-Germain Kouakou, Kouadio , Waidhet Arthur Brice Konan	
Effets anthropiques et contamination du littoral de la région de Gabes : approche géochimique et effet de l'hydrodynamisme	249
Bessma Mansouri, Adel Kharroubi, Maher Gzam, Abdelkader Chahlaoui	
L'analyse Des Caracteristiques De La Secheresse Utilisant Les Copules Archimediennes	253
Soumia Mellak, Doudja Souag, Yazid Tikhamarine, Abderrahmane Ballah	
L'importance d'utilisation des jardins filtrants avec des plantes ornementales dans les pays en développements	258
Mohammed Ali Boukebous, Mahmoud Debabeché	

Evolution quantitative et qualitative de la nappe phréatique de la ville de M'bahiakro (Centre-Est, Côte d'Ivoire)	265
Kouame Kouassi Innocent , Kouassi Kouakou Lazare, Konan Kouakou Séraphin, Baï Ruth, N'cho Achié Hervé	
Identification des processus d'intrusion marine dans les aquifères côtiers par l'usage des rapports Br/Cl et Br/Na	272
Adel Kharroubi , Hajer Mejri , Faten Tlahigui Bassma Mansouri	
Les enjeux environnementaux et économiques des projets de dessalement de l'eau de mer en Algérie	277
Abderrahmane Djoher	
Erosivité des pluies et érosion spécifique et envasement des barrages en milieu semi-aride Tunisien.	291
Belaïd Hechmi , Habaieb Hammadi.	
Les courbes Débit-Durée-Fréquence - Un outil d'aide à la décision. Application à quelques cours d'eau du Nord-est algérien.	303
Beloulou Laroussi , Labed M., Guetatli K., Djorfi Sd., Guechi S.	
Dynamique et cartographie des formations à Tamaricacées dans l'Ouest algérien	312
Benabadji Noury , Mme Belkhodja Nessrine	
Modélisation pluie-débit journalier par l'approche des réseaux de neurones artificiels et un modèle conceptuel le GR4jen zone semi-aride	319
Khadidja Benzineb , Mohamed Remaoun, Khayra Berdane	
Modélisation géostatistique de la salinité en environnement 3D à partir de levés de résistivité électrique et de la géomodélisation (Cas de l'aquifère de Hammam Bouhadjar – Nord-Ouest Algérien)	324
Dehni Abdellatif	
Étude de la fracturation dans les forages carottés dans la région d'Oumé (Côte d'Ivoire)	326
Derving Baka , Théodore Koffi Yao, Marc Youan-Ta, Théophile Lasm	
Evolution Quantitative Et Qualitative Des Eaux De La Source De Ain Khrouf, El Bouni, Annaba	333
Saadane Djorfi , Laroussi Belloulou, Salima Guechi, Samir Djorfi,	
Apport de la piézométrie et de la température à la détermination de l'origine des eaux souterraines de la nappe alluviale de Oued Biskra (Algérie)	344
Faïssal Later , Abdallah Labadi, Mohamed Tahar Kaddouri	
Analyse de la fracturation extraite des images satellitaires de la région de katiola : contribution a la caracterisation des reserves souterraines	351
Franck Maxime Gnamba , Théodore Yao Koffi , Derving Baka	
Calcul des infiltrations à travers les digues en terre	358
Abdelkader Hachemi	
Evaluation de la performance du service d'eau potable en utilisant deux méthodes de pondérations Hamchaoui Samir , Bouchraki Faiza, Berreksi Ali, Benzerra Abbas, Boudoukha Abderrahmane	365
Prévision des crues d'un bassin non jaugé : cas du bassin versant de Tessa au Nord de la Tunisie	370
Taoufik Hermassi , Habiba Ferchichi, Hechmi Belaïd	
Évaluation de l'érosion des sols par le modèle RUSLE à l'aide de la télédétection et du SIG - Étude de cas du bassin de Boussalem Algérie	375
Elhadj Mokhtari	
Scaling potential of the continental intercalaire geothermal waters in the grand erg oriental basin (Algeria and south Tunisia)	382
Radhia Essamin , Samir Kamel	
Calcul et Cartographie de l'infiltration en zone semi-aride	389
Rym Ait Mohamed Amer	
Caractérisation physico-chimique et biologique des eaux du barrage de Béni-Haroun dans l'est Algérien	395
Saliha Kherief Nacereddine , Hamssa Djeddi , Naila Yasmine Benayache et Fatima- Zohra Afri-Mehennaoui	
Experimental study of the effect of the compactness on the sequent depths ratio of the hydraulic jump controlled by thin sill in a rectangular channel	405
Sonia Cherhabil	
Les pertes karstiques du Gardon (Gard, France) : évaluation à partir de chroniques de débit à haute résolution	415
Philippe Martin	
Fonctionnements karstiques et mesures de températures à haute résolution : quelques résultats obtenus dans le sud de la France	418
Philippe Martin	426

**Computation of Normal Depth in an Open Channel with Horizontal Bottom and Circular Walls
Using the Rough Model Method**

Moussa Lakehal , Bachir Achour, Naim Mansri and Ali Bedjaoui

440

Diagnostic De La Qualité Des Eaux Des Barrages Algériens: Étude De Six Cas Régionaux.

Belkacem Bekkoussa, Laouni Benadela, Habib Azzaz

444

Les Ouvrages Hydrauliques au long de l'histoire

Monia Jeridi

456

Aptitudes agricoles de l'eau du puits du jardin botanique de l'Université Péléforo Gon Coulibaly de

Korhogo

Omer Zephir De Lasme, Delmas Stéphane Kouadio , Stephane Avy Koffi

An aerial photograph of a large-scale olive grove. The trees are planted in neat, parallel rows that stretch across a hillside. A central, narrow channel, likely for irrigation, runs down the middle of the grove. The ground between the rows is a reddish-brown color, possibly due to soil type or mulch. The sky is overcast and grey.

Gestion des Ressources en Eaux

Application des cartes SOM pour la classification des paramètres géochimiques des sédiments de la Mer Rouge

Kaoutar El Azhari, Abdelaziz ABdallaoui*, Hamid Zineddine
Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, Département de Chimie, Equipe Chimie Analytique et Environnement, B.P. 11201, Zitoune, Meknès, Maroc.

* Auteur correspondant : a.abdallaoui@gmail.com

Résumé

Les cartes auto-organisatrices (SOM: Self-Organizing Map) est une méthode populaire pour analyser la structure d'un ensemble de données. Dans cet article, nous avons utilisé les performances des cartes SOM pour classer des échantillons sédimentaires de la Mer Rouge selon neuf paramètres géochimiques. Les résultats obtenus avec les performances des cartes SOM ont été rapproché à ceux obtenus par la classification hiérarchique ascendante (CHA). Les typologies recueillies par les cartes SOM et CHA, ont donné des classifications similaires d'échantillons en quatre groupes distincts qui différaient de manière significative dans les concentrations de certains éléments. Cette étude révèle également que le réseau neuronal artificiel des cartes SOM peut être non seulement un outil plus efficace pour classer différents échantillons de cette étude, mais aussi pour déterminer visuellement des corrélations entre ses paramètres géochimiques. En effet, les cartes SOM nous ont offert plus d'informations sur notre base de données multivariée et elles sont plus facilement interprétables qu'avec la CHA.

Mots clés : Cartes auto-organisatrices, classification hiérarchique ascendante, Paramètres géochimiques, Mer Rouge.

Application of SOM maps for classification of geochemical parameters of Red Sea sediments

Abstract

Self-Organizing Map (SOM) is a popular method for analyzing the structure of a dataset. In this paper, we used the performances of SOM maps to classify sedimentary samples of the Red Sea according to nine geochemical parameters. The results obtained with the performances of the SOM cards have been reconciled with those obtained by the ascending hierarchical classification (AHC). The typologies collected by the SOM and AHC maps, gave similar classifications of samples into four distinct groups that differed significantly in the concentrations of some elements. This study also reveals that the artificial neural network of SOM maps can be not only a more efficient tool for classifying different samples of this study, but also for visually determining correlations between its geochemical parameters. Indeed, the SOM cards have offered us more information about our multivariate database and they are more easily interpretable than with the AHC.

Key Words: Self-organizing maps, ascending hierarchical classification, Geochemical parameters, Red Sea.

1. Introduction

Dans le domaine de la classification, on distingue la classification supervisée appelée aussi discrimination et la classification dite non supervisée, [1] où s'identifie les cartes auto-organisatrices ou topologiques de Kohonen [2]–[7]. Cette méthode est capable de projeter des données de grandes dimensions dans un espace à deux dimensions. En plus de leur capacité de classification, ces cartes permettent de mettre en évidence les relations non linéaires impossibles à obtenir avec les méthodes classiques d'analyse multicritère [8], [9]. Elles sont alors recommandées comme alternative dans plusieurs domaines [10]–[13], surtout pour l'exploration de données environnementales [14], [15].

Dans cette étude, nous disposons de résultats de mesure de paramètres géochimiques sur des carottes de sédiments de la Mer Rouge. Nous avons combiné la performance de l'algorithme de Kohonen avec d'autres techniques traditionnelles de clustering, comme la CHA, pour organiser notre base de données en des groupes distinctifs en fonction de leur composition (en particulier les métaux lourds), et aussi pour dévoiler les corrélations éventuelles entre les variables géochimiques.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Zone d'étude

La Mer Rouge est un jeune océan semi-fermé Il s'étend sur près de 2000 km et a une largeur qui varie entre 250 et 450 km. Elle constitue un exemple de bassin océanique aux premiers stades de son ouverture de part et d'autre d'un centre d'expansion lente. Dans ce bassin, l'activité hydrothermale associée au volcanisme et d'épaisses séries évaporitiques du Miocène, se manifestent au sein de la zone axiale par la présence de fosses à saumure et/ou de sédiments minéralisés.

Vue ces particularités géomorphologiques, les sédiments ont subi une étude lithologique, des analyses isotopiques, des mesures de salinité, des analyses de calcimétrie, de carbone/soufre et ont également fait l'objet d'analyses micropaléontologiques. Le rapport a révélé entre autres, que le cadre chrono - stratigraphique des carottes couvre les dernières périodes du Quaternaire [15].

Notre base de données présente des résultats de mesure de plusieurs paramètres géochimiques, mesurés en cinq carottes sédimentaires prélevées de six fosses situées le long de l'axe de la Mer Rouge (du Nord au Sud : Thétis, Atlantis II, Valdivia, Chain B, Port Soudan, Suakin) et hors fosse, entre 19° et 23° de latitude Nord (figure 1).

2.2. Description de la base de données

Dans cette étude, nous avons utilisé une base de données constituée de 348 échantillons et ne garder que neuf variables géochimiques qui sont :

- Six variables géochimiques : Profondeur, Carbonates, Carbone organique, Soufre, Globigerinoides. Ruber et Globigerinoides. Sacculifer ;
- Trois variables relatives aux teneurs de trois métaux lourds : le fer, le manganèse et le zinc (Tableau.1).



Fig. 1 - Carte de localisation des prélèvements des carottes

Paramètres géochimiques		Symboles	Unités
Variables géoch	X ₁ Profondeur	Prof	cm
	X ₂ Carbonates	CaCO ₃	%
	X ₃ Carbone organique	Corg	%
	X ₄ Soufre	S	%
	X ₅ Globigerinoides ruber	G.r	%
	X ₆ Globigerinoides sacculifer	G.s	%
Métaux lourds	X ₇ Fer	Fe	g/kg
	X ₈ Manganèse	Mn	g/kg
	X ₉ Zinc	Zn	g/kg

Tableau 1 - Paramètres des sédiments et leurs symboles

Une phase de prétraitement des données est nécessaire pour les préparer à la phase de clustering. Pour cela, les valeurs de cette base de données ont été normalisées dans l'intervalle [0, 1] pour s'adapter aux exigences de la fonction de transfert sigmoïde utilisée par les réseaux de neurones. Cette normalisation a été effectuée suivant la relation :

$$X_n = \frac{(X - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})}$$

X_n : Valeur normalisée ; X_{\min} : Valeur minimale ;
 X : Valeurs brute ; X_{\max} : Valeur maximale.

2.3. Analyse par la classification hiérarchique ascendante (CHA)

Le regroupement hiérarchique est une méthode de classification itérative dont le principe est simple et peut être résumé suivant les quatre étapes :

- Calcul de la dissemblance entre les n objets ;

- Combinaison de deux objets dont le regroupement minimise un critère d'agrégation donné, créant une classe comprenant ces deux objets ;
- Calcul de la dissemblance entre cette classe et les autres objets utilisant le critère d'agrégation ;
- Regroupement des deux objets en classes incluant la consolidation minimisant le critère d'agrégation.

Cela se poursuit jusqu'à ce que tous les objets soient regroupés. Ces fusions successives produisent un arbre binaire de classification ou dendrogramme, dont la racine est la classe contenant tous les individus.

2.4. Algorithme SOM

La carte topologique auto-adaptative développée par Tuevo Kohonen un réseau de neurones artificiels orienté et constitué de 2 couches [8] : couche d'entrée, les neurones (nœuds, ou unités) correspondent aux décrivants des observations, alors que la couche de sortie est souvent représentée en une grille de neurones bidimensionnelle dite carte de Kohonen topologique. A chaque neurone est associé un vecteur de dimension n qui contient les poids w (Figure 2). Chaque neurone représente un d'observations similaires.

C'est une méthode de classification automatique mais également une méthode de visualisation [14]. En effet, les neurones de la couche de sortie sont disposés de manière que deux cellules adjacentes dans la grille correspondent à des groupes d'observations proches dans l'espace de représentation initial. Le nom de cartes auto-organisatrices.

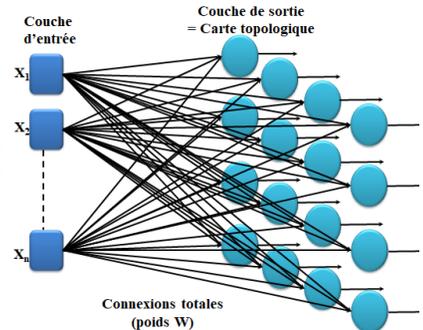


Fig. 2 - Schéma d'une carte de Kohonen

Le réseau de Kohonen fonctionne de manière itérative [8] pour obtenir le neurone avec le vecteur de poids le plus proche (distance minimale) à tous les vecteurs de poids des neurones de la carte SOM, appelée l'unité la mieux adaptée (Best Matching Unit : BMU) ou neurone vainqueur. Une fois le BMU trouvé, les vecteurs de poids du SOM sont mis à jour et le BMU est déplacé plus près du vecteur d'entrée dans l'espace d'entrée. Par conséquent, la carte finale montre des échantillons de données similaires proches les uns des autres et des échantillons de données non similaires loin les uns des autres. La relation de quartier (typiquement gaussienne) qui relie les neurones, dicte la topologie ou la structure de la carte. L'apprentissage se fait avec différentes tailles de cartes et la taille optimale est choisie en minimisant les erreurs dites de quantification (QE) et de topographie (TE).

La QE est la moyenne de la distance entre les observations et les prototypes de leurs classes. C'est un nombre positif dont la valeur doit être proche de 0 pour une bonne qualité de projection. Elle mesure la résolution de la carte est la moyenne des distances entre chaque vecteur d'entrée et son BMU.

La TE mesure la proportion des données ayant les deux premiers BMU non adjacents. Pour le calcul de ce critère, le second neurone le plus proche de chaque observation est déterminé et la fréquence du nombre de fois où ce second neurone ne se trouve pas dans un voisinage à distance un sur la grille du neurone d'affectation est déterminée. Cet indicateur est donc un nombre compris entre 0 (projection de bonne qualité) et 1 (projection de mauvaise qualité).

La carte de Kohonen est à la fois une méthode de quantification vectorielle et un algorithme de projection de données. La quantification de N échantillons d'apprentissage aux M prototypes réduit l'ensemble de données original à un ensemble plus petit tout en préservant les propriétés originales de l'ensemble de données. Dans notre étude, l'optimisation de la taille de la carte a été effectuée en utilisant la règle heuristique proposée par Vesanto [17].

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Classification par la (CHA)

Cette méthode établit une classification des 348 observations de cette étude en quatre classes selon les teneurs des paramètres géochimiques.

Classe I : Rassemble presque la moitié des observations et caractérise les échantillons. Avec des teneurs élevées en soufre et G_r évoquent l'activité hydrothermale des fosses.

Classe II : Définie par des échantillons riches en carbonates, en G_s , en fer et en zinc. Elle concerne probablement les sédiments recueillis près des saumures chaudes extrêmement salées et riches en métaux.

Classe III : Regroupe surtout des sédiments superficiels (faible profondeur) ce qui élucide les fortes valeurs en carbone organique qui leur distingue.

Classe IV : Rassemble les échantillons pratiquement récoltés dans les grandes profondeurs et par conséquent justifie les faibles mesures du carbone organique et des métaux lourds enregistrés.

3.2. Classement selon SOM

La topologie de la carte de Kohonen utilisée pour regrouper les géochimiques est illustrée dans la figure 3. Les essais concernant la taille SOM a permis de relever plusieurs valeurs pour les paramètres QE et valeurs les plus faibles de QE et TE ont été clairement obtenues en utilisant une couche bidimensionnelle de sortie composée de 348 neurones (taille = 9 lignes x 9 colonnes), avec $QE=0,223$ et $TE=0,026$.

Encore quatre classes de sédiments se dégagent de la distribution des échantillons sur les cartes SOM de Kohonen en fonction des valeurs des paramètres géochimiques des échantillons.

On remarque une ressemblance remarquable avec les classifications fournies par les méthodes précédentes mais distribuées différemment

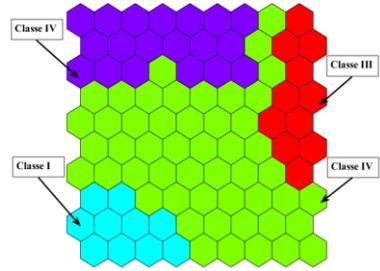


Fig. 3 - Distribution des échantillons selon les classes par la carte SOM

La classification ascendante hiérarchique a ensuite été utilisée pour regrouper les échantillons en dendrogramme (Figure 4).

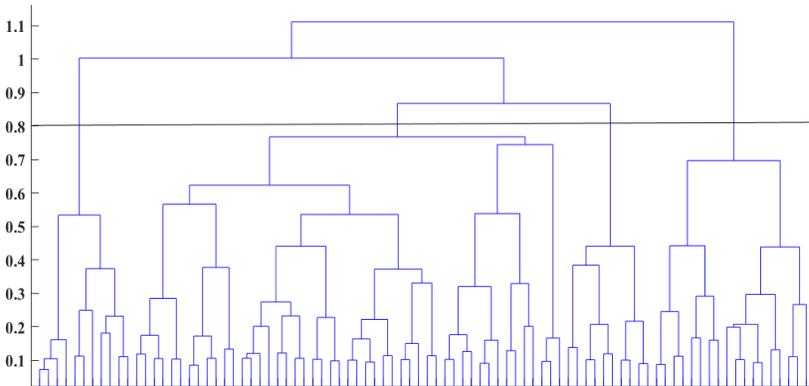


Fig. 4 -Dendrogramme de la classification hiérarchique de SOM ou SOM-HC

Le nombre de classes est ensuite déterminé sur la base de la distance euclidienne choisie. Ainsi, une distance de 0,9 conduit à 3 classes et une distance de 0,8 permet de distinguer 4 classes. Sur la figure 5 on peut voir les cartes de chaque variable et alors, tirer les corrélations entre ces différentes variables.

Les plans de composants SOM de l'ensemble des variables permettent de distinguer deux types de cellules : les cellules rouges foncées représentent des valeurs élevées alors que les cellules bleues représentent des valeurs faibles. Les modes de couleurs identiques des variables correspondent à une corrélation positive. En effet et encore une fois, on constate clairement l'existence de fortes corrélations positives entre la profondeur et 9 ce qui est une évidence, car elles représentent des concentrations de deux métaux lourds qui sont physico-chimiques voisins.

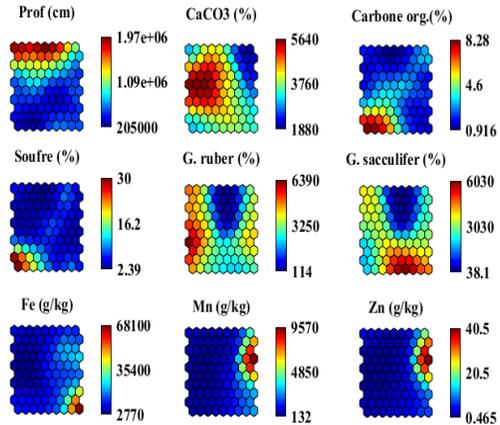


Fig. 5 - Plans de composants pour les variables d'entrée

Elles sont toutefois anti-corrélées par rapport à la profondeur ce qui est raisonnable puisque l'activité hydrothermale en mer Rouge se matérialise par l'enrichissement en métaux. On remarque aussi que la variable teneur en Soufre n'évoque qu'une très légère variation et anti-corrèle avec les métaux lourds. Une corrélation positive entre les teneurs en G.r et G.s est remarquable, ce qui est prévisible car dans tous les segments représentés, en mer Rouge, les foraminifères planctoniques sont en majorité ces deux espèces. Elles sont en fait, caractéristiques des variations de l'eau de surface telle l'élévation ou la baisse de salinité liées au niveau marin.

Les variables restantes ne sont ni de corrélations positives ni négatives, en particulier celles liées aux carbonates.

En comparaison avec les autres méthodes statistiques, la SOM a montré des résultats généralement analogues mais plus facilement accessibles et explicables.

CONCLUSION

L'analyse statistique basée sur l'approche de la carte de sélection de Kohonen et celle relative à la classification hiérarchique, ont montré des résultats très analogues en quatre classes distinctes. Toutefois, la carte auto-organisée de Kohonen a mis en évidence les différentes corrélations positives et négatives entre les variables étudiées. Aussi, la classification hiérarchique de la carte SOM a montré des différences d'un échantillon à l'autre en identifiant le comportement physicochimique entre différents éléments. Cette différenciation serait probablement liée aux conditions de la minéralisation liée à l'intensification de l'hydrothermalisme contemporain des variations du niveau marin engendrées au cours des cycles glaciaires et interglaciaires à la mer Rouge lors du Quaternaire.

En fin, les cartes SOM ont révélé plus d'informations, une meilleure visualisation et une qualité de synthèse remarquable sur notre base de données multivariée. Aussi, la classification proposée est plus facilement interprétable qu'avec la CHA.

Références

- [1] M. Boubou, Contribution aux méthodes de classification non supervisée via des approches prétopologiques et d'agrégation d'opinions, Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I 2007.
- [2] M. Pandey M, A. Kumar, A. Mishra, B. D. Tripathi, Application of chemometric analysis and self Organizing Map - Artificial Neural Network as source receptor modeling for metal speciation in river sediment, Environ. Pollut. 204 (2015) 64–73.
- [3] B. H. Lee B H, M. Scholz, Application of the self-organizing map (SOM) to assess the heavy metal removal performance in experimental constructed wetlands, Water Res. 40 (2006) 3367–3374.
- [4] Y. Bin Wang Y, C. W. Liu, Y. H. Kao, C. S. Jang, Characterization and risk assessment of PAH-contaminated river sediment by using advanced multivariate methods, Sci. Total Environ. 524–525 (2015) 63–73.
- [5] L. Balbinot L, P. Smichowski, S. Farias, M. A. Z. Arruda, C. Vodopivec, R. J. Poppi, Classification of Antarctic algae by applying Kohonen neural network with 14 elements determined by inductively coupled plasma optical emission spectrometry, Spectrochim. Acta - Part B At. Spectrosc. 60 (2005) 725–730.
- [6] D. Adandedjan D, S. Ahouansou Montcho, A. Chikou, P. Laleye, G. Gourene, Caractérisation des peuplements de macroinvertébrés benthiques à l'aide de la carte auto-organisatrice (SOM), Comptes Rendus - Biol. 336 (2013) 244–248.
- [7] R. Arias R, A. Barona, G. Ibarra-Berastegi, I. Aranguiz, A. Elías, Assessment of metal contamination in dredged sediments using fractionation and Self-Organizing Maps, J. Hazard. Mater. 151 (2008) 78–85.
- [8] X. Sun X, J. Deng, Q. Gong, Q. Wang, L. Yang, Z. Zhao, Kohonen neural network and factor analysis based approach to geochemical data pattern recognition, J. Geochemical Explor. 103 (2009) 6–16.
- [9] A. Astel A, S. Tsakovski, P. Barbieri, V. Simeonov, Comparison of self-organizing maps classification approach with cluster and principal components analysis for large environmental data sets, Water Res. 41 (2007), pp. 4566–4578.
- [10] D. Ballabio D, M. Vassighi, P. Filzmoser, Effects of supervised Self Organising Maps parameters on classification performance, Anal. Chim. Acta. 765 (2013) 45–53.
- [11] I. Deljanin I, D. Antanasijević, G. Vuković, M. A. Urošević, M. Tomašević, A. Perić-Grujić, M. Ristić, Lead spatio-temporal pattern identification in urban microenvironments using moss bags and the Kohonen self-organizing maps, Atmos. Environ. 117 (2015) 180–186.
- [12] R. Olawoyin R, A. Nieto, R. L. Grayson, F. Hardisty, S. Oyewole, Application of artificial neural network (ANN)–self-organizing map (SOM) for the categorization of water, soil and sediment quality in petrochemical regions, Expert Systems with Applications, 40 (2013) 3634–3648.
- [13] T. Penczak T, A. Kruk, M. Grzybkowska, M. Dukowska, Patterning of impoundment impact on chironomid assemblages and their environment with use of the self-organizing map (SOM), Acta Oecologica, 30 (2006) 312–321.
- [14] L. Peeters L, F. Baçao, V. Lobo, A. Dassargues, Exploratory data analysis and clustering of multivariate spatial hydrogeological data by means of GEO3DSOM, a variant of Kohonen's Self-Organizing Map, Hydrol. Earth Syst. Sci 2(2007) 1309–1321.
- [15] A. M. Idris AM, Combining multivariate analysis and geochemical approaches for assessing heavy metal level in sediments from Sudanese harbors along the Red Sea coast, Microchem. J. 90 (2008) 159–163.
- [16] E. Oja and S. Kaski, Kohonen Maps. Neural Networks Research centre, Helsinki University of technology Finland, Elsevier 1999.
- [17] J. Vesanto J, SOM-based data visualization methods, IEEE Trans. Neural Networks, 11 (200) 586–600.

Salinity study under a wheat crop at the irrigated perimeter of Lakhmess

Amor Boughdiri¹, Gouider Tibaoui², Hajer Jejjli³, Ahmed Saidi⁴, Oumeima Ben Romdhan⁵

^{1,2,3,5}Ecole Supérieure d'Agriculture de Mateur Route de Tabarka, Mateur

⁴ Institut National de la Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts Rue Hédi Karray

amor.boughdiri@yahoo.fr

tibaoui.gouider@iresa.agrinet.tn

hajer.jeljli@gmail.com

Saidiahmed44@gmail.com

Oumeimabenromdhane@gmail.com

Résumé

Cette étude vise à déterminer et évaluer la salinité sous une culture du blé dur « Karim », cultivée dans deux parcelles : une publique et une autre privée. Le périmètre irrigué de Lakhmess est situé dans la région de Siliana, couvre une superficie de 1275 ha, totalement équipé par un réseau d'irrigation. Deux parcelles d'étude ont été choisies: Une parcelle publique et une parcelle privée à la propriété d'un agriculteur de la région. Elles possèdent chacune une superficie de deux hectares, de longueur 200 m et de largeur 100 m. La variété du blé dur utilisée est « Karim ». Le système d'irrigation pratiqué est l'aspersion classique d'écartement 12x12m. Le suivi des teneurs en eau et de la salinité a été effectué dans les deux parcelles. Les résultats montrent que la conductivité électrique mesurée a varié de 0,7 à 0,9 dS/m. Le stock moyen du sel a été estimé de 4 t ha⁻¹ dans les deux parcelles. Les faibles rendements ne sont pas dus à la salinité mais à une gestion inefficace de l'eau à l'échelle de la parcelle.

Mots clés : conductivité électrique, stock du sel, teneur en eau du sol.

Abstract

This study aims to determine and evaluate the salinity under a culture of durum wheat "Karim" cultivated in two parcels, a public and a private one. The irrigated perimeter of Lakhmess is located in the region of Siliana, covers an area of 1275 ha, totally equipped by an irrigation network. Two study plots were chosen, one public and one private owned by a farmer in the area. They occupy an area of two hectares, each 200 m long and 100 m wide. The durum wheat variety "Karim" was used. The irrigation system practiced is the classic sprinkler spreading 12x12m. Monitoring of water content and salinity was done in both farms. Results show that the measured electrical conductivity varies from 0.7 to 0.9 dS/m. The average stock of salt was 4 t ha⁻¹ in both farms. Low yields are not due to salinity but to inefficient water management at the plot scale.

Keywords: electrical conductivity, salt stock, soil water content.

I. INTRODUCTION

In Tunisia, the agricultural sector occupies an important place in the country's economy, contributing 11% of GDP and providing employment for 22% of the active population. The irrigated sector occupies 8% of the agricultural area and contributes about 35% of the value of agricultural production. Nevertheless, Tunisia is a country with limited water resources. The water share of a Tunisian does not exceed 500 m³ per year. It is lower than the FAO standard of 1000 m³ per inhabitant per year. In addition, these water resources have a salinity rate greater than 3 g/l. Salty soils occupy 1.5 million hectares, or 25% of the total area of cultivable soils [1, 2]. The irrigated perimeters are most often located in the alluvial plains on either side of the rivers (high and low valleys of the Medjerda and in the coastal plains and oases).

As the water table rises and approaches the soil surface, the initially dissolved salts precipitate at the root zone under the effect of evapotranspiration, resulting in an increase in the saline concentration in soils. In addition, if the water table is overexploited near the sea, and its level drops below sea level, it rises in order to balance the static level and leads to an increase in salt concentration in the water table [3].

Most of the research carried out in the irrigated perimeters [4, 5, 6, 7] show an annual trend towards desalinization of soils following the leaching of salts by rain and a significant evacuation of salts thanks to the drainage network during the rainy season. The effect of salinity on the plant may vary depending on the stage of development. The response of crops may be different during germination than during later stages [8].

The roots are generally less inhibited than the aerial part, although they are the organs of the plant that are in contact with the excess salts [9, 10].

2. MATERIAL AND METHODS

The experiment was carried out in the exploitation of the professional training center in Agricultural Machinery of Elgantra Siliana (North West of Tunisia) located at 400 m of altitude. The soil is deep with loam-clay texture. Given the humidity at the volume field capacity (Hc_{fv}); and moisture at the point of volume wilting (H_{pvf}); the useful reserve is of the order of 130 mm / m. the measured parameters are summarized in Table 1

Table 1 : Measured Parameters

Horizon (cm)	0- 20	20- 40	40- 60	60- 100
Clay (%)	60	65	60	40
Limon (%)	30	30	25	30
Sand (%)	10	5	15	30
Da	1.3	1.45	1.5	-
Hcc (%)	24.5	24	22.5	25
H _{pvf} (%)	15	14	14	15
PH				7.42
Hydraulic conductivity (mm/h)				14
Electrical conductivity (dS/m)				0.75
Piezometric level of the water table (m)				17

2.1. Climatic conditions

The study area is characterized by a Mediterranean-type climate, arid to semi-arid, mild winter and generally rainy and dry and usually warm with autumn and generally mild spring. The average rainfall of the region is 380 mm for a period of 24 years (1974 to 1997), it was 666 mm during the year 2008/2009 (Table 2). Rainfall totals recorded for 2008/2009 were 414 mm between December and May. It is characterized by its monthly and ten-day variation. During the second decade of January, the highest rainfall recorded was 133 mm (Table 3). During the vegetative cycle of wheat, the average temperature during the year 2008/2009 was maximal during the month of May, with 27 °C, while it was minimal during the month of January, with 4 °C. The potential evapotranspiration of the study area was determined by the CROPWAT model, it was 1560 mm during the year 2008/2009 in the region.

Table 2: Climatic Parameters in the Siliana Region for the year 2008/2009

Month	sep	oct	nov	déc	jan	feb	mar	april	may	june	july	august
Average rainfall	43	39	41	32	35	39	46	39	35	11	6	14
Rainfall (2008/2	72	56	4	14	177	30	27	129	37	0	47	73
T max (°C)	31	25	20	15	14	14	18	19	27	33	38	36
T min (°C)	17	14	7	5	5	4	5	8	12	15	19	20
T moy (°C)	24	19	14	10	10	9	11	13	19	24	29	28
Evapo-transpira	177	99	107	64	52	69	86	57	144	240	251	214

2.2. Presentation of the study area

The studied perimeter belongs to the south-eastern part of the Siliana Plain, located 10 kilometers from the town of Siliana on the road 73 joining Siliana and Ouesletia (Figure 1). The longitude and latitude of the perimeter are shown below:

- Longitude East 7G81 'and 7G89'
 - Latitude North 39G97 'and 40G69



Fig. 1: Geographical location of the irrigated public perimeter of Lakhmess

2.3.Measured parameters

2.3.1. Water content

The monitoring of soil moisture content was done by the gravimetric method, which consists of taking soil samples using an auger at a depth of 1 m and every 10 cm. The weight humidity "Hm" is then calculated by the relationship:

$$H_m = 100 \times \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (1)$$

Hm: Weight humidity in%, Mh: Weight of the wet sample in g, Ms: Weight of the dry sample in g

2.3.2. Electrical conductivity

Electrical conductivity measurements were made in the public and private sector. It is evaluated by the saturated paste extract method which was established by researchers of the U.S. Salinity Laboratory at Riverside (USSL, 1954).

2.3.3. Salt stock

The salt stock (S) in the soil was determined by the CRUSEUI formula

$$S = 0.7 \times (CE_e) \times D_a \times PS \times Z \times 10^4 \quad (2)$$

With, CE_e: electrical conductivity of saturated paste, D_a: apparent density of soil, PS: saturation percentage, Z: depth of rooting

2.4. Protocole experimental

Two study plots, one belonging to the property of a public farm and the other belonging to a private farm, each covering an area of 2 ha. The variety of durum wheat used is Karim. The water sources are from a 10 l / s borehole and an irrigation stand that irrigate the public plot and the private plot respectively. The irrigation terminal has an average flow rate of 4 l / s fed from the Lakhmess dam of salinity 1 g / L. The irrigation system practiced is the conventional sprinkling of 12x12 m spacing. Both farms are operated under a supplemental irrigation.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1.Measurement of water content

The soil moisture content was monitored in the public plot from 21/02/2009 until 18/5/2009 and in a private parcel of land belonging to a farmer from the date from 10/4/2009 to the date of 25/5/2009. This monitoring period was chosen because it is a critical phase for wheat crops. In the case of a private parcel, the moisture content was always higher than the humidity at the permanent wilting point (Fig. 2), unlike the public plot where a moisture content of less than the moisture at the point of permanent wilting on the dates of 7/5/2009 and 18/5/2009.

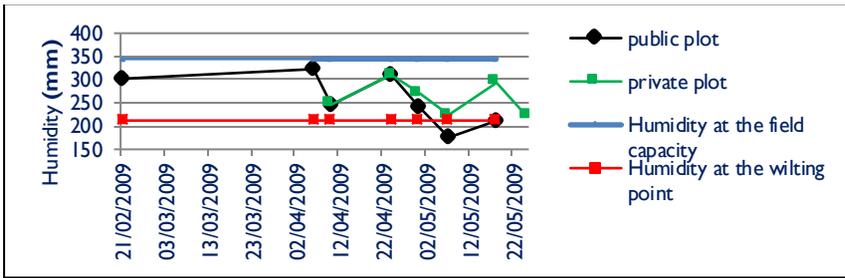


Fig. 2: Humidities measured in the public parcel and the private parcel

3.2. Electrical conductivity of the soil

In the public plot the electrical conductivity varies from 772 to 1043 $\mu\text{s/cm}$ (Fig. 3), in the private plot, it varies from 639 to 702 $\mu\text{s/cm}$ (Fig.4). This slight difference is explained by the use of water sources with different salt concentrations.

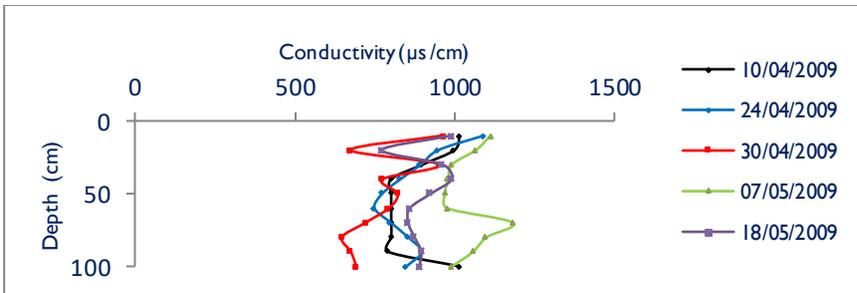


Fig.3: Evolution of electrical conductivities measured in the public parcel

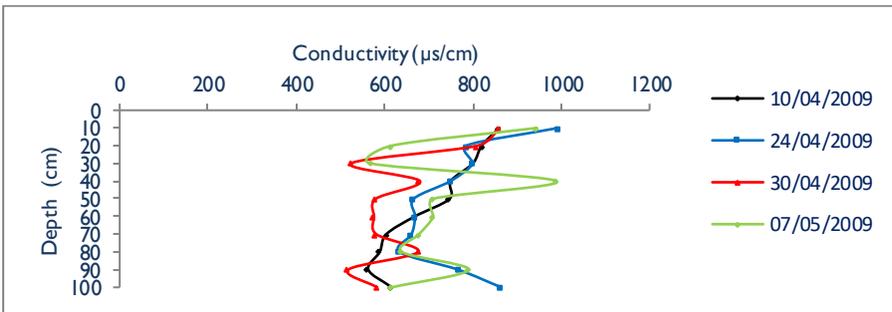


Fig. 4: Evolution of electrical conductivities measured in the private parcel

3.3. Determination of the salt stock in the layer 0-100 cm

3.3.1. Case of public exploitation

The total amount of salt measured throughout the 0-100 cm layer increased from 3.72 to 5.25 t / ha (Fig.5). This increase can be explained by the contribution of irrigation. The decrease in the amount of salt during the period extending from 7/05 to 18/05/2009 is mainly due to the leaching of salts by a 35 mm rain slide observed during this period.

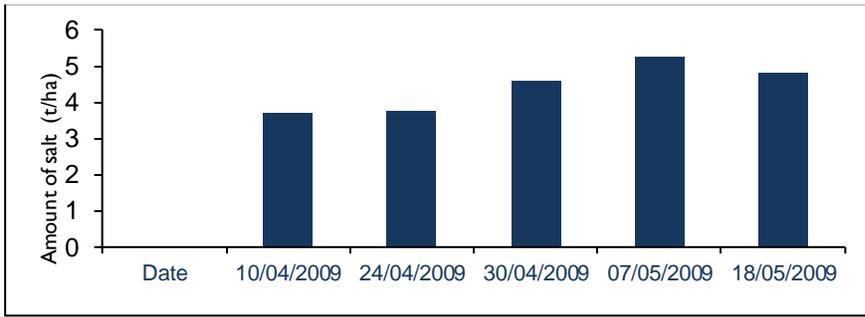


Fig. 5: Amount of salt in 1 m depth in the public plot

3.3.2 Case of the private plot

The salt stock at the start of our measurement campaign was 3.38 t / ha in the private plot, and 3.72 t / ha in the public plot. This slight difference is explained by the use of different sources of water of different salt concentration. The amount of total salt accumulated in the private plot has increased from 3.38 to 4.32 t / ha (Fig. 6). The increase in salt concentration and the observed stock is explained by the phenomenon of soil evaporation and the application of a 50 mm irrigation blade on 1/5/2009.

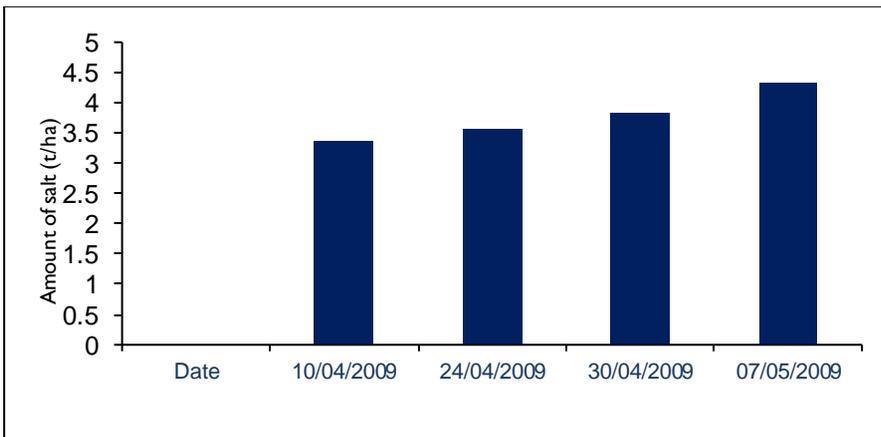


Fig. 6: Amount of salt in 1 m depth in the private plot

4. CONCLUSION

The monitoring of the water content showed that the initial and final stock of water in the depth of 1 m was respectively 301 and 212 mm in the public plot. In the private plot, they were respectively 250 mm and 222 mm. In the case of the private parcel, the water content was always higher than the humidity at the permanent wilting point, unlike the public parcel where water content below moisture at the wilting point was recorded. The cumulative change in the water stock was generally negative. This explains the decrease in water stock in the depth of 1 m of 89 mm, which is caused mainly by the consumption of water by the crop. The salinity monitoring results in the soil profile show that in the public parcel the average salinity increased from 0.86 dS / m to 0.90 dS / m, the measured salt stock was 3.72 and 4.81 t / ha, respectively. While in the private plot the average salinity was almost constant (about 0.7 dS / m), the salt stock fluctuates between 3.38 and 4.32 t / ha respectively. Market gardening and tree crops are generally the most sensitive to the concentration of salts in the root zone, while cereals and fodder support a higher concentration without significant loss of yield. Wheat cultivation tolerates a salinity of 6 dS / m. It follows that in the irrigated area of Lakhmess the problem of salinity does not arise and the low yield of wheat is not due to the salinity of the soil, but rather to an inefficient management of the water at the plot scale.

Bibliographical References

- [1] Hamrouni H., Daghari H. et M'timet A. (2007). Les sols en Tunisie: Problématique et solution. Status of Mediterranean soil resources: Actions needed to support their sustainable use, Tunis, Tunisia 26-31 May 2007. Conference Proceedings. Editors Pandu Zdruli and Guiliana Trisorio Liuzzi.
- [2] Lahlou O. (2005). Gestion des ressources en eau et effet du régime hydrique sur l'agro-physiologie du blé et de la pomme de terre. Thèse de Doctorat en Science agronomiques. IAV. Hassan II. Rabat.
- [3] Hachicha M. (1990). L'efficacité des pluies torrentielles dans le lessivage des sels. Séminaire ATRID-AGT « Erosion.Sol.Eau » INAT, 14/11/1990, 15 pages.
- [4] Ibrahimi K. (2003). Indicateurs de la qualité des terres: Contribution à l'élaboration des indicateurs et mise au point d'un système fonctionnel de suivi de la salinité des terres irriguées de la vallée de Medjerda. Mémoire de Mastère de l'INAT.
- [5] Slama F., Bahri A., Bouarfa S., Chaumont C., Bouhlila R. (2004). Pratiques d'irrigation et rôle du drainage pour le contrôle de la salinité: Cas du périmètre irrigué de Kalâat El Andalous en Tunisie. Projet INCO-WADEMED Actes du séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée Rabat, du 19 au 23 Avril 2004.
- [6] Saidi A. (2014). Gestion de l'irrigation aux eaux saumâtres dans un objectif de maîtrise de la salinité du sol : Cas du périmètre irrigué de Kallâat Landalous. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques INAT. 181p.
- [7] Van Hoorn J.W. (1991). Gestion pour la maîtrise de la salinité dans la zone racinaire. Istituto Agronomico Mediterraneo- Bari (Italie), pp.1-15.
- [8] Bernstein L. and Hayward H.E. (1958). Physiology of salt tolerance. Ann. Rev. Plant Physiol., 9: 25-46.
- [9] Stroganov T., B.P. (1962). Physiological basis of salt tolerance of plants. Jerusalem: Trs. Program for sci. Transl. 279.

Evaluation des écosystèmes d'eau douce de Tunisie

Noura Slimani¹, Eric Guilbert², Moncef Boumaïza¹

¹ Laboratoire Bio-surveillance de l'Environnement, Faculté des Sciences de Bizerte, Tunisie, 72590717, 72590566, noura.slimani@laposte.net, boumaizamoncef@yahoo.fr

² UMR7205, MNHN/CNRS/UPMC/EPHE, CP 50, 57 rue Cuvier, 75005 Paris, France, +33 14079 34 11, eric.guilbert@mnhn.fr

Résumé

Partout dans le monde, les habitats d'eau douce sont soumis à des niveaux accrus de perturbation humaine. À ce stade, il est impératif d'identifier, de surveiller et de conserver les zones importantes de la biodiversité, en particulier des écosystèmes d'eau douce. La présente étude concerne la diversité des communautés d'hétéroptères aquatiques dans 45 cours d'eau du nord de la Tunisie. La richesse spécifique la plus élevée a été observée dans deux stations appartenant au bassin versant du nord-ouest : Ziatine (ST21) et Ennour (ST13) avec respectivement 21 et 17 espèces. Compte tenu du déséquilibre quasi général dans la structure des communautés de punaises aquatiques ($J' < 0,5$), la richesse spécifique était liée à la taille de l'échantillon (effort d'échantillonnage, type d'habitat ou sa complexité) et aux variations saisonnières incluant les principaux paramètres climatiques et hydrologiques. Ainsi, les oueds représentent des habitats les plus touchés d'espèces menacées d'extinction, du fait du changement climatique.

Nous pensons que l'utilisation de ces indices permet non seulement des comparaisons spatiales de «statuts écologiques», mais aussi et surtout de suivre l'évolution de situations de peuplements avant et après un stress.

Mots clés : Écosystèmes aquatiques, Hétéroptères aquatiques, Indicateurs de biodiversité, nord de la Tunisie.

Evaluation of freshwater ecosystems of Tunisia

Abstract

Around the world, freshwater habitats are subject to increased levels of human disturbance. At this stage, it is imperative to identify, monitor and conserve important areas of biodiversity, particularly freshwater ecosystems. This paper concerns diversity of water bugs communities in 45 rivers in northern Tunisia. The highest species richness was observed at two sites in north western watershed: Ziatine (ST21) and Ennour (ST13) with 21 and 17 species, respectively. Due to almost universal imbalance in structure of aquatic bug communities ($J' < 0, 5$), species richness was related to sample size (sampling effort, habitat type or complexity) and seasons variations including main climatic and hydrological parameters. Thus, rivers represent the most affected habitats of species threatened with extinction, because of climate change. We believe that use of these indices allows not only spatial comparisons of "ecological status", but also and above all to follow evolution of settlements situations before and after stress.

Key Words: Aquatic ecosystems, Water bugs, Biodiversity indicators, northern of Tunisia.

I. INTRODUCTION

Les insectes représentent l'élément prédominant de la biodiversité dans la plupart des écosystèmes aquatiques continentaux [1]. Hélas, ils n'ont suscité, jusqu'à présent, que peu d'intérêt par rapport à d'autres taxons plus populaires, principalement les vertébrés. Toutefois, les nouveaux intérêts suscités par les arthropodes, et rappelés par d'importantes organisations de conservation comme l'UICN, doivent être reconnus [2].

On connaît environ 42.347 espèces d'hétéroptères dans le monde, particulièrement dans les régions chaudes, dont 5000 sont aquatiques [3]. Les hétéroptères aquatiques constituent un groupe taxinomique hétérogène de punaises qui ont en commun la même propension à vivre dans, sur, ou à proximité immédiate de l'eau, aussi bien dans les faciès lenticules que lotiques. C'est bien entendu l'eau douce qui renferme le plus d'espèces.

Ce travail se veut une mise au point des connaissances de la faune d'invertébrés des écosystèmes aquatiques continentaux du nord de la Tunisie. Il vise à la connaissance de la biodiversité des divers groupes systématiques pris en compte. Il constituera une contribution à la limnologie des eaux continentales de la Tunisie dont les caractéristiques dominantes sont l'hétérogénéité des bassins versants, la diversité et l'irrégularité des alimentations et des débits.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Etude de la faune

Les hétéroptères aquatiques sont récoltés, par un filet troubleau (vide de maille de 0,3 mm), en effectuant un échantillonnage mensuel sur les 45 stations durant l'année 2013. Au laboratoire, les échantillons ramassés sont triés sous une loupe binoculaire et conservés dans de l'alcool à 70°. L'identification des espèces s'est effectuée sur la base des caractères spécifiques décrits dans les travaux de taxonomie, dont les plus importants sont [4] et [5].

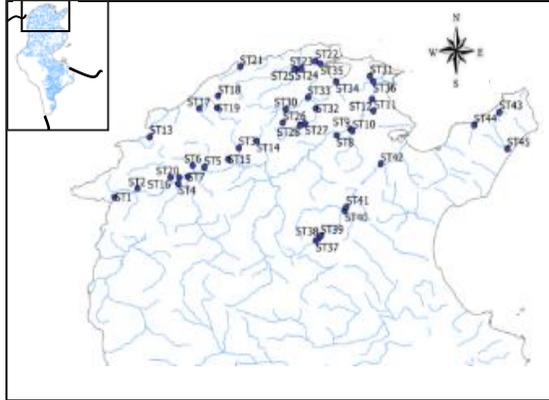


Figure 1. Carte illustrant l'emplacement des sites prospectés appartenant aux principaux réseaux hydrographiques de la Tunisie septentrionale.

2. 2 Traitement des données

2. 2. 1 Diversité des peuplements

La diversité des peuplements concerne l'étude de la richesse spécifique et de la diversité à l'aide des indices de Shannon-Weaver et d'équitabilité. L'analyse de la variation spatiale de ces indices est effectuée sur la base des moyennes dans les 45 stations prospectées. Le calcul avec R s'appuie essentiellement sur le logiciel ve-gan [6].

2. 2. 2 Richesse spécifique

La richesse spécifique (RS) est le nombre brut des espèces dans un relevé ou dans un milieu [7].

2. 2. 3 Indice de diversité de Shannon-Wiener H'

L'indice de diversité de Shannon-Wiener H' [8] est utilisé en écologie comme mesure de la diversité taxonomique [9]: $H' = -\sum (P_i \log_2 P_i)$, avec P_i : abondance relative des taxons. La valeur de H' varie entre 0, dans le cas où le peuplement n'est constitué que d'une seule espèce et $\log_2 S$ dans le cas où toutes les espèces ont une abondance équivalente.

2. 2. 4 Equitabilité

L'indice d'équitabilité [10] permet de mesurer l'équi-répartition des espèces du peuplement par rapport à une répartition théorique [11]: $J' = H' / \log_2 S$. La valeur de J' varie entre 0 (une seule espèce domine) et 1 (toutes les espèces ont la même abondance).

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le calcul des indices de diversité de Shannon et de régularité (équitabilité) permet d'évaluer la diversité spécifique et l'état d'équilibre numérique des peuplements. Deux stations : Ziatine (ST21) et Ennour (ST13) appartenant au bassin versant du nord-ouest présentent la richesse spécifique la plus élevée avec respectivement 21 et 17 espèces (figure 2).

L'indice de diversité de Shannon-Wiener (H'), très faible au niveau de la plupart des stations ($H' < 1,5$ bits), indique un déséquilibre dans la structure des communautés de punaises aquatiques ($J' < 0,5$) (Figure 3). Ce résultat s'explique par la structure du peuplement de ces hétéroptères aquatiques dans les stations 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 16, 17, 19, 20, 23, 25, 28, 29, 30, 34, 38, 39, 40, 41, 42, 43 et 44, marquée, sur le plan quantitatif, par la forte dominance d'un nombre restreint d'espèces, soit respectivement par ordre décroissant : *Aquarius cinereus* pour les stations 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 17, 19, 20, 23, 28, 30, 39, 40 et 44 ; *Micronecta scholtzi* pour les stations 25, 29, 34, 38 et 42 ; *Nepa cinerea* pour la station 16 et *Sigara scripta* pour la station 41.

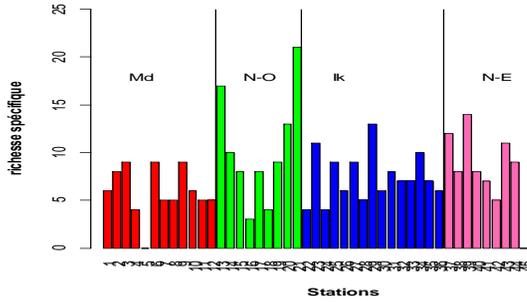


Figure 2. Variation spatiale de la richesse spécifique des hétéroptères aquatiques dans les cours d'eau septentrionaux de Tunisie (janvier-décembre 2013). Md : Medjerda, N-O : nord-ouest, Ik : Ichkeul, N-E : nord-est.

Ces espèces, couvrant plusieurs habitats hétérogènes tant par leurs caractéristiques abiotiques que par leur localisation, peuvent être considérées comme étant les plus euryèces et qualifiées de bonnes colonisatrices. Au niveau des stations 13, 27 et 37, l'indice de diversité de Shannon - Wiener (H') est significativement plus élevé ($H' > 1,9$ bits) que dans les autres biotopes soulignant un équilibre de la communauté de punaises aquatiques ($J' > 0,55$).

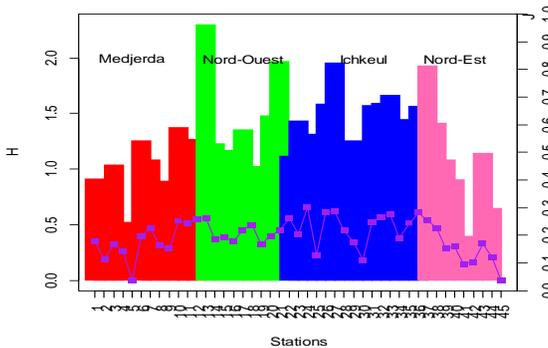


Figure 3. Variation spatiale des indices moyens de Shannon (H') et de l'équitabilité (J') dans les cours d'eau septentrionaux de Tunisie (janvier-décembre 2013).

Selon plusieurs auteurs [12], ces indices sont susceptibles d'être fortement influencés par différentes dimensions de l'échantillon (effort d'échantillonnage, type d'habitat ou sa complexité). Les variations de ces indices biotiques peuvent aussi être fortement affectées par les variations saisonnières touchant les principaux paramètres climatiques et hydrologiques [13]. C'est le cas, par exemple, de certains sites influencés par la proximité de la mer (Hima aval), qui au cours des saisons estivale et automnale et en l'absence d'apports d'eau douce, se chargent en sels suite à l'infiltration des eaux marines qui s'accroît avec l'étendue de la période de sécheresse.

Selon [14], l'utilisation des indicateurs écologiques (biologiques) est considérée comme un appoint important aux qualifications chimiques, biogéochimiques, toxicologiques, physiques et hydrologiques. L'indice de diversité H' est considéré comme étant un paramètre utilisable pour l'évaluation du progrès vers plus d'état de maturité des habitats soumis à une activité de restauration [15], en particulier les sites affectés par l'installation des barrages sur certains cours d'eau (Barrages Sidi Salem, El Aroussia, Mellègue, Bouhermta, Kasseb, Joumine, Sejenane, Miliane et Lebna).

L'intérêt pour l'utilisation des indices de diversité s'est accru depuis les années 2000. Divers indices biotiques pour la caractérisation de la qualité du milieu ont été proposés. C'est pourquoi l'utilisation de ces indices est aujourd'hui considérée comme une partie intégrante du support à la prise de décision dans le cadre de la gestion intégrée des écosystèmes dulcicoles de la Tunisie septentrionale [16].

Ces indices sont mis au point pour évaluer la réponse des peuplements benthiques aux changements naturels et ceux induits par les activités humaines, aussi bien dans la masse d'eau que dans le sédiment [17]. Selon [18], la plupart des indices

traditionnels de la biodiversité se basant sur la richesse spécifique sont fortement affectés par la variabilité des conditions environnementales, sachant que la distinction entre les changements naturels et ceux dus à des activités humaines est très difficile. Corrélativement, des données faunistiques peuvent fournir des indications sur les caractéristiques mésologiques et fonctionnelles du lieu de prélèvement [19].

Bien que l'interaction entre les communautés benthiques soit régie par les variables physico-chimiques [20], l'évolution spatiale de la richesse spécifique ne reflète pas toujours celle des caractéristiques physico-chimiques ou de la pollution du milieu, excepté dans les milieux extrêmes (oligotrophes, polyhalins ou très pollués) où le nombre d'espèces diminue très fortement [21].

CONCLUSION

Dans les aires méditerranéennes, en particulier semi-arides comme la Tunisie, ce sont les écosystèmes aquatiques d'eau douce qui semblent contenir la proportion la plus élevée d'espèces menacées d'extinction, du fait du changement climatique. Selon [22], ces biotopes, à richesse et endémisme importants, sont vulnérables suite au développement des périmètres d'irrigation.

L'indice de Shannon-Wiener exprime la structure de la communauté en corrélant d'une part avec l'état des cours d'eau et d'autre part en rapportant les valeurs les plus élevées à une meilleure qualité de l'eau et aux conditions environnementales les plus stables. [23] recommandent l'utilisation de ces indices non seulement pour des comparaisons spatiales de « statuts écologiques » mais aussi et surtout pour suivre l'évolution de situations de peuplements avant et après un stress.

D'après [24], les valeurs de l'indice de Shannon sont nulles lorsque l'échantillon ne contient qu'une seule espèce. Les valeurs les plus élevées de H' correspondent à un prélèvement équilibré et diversifié. [25] situent les valeurs obtenues pour cet indice dans un milieu normal au-dessus de 3, entre 1 et 3 dans un milieu déséquilibré (cas de la quasi-totalité des stations prospectées dans le présent travail) et tendant vers le 1 dans le cas d'un milieu pollué : exemples : stations ST5 (oued Kasseb) et ST45 (oued Lebna) polluées par les rejets industriels et urbains.

Références

- [1] D. Dudgeon, A.H. Arthington, M.O. Gessner, Z.I. Kawabata, D.J. Knowler, C. Lévêque, R.J. Naiman, A.-H. Prieur-Richard, D. Soto, M.L.J. Stiassny, C.A.Sullivan, Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological reviews*, 81 (2006), 163-182.
- [2] W. Darwall, S. Carrizo, C. Numa, V. Barrios, J. Freyhof, K. Smith, Freshwater Key Biodiversity Areas in the Mediterranean Basin Hotspot: Informing species conservation and development planning in freshwater ecosystems, IUCN, Cambridge, 2014, pp.100.
- [3] T.J. Henry, Biodiversity of Heteroptera. Chapter 10. In: Footitt, R. & Adler, P. (Eds.), *Insect Biodiversity: Science and Society*. Wiley-Blackwell, Oxford, U.K. 2009, pp. 223-263.
- [4] R.Poisson, Hétéroptères aquatiques. Faune de France, 1957, pp. 263.
- [5] L. Tamanini, *Guide per il riconoscimento delle specie animali delle acque interne italiane. 6. Eterotteri acquatici (Heteroptera: Gerromorpha, Nepomorpha)*. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Verona. 1979, pp. 106.
- [6] J. Oksanen, F.G. Blanchet, R. Kindt, P. Legendre, P.R. Minchin, R.B. O'Hara, G.L. Simpson, P. Solymos, M.H.H. Stevens, H. Wagner, *Vegan: community ecology package*. R package version 2.0-8. The R Project for Statistical Computing, (2013) Vienna, Austria. [online] URL: <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- [7] R.Rieux, Etude de la biodiversité dans les écosystèmes. INRA, Avignon, 2000, pp. 13.
- [8] C.E. Shannon, A mathematical theory for communication. *Bell System Technical Journal*, 27 (1948) 379-423 and 623-656.
- [9] S. Frontier, L'échantillonnage de la diversité spécifique, In: *Stratégies d'échantillonnage en écologie*, Paris : Masson-Presses de l'université Laval 1983, pp 416-436.
- [10] E.C. Pielou, The measurement of diversity in different types of biological collections, *Journal of Theoretical Biology*, 13 (1966) 131-144.
- [11] R. Barbault, *Ecologie des peuplements, Structure, dynamique et évolution*, Masson, Paris, 1992, pp. 278.
- [12] P. Abellán, D.T. Biton, A. Millán, D. Sánchez-Fernández, P.M. Ramsay, Can taxonomic distinctness assess anthropogenic impacts in inland waters? A case study from a Mediterranean river basin, *Freshwater Biology*, 51 (2006) 1744-1756.
- [13] P. Chainho, J.L. Costa, M.L. Chaves, D.M. Dauer, M.J. Costa, Influence of seasonal variability in benthic invertebrate community structure on the use of biotic indices to assess the ecological status of a Portuguese estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 54 (2007) 1586-1597.
- [14] P. Magni, G. Hyland, H. Manzella, P. Rumohr, A. Viaroli, A. Zenetos, *Proceeding of the Workshop "Indicators of Stress in the Marine Benthos"*, Torregrande-Oristano (Italy), (2005) 8-9 Oct 2004.
- [15] L.F. Valladares, J. Garrido, B. Herrero, The annual cycle of the community of aquatic Coleopteran (Adephaga and Polyphaga) in a rehabilitated wetland pond: Le laguna de la Nava (Palencia, Spain), *Annales de Limnologie*, 30 (1994) 209-220.
- [16] N. Slimani, *Caractéristiques écologiques de l'habitat des Hétéroptères aquatiques du nord tunisien*, Thèse Doctorat en Sciences Biologiques. Faculté des Sciences de Bizerte, 2015, pp. 287.

- [17]A. Borja, I. Muxika, Guidelines for the use of AMBI (AZTI's Marine Biotic Index) in the assessment of the benthic ecological quality, *Marine Pollution Bulletin*, 50 (2005) 787-789.
- [18]D.R.P. Leonardo, K.R. Clarke, P.J. Somerfield, R.M. Warwick, The application of an indicator based on taxonomic distinctness for UK marine biodiversity assessments, *Journal of Environmental Management*, 78 (2006) 52-62.
- [19]P. Usseglio-Polatera, Caractéristiques biologiques, stratégies géologiques et évolution environnementale d'un hydrosystème: l'exemple des Trichoptères du Rhône à Lyon (France), *Geobios*, 21 (1997) 151-158.
- [20]C. M. Tate, J.S. Heiny, The ordination of benthic invertebrate communities in the South Platte River Basin in relation to environmental factors, *Freshwater Biology*, 33 (1995) 439-454.
- [21]M. Boumaïza, Recherches sur les eaux courantes de Tunisie. Faunistique, Ecologie et Biogéographie, Thèse de doctorat d'Etat, Faculté des Sciences de Tunis, 1994.
- [22]P. Abellán, D. Sanchez-fernandez, J. Velasco, A. Millan, Conservation of freshwater biodiversity: a comparison of different area selection methods, *Biodiversity and Conservation*, 14 (2004) 1-18.
- [23]A. Borja, J. Franco, I. Muxika, The application of a marine biotic index to different sources affecting soft-bottom benthic communities along European coasts. *Marine Pollution Bulletin*, 46 (2003) 835-845.
- [24]I. Legendre, P. Legendre, *Numerical Ecology*. Second English Edition. *Developments in Environmental Modelling*, 20. Elsevier Scientific Publication, Amsterdam, 1998, pp. 853.
- [25]M. Glémarec, C. Hily, Perturbations apportées à la macrofaune benthique de la baie de Concarneau par les effluents urbains et portuaires, *Acta decal application*, 2 (1981) 132-150.

Vulnérabilité des populations face aux risques d'inondations dans les grandes villes d'Afrique de l'ouest : Cas de Cotonou au Bénin et d'Abidjan en Côte d'Ivoire.

Auteurs : Adjakpa Tchékpo Théodore¹ ; N'guessan BI Vami Hermann² ; Kadjegbin Toundé Gislain Roméo³

1. Centre Interfacultaire de Formation et de Recherche en Environnement pour le Développement Durable (CIFRED), Université d'Abomey-Calavi (UAC); Tél : (+ 229) 64 06 15 29 ; 03 BP 1463

Jéricho-Cotonou-Bénin; adjakpatheo@yahoo.fr ;

2. Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) ; Tél : (+225) 02 397753 ; Université Félix Houphouët Boigny ; Cocody, 22 BP : 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire ; vami@outlook.com ;

3. KADJEBIN T. Roméo. G3 ; Laboratoire d'Etudes des Dynamiques Urbaines et Régionales (LEDUR), Université d'Abomey-Calavi (UAC) ; 03 BP 1463 Jéricho-Cotonou-Bénin ; kadjegbinr@yahoo.com;

Résumé :

Depuis quelques décennies, les populations des villes ouest africaines sont confrontées aux problèmes d'inondation face auxquels elles sont très vulnérables. Les populations de la ville de Cotonou au Bénin et de celle d'Abidjan en Côte d'Ivoire n'en ne sont pas épargnées et subissent les impacts négatifs des fréquentes inondations. La présente étude a pour objectif d'analyser les facteurs de la recrudescence de ces inondations, d'évaluer les stratégies de gestion adoptées afin de proposer des mesures pour renforcer les capacités d'adaptation pouvant permettre aux populations des deux villes de faire face au phénomène. Elle a été réalisée par le biais d'une cartographie des zones d'inondation sur la base d'un système d'information géographique avec le logiciel Arc-GIS 10.3. La Méthode Accélérée de Recherche Participative (MARP) a permis de réaliser les enquêtes socioéconomiques. Les données qualitatives ont été analysées et celles quantitatives recueillies sur la période 1957-2017 ont été traitées au moyen du logiciel Excel. Les résultats ont permis de comprendre les facteurs des inondations, d'identifier et de cartographier les zones inondables et de définir les types d'aménagement pour chaque ville pour réduire la vulnérabilité des populations.

Mots clés : changements climatiques, vulnérabilité, facteurs, stratégies de gestion, inondations, Cotonou, Bénin, Abidjan, Côte d'Ivoire.

Vulnerability of populations to flood risk in West African cities: Cotonou case in Benin and Abidjan in Ivory Coast.

Abstracts :

In recent decades, the populations of West African cities are confronted with flooding problems in which they are very vulnerable. The populations of the city of Cotonou in Benin and that of Abidjan in Côte d'Ivoire are not spared and suffer the negative impacts of frequent floods. The present study aims to analyze the factors of the recrudescence of these floods, to evaluate the management strategies adopted in order to propose measures to reinforce the capacities of adaptation which can allow the populations of the two cities to face the phenomenon. It was carried out by mapping the flood zones on the basis of a geographical information system using the Arc-GIS 10.3 software. The Accelerated Participatory Research Method (MARP) was used to conduct socioeconomic surveys. The qualitative data were analyzed and the quantitative data collected over the period 1957-2017 were processed using the Excel software. Results helped to understand flood factors, identify and map flood zones and define types of development for each city to reduce population vulnerability.

Keywords : climate change, vulnerability, factors, management strategies, floods, Cotonou, Benin, Abidjan, Ivory Coast.

Introduction

Le nombre des inondations a augmenté au cours des deux dernières décennies dans le monde (Wang, 2009 ; Amankwah et Caputo, 2011). En Afrique de l'Ouest, elles sont de plus en plus intenses ces dernières années (Diarra, 2010). Les années 2007, 2008, 2009 et 2010 ont connu de très fortes pluviométries provoquant de graves inondations dans presque tous les pays (Boko et Afouda, 2013). Elles ont engendré d'énormes dégâts matériels et humains dans les Communes de Malanville et de Karimama au nord du Bénin au cours de la période allant de 2010 à 2013 (Ayéna, 2013 ; Adjakpa, 2016). Il faut noter que les Schémas Directeurs d'Aménagement des Communes de Malanville et de Karimama élaborés sous le Ministère de l'Intérieur, de la Sécurité Publique et des Collectivités Locales (MISPL) en 2006 ne sont pas respectés et cela constitue un facteur des inondations. Le Quatrième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH4) effectué par l'Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE) en 2013 a montré que les populations des deux

Communes ont augmenté alors que les infrastructures d'Aménagement n'ont pas suivi. Face aux inondations répétées dans ces deux Communes, le Programme des Nations Unies pour le Développement au Bénin (PNUD-BENIN a initié le Programme Intégré d'Adaptation aux changements climatiques par le développement de l'Agriculture, du transport fluvial du tourisme dans la vallée du Niger au Bénin (PIACC-DAT-Vallée du Niger au Bénin) en 2014 pour accompagner ces deux Communes au nord du Bénin dans leur lutte contre les risques d'inondation. Dans la ville de Cotonou au sud du Bénin et dans celle d'Abidjan au sud de la Côte d'Ivoire, les inondations se révèlent préoccupantes en raison de leurs fréquences et impacts. A Cotonou au cours des années 2016 et 2017 le bilan des inondations se chiffre en la destruction des habitations précaires et de plusieurs maladies hydriques dont fondamentalement le paludisme. En juin 2018, une vingtaine de morts, des dégâts matériels, des populations qui ont tout perdu à Abidjan. (AFP, 20 juin 2018). Plusieurs facteurs d'ordre naturels et anthropiques fondent la récurrence de ce phénomène. La présente étude vise l'identification de ces facteurs et l'évaluation des stratégies de gestion adoptées afin de proposer des mesures pour renforcer les capacités d'adaptation pouvant permettre aux populations des deux villes de faire face au phénomène.

I. Démarche méthodologique

I.1. Zone d'étude

La zone d'étude est constituée des villes d'Abidjan en Côte d'Ivoire et de Cotonou au Bénin représentée sur la carte de l'Afrique de l'ouest ci-dessous.

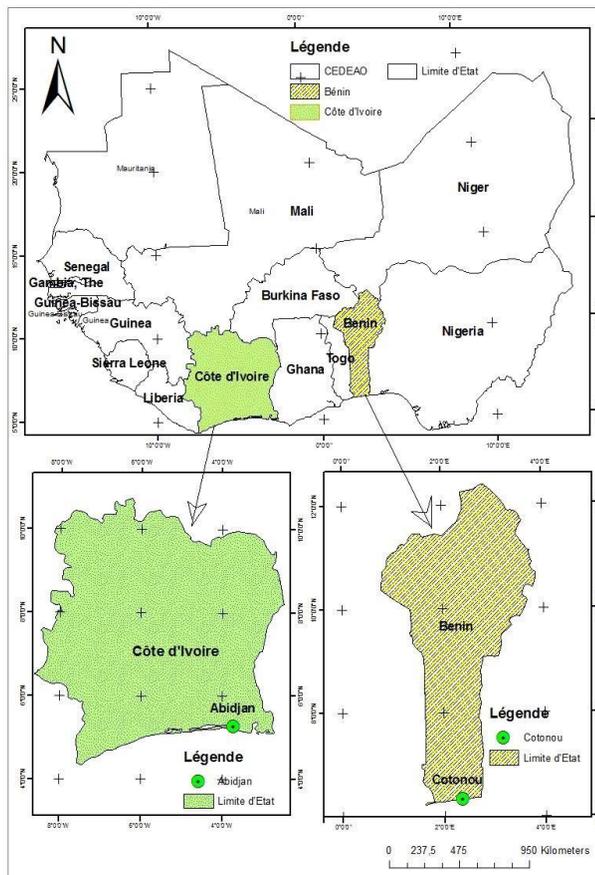


Figure 1 : Situation géographique du secteur d'étude

1.2. Données et approche méthodologique

Pour cette étude, basée essentiellement sur la Méthode Accélérée de Recherche Participative, les techniques de la revue de données secondaires, les entretiens semi-structurés, le focus group et l'observation directe ont été utilisés. Les données hydro-pluviométriques, topographiques, démographiques et les informations socio-anthropologiques ont été également collectées. Les données hydro-pluviométriques sont constituées de hauteurs des pluies. Elles proviennent respectivement du Service National de la Météorologie de l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar ; de la Direction Générale de l'eau du Bénin et de Côte d'Ivoire. Par ailleurs, les informations socio-anthropologiques proviennent des enquêtes de terrain. Les logiciels Excel et Arc-Gis 10.3 ont servi au traitement et à l'analyse de ces données.

2. Résultats et discussion

2.1. Résultats

Plusieurs facteurs naturels et anthropiques sont à l'origine des inondations dans la ville de Cotonou au Bénin et dans la ville d'Abidjan en Côte d'Ivoire, entre autres, il y a : la croissance démographique, l'urbanisation rapide et incontrôlée de zones à risque (habitat spontané), la pauvreté endémique, la faiblesse des dispositifs de préparation et de réponses aux catastrophes, l'insuffisance des informations climatiques, les faibles capacités des institutions. Les photos 1 et 2 présentent respectivement la vulnérabilité des populations face aux inondations à Abidjan et à Cotonou.



Photo1 : Vulnérabilité à Abidjan en 2018
Cliché : AFP 2018 et

Photo2 : Vulnérabilité à Cotonou en 2017
Cliché : T. T. Adjakpa, 2017

Ces photos montrent la vulnérabilité des populations à Abidjan et à Cotonou. Pour limiter la vulnérabilité des populations, il faudra éviter l'occupation anarchique des exutoires d'eau et pratiquer des politiques adéquates d'aménagement urbain.

2.2. Discussion

Les graves inondations répétées dans les villes de Cotonou au Bénin et d'Abidjan en Côte d'Ivoire qui ont rendu les populations vulnérables ont pour causes l'installation anarchiques des populations dans des zones d'écoulement d'eau et les mauvaises planifications dans les aménagements qui ne résistent pas à la montée des eaux. Ces résultats sont similaires à ceux de Blagoë (2014) qui a montré que parmi les causes des inondations dans le Grand Cotonou, il y a les apports fluviaux de l'Ouémé et de ses affluents depuis le Nord et le Centre du Bénin qui viennent provoquer la crue du lac Nokoué. Le lac déverse à son tour le trop plein des eaux sur les quartiers périphériques pour y provoquer les inondations. A ces causes, s'ajoutent des facteurs aggravants comme l'occupation anarchique de la plaine inondable. De pareils résultats ont été obtenus par Kane (2007) à Dakar affirmant que les inondations sont l'aboutissement de l'urbanisation accélérée, favorisée par une occupation anarchique des terrains disponibles sans respect des dispositions prévues par le plan directeur urbain. Egalement N'Bessa (2008) a montré que l'occupation anarchique des zones inondables est un facteur responsable des inondations à Cotonou (Bénin).

Conclusion

Les facteurs naturels et humains tels que la pluviométrie, la nature des terrains ; l'occupation anarchique des exutoires d'eau, l'urbanisation non maîtrisée dans les zones inondables, la misère et les mauvaises politiques d'aménagement sont les facteurs responsables des inondations qui rendent les populations des villes de Cotonou au Bénin et d'Abidjan en Côte d'Ivoire vulnérables. Les mesures d'adaptation et de gestion préconisées par les autorités à divers niveaux n'arrivent pas toujours à lutter véritablement contre les inondations. Des politiques d'aménagement adéquates et la non occupation des zones inondables sont des solutions efficaces pour réduire la vulnérabilité des populations de ces deux villes.

Bibliographie

- [1] T. T. Adjakpa, Gestion des risques hydro-pluviométriques dans la vallée du Niger au Bénin : cas des inondations des années 2010, 2012 et 2013 dans les communes de Malanville et de Karimama. Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, 2016.
- [2] Amankwa, A. et J. Caputo; A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century. Chapitre 2, Banque mondiale: Washington, (2011), 150-152
- [3] A. Ayéna, Gestion des risques hydrométéorologiques dans la Commune de Malanville, Mémoire de maîtrise, Université d'Abomey-Calavi, 2013.
- [5] D. Béhanzin, Risque d'inondation et sécurité humaine au Bénin : cas de la vallée du fleuve Niger au Bénin, Mémoire de master, Université de Lomé, 2014.
- [6] P. Blalogoé, Stratégies de lutte contre les inondations dans le Grand Cotonou : Diagnostic et alternative pour une gestion durable, Thèse de doctorat unique, Université d'Abomey-Calavi 2014.
- [7] M. Boko, et F. Afouda, Climat Agriculture et Ressources en eau d'hier à demain. XXVIème Colloque international Association Internationale de Climatologie, ISSN :
- [8] ISBN-10 : 99919-58-64-9, Cotonou, 557 (2013), 1840-5452.
- [9] L. Descroix, , P. Genthon, O. Amogu, J. L. Rajot, D. Sighomnou et M. Vauclin, Change In Sahelian Rivers Hydrograph: The Case Of recent red floods of the Niger River in the Niamey region. Global Planetary Change, N°98-99 (2012), 18-30.
- [10] D. Diarra, Impacts des changements climatiques en Afrique de l'Ouest. Direction Nationale de la Météorologie Bamako, Mali, 2010. En ligne
- [11] <http://www.wamis.org/agm/meetings/iwacc09/S3-Diarra.pdf> (Page consultée le 15 mai 2010)
- [12] N. Kane, Analyse de la gestion des inondations dans la région de Dakar. Mémoire de DEA en sciences économiques, Université Cheik Anta Diop, Sénégal 2007.
- [13] MISPCL; Schémas Directeurs d'Aménagement de la Commune de Malanville, SERHAU, 2006.
- [14] MISPCL, Schéma Directeur d'Aménagement de la Commune de Karimama. CARTOGEST 2006.
- [15] INSAE, Quatrième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH4). Résultats provisoires, Direction des Etudes Démographiques 2013.
- [16] B N'Bessa, Causes et Manifestations des inondations dans la ville de Cotonou :
- [17] Communications au cours du séminaire sur le programme '3CI' à Cotonou (2008)
- [18] PNUD-BENIN, Programme Intégré d'Adaptation aux changements climatiques par le développement de l'Agriculture, du transport fluvial, du tourisme dans la vallée du Niger au Bénin (PIACC-DAT-Vallée du Niger au Bénin) 2014.
- [19] R. Wang, (2009); Données GLIDE sur les catastrophes, citées dans Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century.
- [20] Chapitre I, Banque mondiale, Washington, (2012), 77-78

Évaluation des facteurs physiographiques et leurs impacts sur les ressources en eau dans les bassins versants d'Essaouira (Essaouira, Maroc)

Zakaria Ouzerbane¹, Mostafia Boughalem², Abdellah El Hmaidi¹, Ali Essahlaoui¹, Abdessamad Najine³, Tahar Aïfa⁴, Fadwa Redouani³, Abdelhadi El Ouali¹

¹Equipe Science de l'eau et ingénierie de l'environnement, Département de Géologie, Faculté des Science, Université Moulay Ismail, BP 11201, Zitoune, Meknes, Maroc, +212 665 473 528, ouzerbanegeophy@gmail.com, elhmaidi@yahoo.fr, essahlaoui@gmail.com

²Ctr Univ Ain Temouchent, Laboratory of Applied Hydrology and environment/DGRSDT, BP 284- 46000 Ain Temouchent, Algeria. Tel : +213 774 521 277, boughalem_2000@yahoo.fr

³Département des Sciences de la terre, Faculté des Sciences et Technique, Université Sultan Moulay Slimane, BP 523 Mghila, 23000 Beni Mellal, Maroc, +212 602 687 046, najine7@yahoo.fr, fadwaradouani@yahoo.fr

⁴Géosciences-Rennes, CNRS UMR6118, Université de Rennes 1, Bat.15, campus de Beaulieu, 35042 Rennes cedex, France, tahar.aifa@univ-rennes1.fr

Résumé

La zone côtière du synclinal d'Essaouira (zone d'étude) est une zone où les précipitations ne dépassent pas 317 mm/an durant la période étudiée (1990-2015), avec une valeur d'ETP très élevée peuvent atteindre 766 mm. Le climat est de type aride à semi-aride avec une période sèche importante de six à sept mois. Les ressources en eau dans la zone d'Essaouira ont connu à l'instar des autres régions du Maroc une baisse significative en qualité et quantité. L'application des Systèmes d'information géographique (SIG) a permis d'évaluer les facteurs physiques des bassins versants constituant la partie Ouest du bassin d'Essaouira (Zone côtière) où le bassin versant d'Ait Tahria présentant une forme allongée avec des pentes faibles et un relief assez fort, alors que les pentes sont relativement élevées avec un relief fort pour les bassins versants Qsob et Tidzi.

Mots clés : Bassin versant d'Essaouira, SIG, Plio-Quaternaire, Ressource en eau, Paramètre physiographique, Essaouira (Maroc).

Assessment of physiographic factors and their impacts on water resources in Essaouira watersheds (Essaouira, Morocco)

Abstract

The coastal zone of the Essaouira syncline (study area) is an area where rainfall does not exceed 317 mm / year during the studied period (1990-2015), with a very high ETP value can reach 766 mm. The climate is arid to semi-arid with a significant dry period of six to seven months. Water resources in the Essaouira zone have experienced, like the other regions of Morocco, a significant drop in quality and quantity. The application of Geographic Information Systems (GIS) made it possible to evaluate the physical factors of the watersheds constituting the western part of the Essaouira Basin (Coastal Zone) where the watershed of Ait Tahria has an elongated shape with low slopes and a fairly strong relief while the slopes are relatively high with a strong relief for Qsob and Tidzi watersheds.

Key Words: Watershed of Essaouira, GIS, Plio-Quaternary, Water Resource, Physiographic Parameter, Essaouira (Morocco).

1. INTRODUCTION

Au Maroc, la rareté des ressources en eau n'est pas un concept exceptionnel. Elle découle des particularités du contexte géographique et climatique de la région. Les processus environnementaux, économiques, sociaux et culturels ont exacerbé les problèmes de disponibilité de cette ressource en quantité et en qualité. Ceci accentuera la tension entre l'offre et la demande et laisse présager des situations extrêmes dans un horizon proche. De telles situations se reproduiront dans l'avenir et peut-être même plus fréquemment si on les rattache au phénomène de désertification qui affecte l'Ouest africain et à l'ampleur des changements climatiques à l'échelle planétaire [1].

Le secteur d'étude est représenté par la partie côtière du bassin d'Essaouira qui fait partie du littoral atlantique marocain. C'est un espace qui se voit conférer une lourde responsabilité dans le développement socio-économique du pays. Ce développement implique un accroissement significatif des besoins en eau dans les années à venir tant pour l'alimentation en eau potable que pour l'irrigation et l'industrie. Le bassin d'Essaouira a connu à l'instar des autres régions du Maroc une décroissance significative des apports d'eau en quantité et en qualité. Cette situation a entraîné la réduction de la productivité agricole et la dégradation de plusieurs écosystèmes. La présente étude vise à étudier les possibilités offertes par les SIG pour l'évaluation de la quantité et la qualité des potentialités hydriques de la zone côtière d'Essaouira et également la caractérisation topographique, morphologique, hydrographique et climatique de ces bassins versants.

Les caractéristiques physiques d'un bassin versant ont un impact sur sa réponse hydrologique, et précisément le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. La caractérisation topographique, morphologique, hydrographique et climatique des bassins versants de la zone d'étude (zone côtière d'Essaouira) a été effectuée en faisant appel aux Systèmes d'Information Géographiques (SIG).

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

a. Situation géographique et géologique

La zone d'étude dite synclinale d'Essaouira fait partie de la zone côtière du bassin avec une superficie de 1418 km² environ. Elle est limitée au Nord par Jebel Hadid, au Sud par oued Tidzi, à l'Est par les reliefs de Chiadma du Sud et Haha du Nord et par le diapir de Tidzi et à l'Ouest par l'Océan Atlantique (Fig. 1A). Géologiquement, les formations affleurant dans la zone d'étude sont généralement d'âge quaternaire et plio-quaternaire (Fig. 1B). En allant du Sud vers le Nord la série stratigraphique s'étend du Trias au Quaternaire [2].

b. Cadre climatique

L'étude des paramètres climatiques à savoir les précipitations, la température, l'humidité et l'évapotranspiration conditionnent l'expression du bilan hydrologique et la quantité échangée entre le système aquifère et son environnement. La pluviométrie est l'un des paramètres qui influence sur le climat et aussi sur le cycle hydrologique. L'analyse des données pluviométriques et des mesures relevées auprès de l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT) durant la période 1990-2015, dans les trois stations (Essaouira, Adamna et Igrouzgar) situées dans la zone d'étude permet de caractériser le climat de la région (Fig. 2). Elle montre une irrégularité des valeurs mesurées dans le temps, les précipitations dans la région étudiée sont généralement faibles et très variables d'une année à l'autre [3].

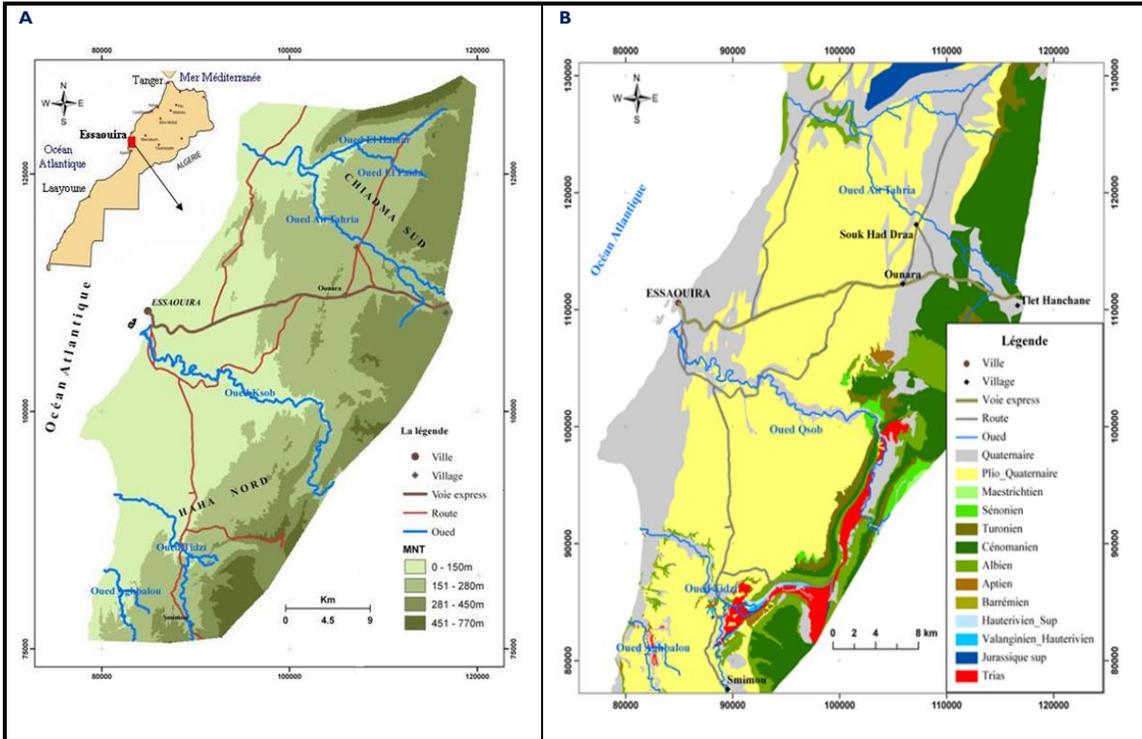


Fig. 1 - Contexte géographique et géologique de la zone côtière d'Essaouira. (A : Carte de localisation, B : Esquisse géologique).

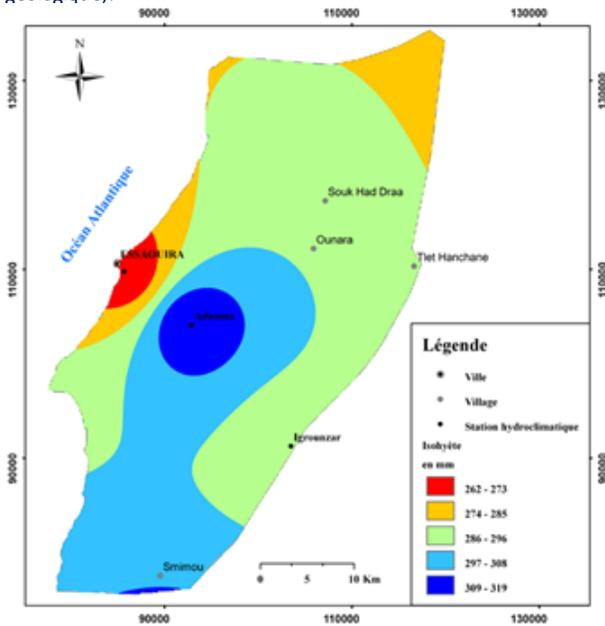


Fig. 2 - Carte du potentiel pluviométrique de la zone côtière d'Essaouira (1990-2015).

Les résultats obtenus de l'ETP par les deux méthodes utilisées (Serra et Thornthwaite) dans la zone d'étude, montre que les valeurs varient suivant la même allure, elle présente des valeurs maximales pendant les mois de juin, juillet, août et septembre et les valeurs minimales durant les mois de janvier et février (Fig. 3).

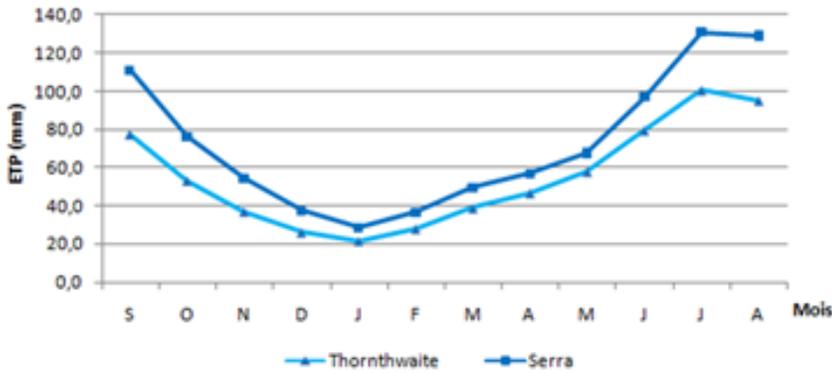


Fig. 3 - Evapotranspiration potentielle mensuelle de la zone d'étude (station Igrounzar) par les méthodes de Thornthwaite et de Serra (1990-2015).

Concernant l'ETR, le bilan de Thornthwaite appliqué au trois stations (Essaouira, Adamna et Igrounzar), montre que la région connaît un excédent d'eau qui s'étend surtout de janvier à février où la pluviométrie satisfait les réserves hydriques du sol (RFU) qui atteint son maximum (50mm) car le climat de la région est semi-aride [4], et durant la période allant de mai à octobre on remarque un déficit très important qui peut atteindre 400mm (Tab. 1).

Tableau 1. Bilan de Thornthwaite dans la station Igrounzar (1990-2015).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	M.A
T°C	24.5	20.3	17.1	14.2	12.4	14.0	16.3	17.5	19.1	22.9	26.6	26.4	19.3
P	6.8	22.5	47.3	51.3	50.3	39.7	41.7	20.7	6.5	1.0	0.8	0.5	282.6
ETP	77.5	53.2	36.9	26.0	21.3	28.1	38.7	46.5	57.7	79.5	100.6	94.3	660.2
RFU	0	0	10.4	35.3	50.0	50.0	50.0	24.2	0	0	0	0	-
ETR	6.8	22.5	36.9	26	21.3	28.1	38.7	46.5	30.7	1.0	0.8	0.5	259.8
Déficit	70.7	30.7	-	-	-	-	-	-	27	78.5	99.8	93.8	400.5
Excédent	-	-	-	-	14.3	11.6	3.0	-	-	-	-	-	28.9

c. Hydrographie de la zone d'étude

Le bassin d'Essaouira est traversé par un ensemble de cours d'eau à importance inégale vue la rareté des eaux de surface et leurs origines de départ. Trois principaux oueds traversent la zone d'étude (Fig. 4). Oued Ait Tahria qui traverse le bassin versant d'Ait Tahria (BV d'Ait Tahria) et prend naissance dans les collines avoisinantes et dans l'anticlinal de Jbel Hadid. Il est moins important, ne dispose pas de station hydroclimatique, et ne fonctionne qu'en saison pluvieuse, Oued Tidzi traverse le bassin versant de Tidzi (BV de Tidzi), et prend naissance au niveau du diapir de Tidzi, il ne dispose d'aucune station hydro-climatique [3] et Oued Qsob traverse le bassin versant de Qsob (BV de Qsob), il est la confluence des oueds Igrounzar et Zeltene traversent successivement les sous-bassins versants d'Igrounzar et Zelten.

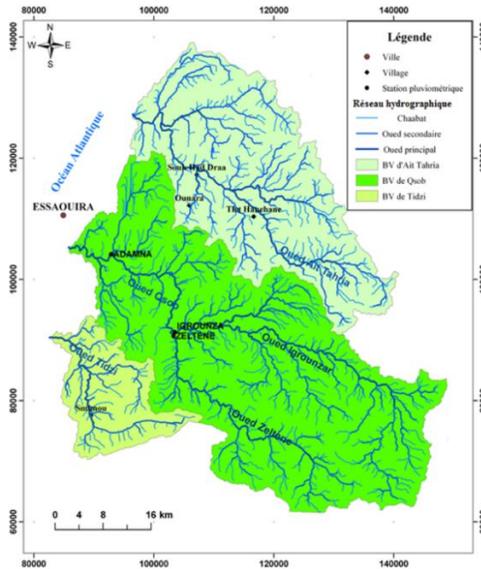


Fig. 4 - Bassins versants et réseaux hydrographiques de la zone d'étude.

d. Cadre Hydrogéologique de la zone d'étude

Du Nord vers le Sud de la zone d'étude, l'importance du système aquifère varie en fonction de la nature des formations géologiques qui constituent le réservoir et son extension. Les principaux aquifères du bassin sont l'aquifère multicouches du Crétacé du plateau et l'aquifère plio-quaternaire développé au niveau de la bande côtière. L'aquifère le moins important est celui du Jurassique qui plus profond au centre de la zone d'étude. Ils sont hydrauliquement interconnectés et interdépendants et constituent de ce fait un seul système hydraulique.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Hypsométrie des bassins versants de la zone d'étude

Le relief d'un bassin versant est très important dans leur comportement hydrologique, il influence sur le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation, car de nombreux paramètres hydro climatiques varient avec l'altitude et la morphologie du bassin. La courbe hypsométrique donne la répartition des altitudes par rapport aux superficies qu'elles occupent (Fig. 5), elle est obtenue par le planimétrage systématique des superficies délimitées par deux courbes de niveaux maitresses dans un bassin versant, la forme de la courbe hypsométrique reflète l'état de maturité du relief et sa capacité érosive.

La courbe tracée pour le bassin versant d'Ait Tahria montre une forme en 'S', avec une pente faible (Fig. 5C), et celle tracée pour le bassin versant de Qsob montre que le relief est en état d'équilibre, avec une pente forte au niveau des hautes altitudes et faible au niveau des basses altitudes (Fig. 5A), par contre, la courbe tracée pour le bassin versant de Tidzi montre que le relief est en état d'équilibre, avec une pente forte traduit l'évolution rapide des pentes au sein du bassin versant (Fig. 5B)

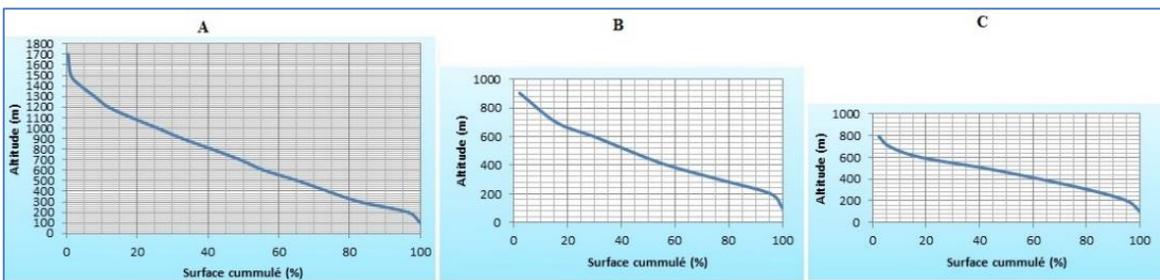


Fig. 5 - Courbes hypsométriques des bassins versants de la zone d'étude(A: Bassin versant de Qsob, B : Bassin versant de Tidzi, C : Bassin versant d'Ait Tahria)

3.2. Paramètres physiques des bassins versants de la zone d'étude

Les bassins versants (BV) de la zone d'étude sont spatialement très voisins, et sont très distincts par leurs caractéristiques physiographiques et lithologiques et par leurs régimes hydrologiques. Ils possèdent une forme allongée et s'étendent sur une direction principale du Sud-Est vers le Nord-Ouest. L'analyse des résultats obtenus pour le calcul des paramètres physiques des bassins versants de la zone d'étude (Tab. 2), montrent que les trois bassins ont une forme allongée, car leurs indices de compacité K_c est supérieur à 1. La superficie du bassin versant d'Oued Qsob est deux fois supérieure à celle du bassin versant d'Oued Ait Tahria et six fois supérieure à celle du bassin versant d'Oued Tidzi. L'écart des altitudes, généralement entre 785 m et 1697 m, traduit une morphologie relativement accidentée, avec une pente très forte pour Qsob et Tidzi respectivement de l'ordre de 13,63 et 19,46 % et très faible pour Ait Tahria de l'ordre de 8,62 %. Ainsi, les deux bassins versants de Qsob et Tidzi appartiennent à la catégorie de relief fort, par contre le bassin versant d'Ait Tahria appartient à la catégorie du relief assez fort. La forme allongée et les pentes relativement fortes des bassins versants de Qsob et Tidzi et de leurs affluents et les affleurements peu perméables (Marnes et marno-calcaires) sont tous des paramètres qui confèrent aux écoulements un caractère torrentiel et boueux et offrent un environnement propice aux crues [5]. L'Oued Qsob a une longueur de cours d'eau très importante de l'ordre de 112 km par rapport à celle des deux autres oueds Ait Tahria et Tidzi. La densité de drainage D_d presque similaire pour le bassin versant de Qsob et d'Ait Tahria, elle est faible par rapport à celle du bassin versant de Tidzi. Ces différents paramètres physiographiques et leurs variations d'un bassin versant à l'autre, associées à d'autres caractéristiques géologiques, se refléteront sur le comportement climatique, hydrologique et hydrogéologique de chaque bassin

Paramètre	BV Qsob	BV Ait Tahria	BV Tidzi
Périmètre (Km)	274	202	104
Surface (Km ²)	1726	978	283
Indice de compacité K_c	1,86	1,82	1,74
Longueur L (Km)	124,16	91,04	46,29
Largeur l (Km)	13,90	10,74	6,11
Surface de rectangle équivalent (Km ²)	1726	978	283
Périmètre de rectangle équivalent (Km)	276,12	203,56	104,80
Altitude maximal (m)	1703	794	905
Altitude minimal (m)	6	9	4
Altitude moyen (m)	100,28	99,42	104,28
Altitude médiane (m)	680	480	440
Déférence d'altitude Δh (m)	1697	785	901
Pente moyenne	13,67	8,62	19,46
Indice de pente I_p	3,43	2,77	4,16
Dénivellation utile D_u	1160	520	660
Indice de pente globale I_g	9,34	5,71	14,26
Dénivelée spécifique D_s	388,15	178,63	239,86
Longueur du cours d'eau principal LCE (Km)	112	73	42
Densité de drainage D_d (Km/Km ²)	0,06	0,07	0,15

Caractéristiques physiographiques versants Qsob, Ait Tahria et Tidzi.

3.3. Paramètres physiques de la nappe cotière de la zone d'étude.

3.3.1 Piézométrie de l'aquifère

L'aquifère plio-quaternaire est le plus exploité dans la région par un nombre très important de puits captant cette nappe. Dans le cadre de ce travail, une mission a été réalisée dans la région d'étude pour mesurer le niveau piézométrique de la nappe et la conductivité électrique en septembre 2013.

L'étendu de la roche réservoir et la géométrie du mur, constitué par des marnes d'âge Crétacé sur la zone d'étude, montrent un aquifère plio-quaternaire formé de trois secteurs séparés par des lignes de partage des eaux et dont la direction des couches géologiques d'âge crétacé affleure à la surface, avec un sens d'écoulement général SE-NW du au pendage de ces couches vers l'Ouest.

Le secteur situé au Nord d'oued Qsob et au Sud de l'anticlinal de Jbel Hadid (Fig. 6), avec des lignes de courant orientées selon la direction générale d'écoulement en allant vers l'océan atlantique le sens des eaux souterraines divergent vers le NW pour rejoindre les sources long de l'oued Ait Tahlia. L'altitude de la surface piézométrique est entre 180 m à l'Est et 35 m à l'Ouest, d'un gradient de l'ordre de 1%.

Le secteur du centre entre oued Qsob et oued Tidzi où affleurent les marnes d'âge albien -aptien, montre une altitude de la surface piézométrique d'environ 180 m à l'Est où le gradient hydraulique est fort, de l'ordre de 2% due à la remontée du diapir de Tidzi, de 0,27% en allant vers le centre, ensuite tend à augmenter vers l'aval pour atteindre 2%. Cette augmentation s'explique par la remontée de diapir caché détecté par la géophysique pétrolière au Sud de la ville d'Essaouira [6]. Ce secteur est séparé en deux, l'un au Nord où l'eau circule selon le gradient hydraulique global, l'autre au Sud avec des lignes de courants dirigées de l'Est vers l'Ouest pour rejoindre la mer.

Le troisième secteur au Sud entre l'oued Tidzi et oued Aghbalou, présente une altitude de la surface piézométrique d'environ 230 m à l'Est et 80 m à l'Ouest où affleurent les formations d'âge albien -aptien, avec un gradient hydraulique de l'ordre de 1%. Les eaux souterraines circulent de l'Est vers l'Ouest pour se diverger vers les plans de stratifications.

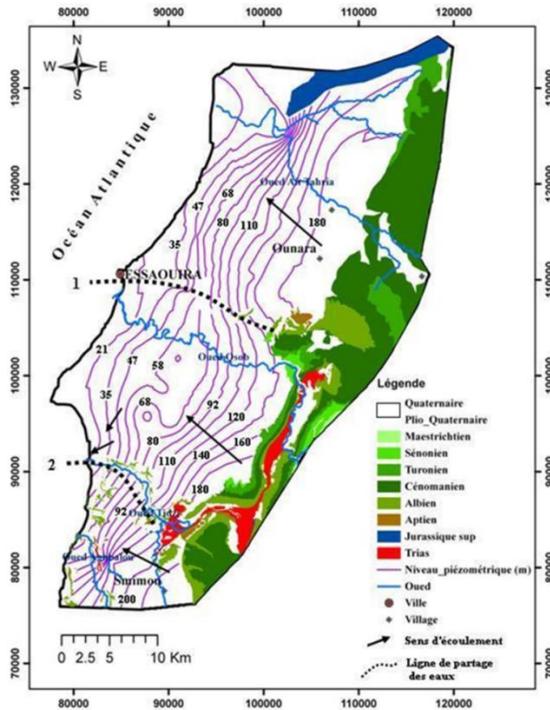


Fig. 6 - Carte piézométrique du réservoir plio-quaternaire (septembre 2013).

3.3.2 Conductivité électrique des eaux de l'aquifère plio-quaternaire

Les premières interprétations de la carte établie par des mesures de la conductivité électrique (Fig. 7A), effectuée lors des enquêtes des points d'eaux (puits et sources) dans la zone d'étude, montrent une variété spatiale des va 4leurs selon une direction NE-SW conformément à la longement de la forme des bassin versant, avec des valeurs minimales de l'ordre de 1334 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au centre de la zone et vers le Sud-Est. En allant vers le SW et vers le NE de la zone d'étude, les valeurs augmentent pour atteindre le maximum de l'ordre de 6524 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Bassins versants de Tidzi et d'Ait Tahria).

Les eaux du réservoir plio-quaternaire ont une conductivité électrique très variée en allant du centre de la zone d'étude (Bassin versant de Qsob) où les valeurs sont minimales (1334 $\mu\text{S}/\text{cm}$) vers l'Est et vers le Nord Ouest (Bassin versant d'Ait Tahria) où les valeurs sont maximales (6524 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

3.3.3 Température des eaux de l'aquifère

L'analyse de la carte de répartition spatiale de la température des eaux souterraines (Fig. 7B) montre une augmentation de la température selon le gradient hydraulique dans la partie Nord d'oued Qsob, par contre au Sud d'oued Qsob la température des eaux de l'aquifère plio-quaternaire augmente en s'éloignant de l'oued vers le Sud (Oued Tidzi).

Cette variation des valeurs de la température, qui oscille entre 22,1 °C et 24,7 °C, est due fort probablement à l'augmentation de la profondeur dans la partie Nord Qsob, et pour la zone Sud Qsob cette augmentation de direction Nord-Sud est due probablement à la l'alimentation de la nappe phréatique (Plio-Quaternaire) par les eaux fraîches d'oued Qsob.

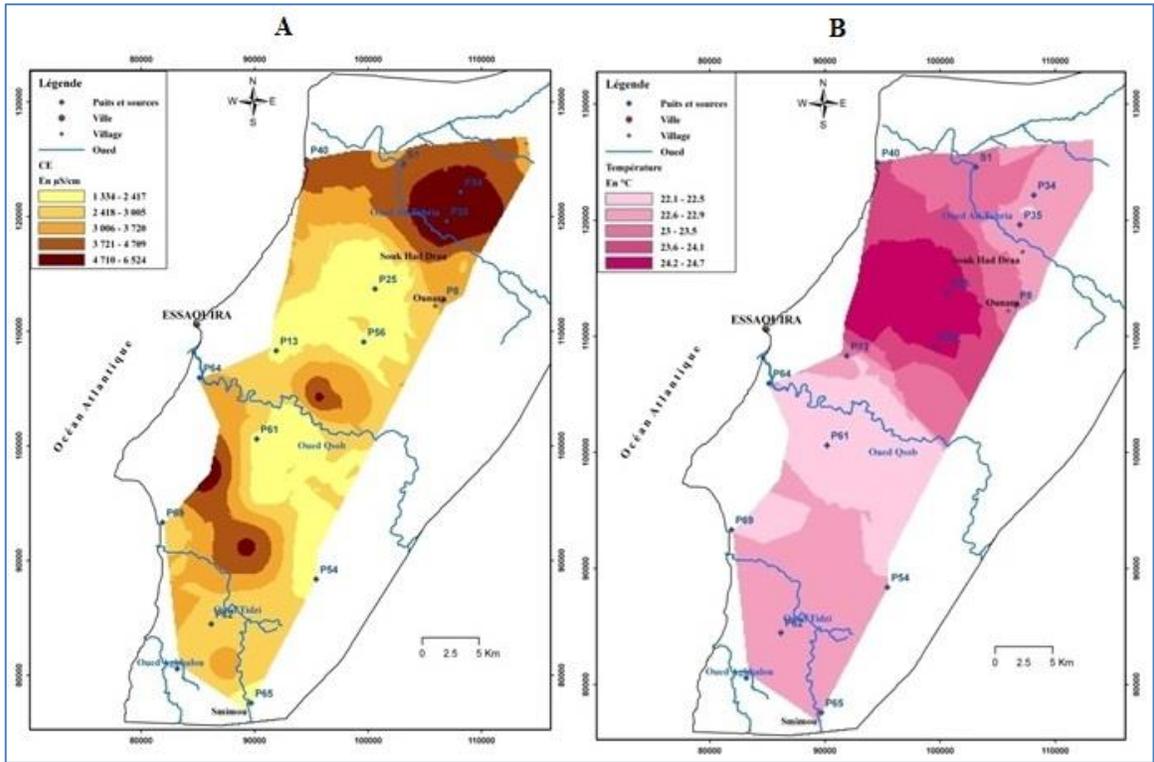


Fig. 7 – Cartes des paramètres physiques des eaux de la nappe cotière d'Essaouira (A : La répartition de la conductivité électrique. B : La répartition de la température des eaux sous terrains).

CONCLUSION

La zone côtière d'Essaouira est une zone semi-aride à laquelle appartient les trois bassins versants étudiés (BV Ait Tahria, BV Qsob et BV Tidzi), elle est essentiellement recouverte par des formations d'âge quaternaire et plio-quaternaire, c'est une zone où les précipitations ne dépassent pas 317 mm/an (1990-2015), avec une valeur d'ETP très élevée peuvent atteindre 766 mm. Les trois bassins versants peuvent atteindre des points de crue exceptionnelles et les débits de ces crues

sont importants par rapport à des surfaces drainées des bassins Qsob (1 726 km²), Ait Tahría (978 km²) et Tidzi (283 km²). Ils présentent une forme allongée, avec des pentes faibles pour le BV Ait Tahría et relativement élevé pour les BV Qsob et Tidzi. La classification de ces bassins par leurs dénivelés spécifiques D_s a donné la catégorie de relief fort aux bassins versants Qsob et Tidzi, par contre le bassin versant d'Ait Tahría appartient à la catégorie de relief assez fort.

L'analyse des cartes des paramètres physique de la nappe superficielle de la zone d'étude, montre que le gradient hydraulique de cette nappe est fort dans l'Est et dans l'Ouest de la région de l'ordre de 2% et devient faible au centre (0,27%). Sa température variée entre 22 °C et 25 °C, alors que sa conductivité électrique varie entre 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 6500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

A partir des résultats obtenus, on peut dire que les paramètres physiographiques des bassins versants et la nature géologique de la zone saturée et non saturée, ont une influence sur les paramètres physiques de réservoir superficielle de la région, d'une part. Cette influence elle est remarquable au niveau de la partie NE du bassin d'Ait Tahría, connu par sa pente faible, sa surface de drainage importante et par ces marnes et marno-calcaires d'âge Crétacé, en plus du phénomène de lessivage dans cette partie où la valeur de la conductivité électrique des eaux sous terrains est très élevée, elle dépasse les normes de potabilité (6524 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

D'autre part, les paramètres physiographiques, le climat et les affleurements peu perméables sont tous des facteurs qui influencent sur l'écoulement des eaux de surface très boueuses. On peut conclure qu'en plus du climat de la zone d'étude, son milieu physique peut offrir un environnement favorable à des crues brutales des cours d'eau. Cette situation suggère une grande surveillance concernant la protection des terres végétales contre les inondations et l'érosion et l'installation des digues et barrages collinaires pour but de recharge artificielle des nappes souterraines de la région et l'emmagasinement des eaux de surface.

Références

- [26] M. Bahir, A. Mennani, M. Jalal, Y. Fakir, Impact de la sécheresse sur les potentialités hydriques de la nappe alimentant en eau potable la ville d'Essaouira, Mogador, Maroc. *Revue Secheresse*, Mars 2002, pp (13-19) FRANCE.
- [27] Z. Ouzerbane, A. Najine, T. Aifa, A. El Hmaidi, A. Essahlaoui and Fadwa Radouani, Etude géophysique par imagerie électrique du système aquifère au Nord-Est du bassin d'Essaouira, Maroc, *Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research*, 4, 1 (2013), 57-70.
- [28] Z. Ouzerbane, Contribution de la géophysique, des SIG et de l'analyse multicritère à la reconnaissance des ressources en eau et leur vulnérabilité à la pollution. Cas du sous-bassin côtier d'Essaouira, Maroc. Thèse de Doctorat, Université Moulay Ismail, Faculté des sciences, Meknès, 2015.
- [29] A. Essahlaoui, Contribution à la reconnaissance des formations aquifères dans le bassin de Meknès-Fès (Maroc). Prospection géo-électrique, étude hydrogéologique et inventaire des ressources en eau. Thèse de Doctorat, E.M.I, Rabat, 2000.
- [30] A. El Mimouni, L. Daoudi, M.E. Saidi, A. Baiddah, Comportement hydrologique et dynamique d'un bassin versant en milieu semi-aride : exemple du bassin versant du Qsob (haut atlas occidental, Maroc). *Rev. C. & G.*, 24 (1-2) (2010), 99-112.
- [31] A. Mennani, Apport de l'Hydrochimie et de l'Isotopie à la connaissance du fonctionnement des aquifères de la zone côtière d'Essaouira (Maroc occidental). Thèse Doct. Es. Sci, Uni. Cadi Ayyad, Marrakech, 2001.

Apport de la télédétection et des SIG dans la cartographie des zones favorables à l'implantation de forages d'eau à gros débits dans la région de Daloa.

Labe Simplicel, Jourda Patrice I, 2, Saley M. Bachir I, 2, Youan Ta Marcl, 2; Lasm Théophile I, Kouadio Boyossoro Helène I, 2

¹ Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire, Tél : (+225) 588 78 155 (labe.simplice@gmail.com)

². Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection. UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire, Tél: (+225) 075 92 282 (youanta@gmail.com)

Résumé

La région de Daloa est alimentée par les eaux de surfaces, souvent polluées par les activités anthropiques. Ces eaux subissent le phénomène d'eutrophisation pendant la saison sèche. Il est donc important de se tourner vers les eaux souterraines à l'abri de toute fluctuation saisonnière et pollution. Cette étude a pour objectif d'identifier les zones favorables à l'implantation de forages à gros débits pour l'approvisionnement en eau potable. L'exploitation de ces eaux souterraines nécessite l'application d'une série de technique indirecte dont la télédétection. Complétée par la technique Thornthwait, elle a conduit à une évaluation des potentialités en eaux souterraines de la région. L'intégration dans un SIG des données générées par les méthodes ci-dessus avec d'autres sources de données favorables à une bonne accumulation des eaux souterraines en milieu de socle a permis la réalisation de la carte des potentialités en eaux souterraines de la région. La carte de potentialité a été validée. L'analyse de cette carte révèle que près de 61,45% de la zone d'étude présente des potentialités bonnes et excellentes.

Mots-clés: Eau Souterraine, Potentialité, Eau potable, Débits, Cartographie Télédétection, Système d'Information Géographique, Côte d'Ivoire.

Contribution of remote sensing and GIS in mapping favorable areas implantation of boreholes at big flows in Daloa region

Abstract:

The area of Daloa is supplied by waters surfaces, often polluted by anthropogenic activities. These waters underground the phenomenon of eutrophisation during drought. It's so important to adopt subway waters under the protection of any seasonal trouble and pollution. The purpose of this study is to identify favorable zones to the implementation of high debit drilling for drinking water provision. The exploitation of these subway waters needs the application of a serie of an indirect technique meant by Teledetection. Added by the technique of Thornthwait, it led to an evaluation of potentialities in subway waters of the area. The integration in a SIG of data generated by the following methods with other sources of data favorable to a good accumulation of subway waters of the area. The card of potentiality has been validated. The analysis of the card shows almost 61.45% of the present zone understudy of good and excellent potentialities.

Key-words: Subway water, potentiality, drinking water, debits, cartography; Teledetection; Geographic information system Côte d'Ivoire.

I. INTRODUCTION

La zone d'étude, est située au centre-ouest de la Côte d'Ivoire. Le fleuveassandra et son affluent la Lobo, Dé et la Goré drainent la région. Le substratum géologique de la région est caractérisé par les formations du Précambrien moyen. [1]. En Côte d'Ivoire, le tarissement progressif des eaux de surface, conjugué avec la croissance démographique inquiètent les gestionnaires de la ressource en eau. Confrontée à une pénurie d'eau, la connaissance du potentiel des aquifères en eaux souterraines s'avère nécessaire pour résoudre cet épineux problème d'eau dans la région de Daloa. L'essentiel des ressources en eau souterraine est contenue dans les aquifères de roches fracturées en milieu de sol cristallin [2]. Pour la cartographie de ces eaux souterraines, l'utilisation des outils modernes comme la Télédétection et les SIG s'imposent aujourd'hui pour distinguer les fractures dans le substratum rocheux [3; 4]. Cependant, d'autres méthodes (géophysiques) favorisent mieux la connaissance de l'épaisseur d'altérites, la nature des fractures, des filons et des zones broyées [5]. La plupart des forages réalisés dans la région ont des débits très faibles (1 à 2 m³/h) [6]. Une étude hydrogéologique s'avère nécessaire pour déterminer des zones favorables aux forages à grande productivité. L'objectif général de ce travail est d'identifier les zones favorables à l'implantation de forages à gros débits à l'aide de la Télédétection et du Système d'Information Géographique (SIG). L'objectifs spécifiques, est d'établir la carte structurale de la zone d'étude à partir du traitement des images satellitaires; d'élaborer grâce aux Systèmes d'Informations Géographiques et de l'analyse multicritères, la carte des zones favorable en eau souterraine de la zone d'étude.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les données utilisées sont les scènes 197- 055 du 20/01/2002 et 198-055 du 27/04/2002 ETM+ de LandSat 7. Les données hydroclimatiques, les fiches techniques des forages; des cartes géologiques et topographiques à échelle 1/200 000. Les logiciels utilisés sont : Map Info 11.0; Envi 5.1; et Rue 3 et ArcGis 10.2 pour le S.I.G.

La cartographie des linéaments suit les étapes suivantes : le prétraitement permet d'avoir une image mosaïquée. Ensuite, l'ACP; et rapports de bandes. Puis, il est appliqué les filtres directionnels de type Sobel de taille 7x7 sur les images traitées [2]. Enfin, les linéaments sont extraits manuellement grâce au logiciel Envi 5.1 des images traitées. La validation des linéaments obtenus en fractures a été possible grâce aux mesures réalisées sur le terrain et la carte géologique de la zone d'étude. La démarche multicritères obéit aux étapes d'identification; d'élaboration des critères; la classification; la standardisation des critères; la pondération des critères et leur agrégation. Selon [2; 7], les critères pour l'établissement cartes thématiques sont : la densité de drainage (km/km²); la densité de fracture (km/km²); la perméabilité induite (m/s); la pente (%); l'infiltration efficace; l'épaisseur d'altération; la piézométrie de la nappe (m); le débit d'exploitation (m³/h); la probabilité de réussite (%) et le coût de foration (euro). La probabilité de succès, est calculée selon les travaux de [8 in 9]. La classification est effectuée en référence aux travaux de [10; 2 et 11] en environnement cristallin. Cinq classes ont été retenues pour chaque critère pour la conception du SIG selon Comité Inter-Africains d'Études Hydrauliques [12]. Ce sont : la classe très faible; faible; moyenne; forte; et très forte. Un intervalle commun de 0 à 10 est retenu pour cette opération [9] voir Table I. Enfin, la technique d'agrégation et de pondération.

Table I – Classification, standardisation des critères d'accessibilité et d'exploitabilité.

Indicateur	Critères	Qualificatifs des critères	Classes	Notes
Accessibilité	Probabilité de succès (%)	très faible	<30	1
		faible	30-50	3
		moyen	50-60	5
		forte	60-90	8
		très forte	>90	10
	coût de foration (en CFA)	très faible	< 550000	10
		faible	550000-850000	8
		moyen	8850000-1150000	5
		élevé	1150 000-1450000	3
		très élevé	>1450000	1
Exploitabilité	Niveau Piézométrique (m)	très faible	< 4,0	1
		faible	4,0-6,9	3
		moyen	6,9-12,7	5
		forte	13,0-19,4	8
		très forte	>19,4	10
	Débit d'exploitation (m ³ /h)	très faible	< 0,7	1
		faible	0,7-1,5	3
		moyen	1,5-3,0	5
		forte	3,0-7,0	8
		très forte	>7,0	10

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Analyse statistique et discussion de la carte du réseau de fractures de la région de Daloa

La figure 1, les directions en nombre cumulée de fractures identifiées sont : N0-10; N40-50; et N160-170 avec une proportion majoritaire de 17% dans la direction N0-10. Concernant l'orientation des fractures en longueurs cumulées seules les directions N90-100; N10-20 et N0-10 atteignent respectivement des proportions de 10 ; 11 et 15%. Cette hétérogénéité montre que le socle a été affecté par des évènements tectoniques de différentes directions. Au plan hydrogéologique, ces fractures favorisent une bonne infiltration des eaux de pluie et de surface pour alimenter la nappe souterraine dans la région.

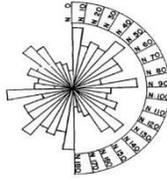


Figure 1 : Rosace directionnelle du champ de fracturation obtenue dans la zone d'étude

3.2.1 Interprétation et discussion des différentes cartes thématiques des ressources en eau

La carte d'accessibilité aux ressources en eau indique les différentes zones favorables et moins défavorables à la réalisation des ouvrages d'eau. Ainsi, les zones de Mauvaise et médiocres accessibilité occupent 72% de la zone d'étude. Les zones de bonne et excellente d'accessibilité, se localisent au sud-ouest (28%) du secteur d'étude. Ces zones ont une d'accessibilité difficile se caractérisant par des nappes se trouvant à une très grande profondeur avec des zones de captage coûteuses. Les zones bonnes et d'accessibilité excellente sont caractérisées par de faibles profondeurs de forage et une bonne recharge de la nappe lorsque la densité de fracturation le permet. La carte d'exploitabilité de la région indique que, les classes mauvaises et médiocres d'exploitabilité couvrent plus de la moitié de la zone d'étude soit 77,89% et sont caractérisées par des débits d'exploitation très faible (<1 m³/h) et un niveau statique très fort (> 25 m). Les classes bonnes et excellentes d'exploitabilité occupent 22,68% et sont identifiées par les débits très forts (> 75 m³/h) avec des niveaux piézométriques très faibles à faibles (<10 m). La carte de potentialité en eau souterraine est le résultat de la combinaison des critères en indicateurs d'exploitabilité et d'accessibilité. Cette carte montre des classes à potentialité mauvaise et médiocre couvrant 38,55 1% de la zone d'étude. Ces zones sont défavorables à l'implantation des points d'eau à gros débit; sont caractérisées par de faibles densités de fracturation, une perméabilité in duite et une épaisseur d'altération également faible. Les classes bonnes et excellentes potentialité occupent 61,45%. Ces zones sont caractérisées par une faible pente; une forte densité de fracturation; une faible densité de drainage et une forte recharge de la nappe.

3.2.2 Discussion

La télédétection et les SIG, utilisés pour la réalisation de la carte de zones potentielles en eaux souterraines donnent des résultats satisfaisants. Malgré certaines erreurs de manipulations des résultats positifs sont toutefois visibles dans les travaux de [4] à Odienné; [10] à Man; et [7] à Bondoukou. Elle a permis d'identifier à travers la carte de potentialité en eau souterraine les zones favorables à l'implantation de forages d'eau à gros débits. Des insuffisances sont encore à souligné selon [2], les méthodes ne s'appliquent que dans les milieux fissures ou la profondeur des aquifère est au tours de 100 m et non dans les zones trop profondes.

3.3. Validation de la carte de potentialité en eaux souterraines

La validation consiste à superposer des débits d'exploitation ou de production à la carte thématique de potentialité en eau. Ces débits, respectent le principe d'indépendance pour la réalisation de la carte de potentialité conformément aux exigences de la méthode. Les débits utilisés pour la validation sont au nombre de 47. La figure 1 montre les zones favorables à la réalisation des forages à gros débits en eau souterraine dans la région de Daloa.

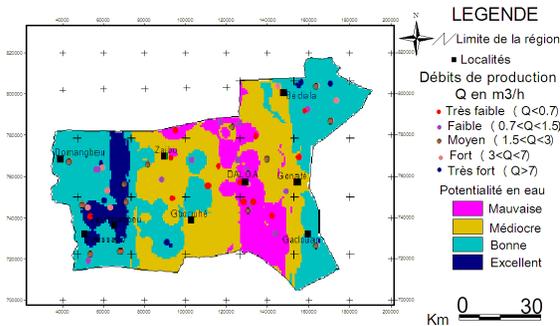


Figure 2 : Carte de potentialité définitive des ressources en eau de la région de Daloa

CONCLUSION

Cette étude a été réalisée dans le socle précambrien de la région de Daloa grâce aux techniques de Télédétection et des SIG, qui ont permis de cartographier le réseau de fractures de la zone d'étude. La carte d'accessibilité indique les différentes zones favorables et défavorables à l'implantation des forages de la région près de 72% de la zone d'étude. Les lieux favorables sont définis par de faibles profondeurs de forage et une bonne recharge de la nappe, ces zones couvrent 28% de la région. La carte d'exploitabilité présente les différentes zones d'alimentation des ouvrages de captage. Elles sont caractérisées majoritairement par des débits d'exploitation très faible ($< 1 \text{ m}^3/\text{h}$) et un niveau statique très fort ($> 25 \text{ m}$). Elle occupe 68% de la région d'étude. Elle constitue une difficulté dans l'exploitation des ressources en eau souterraines pour les grands centres urbains. Les zones à bonne exploitabilité sont caractérisées par des débits moyens et excellent ($> 7,5 \text{ m}^3/\text{h}$) avec des forts niveaux piézométriques (10-15 m). Elle recouvre 32 % de la zone d'étude. Ainsi la carte de potentialité en eau souterraine montre environ 54% de potentialité bonne et excellente dans la région. En conséquence, les résultats obtenus dans cette étude sont assez satisfaisants. Car elle nous a permis d'identifier les zones à gros débit. Ne serait-il pas important d'améliorer les techniques de cartographie pour avoir des résultats encore plus probants dans l'identification des zones propices au forage à gros débit ?

Références

- [1]-Ahimon O. A. (1990). Notice explicative de la carte géologique à 1/200000 de la feuille de Daloa. Contribution à la carte géologique de reconnaissance de la Côte d'Ivoire, mémoire n°1 première édition, 28p
- [2]-Jourda J. P., Saley M. B., Djagoua E. V., Kouame K., Biemi J., et Razack M. (2006). Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation. Revue de Télédétection, vol. 5, n° 4, pp. 339-357
- [3] - Biemi J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique, et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillon et aires granitiques de la Ma rahoué (Côte d'Ivoire). Doctoratès Sciences Naturelles de l'Université Felix Houphouët-Boigny, Abidjan, 478 p.
- [4] - Savané I., Goze B. B., Hugh G. J. Q., Biemi J. (1993). Application de la télédétection à la recherche des eaux souterraines en milieu cristallin: cas d'Odienné Côte d'Ivoire. Télédétection des ressources en eau. Actes des journées scientifiques de Tunis, pp.111-120.
- [5] - Lasm T. (2000) : Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyses statistiques et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (Domaine Archéen). Thèse Unique de Doctorat, Université de Poitier, 272p
- [6] - Ligban R., Gone D. L., Bamory K., Mahaman B. S. et Biemi J. (2009). Processus hydrogéochimiques et origine des sources naturelles dans le degré carré de Daloa (Centre ouest de la Côte d'Ivoire). Int. J. Biol. Chem. Sci. 3(1), pp 38-47.
- [7] - Youan T. M., (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'ouest : cas de la région de Bondoukou (nord-est de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de l'Université Felix Houphouët-Boigny, Abidjan, 270 p.

- [8] - Savané, (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Doctorat ès Sciences Naturelles de l'Université Felix Houphouët Boigny, Abidjan. 395 p
- [9] - Jourda J. P.-R. (2005). Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des acquièrès fissurés d'Afrique de l'ouest, concept de l'hydrotechnique spatiales cas des zones tests de la Cote d'Ivoire. Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles de l'Université Felix Houphouët-Boigny Abidjan, 430 p.
- [10] - Saley M. B. (2003). Système d'informations hydrogéologiques a référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi montagneuse de man (ouest de la côte d'ivoire) Thèse unique de l'Université Felix Houphouët-Boigny, Abidjan, 195 p
- [11]- Youan T. M., Lasm T., Jourda P. J., Saley M. B., Adja G. M., Kouame K., Biémi J. (2011). Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère cas de Bondoukou (Côte-d'Ivoire). Revue internationale de géomatique. Volume 21 n° 1, pp 43 -71.
- [12] - C.I.E.H, (1978) Méthodes d'étude et de recherché de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Géohydrologique, Vol. 38,

Qualité de l'eau de robinet dans la ville de Biskra en Algérie- étude de cas

Boukharouba Khadidja¹, Daoud della²

¹Laboratoire de Chimie Analytique LCA, Université de Biskra, Biskra.Tel: +2130559694120,
E-mail:boukharouba.khadidja@gmail.com

² Université de Biskra, Fac des SESNV, Biskra.Tel: +213550207987 E-
mail:daouddella@gmail.com

Résumé

L'existence de substances chimiques à des taux élevés dans l'eau de robinet destinée à la consommation peut porter préjudice à la santé humaine. Ceci a poussé les habitants de Biskra en Algérie à renoncer à la consommation de l'eau de robinet malgré les efforts déployés par l'état algérien pour résoudre le problème. L'objectif de ce travail est l'examen de la potabilité de l'eau de robinet de la ville de Biskra afin de regagner la confiance des consommateurs de cette eau. Pour cela, deux sites ont été choisis : Lebachach dans le vieux Biskra non touché par les investissements de l'état pour l'amélioration de la potabilité de l'eau et El Alia Nord dans le nouveau Biskra, touché par ces derniers. Ces deux sites ont fait l'objet d'une caractérisation de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau de robinet. Les résultats des analyses ont montré une différence nette entre les deux localités : l'eau de robinet de El Alia Nord est de bonne qualité organoleptique, physico-chimique et microbiologique; elle répond bien aux normes de potabilité en vigueur, donc propre à la consommation humaine. Par contre, l'eau de robinet de Lebachach est de mauvaise qualité organoleptique, physico-chimique et même microbiologique. Ce constat peut aider à regagner la confiance perdue dans l'eau de robinet au moins dans les nouveaux quartiers de Biskra et aide à limiter le recours à l'eau des citernes.

Mots clés : Eau de robinet, potabilité, organoleptique, bactériologique, physico chimique, Biskra.

Quality of tap water in the city of Biskra in Algeria - a case study -

Abstract

The existence of chemicals at high levels in tap water intended for consumption can be detrimental to human health. This prompted the inhabitants of Biskra in Algeria to renounce the consumption of tap water despite the efforts made by the Algerian state to solve the problem. The objective of this work is the examination of the potability of tap water of the city of Biskra in order to regain the confidence of the consumers in this water. For this, two sites were chosen: Lebachach in the old Biskra, not affected by the investments of the State for the improvement of the potability of water and El Alia Nord in the new Biskra, affected by these later. The two sites have undergone a characterization of the physico-chemical and bacteriological Quality of tap water. The results of the analyses showed a clear difference between the two localities: the tap water of El Alia Nord is of good organoleptic, Physico-Chemical and microbiological quality. It responds well to the standards of potability, therefore suitable for human consumption. On the other hand, Lebachach's tap water is of poor organoleptic, physico-chemical and even microbiological quality. This observation can help to regain the confidence lost in the tap water at least in the new Biskra and helps to limit the use of water from the tanks.

Key Words: Tap water, potability, organoleptic, bacteriologic, physico-chemical, Biskra.

I. INTRODUCTION

Une eau potable est une eau que l'on peut boire sans risque, selon l'Organisation Mondiale de la Santé. Elle ne doit contenir en quantités nuisibles, ni substances chimiques ni germes nocifs [1]. Les habitants de la ville de Biskra

s'alimentent exclusivement des eaux qui proviennent des nappes souterraines du Complexe Terminal réputées pour leur forte minéralisation [2,3]. Dans cette région, l'eau de robinet est dure avec un goût salé, ce qui pousse les habitants de la ville à recourir à l'eau de citerne, comme alternative, pour couvrir leurs besoins en eau de consommation. Cette situation problématique persiste toujours en 2017 et ce malgré les efforts et les moyens déployés par les pouvoirs publics pour le changement de ces pratiques rudimentaires à haut risque sur la santé publique.

A cet effet, et dans l'optique d'assurer une alimentation en eau potable en quantité et en qualité, l'état algérien a mis beaucoup de moyens. Ces dernières années, plusieurs projets stratégiques et de grande envergure visant la concrétisation de cette politique ont été mis en place, dans le Nord comme dans le Sud du pays [4]. Ne faisant pas l'exception, la wilaya de Biskra a connu ces dernières années, un saut considérable en termes d'investissements visant l'amélioration de la qualité de l'eau potable. Dans ce sens, le chef-lieu de wilaya a connu une amélioration remarquable et beaucoup de quartiers sont actuellement alimentés d'eau douce, à la place ou en alternance avec de l'eau salée habituelle. Il convient de mentionner, dans ce contexte, que les autorités locales ont fourni des efforts considérables pour améliorer la potabilité de l'eau, partant des traitements classiques de l'eau et allant, quelques fois même, jusqu'à l'acheminement des eaux de sources naturelles (Droue à titre d'exemple) vers les réseaux d'adduction publique même si cela ne dure que quelques heures seulement par jour.

Malheureusement, force est de constater que la confiance du consommateur en l'an 2017 reste encore loin à gagner, et les habitants préfèrent toujours acheter l'eau de citerne pour boire et cuisiner plutôt que d'utiliser l'eau de leurs robinets pour le faire. Cette situation, a encouragé la commercialisation anarchique de l'eau dans des citernes dans l'absence de toute réglementation et loin des conditions et normes d'hygiène. Ces eaux proviennent de Chaiba, Sidi Khelil et bien d'autres localités avoisinantes dont l'eau est plus douce à goûter certes mais, par manque d'hygiène et de contrôle, peut présenter beaucoup de risques pour la santé publique.

Notre travail se propose d'examiner la potabilité de l'eau de robinet dans la ville de Biskra. Ceci est fait pour contribuer au regain de confiance en cette eau par la mise en exergue de l'amélioration de sa qualité investie par les autorités locales d'une part, et d'autre préparer le terrain pour des études futures sur la comparaison de la qualité de l'eau de robinet avec l'eau de citernes dans la même région. A cet effet, deux sites ont été choisis sur la base d'être (ou non) touché par les investissements de l'état qui visent l'amélioration de la potabilité de l'eau de la région. Le premier site étant la région de Lebchach dans le vieux Biskra ; quartier populaire avec un réseau d'adduction très ancien donc non touché par les investissements de l'état. Le deuxième site est El Alia Nord, quartier relativement plus moderne avec un réseau d'alimentation en eau potable plus récent touché par ces investissements. Ces objectifs sont réalisés par la détermination de la composition physico-chimique et la qualité bactériologique de l'eau de robinet et la vérification de sa conformité aux normes de potabilité en vigueur.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Echantillonnage et lieu de prélèvement

Tous les échantillons d'eaux analysées ont été prélevés 3 fois pendant le mois de février 2017 au robinet de consommateurs dans les deux points de prélèvement à Biskra: El Alia Nord et Lebchach. Rappelons que l'eau de consommation de la wilaya de Biskra (Fig. 1) provient exclusivement des eaux souterraines connues par leur forte minéralisation.

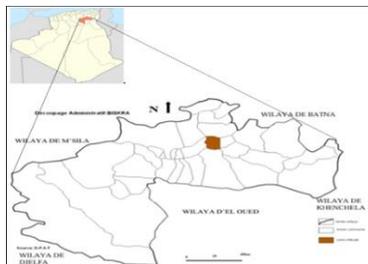


Figure 1. Situation de la wilaya de Biskra (source : DPAT,2003)

2.2. Methodes d'analyses

- Pour l'appréciation de l'odeur et du goût des échantillons d'eau, le jugement personnel de quatre personnes saines ne faisant pas partie de la communauté scientifique est donné et noté sur place. Cette opération est répétée trois fois, chaque fois avec quatre personnes différentes.

- Pour la caractérisation physico-chimique, les techniques d'analyse standard sont utilisées. Pour de plus amples détails concernant les méthodes de dosage et la détermination des concentrations etc. ainsi que les normes de potabilité, se référer à [5,6,7].
- Pour l'analyse microbiologique, elle a été faite selon les méthodes AFNOR (1), (2) et celles de l'OMS 2000. Les germes recherchés sont les germes totaux, les coliformes thermotolérants ou fécaux et totaux, dans 100 ml d'eau, les streptocoques fécaux (ou Entérocoques intestinaux) dans 100 ml d'eau et les Clostridium sulfito- réducteurs

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Paramètres organoleptiques

Une eau destinée à l'alimentation doit être incolore et inodore. Toute odeur ou couleur peut être le signe de pollution ou de présence de matières organiques en décomposition. Ces substances sont en général en quantité si minime qu'elles ne peuvent être mises en évidence par les méthodes d'analyses ordinaires. Le sens olfactif peut seul, dans une certaine mesure, les déceler [7]. Les résultats de ces caractéristiques sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques organoleptiques de l'eau d'El Alia et Lebchach

Localité	Avec odeur	Sans odeur	Goût salé	Goût doux
El Alia Nord	0 %	100%	0 %	100%
Lebchach	25%	75%	100%	0%

Il en découle que l'eau d'El Alia Nord est incolore et inodore, c'est une eau douce à boire selon toutes les personnes interrogées. Par contre, l'eau de Lebchach présente un goût salé assez prononcé et 25% des mêmes personnes ont décelé une odeur désagréable. Le goût salé revient probablement à la présence excessive de minéraux alors que l'odeur peut être expliquée soit par une contamination donc une pollution d'origine quelconque, soit par la présence de matières organiques décomposées, soit par la présence de substances chimiques dissoutes. Dans tous les cas, l'état précaire de la localité et de son réseau d'AEP présentent déjà un terrain favorable à toutes les hypothèses.

3.2. Analyses physico-chimiques

Ces analyses ont été effectuées pendant le mois de février 2017 au laboratoire de l'Algérienne Des Eaux (ADE) et les résultats correspondants sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau d'El Alia Nord et lebchach

Paramètre	El Alia Nord	Lebchach	Normes Algériennes
Electrochimie			
T [°C]	24	13	25
pH	7.38	7.46	6.5-8.2
Cond [µs/cm]	2284	4790	2800
Volumétrie			
Cl ⁻ [mg/l]	122	568	500
Alcalinité [mg/l]	16.2	29.4	-
Dureté [mg/l]	65	179	50
Mg ⁺⁺ [mg/l]	66	184	150
Ca ⁺⁺ [mg/l]	152	412	200
Résidu sec [mg/l]	1200	3000	2000
Spectrophotométrie			
Nitrate [mg/l]	7.3	31	50
Nitrite [mg/l]	0	0	0.1
Phosphate [mg/l]	0	0	0.5
Sulfate [mg/l]	111	117	250
Fer [mg/l]	0	0	0.3
Ammonium [mg/l]	0	0	0.5

3.2.1. Paramètres électrochimiques

La température dépend de la profondeur et agit sur les propriétés physico-chimiques et les diverses réactions biologiques dans l'eau [8]. Pour l'Alia Nord tout comme Lebchach, la température de l'eau est conforme à la norme algérienne et celle de l'OMS car elle est bien en dessous de 25°C.

Le pH (ou potentiel d'hydrogène) détermine la concentration en ions H⁺ de l'eau qui conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques [9]. Pour les deux points de prélèvement, ce paramètre est bien situé dans la fourchette des normes de potabilité.

La conductivité est un paramètre qui donne une idée sur la quantité de sels minéraux contenus dans l'eau que nous buvons. Elle dépend des terrains traversés et n'a pas d'effet direct sur la santé humaine, mais les valeurs élevées donnent un goût désagréable à l'eau [10]. Selon les résultats obtenus, l'eau d'El Alia Nord est une eau à minéralisation moyenne car la valeur 2284 µs/cm de sa conductivité est conforme aux normes algériennes (2800 µs/cm). A l'inverse, l'eau de Lebchach affiche une valeur de 4790 µs/cm qui dépasse de loin les normes algériennes (2800 µs/cm), et qui indique sa minéralisation excessive.

3.2.2. Paramètres volumétriques

- **Les Chlorures Cl⁻** : des teneurs fortes en chlorures donnent à l'eau un goût désagréable surtout lorsqu'il s'agit de chlorures de sodium. Les directives de l'union Européenne et de l'OMS précisent qu'au delà d'une concentration de 200 mg/l de chlore, des risques peuvent s'apercevoir sur le plan santé [7].

Pour El Alia nord, la teneur en chlorures dans l'eau est de l'ordre de 122 mg/l ce qui est en respect des normes algériennes (200 mg/l) et celles de l'OMS, alors que l'ordre de cette teneur pour Lebchach est de 568 mg/l qui dépasse de très loin les normes algériennes et celle de l'OMS.

- **Le calcium Ca⁺⁺** : le calcium est un composant majeur de la dureté de l'eau, sa teneur varie essentiellement suivant la nature des terrains traversés. Les eaux potables de bonne qualité renferment 100 à 140 mg/l de calcium [7].

Pour l'Alia Nord, la teneur en Calcium est de 152 mg/l qui est bien en respect de la norme algérienne (200 mg/l). Cependant, de préférence cette eau ne devrait pas être consommée par les personnes qui présentent des problèmes cardio-vasculaires car selon Vilaginès [11] la fréquence des maladies cardio-vasculaires augmente de part et d'autre d'une concentration idéale de 100mg/l de calcium. Pour l'eau de robinet de Lebchach la teneur en calcium est de 412 mg/l, c'est une valeur qui dépasse de très loin la norme algérienne et celle de l'OMS. Mais d'un autre point de vue, cette richesse en calcium fait de l'eau de Lebchach fortement recommandée pour la prévention des risques de lithiases oxalo-calciques urinaires, chez les sujets sans antécédants, car le calcium joue un rôle dominant dans la prévention des calculs urinaires [12].

- **Le Magnésium Mg⁺⁺** : la teneur en magnésium dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées. Le magnésium constitue l'élément significatif de la dureté de l'eau, c'est un élément indispensable pour la croissance.

Pour l'Alia Nord : Les résultats obtenus montrent que la teneur en magnésium est d'ordre de 66 mg/l, ce qui est en respect de la norme algérienne et celle de l'OMS (150 mg/l). Pour Lebchach, la teneur en magnésium est de l'ordre de 184 mg/l qui dépasse la norme algérienne et celle de l'OMS également. L'eau de Lebchach est recommandée pour les personnes souffrant de troubles neuromusculaires et cardiaques car selon Hartemann [10] l'insuffisance de magnésium entraîne des troubles neuromusculaires, et peut aussi se traduire par des manifestations cardiaques.

- **L'alcalinité** : l'alcalinité (titre alcalimétrique TA et titre alcalimétrique complet TAC) correspond à la concentration en base libre OH⁻ (ion hydroxyde), CO₃²⁻ (ion carbonate) et HCO₃⁻ (ion hydrogencarbonate ou bicarbonate) responsable du caractère agressif de l'eau.

Pour l'Alia Nord : la teneur de l'alcalinité est de 16,2. Pour Lebchach : la teneur de l'alcalinité est de 29,4. Ces valeurs sont toutes les deux conformes à la norme algérienne et celle de l'OMS, ce qui confère à l'eau étudiée dans les deux sites, le caractère non agressif.

- **La dureté** : La dureté (ou titre hydrotimétrique) de l'eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques à l'exception des métaux alcalins et de l'ion hydronium [6]. C'est un indicateur de minéralisation qui est surtout due aux ions de calcium et magnésium.

Les résultats montrent que la dureté de l'eau d'El Alia Nord est de 65 mg/l, et que celle de l'eau de Lebchach est de 179 mg/l. Ces deux valeurs dépassent la norme algérienne (50 mg/l) et celles de l'OMS, et confirment l'excès de minéralisation de l'eau de robinet avancé par [2].

- **Les résidus secs** : les résidus secs de l'eau est ce qui reste, quand on laisse toute l'eau s'évaporer. La détermination des résidus secs permet d'estimer la teneur en matières dissoutes et en suspension d'une eau. Pour des valeurs

inférieures à 60 mg/l, l'eau est acceptable par le consommateur; mais au-delà de 1200 mg/l, l'eau devient désagréable [13].

Les résultats obtenus ont montré une teneur de 1200 mg/l pour l'eau d'El Alia Nord, en respect de la norme algérienne (2000 mg/l) et celle l'OMS. Mais cette teneur pour Lebchach est de 3000 mg/l qui dépasse de loin cette norme. Ces résultats concordent avec les jugements subjectifs des caractéristiques organoleptiques déjà évoqués plus haut, et confirment une fois de plus la minéralisation forte de l'eau de Lebchach en calcium, magnésium et/ou sodium relativement à l'eau d'El Alia Nord.

3.2.3. Paramètres de spectrophotométrie

- **Les Nitrites, phosphate, fer et ammonium**: l'absence de ces teneurs dans l'eau analysée des deux régions d'El Alia Nord et Lebchach montre la conformité des eaux correspondantes aux normes algérienne et celle de l'OMS.

- **Les Nitrates NO_3^-** : La présence de nitrates dans l'eau est un indice de pollution d'origine agricole, domestique ou industrielle. Les nitrates se transforment dans l'organisme humain en nitrites (NO_2^-). Les nitrites réagissent avec l'hémoglobine normale pour former la méthémoglobine. Ainsi, la capacité du sang à transporter suffisamment d'oxygène jusqu'aux cellules de l'organisme est affectée, ce qui peut provoquer des troubles sanguins. Si la teneur en nitrates est supérieure à 50 mg/l, cela peut provoquer une cyanose liée à la méthémoglobine, particulièrement pour les nourrissons [10].

Les résultats obtenus ont indiqué une teneur en nitrates de 7.3 mg/l dans l'eau d'El Alia Nord contre 31 mg/l (5 fois plus) pour l'eau de Lebchach. Toute fois, les deux valeurs sont en accord avec les normes de potabilité algériennes (< 50 mg/l).

- **Les Sulfates SO_4^-** : l'excès de sulfates dans l'eau de boisson peut entrainer des troubles intestinaux.

Les résultats des sulfates ont indiqué une teneur de 111 mg/l dans l'eau d'El Alia Nord contre 117 mg/l pour l'eau de Lebchach. Ces deux valeurs étant inférieures à la limite admise par les normes, viennent confirmer la potabilité de l'eau des deux localités.

3.3. Analyses microbiologiques

Les résultats des analyses microbiologiques sont présentés dans le Tableau 3.

Pour El Alia Nord, les résultats obtenus montrent que la le nombre de germes totaux contenus dans l'eau est égal à 6 germes/ml à 37°C, ce qui est conforme à la norme algérienne (20 germe/ml). Ces résultats montrent aussi l'absence des coliformes (totaux et fécaux), des streptocoques fécaux et des Clostridium sulfito-réducteurs. Ceci confirme la qualité hygiénique de l'eau d'El Alia Nord et montre qu'elle est propre à la consommation sans risque lié à la santé.

Pour Lebchach, les résultats montrent que le nombre de germes totaux dans l'eau est égal à 60 germes/ ml à 37°C. Cette valeur dépasse la norme algérienne et celle de l'OMS et fait de l'eau de Labch ech impropre à la consommation. Ce nombre élevé de germes totaux, peuvent être dû soit à une contamination lors du transport de l'échantillon ou dans le laboratoire, soit à une contamination du réseau de distribution d'eau potable ou encore une contamination dans le forage. L'absence des coliformes, des streptocoques fécaux et des Clostridium sulfito-réducteurs a également été confirmée par les mêmes résultats, ce qui écarte tous les risques dus à l'hygiène de ces eaux.

Tableau 3. Analyses microbiologiques de l'eau de robinet à El Alia Nord et Lebchach

Date de prélèvement	19/02/2017		
Date de lecture	21/02/2017		
Paramètre	El Alia Nord	Lebchach	Norme algérienne
Germe T	6	60	< 20/ ml
Coliforme T/F	0	0	0/100 ml
Streptocoque F	0	0	0/100 ml
Clostridium SR	0	0	0/20 ml

4. CONCLUSION

La potabilité de l'eau de robinet de la ville de Biskra a été examinée en deux localités différentes : Labchech et El-Alia Nord. La première se situe dans le vieux biskra, une localité très ancienne qui n'a fait l'objet d'aucun investissement visant l'amélioration du cadre de vie en général. La deuxième localité, par contre, est un quartier plus moderne qui a bénéficié de plusieurs investissements y compris un réseau d'AEP récent. Les résultats des analyses physico-chimiques ont montré une différence nette entre les deux localités : l'eau de robinet d'El-Alia Nord est de bonne qualité

organoleptique, physico-chimique et microbiologique; elle répond bien aux normes de potabilité en vigueur, donc propre à la consommation humaine. Par contre, l'eau de robinet de Lebchach est de mauvaise qualité organoleptique, physico-chimique et même microbiologique. A l'état actuel, elle est déconseillée à la consommation humaine, à moins de lui faire subir un traitement adéquat. Ce constat peut aider à regagner la confiance perdue dans l'eau de robinet au moins dans les nouveaux quartiers de Biskra et aide à limiter le recours à l'eau des citernes. Comme recommandations, il serait encore plus intéressant de compléter ce travail par l'analyse de l'eau de citernes afin de voir si des différences de qualité entre les deux eaux existent pour justifier l'achat de ces dernières. Au même titre, l'étude de l'excès en sels minéraux tels que le magnésium, le calcium, dans l'eau de la région est aussi recommandée, car il peut jouer un rôle de prévention des calculs urinaires [12] ou lithiases calciques [14], maladies très courantes dans la région de Biskra, et qui sont- sans fondement scientifique- attribuées à l'eau de robinet.

Références

- [1] Organisation mondiale de la santé (OMS). In : Directives de qualité pour l'eau de boisson. Recommandations. Vol. 1. 2^e éd. Genève : OMS, 1994 187-95
- [2] Megdoud M. Qualité des eaux du Sahara septentrional. Séminaire de l'Agence nationale des ressources hydriques (ANRH), El Oued, Mai 19-20 (2003), volume 1 : 42-49
- [3] United Nations Education, Science and Culture Organization (Unesco), Étude des ressources en eau du Sahara septentrional, Rapport de 1972, 1972, Paris : Unesco, 47 p.
- [4] Rouane H., Contribution à la mise-en-évidence de l'expérience de l'Algérie dans la gestion intégrée des ressources en eau : Proceedings of the Euro Mediterranean Scientific Congress on Engineering (EMSC2011), Algeciras. Mai 19-20 (2011) 125-130.
- [5] Organisation mondiale de la santé (OMS). In : Directives de qualité de l'eau de boisson. Critères d'hygiène. Vol 2. 2^e éd. Genève : OMS, 1994 272-9
- [6] Rodier J., L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer, 7^e éd. Paris : Bordas, 1984, 345 p.
- [7] Rodier J., Analyse de l'eau : 8^{ème} Edition, Dunod, 1996 Paris, 1383p.
- [8] Bouziani M., les pathologies infectieuses. Edition, Dar el Gharb-Oran, 2002, Alger
- [9] World Health Organization (WHO) In : Guidelines for Drinking-water Quality. Chemical summary tables. Vol. 1, 3rd ed. Appendix 4. Geneva : WHO, 2004 : 488-93.
- [10] Hartemann P., Arnaud M., Qualité de l'eau et santé, Let. Sc. Inf., 43 (1996) 1-8
- [11] Vilaginés R., Eau, environnement et santé publique : Edition, technique et documentation, 2003, Paris, 198p.
- [12] Jungers P., Daudon M., Le Duc A., Lithiase urinaire, 1998, Paris : Flammarion Médecine-Sciences, 590 p.
- [13] Koch P., L'alimentation en eau des agglomérations. Édition, Dunod, 1969, Paris.
- [14] Curhan G.C., Willet W.C., Speizer F.E., Stampfer M.J., Beverage use and risk for kidney stones in women, Ann. Intern. Med., 128 (1998) 534-40.

La qualité physico-chimique des eaux du Complexe Terminal (CT) dans la région d'Oued Righ (Sud-Est d'Algérie)

Belksier Mohamed Salah ^{*1}, Bouselsal Boualem¹ et Abour Fella²

¹ Laboratoire des réservoirs souterrains : Pétrouliers, gazifères et Aquifères. Université Kasdi Merbah Ouargla

² Laboratoire de géologie, Université d'Annaba.

E-mail: mouhbelksier@yahoo.fr/blksier.mo@univ-ouargla.dz

Résumé :

Dans la région désertique de l'Oued Righ la demande en eau est importante et est influencée par la croissance démographique et le développement de l'agriculture. Elle est satisfaite par l'exploitation intensive des nappes profondes du Complexe terminal.

L'étude hydro chimique de la nappe du Complexe Terminal de la région de l'Oued Righ, nous a permis de distinguer les types des faciès chimiques suivants :

- Chloruré et sulfaté calcique et magnésienne.
- Chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique.

Le traitement statistique a été effectué pour déterminer les paramètres de position centrale et des paramètres de la dispersion. Le calcul de la matrice de corrélation a été effectué sur l'ensemble des données des échantillons du Complexe Terminal de l'Oued Righ On constate que la conductivité (CE) est corrélée positivement à Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} .

Mots clés : ACP ; faciès; association et Complexe Terminal.

The physicochemical quality of the waters of the Complex Terminal (CT) panel in the oued righ region (Southern Algeria)

Abstract :

In the desert region of the Wadi Righ, the significant water demand, because of the population growth and the development of the agriculture, is satisfied by the intensive exploitation of the deep aquifers of "Complex Terminal".

The hydro chemical study of the Terminal Complex aquifer in the Oued Righ region allowed us to distinguish the following types of chemical facies:

- Chlorinated and sulphated calcium and magnesium.
- Sodium chloride and potassium or sulphated sodium.

Statistical processing was performed to determine the central position parameters and the dispersion parameters. The calculation of the correlation matrix was performed on all the data of the samples of the Terminal Complex of Oued Righ It is found that the conductivity (CE) is positively correlated with Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} .

Key Words: PCA, ; faciès; Association and Terminal Complex.

Introduction

La salinisation est l'une des principales causes de dégradation de la qualité de l'eau dans le monde. Les mécanismes à l'origine de la salinité d'un système hydrologique sont diverses et complexes. Ainsi, le mode de salinisation dépend du contexte géographique (côtier, continental...), géologique (nature de l'aquifère, minéralogie des sédiments...) et climatique (Bourhane, 2010). Les concentrations en sels, peuvent augmenter jusqu'à la précipitation d'évaporites. Les lieux principaux de la formation de sels solides sont les sols agricoles irrigués et les bassins endoréiques où l'évaporation atteint ou excède l'influx d'eaux continentales (Kloppmann et al. 2011).

Les ressources en eau souterraines du Sahara sont essentiellement constituées de ressources non renouvelables représentées par deux grands aquifères profonds surmontés par une nappe superficielle (le complexe terminal et le continental intercalaire). Ces deux systèmes aquifères font du Sahara Algérien une région riche en ressources en eaux souterraines.

La région de l'Oued Righ est l'une des régions les plus anciennement cultivées Elle s'étend sur une longueur de 150 km Sud – Nord et une largeur allant de 20 à 30 km. Est- Ouest. (Guettiche S. 2005)

La salinité des eaux et du sol de l'Oued Righ a fait l'objet d'un bon nombre de travaux antérieurs (Jean Fabre 2004; Belksier Med., 2009; Bouznade I., 2009; Bouchahm N. et al, 2013).

Le chimisme naturel des eaux dépend essentiellement de la composition géologique des milieux traversés et du temps de séjour. Le chimisme est principalement régi par les équilibres calco-carboniques (Ca^{++} , HCO_3^-) auxquels viennent se greffer des éléments en provenance de l'environnement alluvial (Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^-) et des éléments d'origine biologique (NO_3^-). Les concentrations de ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs tels que les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface (Belksier Med., 2017; Bousalsel B., 2016). L'intérêt principal de cette partie de l'étude est de mieux caractériser la qualité des eaux souterraines de l'Oued Righ, et ses variations dans l'espace et dans le temps.

Les eaux de l'Oued Righ se répartissent en deux nappes :

Complexe Terminale (Nappes des Sables Argileux, et Nappes des Calcaires) ;

L'étude se base principalement sur les analyses durant la période de 2013 des données physico-chimiques (A.N.R.H) à partir de 97 points d'eau, répartis sur la vallée de l'Oued Righ.

I. MATERIELS ET METHODE DE TRAVAIL

I.1. Situation Géographique de la Zone d'Etude

La vallée de l'Oued Righ est une entité économique, qui regroupe près de 50 Oasis, situées au Nord-Est du Sahara, longeant les rives Ouest du grand Erg Oriental et au Sud du massif des Aurès (Castagny G., 1980)

Administrativement la zone d'étude englobe les daïras de M'Rhaïer et de Djamaâ dans la Wilaya d'El Oued au Nord et la daïra de Touggourt dans la wilaya d'Ouargla. Elle est limitée par :

Au Nord par la commune de Tolga (Wilaya de Biskra)

Au Sud-Ouest par les oasis d'Ouargla.

A l'Est par la vallée de l'Oued Souf.

Elle s'étend sur un axe Sud-Nord sur environ 150 km, entre les latitudes $32^{\circ}54'$ à $39^{\circ}9'$ Nord et les longitudes $5^{\circ}50'$, $5^{\circ}75'$ Est. Elle couvre près de 20000 ha de palmiers.

La vallée de l'Oued Righ débute à Ain Chikh au Nord à 500 km au Sud-Est d'Alger, et à 330 km au Sud de Constantine (Belksier Mohamed Salah et al 2014).

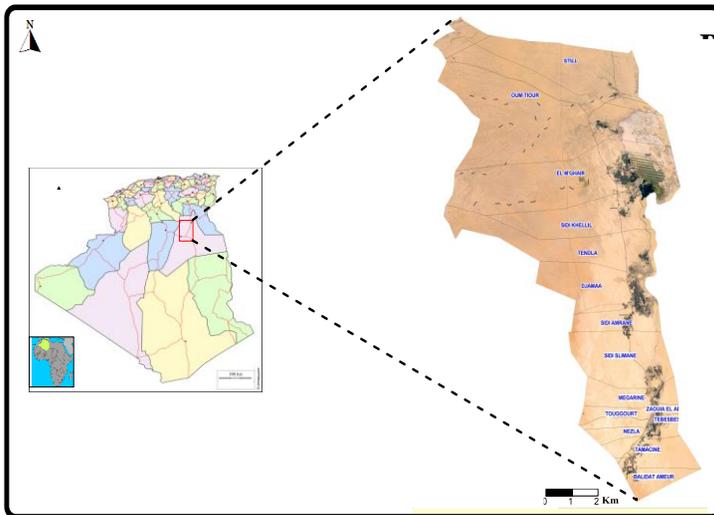


Fig. 1 : Situation géographique de la vallée de l'oued Righ (A.N.R.H, 2015)

A : Situation géographique

B : Subdivision administrative

I.2. Description des données utilisées

L'étude hydro chimique été faite sur les données des échantillons de l'eau de la nappe Complexe terminale (CT) de la région de l'Oued Righ. Au totale 97 échantillons, représentent 97 forages de l'A.E.P. et l'I.R.R. Les analyses ont été effectuées

au niveau du service de laboratoire de l'ANRH et ADE d'Ouargla en 2014. Les paramètres physico-chimiques ont fait l'objet de cette analyse.

1.3. Logiciels utilisés

Le traitement de données statistique manuellement est difficile ou pratiquement impossible dans la plus part des cas. Ceci exige l'utilisation de l'outil informatique pour toutes les étapes de l'étude hydro chimiques depuis l'élaboration des fichiers jusqu'à la cartographie et la visualisation des résultats. Plusieurs logiciels ont été utilisés dans cette étude:

Logiciel "EXCEL". Ce logiciel qui est un tableur a été utilisé essentiellement pour la saisie et la gestion des fichiers des données. Les fichiers de données des paramètres physico-chimiques ont été faits au préalable à l'aide de ce logiciel (Belksier Mohamed Salah et al 2016) ;

Logiciel "Surfer I2". est un logiciel plus utilisable dans le domaine de cartographie et pour la réalisation des cartes des iso valeurs (Piézométriques, implantation des points, ..)

Logiciel "Diagramme". est un logiciel d'hydrochimie on a utilisé pour les présentations graphiques des différents diagrammes pour la qualité des eaux, faciès chimiques, aptitude des eaux à l'irrigation,....

Logiciel XLSTAT : Ce logiciel a été utilisé pour le traitement statistique monovarié, bivarié et multivarié (calcul des matrices de corrélation, calcul des facteurs de charges,.....).

2. RESULTATS ET DISCUSIONS

2.1. Classification chimique des chimique des eaux des nappes du CT : Représentation graphique des eaux sur le diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est une représentation graphique de la chimie d'un ou plusieurs échantillons d'eau. Les anions et les cations sont représentés dans deux diagrammes ternaires distincts. Les sommets du diagramme ternaire des anions sont le sulfate, le chlorure et le carbonate plus l'hydrogénocarbonate. Les sommets du diagramme ternaire des cations sont le magnésium, le calcium et sodium plus le potassium. Les deux diagrammes ternaires sont projetés dans un losange qui représente est une matrice de passage du graphique des anions (sulfate + chlorure/total des anions) et des cations (sodium + potassium/total des cations). La projection des cations et des anions en % de meq/l sur le losange détermine le faciès chimique.

La projection sur le diagramme de piper des cations et des anions des eaux souterraine des forages du Complexe Terminal (CT) montre que les eaux sont un faciès chimique à dominance chlorurée-sodique. Ce faciès est engendré par le contact de l'eau avec les formations géologiques constituées en partie de roches évaporitiques (fig. 2) (Belksier Mohamed Salah et al 2016).

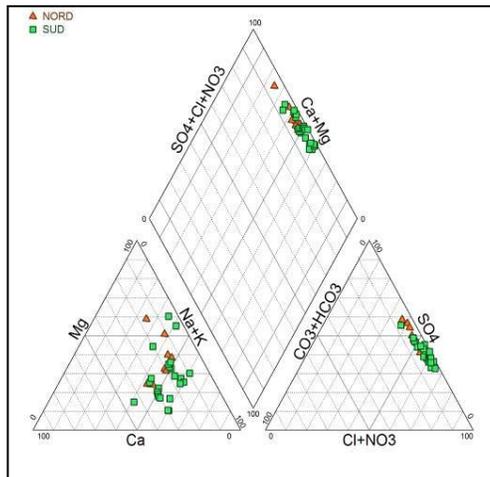


Fig. 2 : diagramme de piper des eaux : du Complexe Terminal (CT) dans la région de l'Oued Righ.

2.2. Analyse des données statistique Statistique élémentaire

Un traitement statistique a été effectué pour déterminer les paramètres de position centrale et des paramètres de la dispersion ainsi les corrélations entre les paramètres physico-chimiques. Les résultats obtenus sont reportés au (Tab. I)

Tab. 1 : Paramètres statistiques des éléments chimiques à partir des données de la nappe de Complexe Terminal de l'Oued Righ

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Ca ²⁺	56,00	776,00	342,60	143,49
Mg ²⁺	71,00	802,00	359,12	222,22
Na ⁺	125,00	1630,00	897,70	398,51
K ⁺	10,00	43,00	25,07	6,07
Cl ⁻	355,00	2912,00	1523,10	769,45
SO ₄ ²⁻	640,00	4150,00	1974,37	667,15
HCO ₃ ⁻	70,00	228,80	125,51	29,61
NO ₃ ⁻	0,00	42,00	12,33	10,56
RS	1752,00	8730,00	5645,73	1949,98
CE	2310,00	9670,00	6383,49	1861,48
pH	7,01	8,71	7,89	0,32
TH	85,00	2280,00	393,87	524,30

Les Unités en (mg/l), sauf (RS, CE, pH) sans unité, et TH en degré Française

Traitement statistique bi-varié

Le calcul de la matrice de corrélation (Tab.2) a été effectué sur l'ensemble des données des échantillons du Complexe Terminal de l'Oued Righ. On constate que la conductivité (CE) est corrélée positivement à SO₄²⁻, Cl⁻, Na⁺, et Mg²⁺

Tab.2: Matrice de corrélation des éléments chimiques calculée sur l'ensemble des échantillons de Complexe Terminal de l'Oued Righ :

Variables	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	RS	CE
Ca ²⁺	I									
Mg ²⁺	-0,36*	I								
Na ⁺	-0,19	0,81*	I							
K ⁺	0,18	0,17	0,06	I						
Cl ⁻	-0,19	0,89*	0,92*	0,22*	I					
SO ₄ ²⁺	0,06	0,80*	0,79*	0,10	0,73*	I				
HCO ₃ ⁻	-0,13	-0,31*	-0,35*	-0,13	-0,42*	-0,27*	I			
NO ₃ ⁻	-0,09	-0,11	-0,17	-0,17	-0,22*	-0,09	-0,10	I		
RS	-0,01	0,88*	0,92*	0,18	0,92*	0,91*	-0,38*	-0,16	I	
CE	0,03	0,85*	0,92*	0,20	0,92*	0,89*	-0,38*	-0,15	0,99*	I

La valeur critique corrigée du coefficient de corrélation est : 0.40

La matrice de corrélation montre que la conductivité (Ce) est corrélée positivement avec le Sodium (Na⁺), les chlorures (Cl⁻) et les sulfates (SO₄²⁻). La signification du coefficient de corrélation linéaire simple est liée étroitement avec le nombre des échantillons selon la formule de Student $R = 2/\sqrt{n-1}$. Le coefficient de corrélation r reporté dans le tableau est significative lorsque r égale ou supérieur à R il est marqué en gras si non il est sans signification. Ce n'est pas une question de dépendance ou indépendance. C-à-dire je peux avoir un $r = 0.8$ calculé sur la base de 4 échantillons !! (C'est fortement dépendant mais sans signification) par contre $r = 0.4$ calculé sur 200 échantillons (c'est faiblement dépendant mais il a plus

de signification que celui calculé sur 4 échantillons). Avec le logiciel on calcul la corrélation et sa signification liée au nombre de données utilisées en non pas aux degrés (nulle, faible où forte). Il est claire dans les tableaux que les faibles corrélations (inferieures 0.4 sont faible et insignificatives)

Les cercles de corrélation ont été tracés sur le plan des facteurs F1 -F2 (Fig. 3). Elles montrent l'existence de deux associations physico-chimiques à savoir (Belksier Mohamed Salah et al 2016) :

- La première association, corrélée positivement avec le facteur F1, regroupe les paramètres suivants : Ce, Chlorures (Cl⁻), Sulfates (SO₄⁻²) et Sodium (Na⁺). Ce sont les éléments qui représentent l'axe de la minéralisation. Cette association montre globalement une origine évaporitique, dont le minéral dominant est l'Halite (NaCl).

- La deuxième association est constituée des éléments Calcium (Ca⁺⁺), Magnésium (Mg⁺⁺), Bicarbonates (HCO₃⁻) et Potassium (K⁺). Le Calcium (Ca⁺⁺) est corrélé positivement avec F1 et négativement avec F2. Les Bicarbonates (HCO₃⁻) et le Potassium (K⁺) sont corrélés négativement avec F1. Le Magnésium (Mg⁺⁺) est positivement corrélé avec F2. Cette association représente la dissolution des roches carbonatées et dolomitiques. Cependant son influence sur la minéralisation est limitée par rapport à l'influence de Na⁺ et du Cl⁻ qui sont proches de l'association incluant la conductivité (Ce). Ceci est caractéristique aux eaux de la nappe des sables mio-pliocènes.

Le facteur de charge F2 qui représente 28% de la variance totale montre l'axe de la dissolution des formations carbonatées

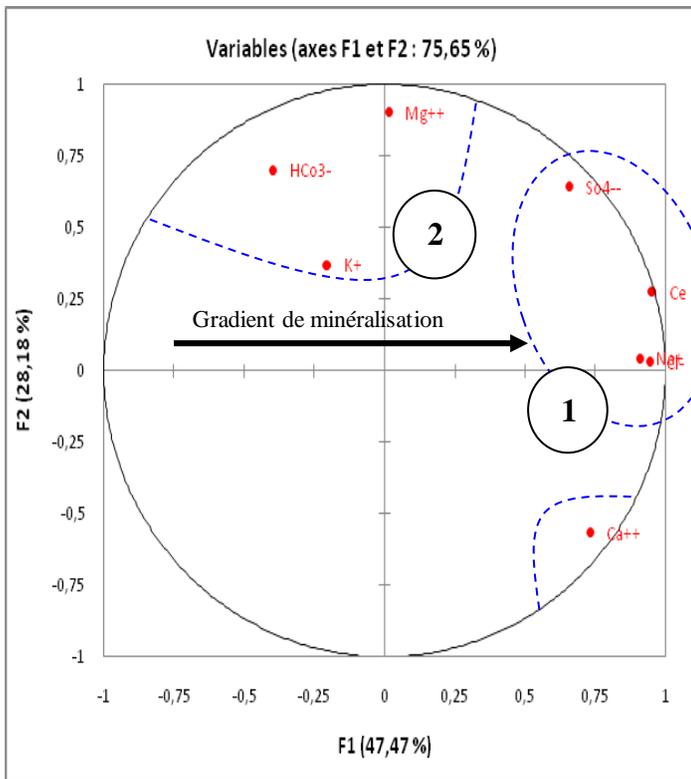


Fig. 3: Cercles de corrélations sur le plan des facteurs F1 - F2 des eaux du Complexe Terminal (CT) de la région de l'Oued Righ.

2.3. Cartographie des éléments Chimique

Les analyses physicochimiques des eaux permettent de connaître, d'abord, la nature de la composition, la prédominance quantitative de certains éléments; ensuite, d'évaluer l'agressivité physico-chimique des eaux et, par conséquent, le taux d'éléments solubles et insoluble dans la mise en solution des eaux de la région d'étude. Les principaux éléments sont:

Le Calcium (Ca²⁺): C'est un élément de la dureté totale, la dissolution du calcium résulte principalement de l'infiltration des eaux dans les formations carbonatées, cette dissolution est due principalement à la présence du gaz carbonique. Ce gaz provient de l'atmosphère en raison de l'activité bactérienne qu'il génère selon l'équation suivante :



Les teneurs de Ca^{2+} de la nappe du complexe terminale sont comprises entre 56 mg/l et 776 mg/l.

Les concentrations de Ca^{2+} , on constate que les teneurs en Ca^{2+} au Sud et Centre de la vallée sont remarquables et importants par rapport au Nord. (Fig. 4)

Le magnésium (Mg^{2+}): Ces ions proviennent de la dissolution des roches magnésiennes du gypse et des minéraux ferromagnésiens et surtout de la mise en solution des dolomies et des calcaires dolomitiques.

D'après la carte d'iso teneurs de Mg^{2+} (Fig. 4), on constate que les valeurs de concentration de Mg^{++} sont très élevées au centre de la vallée, par de valeur maximale au Centre de la carte au niveau Djamaa 802 mg/l, et l'autre au Nord et Sud présente des valeurs minimales entre 71 mg/l et 120 mg/l.

L'évolution du magnésium est très différente par rapport à celle du (Ca^{2+}), car ce dernier possède de très fortes teneurs provenant de deux origines: Carbonaté ou Gypseux.

Le sodium (Na^+): L'écoulement a favorisé l'acquisition de ces teneurs, car les eaux souterraines, qui s'écoulent suivant la direction SE-NW, se chargent progressivement au fur et à mesure que l'on se déplace vers la zone d'accumulation (exutoire naturelle). Ceci explique les fortes concentrations, qui dépassent 500 mg/l, et qui sont signalées dans le centre de la vallée. (Zone de partage des eaux), (Fig.4)

Les plus faibles valeurs, de l'ordre de 125 mg/l, sont enregistrées au sud de la vallée. Les concentrations varient beaucoup, à cause de leurs différentes origines (écart type: 396,06 mg/l). On signale que la majorité des puits dépassent les normes de potabilité.

Le potassium (K^+): ses valeurs sont relativement faibles. Les valeurs moyennes de la série oscillent autour de 25 mg/l. Les maxima et les minima sont respectivement 43 mg/l et 10 mg/l.

Les chlorures (Cl^-): Les teneurs enregistrés possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques et reste très mobile. Il constitue un bon indicateur de la pollution. Les valeurs des analyses chimiques, montrent des valeurs importantes qui dépassent la norme de potabilité de l'OMS fixée à 250 mg/l, (Fig.5) On signale que 90 % des puits dépassent cette norme. Les chlorures peuvent avoir plusieurs origines (écart type 764.42: mg/l)

Les argiles sableuses gypsifères du Mio-Plio-Quaternaire: c'est les lithologies dominant dans la nappe du complexe terminale;

Les formations évaporitiques;

Le déversement des eaux usées dans la plaine;

D'après la carte des Chlorure ont remarqué que les valeurs maximale sont enregistrées au centre de la vallée c'est une zone d'agriculture

Les sulfates (SO_4^{2-}): Les sulfates sont toujours présents dans l'eau naturelle, leur présence dans l'eau provient de: La dissolution du gypse contenu dans la nappe et au lessivage des dépôts évaporitiques selon la relation (CASTAGNY G, 1967):



Les plus fortes valeurs sont enregistrées dans le centre de la carte (vallée de l'oued righ) avec une valeur moyenne de 1950 mg/l suite au phénomène d'évaporation. Les plus faible valeurs sont enregistré au Nord et Sud (Fig.5)

Les bicarbonates HCO_3^- : Elles proviennent de la dissolution des roches carbonatées en fonction de la tension en CO_2 , de la température, le pH de l'eau et la nature lithologique des terrains traversées.



Les valeurs de la concentration de HCO_3^- sont faibles, elles sont comprises entre 69 mg/l et 228mg/l.

Figure 4. Map of the cations in (mg / l) of the waters of the Terminal Complex of Oued Righ. (A: Ca^{2+} , B: Mg^{2+} , C: Na^+) in 2013.

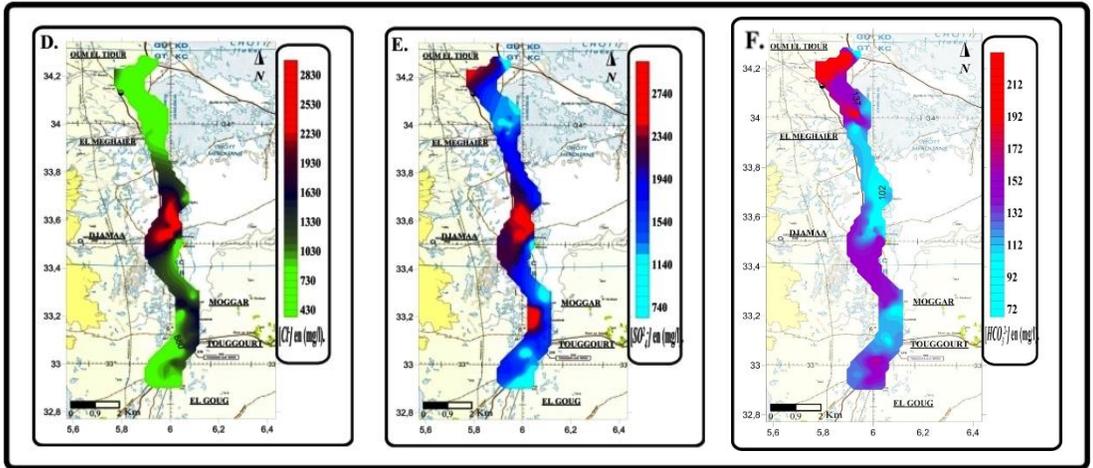
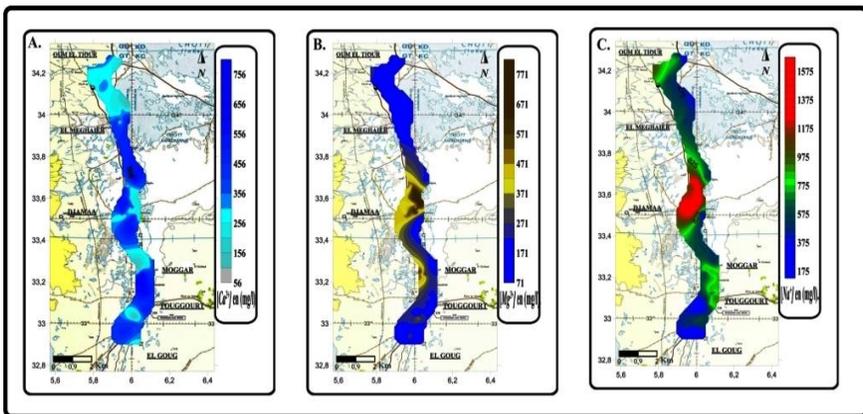


Figure 5. Anion map in (mg / l) of the waters of the Oued Righ Terminal Complex. (D: Cl⁻, E: SO₄²⁻, F: HCO₃⁻) in 2013.



Conclusion

L'étude consacrée à l'hydrochimie, a porté sur les aspects qualitatifs des eaux de la région. Dans notre travail, on s'est intéressé aux eaux souterraines de la nappe du Complexe Terminal (Nappe des Sables, et Nappe des Calcaires)

Pour l'étude de la qualité des eaux destinées à l'AEP, nous avons trouvé que :

Les eaux de la nappes du CT de l'Oued Righ qu'elles sont non adapter pour la consommation humaine, ces eaux sont très dures et fortement minéralisées.

La classification des eaux selon Piper montre la dominance de faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien pour les eaux du CT. Cette dominance de faciès est liée au contact eau roche selon la nature géologique de la région, puisque l'interaction entre l'eau et la roche provoque une dissolution entraînant un enrichissement des eaux en chlorures et magnésium.

L'ACP de la nappe du Complexe Terminal (CT) a montré l'existence de deux associations :

La première est constitué de : Ce, Chlorures (Cl⁻), Sulfates (SO₄⁻), Sodium (Na⁺). Elle représente l'axe de minéralisation et montre globalement une origine évaporitique dont le minéral dominant est l'Halite (NaCl). Ceci caractérise généralement la nappe du Mio Pliocène.

La deuxième association, constituée des Calcium (Ca⁺⁺) et Magnésium (Mg⁺⁺), représente la dissolution des roches carbonatées et dolomitiques.

Références

- [1] Belksier Mohamed Salah 2017: Hydrogeological characteristics of the surface water table in the Oued Righ region and assessment of the impact of pollution and salinity on the quality of its waters. PhD thesis, Badji Mokhtar-Annaba-University, pp.01-04.
- [2] Belksier Mohamed Salah., Chaab Salah., Abour Fella: Hydrochemical quality of surface water in the Oued Righ region and its vulnerability to pollution. Rev. Sci. Technol., Synthesis 32: 42-57 (2016).
- [3] Belksier Mohamed Salah., Chaab Salah., Abour Fella., Zeddouri Aziez., Bouselsal Boualem., Kechiched Rabeih : Irrigation and the risk of saline pollution. Example of the waters of the open water in the Touggourt area, International Journal for Environment and Global Climate Change, Volume 2, Issue 3 (2014) Pages: 32-39 ISSN 2310-6743
- [4] Bouselsal, B (2016) : Etude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère libre d'El Oued souf (SE Algérie), Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba- 126-156 p.
- [5] BOUZNAD IMAD EDDINE, 2009; Ressources en eau et Essai de la gestion intégrée dans la vallée Sud d'Oued Righ (W. Ouargla) (Sahara septentrional algérien), Thèse de magistère, option hydrogéologie, Université Badji Mokhtar-Annaba ; 128p.
- [6] BUSSON. G., 1970. The Mesozoic Saharan. 2nd part: Essay of synthesis of the data of the Algerero-Tunisian polls. Edit, Paris, Center Rech. Arid Zones, Geol., 11, 811 p. Ed. C.N.R.S.
- [7] CASTAGNY G., 1967. Practical Groundwater Treaty. Ed. Dunod, Paris. France 661 p.
- [8] CASTAGNY G., 1980. Clean water. Hachette edict. Paris, 192 p.
- [9] CORNET, A (1961): Initiation to the Saharan hydrogeology. Roneoed course for officers of the preparatory course for Saharan Affairs. service of scientific studies. Burmese, Algiers, 1961,

Simulation numérique des écoulements turbulents à surface libre : Application aux coursiers d'évacuateurs de crues

Fatima Lebdiri, Abdelghani Seghir, Ali Berreksi

Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement (LRHAE), Département d'Hydraulique, Faculté de Technologie, Université de Bejaia, 06000, Bejaia, Algérie. lebdiri.fatiha@gmail.com, seghir.a@gmail.com, berreksi.ali@gmail.com

Résumé

La détermination de l'interface eau-air est l'un des problèmes majeurs dans l'étude numérique des écoulements à surface libre. Dans la présente étude, on compare deux modèles de simulation de cette interface, qui sont le modèle VOF (Volume Of Fluid) et le modèle MMF (Mixture Multiphase Flow). Des simulations numériques d'écoulement turbulent à surface libre dans des coursiers d'évacuateurs lisses et à marches d'escaliers ont été réalisées et présentées ici. En employant le code de calcul Ansys-Fluent, basé sur la méthode des volumes finis, les équations de Navier-Stokes ont été résolues pour le cas d'un fluide incompressible avec les équations du modèle k-ε pour tenir compte de la turbulence. Les profils de la surface libre obtenus ont été comparés à des résultats expérimentaux et à des résultats de simulations numériques existant dans la littérature

Mots clés : Ecoulement à surface libre, Ecoulement turbulent, Le modèle VOF, Le modèle MMF, Le profil de la surface libre

Numerical simulation of open channel flow: application to spillways

Abstract

Determination of water-air interface is one of the important problems in numerical investigation of open channel flows. In this study, we have compared between two numerical interface models, which are VOF (Volum Of Fluid), and MMF (Mixture Multiphase Flow). For this, numerical simulations of turbulent open channel flow in smooth and in stepped spillways were carried out and presented herein. Using Ansys-Fluent software, which is based on the finite volume method, the Navier-Stokes equations are solved for an incompressible fluid together with equations of k-ε model in order to take into account the turbulence. The results of free surface flow are compared to experimental and numerical results depicted from literature.

Key Words: Open channel flow, Turbulent flow, VOF model, MMF model, Free surface flow

1. INTRODUCTION

L'importance des évacuateurs de crues dans la stabilité et la sécurité des barrages rend l'analyse de l'écoulement sur ces structures indispensable. Pendant ces dernières décennies plusieurs études se sont penchées sur la modélisation numérique pour simuler les problèmes d'écoulement de l'eau dans ce type d'ouvrages, en employant divers codes de calcul à savoirs ADINA software, FLUENT software, ANSYS.

La détermination de l'interface eau-air est l'un des problèmes majeur dans l'étude numérique des écoulements à surface libre. Ces derniers sont caractérisés par une interface déformable due à l'apparition d'aération superficiels [1], plusieurs méthodes ont été développées pour capturer ou suivre cette interface [2] à savoirs le modèle VOF (volum of fluid) et MMF (Mixture Multiphase Flow). Dans le but de comparer ces deux méthodes, nous avons simulé un écoulement bidimensionnel, turbulent à surface libre en employant le code de calcul ANSYS-Fluent, tout en traitant deux types de coursiers d'évacuateurs de crues, lisses et à marches d'escalier. Les résultats obtenus dans ce travail ont été comparés aux résultats expérimentaux et aux résultats numériques existant dans la littérature.

2. EQUATIONS DE BASE

Les équations qui gouvernent l'écoulement sont l'équation de continuité et l'équation de Navier-Stokes ou l'équation de quantité de mouvement pour un fluide Newtonien incompressible. Par prise de la moyenne d'ensemble en respectant les règles de Reynolds, ces équations s'écrivent comme suit :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + g_{x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j})$$

Avec \bar{u}_i sont composantes de la vitesse moyenne et u'_i leurs valeurs fluctuante.

ρ : la masse volumique; \bar{P} : la pression moyenne; ν : la viscosité cinématique; g : les forces de gravité; $-\overline{u'_i u'_j}$ sont les composantes du tenseur de Reynolds.

Cette équation fait apparaître les contraintes de Reynolds comme inconnues supplémentaires ce qui confère au système un caractère ouvert.

Dans le cadre de notre étude nous avons utilisé le modèle k- ϵ basé sur le concept de la viscosité turbulente pour la fermeture du système d'équations à résoudre, ses équations sont données comme suit :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \epsilon$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \nu_t \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k}$$

Avec $\nu_t = C_u \frac{k^3}{\epsilon}$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $\sigma_k = 1.0$, $C_u = 0.09$

3. MODELISATION DE LA SURFACE LIBRE

Le modèle VOF est une technique de suivi de surface, proposé par Hirt et Nichols (1981). Il a été conçu pour deux ou plusieurs fluides non miscibles. Dans ce modèle, les fluides partagent un seul ensemble d'équations de quantité de mouvement. La fraction volumique de chacun des fluides dans chaque cellule de calcul est suivie dans tout le domaine. Ce modèle est généralement couplé avec la méthode Level-Set. Le modèle VOF est utilisé pour localiser les deux fluides, par contre le modèle Level-Set assure la capture d'interface qui les sépare.

Dans le modèle de MMF, les phases sont traitées comme des régions interpénétrantes et elles peuvent se déplacer avec différentes vitesses. Ce modèle résout les équations de quantité de mouvement, de continuité pour le mélange ainsi que les équations de fraction volumique pour les phases secondaires et les expressions algébriques pour les vitesses relatives [3].

4. PRESENTATIONS DES MODELES

Nous avons examiné trois géométries différentes extraites de la littérature (Fig. 1), un canal horizontal à rugosité périodique, un coursier lisse à forte pente, et un coursier à forte pente avec 18 marches de hauteur de 19mm chacune. Comme conditions aux limites, nous avons imposé la condition «Velocity inlet» à l'entrée de l'eau, pour ce fait, nous avons utilisé les valeurs de 0.3861m/s, 0.1025m/s, 0.1065m/s pour le premier, le deuxième et le troisième cas respectivement. A l'entrée de l'air nous avons une vitesse de 0.001 m/s pour les trois cas. A la sortie et à la surface libre nous avons utilisé la condition «Pressure outlet» qui permet d'imposer une pression atmosphérique. La condition «scalable wal function» est utilisée à la paroi.

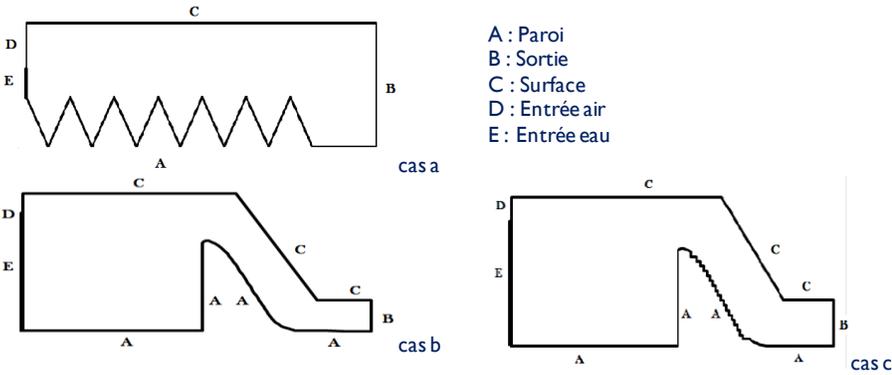


Fig. 1 – géométries et conditions aux limites.

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans les figure 2.a ; 2.b ; 2.c, les profils de la surface libre obtenu par des simulations numériques avec Ansys-Fluent, en utilisant le modèle MMF et le modèle CLS-VOF (Coupled Level-Set VOF), ont été comparés aux résultats expérimentaux de Benmamar [4] pour le cas d'un canal à marches d'escalier horizontal. Et pour le cas d'un coursier lisse et à marches d'escalier à fortes pentes, ces profils ont été comparés aux résultats expérimentaux et aux résultats numériques de Chatila et Tabbara [5] et Tabbara et al. [6] obtenus avec Adina software basée sur la méthode des éléments finis.

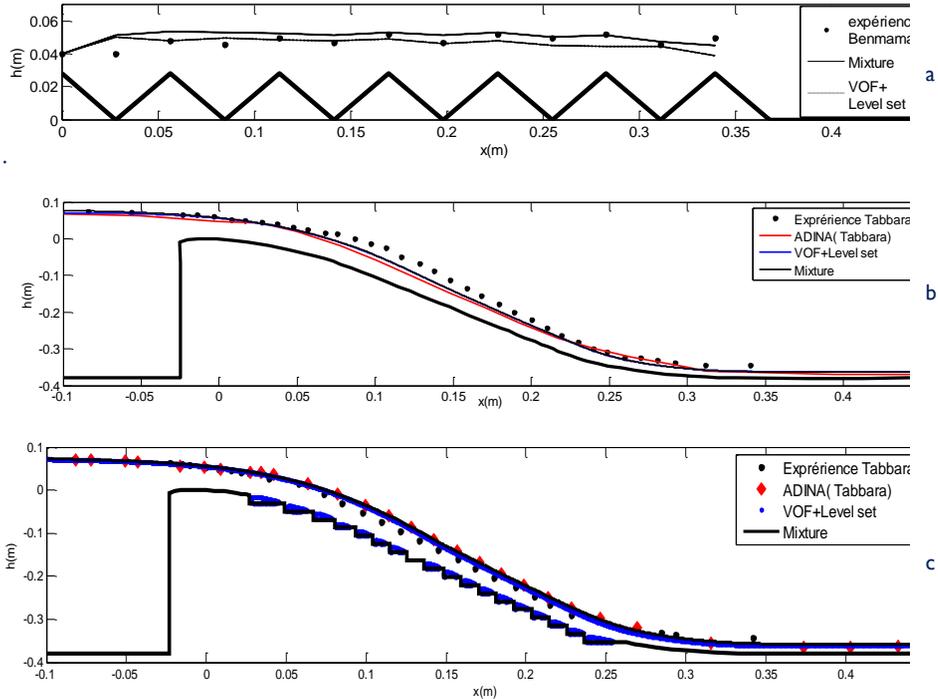


Fig. 2 – profils de la surface libre (a) canal à marches d'escalier horizontal, (b) coursier lisse à forte pente, (c) coursier à marches d'escalier à forte pente

D'après les figures ci-dessus, pour le cas d'un coursier à marches d'escalier horizontal, on remarque qu'au début du canal, le profil obtenu par le modèle CLS-VOF est très proche du profil expérimental. Par contre, à l'aval, c'est le profil obtenu avec le MMF qui est le plus proche au profil expérimental de Benmamar [4]. Concernant les coursiers

à forte pente (lisse et avec marches), et d'après les figures 2.b ; 2.c, on remarque que les profils obtenus avec CLS-VOF et MMF sont plus proches des profils expérimentaux que ceux de référence [5] et [6].

L'utilisation du modèle CLS-VOF pour le cas d'un coursier à marches d'escalier à forte pente permet de visualiser les rouleaux de recirculations aux voisinages des marches (Fig. 2.c). Ce résultat nous a conduit à évaluer et comparer les pressions au niveau des parois. Et d'après les figures 3.a et 3.b qui présentent les profils de pression le long de la 3^{ème} et 12^{ème} marche, on remarque que les profils de pressions obtenus par le modèle de mélange sont très proches des profils obtenus par Tabbara et al. [6]. On remarque aussi que le modèle CLS-VOF donne des pressions négatives au niveau de la paroi (Fig.3.a).

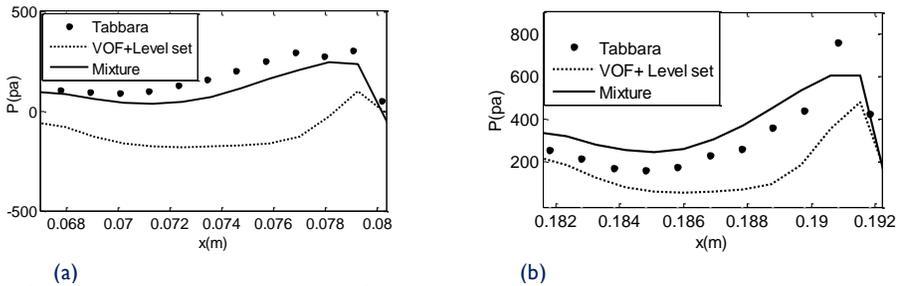


Fig. 3 – profils de pression (a) le long de la 3^{ème} marche (b) le long de la 12^{ème} marche

6. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons comparé deux méthodes de simulations des écoulements diphasiques, qui sont le modèle VOF couplé avec Level-Set (CLS-VOF) et le modèle MMF. Des simulations d'écoulements turbulents dans les coursiers d'évacuateurs de crue lisses et à marches d'escalier ont été réalisées avec le code Ansys-Fluent basé sur la méthode des volumes finis. Les résultats de la surface libre obtenus dans le présent travail ont été comparés aux résultats expérimentaux et numériques extraits de la littérature existante. Cette comparaison montre que les deux méthodes permettent de simuler les écoulements diphasiques et donnent des profils de surface libre avec une grande concordance. En ce qui concerne les profils de pression, la méthode MMF donne de résultats très proches de ceux issus de la littérature pris comme référence.

References

- [1] Zhan.J, Zhang.J, Gong.Y, Numerical investigation of air-entrainment in skimming flow over stepped spillways, Theoretical and Applied Mechanics Letters, (2016) 139-142.
- [2] Kositgittiwong.D.D, Chinnarasri.C,Julien.P.Y, Two phase flow over stepped and smooth spillways, Civil Engineering, 2012 147-154.
- [3] Ansys-Fluent Inc. (2016), Ansys-Fluent 17.2 user guid,USA
- [4] Benmamar.S, Etude des écoulements dans ples conduits à motifs périodiques – Application aux évacuateurs de crues, these de doctorat, (2006)
- [5] Chatila.J, Tabbara.M, Computational modeling of flow over an ogee spillway, Computers and Structures, 2004 1805–1812
- [6] Tabbara.M, Chatila.J, Awwad.R, Computational simulation of flow over stepped spillways, Computers and Structures, 2005 2215-2224.

Contribution de la télédétection à l'étude de la fracturation, et de la mise en place du système hydrogéologique de la zone des sources, Haut Bassin de l'Oum Er Rabiaa(Moyen-Atlas, Maroc).

Amine Tahiri¹, Fouad Amraoui², Mohamed Sinan³

¹ Doctorant, Équipe Hydrosiences, Laboratoire Géosciences Appliquées à l'Ingénierie de l'Aménagement (G.A.I.A.). Université Hassan II de Casablanca, Faculté des Sciences Ain Chock, Km 8, route d'El Jadida, BP 5366 Maarif, Casablanca, Maroc. Courriel : tahiri.amine28@gmail.com

² Professeur, Université Hassan II de Casablanca, Faculté des Sciences Ain Chock, Équipe Hydrosiences, Laboratoire Géosciences Appliquées à l'Ingénierie de l'Aménagement (G.A.I.A.). Km 8, route d'El Jadida, BP 5366 Maarif, Casablanca, Maroc. Courriel : amraoui_f@hotmail.com.

³Professeur. École Hassania des Travaux Publics, Département Hydraulique, Environnement et Climat. Equipe de recherche : Hydrogéologie, Traitement, Epuration des Eaux et Changement Climatique. Km 7 route d'EL Jadida, Casablanca, Maroc. Courriel : sinanmohamed1960@gmail.com

Résumé

Le haut bassin de l'Oum Er Rabiaa fait partie du Moyen Atlas marocain, il renferme une ressource en eau souterraine importante à l'échelle du Maroc. Le système hydrogéologique de la zone d'étude est caractérisé par la présence de nombreuses sources, dont certaines ont une forte salinité et se déversent dans l'oued Oum Er Rabiaa. Le débit global de ces sources varie entre 12 et 15 m³/s, dont 400 à 500 l/s est constitué d'eau saumâtre. La zone d'émergence des sources salées de l'Oum Er Rabiaa est caractérisée par l'existence de grands accidents géologiques, à l'origine de la remontée des formations argileuses du Trias au contact des calcaires du Lias. Les argiles salifères du Trias (qui constituent le substratum imperméable de l'aquifère Liasique) sont présumées être à l'origine de la salinité d'une grande partie des eaux des sources de la zone d'étude. Les techniques de la télédétection et de l'imagerie satellitaire (LANDSAT8 ETM⁺, et ASTER) ont permis de déterminer la distribution directionnelle des linéaments et d'expliquer le système d'écoulement souterrain dans la zone des sources, qui est compartimenté en blocs étagés, conséquences des contraintes tectoniques (succession d'épisodes extensifs) qu'ont connues par les calcaires dolomitiques du Lias.

Mots clés : hydrogéologie, hydrochimie, salinité, SIG, télédétection

Contribution of remote sensing to the study of the fracturing and the establishment of the groundwater hydrogeological system, the high basin of Oum Er Rabiaa, (Middle Atlas, Morocco).

Abstract

The high basin of Oum Er Rabiaa is part of the Medium Atlas, it constitutes an important resource of water on the scale of Morocco. The hydro-geological system of the region is characterized by the predominance of fractured and karstified liasic limestone giving rise to numerous sources, some of which have too high salinity flowing into the Oum Er Rabiaa river the rate of flow of these sources is in fact of the order of 12 to 15 m³/s with 400 to 500 l/s of brackish water. The area of emergence of the Oum Er Rabiaa salt sources is characterized by the existence of great geological accidents, causing the triassic rise in contact with the Lias, the saline clays of the trias, which constitute the impermeable substratum of the liasic aquifer, are presumed to be at the origin of the salinity of a large part of the sources in the area of study. Remote sensing techniques and satellite imagery (LANDSAT8 and ASTER) have made it possible to determine the directional distribution of lineaments, the flow system in the area of study is therefore due to the fact that this water area corresponds to a basin formed following the succession of extensive episodes.

Key Words: hydrogeology, hydrochemistry, salinity, GIS, remote sensing.

1. INTRODUCTION

Durant l'histoire géologique, les formations de l'écorce terrestre ont subi des déplacements complexes dans diverses directions. Les roches qui les composent sont comprimées en plis, se chevauchent les unes sur les autres, subissent des ruptures, etc. Il en résulte que le relief de la surface terrestre. Les renseignements sur les mouvements tectoniques peuvent être fournis par l'analyse des données géologiques, notamment par la lithologie, et les linéaments géologiques [1]. A souligner qu'en matière de géologie, l'imagerie satellitaire a permis de mettre en évidence les grandes structures visibles depuis l'espace pour en déduire une panoplie des données, par exemple : une meilleure connaissance des réseaux de failles[2]. Ces données sont particulièrement précieuses pour les études en géosciences de façon générale, en géologie et l'hydrogéologie de façon particulière.

2. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Le haut bassin de l'Oued Oum Er Rabiaa fait partie du Moyen Atlas, il constitue une ressource en eau importante à l'échelle du Maroc[3]. Le système hydrogéologique de la région Moyen-Atlasique est caractérisé par la prédominance de calcaires liasiques fracturés et karstifiés[4]. Ces derniers jouent un rôle important dans le système hydrogéologique de la zone d'étude donnant naissance à de nombreuses sources, dont certaines ont une salinité très élevée. Les sources de l'Oum Er Rbiaa constituent des ressources en eau considérables par leur débit d'étiage, qui varie entre 12 et à 15 m³/s, avec 400 à 500 l/s d'eau saumâtre[5]. Il sera donc primordial d'entreprendre une étude (par le biais de la télédétection et de l'imagerie satellitaire) de la fracturation des roches qui est présumée être à l'origine de la mise en place de ce système hydrogéologique.

3. ACQUISITION ET TRAITEMENT DE DONNEES

L'avènement des satellites d'observation a grandement facilité le travail des cartographes qui disposent maintenant d'une vue très globale de la surface de la Terre. Le présent travail a pour objectif d'étudier, par le biais de l'imagerie satellitaire et des outils S.I.G, la distribution des linéaments dans la zone des sources à fin d'analyser le rôle de la fracturation dans la circulation d'eau souterraine. En se basant sur le principe de la télédétection qui permet d'analyser certaines caractéristiques de surface du sol et du proche sous-sol, par l'analyse des propriétés du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par le sol[6]. Plusieurs types de données ont été utilisés dans l'étude de la présente problématique (Images LANDSAT8, Images ASTER.). Avant d'exploiter les données acquises, un ensemble de prétraitements des images (filtrage, correction atmosphérique, analyse en composante principale) ont permis de fournir des supports visuels complémentaires sur lesquels le travail de l'interprétation de la réalité de terrain et d'extraction des linéaments s'est appuyé[7]. Ce travail d'interprétation a été assuré par un ensemble de logiciels (Envi pour contraster les images, Géomatica : pour l'extraction des linéaments, Rockwork : pour calculer les directions extraites, ArcGis : pour la compilation des géo-données (Fig.1).

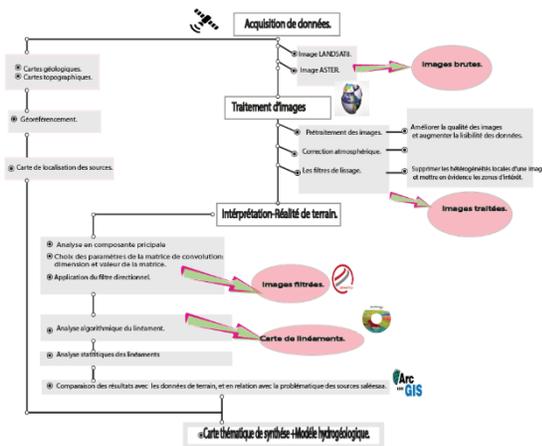


Figure 1 – Schéma organisationnel de la méthodologie, (T.Amine).

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1. Observation des accidents majeurs et rehaussement des linéaments par filtrage directionnel

Le filtre de lissage a permis de visualiser le maximum de détails structuraux possibles, permettant dans une large mesure de confirmer l'existence de grands couloirs de cisaillement qui traversent la zone des sources (Fig.2a). Ceci a permis d'avancer une première appréciation sur le rôle rempli par la fracturation pour la mise en place du système hydrogéologique de la zone.

Le rehaussement des linéaments associés aux mégastructures et aux grands couloirs de cisaillements, a été effectué à partir des filtres directionnels [8] appliqués à la première composante principale CPI, sous de nombreux angles, (0° - 45° ; 45° - 90° ; 90° - 135° ; et 135° - 180°), tout en faisant une analyse visuelle afin d'éliminer toute sorte de fausses présentations qui coïncide avec les pistes, les routes... , le résultat montre que la fracturation dans la zone des sources est polyphasée et se traduit par le jeu des accidents et des failles, qui ont compartimenté la zone en donnant naissance à une géométrie complexe avec des blocs faillés isolant ainsi les couches aquifères. Le filtrage assure le saisi d'une grande variété de linéaments. Les directions privilégiées sont celles comprises entre 45° et 90° (Figs. 2b,2c,2d,2e). Ces résultats confirment les travaux antérieurs réalisés dans la zone moyenne atlasique, et confirment aussi les informations collectées sur le terrain. Les accidents obliques sont des éléments familiers du contexte géologique actuel de la zone d'étude [9],[10].

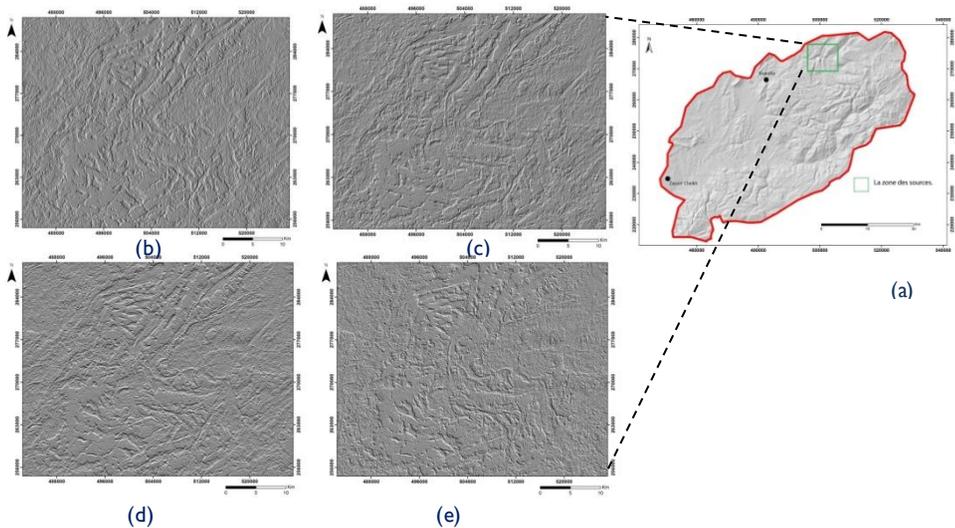


Figure 2 – Filtre de lissage appliqué sur la totalité du bassin (a).Filtres directionnels sur le couloir de cisaillement donnant naissance aux sources : filtre pour l'angle 0° - 45° (b),filtre pour l'angle 45° - 90° (c), filtre pour l'angle 90° - 135° (d), filtre pour l'angle 135° - 180° (e).

4.2. Cartographie des linéaments majeurs et carte de synthèse des linéaments

La carte de synthèse des linéaments représente l'ensemble des segments résultant de la superposition de l'information contenue dans les quatre images filtrées (Fig.2). Elle regroupe au total 954 linéaments et met en évidence quatre familles principales d'orientation des linéaments qui sont : N-S, E-W, NE-SW et NW-SE. Les deux directions dominantes sont : E-W et ENE-WSW.

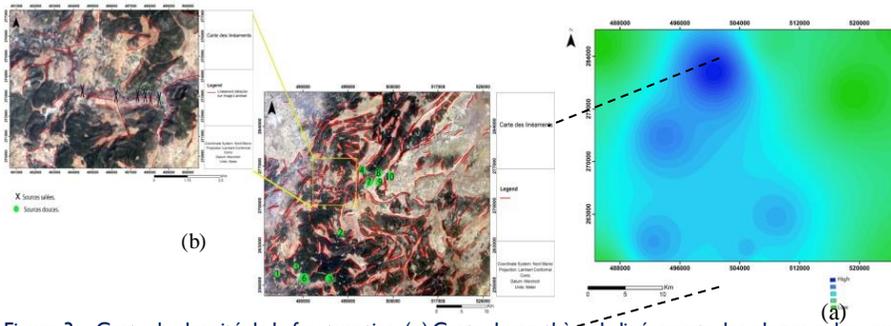


Figure 3 – Carte de densité de la fracturation (a). Carte de synthèse de linéaments dans la zone des sources (b).

La carte de densité de la fracturation (Fig.3a) et la carte de synthèse des linéaments (Fig.3b) ont montré que les sources de la zone d'étude s'organisent à la faveur des linéaments qui représentent des zones de failles et des couloirs de cisaillements. Ceci confirme que les linéaments détectés ne sont que des expressions de sub-surface de quelques phénomènes géologiques profonds, notamment des accidents majeurs traversant la zone des sources, créant ainsi un ensemble d'émergences qui sont des sources de débordement par contacts structuraux, ayant des caractéristiques physico-chimiques particulières. La distribution directionnelle des linéaments fait ressortir que la classe de direction [N45°] constitue la direction majeure de la trame linéamentaire ayant une expression régionale, déjà remarquée sur les combinaisons des filtres directionnels.

4.3. Le modèle hydrogéologique du phénomène des sources douces et des sources salées de l'Oum Er Rabia

L'élaboration d'une synthèse pertinente sur les conditions et les causes de l'hétérogénéité des caractéristiques physico-chimiques des sources a nécessité la réalisation d'une étude géologique poussée de terrain et en vue de confronter les observations sur site avec les résultats de l'analyse par télédétection et par imagerie satellitaire. Au droit des sources de l'Oum Er Rbia, les calcaires du Lias inférieur sont mis directement en contact avec les argiles salifères du Trias à travers un ensemble de failles de directions SSW-NNE. L'alimentation des émergences douces est assurée par les eaux qui transitent dans les compartiments en blocs basculés formés suite à la succession des périodes extensives dans la région. Les sources du compartiment ouest ne sont pas salées et présentent de forts débits. Elles se distinguent des émergences du compartiment est par la circulation des eaux qui s'effectue sur les argiles du Trias et qui se caractérisent également par l'accumulation des dépôts de sels (Figs : 4a,4b).



Figure 4 – photo d'un accident mettant en juxtaposition les calcaires lités du Lias et les argiles du Trias, et les écoulements salés dans les argiles triasiques (a), photo de dépôts de sels s'accumulant sur les argiles du Trias (b). (Cliché T.Amine 20/08/2017).

Les arguments tirés des données de terrain et le balayage de la zone d'étude par les techniques de la télédétection et de l'imagerie satellitaire montrent qu'on est en présence de deux systèmes hydrogéologiques de circulations qui sont totalement indépendants (Fig.5).

- Un premier système : dont la circulation s'effectue dans le compartiment NE, uniquement dans les calcaires fracturés du Lias et donnant naissance aux sources douces ;
- Un deuxième système : dont la circulation s'effectue également dans les calcaires fracturés du Lias, mais en les mettant en contact avec les formations du Trias salifère, qui procurent à l'eau souterraine sa forte minéralisation.

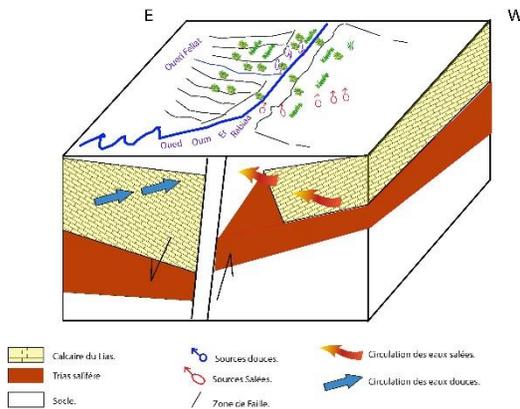


Figure5 –illustration du modèle d'écoulement dans la zone des sources de l'Oum Er Rbia

CONCLUSION

Le bassin de l'Oum Er Rabia contient un ensemble de cours d'eau complexes, se concentrant dans la partie du Moyen Atlas. Il s'agit du réseau fluvial comprenant l'Oum Er Rabia, l'Oued Fellat, ainsi que de nombreuses sources drainant des débits importants d'eaux souterraines. Les caractéristiques lithologiques et structurales en font un système hydrogéologique complexe. Les formations géologiques de la zone d'étude sont constituées essentiellement par des faciès carbonatés du Lias, qui se caractérisent par une circulation d'eau douce. Au site des sources, le Lias inférieur est mis en contact direct avec les argiles du Trias salifère à travers un système de failles de direction principale SSW-NNE. Ce contact est à l'origine de la mise en place d'un système de circulation d'eau salée. Le présent travail a fait l'objet de l'application d'une approche complémentaire, ayant permis de décrire la répartition spatiale et la densité de la fracturation et de définir la cause de l'hétérogénéité physico-chimique des eaux des sources.

Références

- [1] LATTMAN L.H (1958). Technic of Mapping Geologic Fractures and Lineaments on Aerial Photographs. Photogrammetric Engineering, 24(4), pp.568-576.
- [2] SCANVIC J., 1983. Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre. BRGM. Manuel et Méthodes. N 7 p.158
- [3] DIRECTION DE L'HYDRAULIQUE (1977). Ressources en Eau du Maroc, Tome3, domaine Atlasique et Sud-Atlasique. Editions Du Service Géologique Du Maroc, Rabat. 1977.p.29-50.
- [4] AMRAOUI F., 2005. Contribution à la connaissance des aquifères karstiques : cas du Lias de la plaine du Saï et du Causse moyen atlasique tabulaire (Maroc). Doctorat d'Etat. Univ. Hassan II. Ain Chock. Casablanca.
- [5] ARCHAMBAULT et al. (1972) le phénomène hydrogéologique des sources douces et des sources salées de l'Oum Er Rabia. Etude quantitative, Mines et géologie N°36, Rabat. ».
- [6] GRONAYES C., 2003. Identification de couloirs de cisaillement à partir de l'imagerie de landsat: application à l'archéen de bloléquin (ouest de la côte d'ivoire). Télédétection, 2003, vol. 3, n° 2-3-4, p. 217-226 © 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
- [7] JOURDA J. P., 2006. Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire). Télédétection, 2006, Vol. 5, n°4, pp.339-357.
- [8] BONN F. ET ROCHON P., 1992. Précis de télédétection: Applications thématiques, Vol 2, PUQ/AUPELF-UREF, 633p.
- [9] HINAJES (2004) : Tectonique cassante et paléochamps de contraintes dans le moyen atlas et le haut atlas central (Midele-Errachidia) depuis le trias jusqu'à l'actuel. Thèse Doc. Etat, Univ.Fes.
- [10] KHALIL N. (2002): Démarche méthodologique pour une meilleure connaissance de l'hydrologie et la géochimie des aquifères de moyenne montagne: cas du Haut bassin de l'Oum Er Rabia (Moyen-Atlas, Maroc). Thèse Doctorat d'état, Univ. CADI AYYAD Semlalia. Marrakech.

Cartographie de la susceptibilité aux inondations par la méthode de l'analyse multicritère et SIG : Cas de la wilaya d'Oran Nord-Ouest de l'Algérie

Zine el abidine roukh¹, Abdelmansour najji¹

Laboratoire Géoressources, Environnements et Risques Naturels, Université d'Oran 2 Mohamed BENAHMED, Faculté des Sciences de la Terre et de l'univers.B.PI 1524 El-M'Naouar. Oran31000.Algérie

Mail: 1) zinougeorisque@gmail.fr

2) amansour_najji@hotmail.com

Résumé

L'objectif principal de cette étude est de cartographier la susceptibilité aux inondations par la combinaison du modèle statistique (AHP) et le système d'information géographique pour la wilaya d'Oran au Nord-Ouest de l'Algérie. Pour atteindre ce but, une démarche analytique de la distribution géo spatiale des paramètres intrinsèques au phénomène d'inondation des zones littorales a été réalisée. Pour notre investigation, nous avons échantillonné quatre paramètres de prédisposition environnementaux à savoir : la pente, l'altitude, la proximité d'oueds et l'occupation du sol. Une pondération de chaque paramètre a été calculée par la méthode AHP basée sur l'environnement du SIG. En conséquence, une cartographie thématique de la susceptibilité aux inondations régionales a été établie par la classification d'indice global de la susceptibilité. Cette carte simulée synthétique aux inondations potentielles permettra de définir les zones susceptibles à l'inondation et servira ainsi comme outil adapté à l'aménagement du territoire pour explorer de zones abritées au risque hydrique en cas d'une inondation dévastatrice.

Mots clés : susceptibilité, inondation, AHP, SIG, Oran, Algérie.

Flood susceptibility zoning using multi-criteria decision analysis and GIS for the Oran region north western of Algeria

Abstract:

The main objective of this study is to perform flood susceptibility zoning by the combination of statistical model and geographic information system for Oran region north western of Algeria, to achieve this goal, An analytical approach has been implemented for the spatial distribution of the fundamental intersects parameters of the flooding phenomenon in coastal areas. For our investigation, four environmental predisposition parameters were selected such as: gradient, elevation, proximity to valleys and land use. Each parameter is weighted by the AHP method based on the GIS environment. As a result, a thematic map of regional flood risk has been established through the classification of Global susceptibility Index. This simulated artificial map of potential flooding will identify flood susceptible areas and thus serve as an adapted tool to land use planning to explore areas sheltered from water risk in case of a devastating flood.

Keys Words: flood hazard, AHP, SIG, Oran Algeria.

I. INTRODUCTION

Les inondations présentent l'un des aléas naturels les plus commun dans le monde, elles peuvent engendrer des catastrophes économiques et environnementales notables associées aux inondations de plaines à grandes envergures. Ce phénomène hydrique peut provoquer d'importantes pertes humaines, dégâts matériels et la dégradation des milieux urbains et/ou ruraux. La cartographie de zones exposées à ce risque naturel devient une nécessité pour la gestion et la planification spatiale de l'aménagement du territoire. Pour cela, les chercheurs essaient de décrire ces différentes

catastrophes mais surtout pour estimer le degré de risque dans les différentes régions du monde en se basant sur les paramètres causatives intrinsèques et (extrinsèques). Dans la littérature des risques naturels, différents modèles ont été utilisés pour la cartographie de l'aléa d'inondation telle que les modèles hydrodynamiques et hydrologiques [1.2.34], ainsi par les méthodes statistiques [5.6.7], et d'autres recherches déterministes fondées principalement sur l'analyse multicritère hiérarchique ayant comme support le système d'information géographique 'SIG' [8.9.10].

L'Algérie a connue dans son histoire, plusieurs catastrophes naturelles liées aux inondations, parmi les plus meurtrières nous mentionnons celle de 'Bab-El Oued' événement hydrique dévastateur d'Alger de novembre '2001', où plus de 750 morts et 120 personnes disparues et plus de 10.000 familles sinistrées. Comme on signale l'inondation de la ville de Oued R'Hiou du 20 octobre '1993' qui a fait plus de 23 morts et 20 blessés.

Vu l'aspect géographique et les variantes géologiques, géomorphologiques, climatique et hydrologiques, la wilaya d'Oran est considéré comme une région à risque hydrique et susceptible de percevoir d'autres risques dévastateurs telles que les événements sismiques et les mouvements de terrain (géologiques).

L'objectif principal de cette note est de proposer une cartographie de la susceptibilité aux inondations de la wilaya d'Oran par la méthode statistique analyse hiérarchique des procédés 'AHP' sous l'égide du système d'information géographique 'SIG'. Cette approche est basé sur la collecte de données, l'évaluation de degrés de la susceptibilité et en fin sur la cartographié algébrique de la susceptibilité aux inondations.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2. 1. Présentation de la zone d'étude

La wilaya d'Oran se situe dans le Nord-ouest de l'Algérie, entre les coordonnées géographiques en latitude (35° & 36°) et en longitude (-2° & 0°), qui couvre une superficie de 21 14 km². Du point de vue découpage administratif, la wilaya d'Oran se subdivise en 09 Daïra(s) totalisant 26 Communes, dont 21 sites urbains et 05 sites ruraux. La population selon le 'RGPH' de l'année '2008' est de : 1.453.152 habitants, soit une densité de 6.8 habitant/ha dont la population urbaine est de 1.424.704 habitants et 28.448 habitants pour la population rurale. Le territoire de la wilaya d'Oran se répartie en trois grands ensembles :

- Le Massif côtier de la wilaya au Sud-ouest et Nord-est, formant une chaîne littorale discontinue avec des altitudes qui varient entre 200 et 600 m.
- Au Sud, de cette chaîne tellienne s'intercale à l'Est la plaine de l'Habra & la Macta (wilaya de: Mascara) et à l'Ouest la plaine de la M'léta (Wilaya de: Sidi Bel Abbés), celles-ci occupent plus ou moins les 70% de la Wilaya et disposent d'une altitude allant de 00 à 400m.
- Sur la pointe Sud de la Wilaya, on a les Monts de Beni Chougrane qui sont situés à cheval sur les deux wilayas (Mascara et Oran), dont les altitudes varient entre 200 à 600 mètres.

La wilaya d'Oran est caractérisée par les édifices morphologiques suivants : les massifs côtiers d'Est et d'Ouest, les plaines littorales et sub-littorales, les monts du Tessala (Oran), les plaines et piémonts d'el Ançor et de la Grande Sebkhia d'Oran. Les massifs côtiers d'Oran ont un bio climat méditerranéen semi-aride à un été chaud et un hiver humide. Les plaines littorales et sub-littorales de cette wilaya, ont un bio-climat méditerranéen semi-aride à hiver tempéré (60% des superficies de la wilaya). Les températures moyennes des maxima(s) et des minima(s) sont respectivement comprises entre 24°C et 08°C avec une moyenne annuelle de 14°C.

2. 2. Données d'entrées

Il n'existe aucun modèle conventionnel qui définit le nombre exacte de facteurs utilisés dans la cartographié de susceptibilité aux inondations

Pour une bonne précision, certains paramètres sont jugés nécessaires pour le processus d'évaluation. Les facteurs utilisés dans cette étude sont respectivement: La pente, la proximité aux réseaux de drainage, l'occupation du sol et l'altitude. Ces facteurs sont utilisés pour l'établissement d'une cartographie thématique relative aux zones les plus exposées aux inondations qui s'intègre parfaitement au SIG.

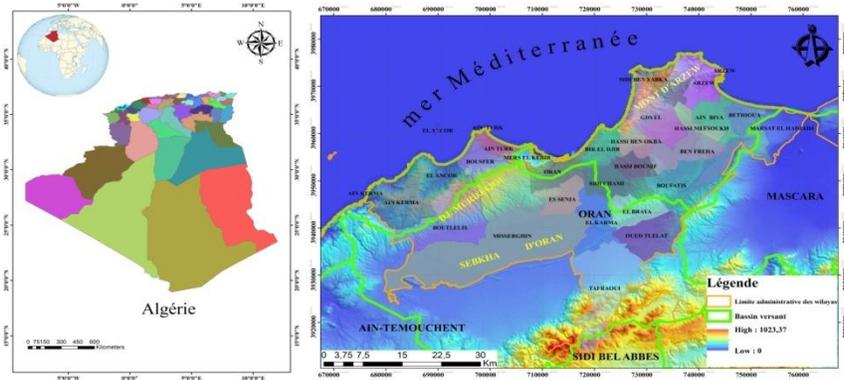


Fig. 1 - Localisation de la zone d'étude

2.1. a. La Pente

La pente joue un rôle très important dans la cartographie de la susceptibilité aux inondations. Ce facteur intrinsèque permet de contrôler la vitesse de ruissellement et de déterminer les zones de stagnation des eaux de surface lors des précipitations occasionnelles. La pente est exprimée en degré; générée à partir d'un modèle numérique de terrain 'MNT' réparties en 05 gradients de pentes; classés en: (00-02°), (02-04°), (04-08°), (08-12°) et >12° (fig.2.a)

2.2. b. L'altitude

Ce paramètre à un rôle clé dans le contrôle du mouvement de la direction de débordement et dans la profondeur de l'inondation [11], la carte hypsométrique est générée à partir d'une classification automatique du MNT utilisant l'ASTER DEM qui la segmentera en cinq classes (fig.2. b).

2.3. c. L'occupation du sol

L'occupation du sol présente aussi un paramètre très essentiel dans le zonage de la susceptibilité aux inondations. Les sols nus, les espaces bâtis et les zones à une faible densité de végétation caractérisées par une importante susceptibilité aux inondations. Dans cette étude la carte d'occupation du sol (fig.2d) a été classifiée en six classes selon le degré de susceptibilité.

2.2. d. La proximité aux rivières

Les zones situées aux bords des rivières caractérisées par une forte susceptibilité aux inondations due au phénomène de débordement, la distance par rapport aux rivières présente l'un des paramètres important dans l'évaluation d'Alca d'inondation. Dans la présente note, la carte de la proximité aux rivières a été générée par la classification des distances par rapport aux cours d'eau en cinq classes : (0-100), (100-200), (200-300), (300-400) et >400 mètre (fig.2c).

Tous les fichiers ont été convertis en format raster avec une taille de pixel de 30 × 30 m et intégrées dans SIG pour l'application de la méthode du Analyse Hiérarchique des procédés (AHP).

2.2 Méthodologie

L'analyse hiérarchique des procédés (AHP) est une méthode multicritère d'aide à la décision d'un choix correcte et justifié entre plusieurs critères. Cette méthode est introduite par [12], elle repose sur la comparaison par de paires de critères. Vue sa facilité d'application et sa précision dans la prise de décision, la méthode AHP a été utilisée dans plusieurs domaines telle que la susceptibilité aux glissements de terrain [13], la gestion des risques [14], la planification des transports combinés [15], l'analyse comparative des opérations logistiques et les risques d'inondation.

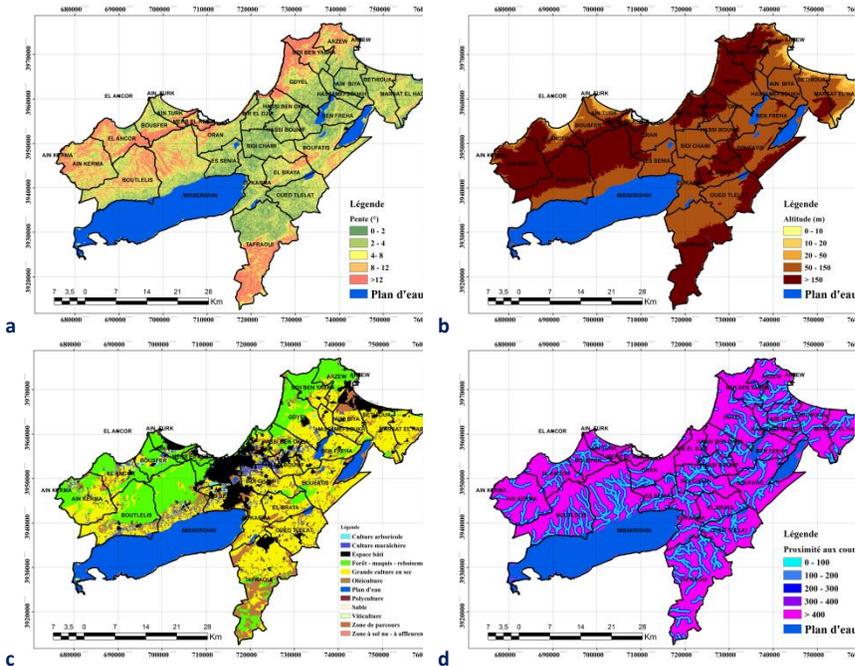


Fig 2. Cartes des données entrées : a) carte des pentes classifiée, b) carte des altitudes, c) carte des distances par rapport aux cours d'eau, d) carte d'occupation du sol

Les étapes fondamentales de la méthode AHP sont : structuration hiérarchique d'un problème, structuration des priorités et calcul de la cohérence.

Dans cette étude, la méthode AHP a été utilisée pour calculer la pondération de chaque facteur. Pour atteindre ce but, une matrice de comparaison par paire a été établie à la faveur d'une échelle graduée de 1 à 9 qui indique le degré d'importance (tab. I).

Table I -Echelle de comparaison

Echelle	Définitions	Explications
1	importance égale des deux éléments	Deux éléments contribuent autant à la propriété
3	un élément est un peu plus important que	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
5	un élément est plus important que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
7	un élément est beaucoup plus important que	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est dans la pratique
9	un élément est absolument plus important que l'autre	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible

Une fois les poids sont calculés, la cohérence des jugements doit être calculée afin de valider les priorités obtenues. Pour calculer la cohérence des jugements utilisés dans la matrice de comparaison en se basant sur l'équation suivante :

$$RC = CI/IA \quad (1)$$

Dans RC est le ratio de consistance varie de 0 à 0.1, CI est l'indice de cohérence estimé selon l'équation (2) :

$$IC = \lambda_{max} - 1/n - 1 \quad (2)$$

λ : est la valeur propre, calculer à partir de la matrice de comparaison et n : le nombre de comparaison

IA Présente l'indice aléatoire définis par Saaty selon le tableau 2

Tableau 2. Indice Aléatoire (IA)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16
IA	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

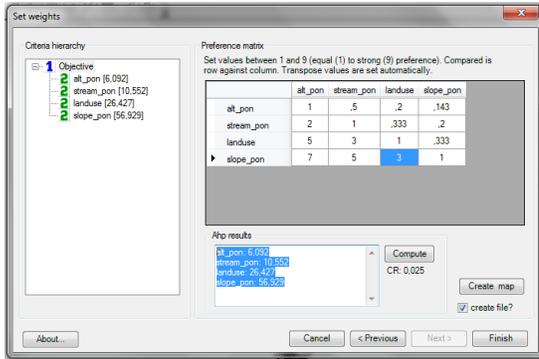


Fig3. Matrice de comparaison par paire.

Pour la pondération de chaque classe des paramètres, on attribue un rang de 1 à 7 selon le degré de susceptibilité (tableau3)

L'indice de la susceptibilité aux inondations a été calculé selon l'équation suivante :

$$I = \sum_{R=1}^{R=n} RN(Ci) \times P(cr) \quad (3)$$

RN(Ci) rang normalisé de chaque classe, P (cr) pondération de chaque paramètre calculé selon AHP.

Tableau 3- Rang normalisé de chaque classe et la pondération des paramètres calculée selon AHP

Parametre	Classe	Rang	Rang normalis	Pondération (A)
Pente(°)	0 – 2	7	0.33	0.569
	2 – 4	6	0.28	
	4 – 8	4	0.19	
	8 – 12	3	0.14	
	>12	1	0.04	
Distance par rapti cours d'eau (m)	0 – 100	6	0.37	0.105
	100 – 200	4	0.25	
	200 – 300	3	0.18	
	300 – 500	2	0.12	
	>500	1	0.06	
Altitude (m)	0 – 10	5	0.33	0.0609
	10 – 20	4	0.26	
	20 – 30	3	0.20	
	30 – 40	2	0.13	
	>40	1	0.06	
Occupation du so	Foret- maquis- reboisement	1	0.004	0.264
	Culture arboricole- oléiculture- vit	2	0.096	
	Culture maraichère- grand cultur	3	0.14	
	polyculture			
	Bâts	4	0.19	
Plan d'eau	Sol nu- zone de parcoure- sable	5	0.23	
		6	0.28	

2. Resultat et discussion

Toutes cartes thématiques sont établies par les performances du logiciel Arc-GIS, aménagées sous l'environnement SIG, par l'emploi d'une méthode de combinaison linéaire de pondération. En conséquence, une cartographie de la susceptibilité aux inondations a été obtenue par la classification d'indice de susceptibilité respectivement réparti en quatre classes d'inondation potentielle : Nulle, faible, moyenne et forte (fig-4)

L'interprétation de la carte thématique synthétique des terrains inondables fait apparaître l'existence de plusieurs zones communales qui sont sujet de risque hydrique émanant lors périodes pluvieuses excédentaires des années accidentellement humides. Sur le plan de la distribution géographique des zones à risque, nous soulignons que les bassins endoréiques sont les surfaces les plus exposées au phénomène d'inondation notamment au niveau des communes: d'Es-Sénia, El-Braya, Sidi-Chahmi, Tafraoui, et Oued-Tlélat. Par-ailleurs, en zones à drainage exoréique vers la mer telles que El-Mactaa, Arzew, Aïn El-Turk et la plaine des Andalouses leur terrains sont strictement exposés à ce risque, lorsque les conditions de houle maritime seront associée aux tempêtes littorales en leur phase extrême souvent hivernale.

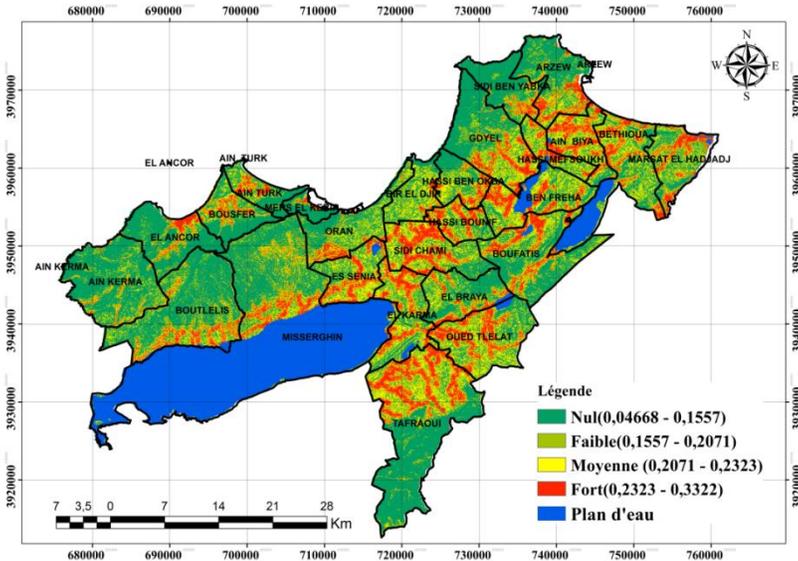


Fig4. Carte de la susceptibilité aux inondations de la wilaya d'Oran

CONCLUSION

Dans cette recherche, nous venons de proposer une carte préventive du risque hydrique sur les zones déprimées de la wilaya d'Oran. Le produit de cette thématique est une cartographie de la susceptibilité aux inondations en zones potentiellement inondables, initiée par l'analyse algébrique multicritères, sous l'égide du système d'information géographique SIG. L'application de la méthode statistique 'AHP' nous a permis de calculer l'indice de la susceptibilité aux inondations en faisant intégrer quatre facteurs intrinsèques au phénomène de submersion des plaines et des vallées littorales qui sont respectivement: la pente, l'altitude, la proximité d'Oueds' et du type de parcelles d'occupation de sol. Dans notre investigation nous soulignons quatre niveaux de susceptibilité qui définissaient, à la faveur de classification d'indice spécifique à la lame d'eaux inondée, les principales classes d'inondation suivantes : nulle, faible, moyenne, et forte. Les zones à grande alternative aux inondations accidentelles nécessitent des études hydrologiques détaillées. En effet, l'estimation de l'ampleur de la propagation du flux d'inondation en zones endoréiques (Sebkhas) et exoréiques (Oueds) littoraux est d'une grande importance pour la prévision d'aléa hydrique en relation avec les crues d'Oueds et les inondations de plaines alluviales apériodiques cycliques. Dans ce sens intervient la modélisation d'aléa d'inondation des bassins versants; pour mieux estimer les périodes de retours des crues historiques souvent indexées les cycles centennal pour notre cas on songe à périodes de retour notées 'Tr' plus ou moins restreintes d'ordre: $Tr=50$ ans et $Tr=100$ ans. Le résultat principal de cette recherche se manifeste par l'élaboration d'une carte thématique liée au risque hydrique régional qui pourra être exploitée d'une part, sur le plan d'aménagement du territoire par les collectivités locales pour minimiser le risque encouru à l'inondation de plaines littorales et zones côtières du Sahel Oranais et d'autre part, cette cartographie déterministe pourra être considérée comme un document essentiel à la préparation d'un Plan de Prévention du Risque Hydrique de la région littoral de l'Algérie Nord-occidentale 'PPRH'.

Références

[1] Merwade, V., Cook, A., & Coonrod, J. (2008). GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. *Environmental Modelling & Software*, 23(10-11), 1300-1311.
 [2] Refsgaard, J. C. (1997). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of hydrology*, 198(1-4), 69-97.

- [3] YAHIAOUI, A. *Inondations torrentielles. Cartographie des zones vulnérables en Algérie du Nord (cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès)*. 2012. Thèse de doctorat. École Nationale Polytechnique El Harrach, Alger (Algérie).
- [4] Mokhtar, E. S., Pradhan, B., Ghazali, A. H., & Shafri, H. Z. M. (2018). Assessing flood inundation mapping through estimated discharge using GIS and HEC-RAS model. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(21), 682
- [5] Tehrany, M. S., Lee, M. J., Pradhan, B., Jebur, M. N., & Lee, S. (2014). Flood susceptibility mapping using integrated bivariate and multivariate statistical models. *Environmental earth sciences*, 72(10), 4001-4015.
- [6] Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H. (2016). Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*, 31(1), 42-70.
- [7] Pradhan, B. (2010). Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. *Journal of Spatial Hydrology*, 9(2).
- [8] Das, S. (2018). Geographic information system and AHP-based flood hazard zonation of Vaitarna basin, Maharashtra, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(19), 576.
- [9] Ghosh, A., & Kar, S. K. (2018). Application of analytical hierarchy process (AHP) for flood risk assessment: a case study in Malda district of West Bengal, India. *Natural Hazards*, 94(1), 349-368.
- [10] Luu, C., Von Meding, J., & Kanjanabootra, S. (2018). Assessing flood hazard using flood marks and analytic hierarchy process approach: a case study for the 2013 flood event in Quang Nam, Vietnam. *Natural Hazards*, 90(3), 1031-1050.
- [11] Rahmati, O., Zeinivand, H., & Besharat, M. (2016). Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(3), 1000-1017.
- [12] Saaty, T.L. *The analytical hierarchy process: planning, priority setting and resource allocation*. McGraw-Hill, New York. 1980,
- [13] Yalcin, A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. *Catena*, 72(1), 1-12
- [14] Abdelgawad, M., & Fayek, A. R. (2010). Risk management in the construction industry using combined fuzzy FMEA and fuzzy AHP. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9), 1028-1036
- [15] Saaty, T. L. (1995). Transport planning with multiple criteria: the analytic hierarchy process applications and progress review. *Journal of advanced transportation*, 29(1), 81-126.

Caractérisation géochimique de l'aquifère de Complexe Terminal de El-Oued (SE Algérie)

Bouselsal Boualem¹, Belksier Mohamed Salah²

¹et ². Laboratoire des réservoirs souterrains pétroliers gaziers et aquifères. Université de Kasdi Merbah. Ouargla. Algérie.

Email : ¹bousboualem@gmail.com²blksier.mo@univ-ouargla.dz

Résumé

La région d'Oued-Souf (SE Algérie), est caractérisée par la superposition de trois couches aquifères, il s'agit de haut en bas, de l'aquifère superficiel, l'aquifère de complexe terminal (CT) et l'aquifère de continental intercalaire (CI). L'aquifère de complexe terminal constitue la principale source pour l'approvisionnement en eau potable et pour les usages agricoles, il englobe des assises perméables du Sénonien carbonaté au Mio-Pliocène. En effet on distingue trois couches aquifères séparées localement par des horizons semi-perméables ou imperméables. La profondeur du CT varie entre 200 et 600 mètres. L'examen des cartes piézométriques montrent que le sens d'écoulement des eaux est de sud vers le nord.

Le mécanisme de l'acquisition de la charge saline des eaux et la compréhension des comportements géochimiques, en réponse à certains fonçages naturels et anthropiques, ont été approchées par l'étude combinée des rapports ioniques et analyses statistiques des données hydrochimiques. Cette étude a montré que la qualité de l'eau n'obéit pas aux normes des eaux potables et d'irrigation. La minéralisation des eaux est liée principalement à la dissolution des évaporites (gypse et halite en particulier), à l'infiltration des eaux de la nappe phréatique, au phénomène d'échange de base.

Mots clés : *Complexe Terminal, El Oued, analyses statistiques, géochimiques, Irrigation.*

Geochemical Characterization of the El-Oued Complex Terminal Aquifer (SE Algeria)

Abstract

The region of Oued-Souf, is characterized by the superposition of three aquifer layers, it is from top to bottom, the superficial aquifer, the aquifer of terminal complex (CT) and the aquifer of intercalary continental (CI).

The terminal complex aquifer is the main source for the supply of drinking water and for agricultural uses, it includes permeable bases of Senonian carbonate to Mio-Pliocene. Indeed, there are three aquifer layers separated locally by semi-permeable or impermeable horizons. The depth of the CT varies between 200 and 600 meters. Examination of the piezometric maps shows that the direction of flow of the water is from south to north. The mechanism of the acquisition of the saline load of the waters and the understanding of the geochemical behaviors, in answer to some natural and anthropic darkings, were approached by the combined study of the ionic relations and statistical analyzes of the hydrochemical data. This study showed that water quality does not comply with drinking water and irrigation standards. The mineralization of water is mainly related to the dissolution of evaporites (gypsum and halite in particular), the infiltration of water from the water table, the phenomenon of ratio exchange.

Key words: Terminal Complex, El Oued, statistical analysis, geochemistry, Irrigation.

1. Introduction

Dans la région d'El Oued, les eaux souterraines constitue la seul source l'approvisionnement en eau potable et agricole. Cette région est caractérisée par la superposition de trois couches aquifères, il s'agit de haut en bas, de l'aquifère superficiel libre, l'aquifère de complexe terminal (CT) et l'aquifère de continental intercalaire (CI). La nappe superficielle est devenue moins utilisées depuis plus 20 ans à cause de sa minéralisation excessive et son fort degré de pollution soit minérale ou organique [1]. Les forages récents sont orientés vers l'exploitation de l'aquifère de complexe terminal, soit pour l'AEP ou pour l'irrigation, a cause du coût relativement supportable de forages.

Objectif de ce travail c'est d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux de complexe terminale, pour les différents usages et la compréhension des comportements géochimiques des eaux, en réponse à certains fonçages naturels et anthropiques, par l'étude combinée des rapports ioniques et analyses statistiques des données hydrochimiques.

2. Cadre général

La vallée d'El Oued Souf située (Fig.1) au Sud-Est algérien, elle occupe une superficie de 11738 km² et englobe un nombre de population de 523 656 habitants. La région fait partie du grand Erg oriental, formé essentiellement par des dunes de sable continentale, la pente est généralement orientée Sud-Nord, avec des valeurs d'altitude oscillant entre -3 m (Follia) et 125 m (Soualah). De nombreuses dépressions sous formes d'entonnoirs artificiels caractérisant la région, servant à l'implantation des palmerais et de légumes, appelée localement « Ghout ».

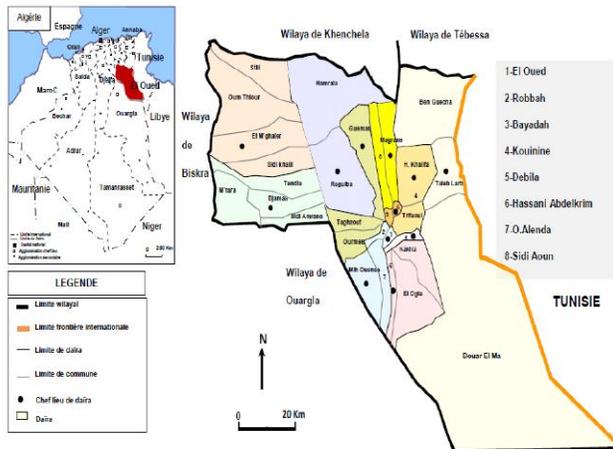


Fig.1.Situation géographique de la zone d'étude

La zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional dont l'extension couvre une superficie de 780 000 km². Ce bassin, constitue une importante dépression topographique, laquelle est sous-tendue par une cuvette structurale en forme de synclinal dissymétrique. La série sédimentaire est marquée, au centre de la fosse, par d'importants accidents tectoniques subverticaux. Les pendages des bancs sont en général faibles, à l'exception de la zone bordière située au Nord-est du bassin [2,3,4]. Cette série comporte, à sa base, des formations paléozoïques marines surmontées en discordance par les formations continentales du Secondaire et du Tertiaire, épaisses de plusieurs milliers de mètres. Le Quaternaire y succède. Il est constitué essentiellement de sables dunaires dont l'épaisseur peut atteindre quelques centaines de mètres. Seule la série supérieure présente un intérêt hydrogéologique.

Le système aquifère d'El-Oued (Fig.2) est caractérisé par la superposition de trois couches aquifères [5,6,7,8]. Il s'agit de bas en haut, de l'aquifère de Continental Intercalaire (CI), de l'aquifère du Complexe Terminal (CT) et de l'aquifère superficiel.

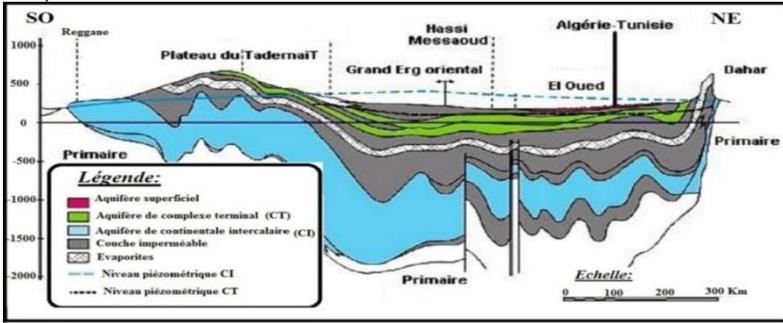


Fig.2. Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrionale (UNESCO, 1972).

L'aquifère du Complexe Terminal englobe les assises perméables du Sénomien carbonaté et du Mio-Pliocène. En fait, il est possible d'y distinguer trois nappes séparées localement par des horizons semi-perméables ou imperméables. Ces trois aquifères sont représentés par les sables du Mio-Pliocène (la première nappe de sables CT₁), par les sables, grès et graviers du Pontien (la deuxième nappe de sables CT₂), et par le calcaire fissuré et la dolomie d'âge éocène et sénonien carbonatée [3] (nappe de calcaire CT₃). La troisième nappe de calcaire se rencontre à une profondeur d'environ 250 m et s'étendue jusqu'à 700 m.

La carte piézométrique (Fig. 3) établie en mars 2017, montre que la partie haute de la nappe se trouve au sud de Ogla avec une côte de 60 m alors que la partie basse se trouve au nord de Hassi Khelifa avec une côte de 11 m. Le sens d'écoulement des eaux est orienté de sud vers le nord.

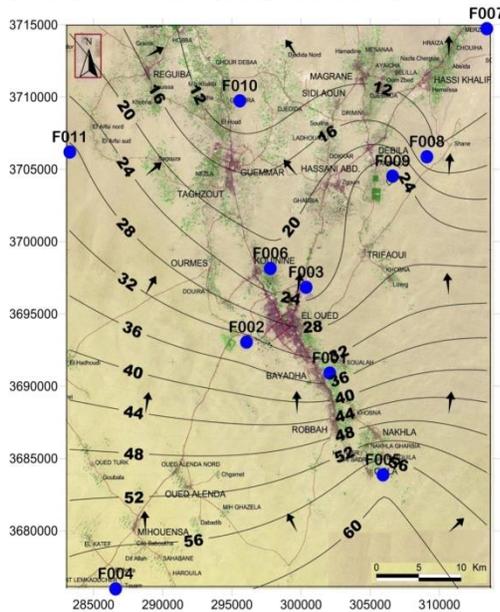


Fig.3. Carte piézométrique de complexe terminal (mars 2017)

3. Matériel et méthodes

Pour la réalisation de cette étude, une compagne de prélèvement et de mesures hydrochimiques a été effectuée sur vingt-deux (22) échantillons issues des forages de l'aquifère de complexe terminal d'El Oued (Fig.5), en mars 2017.

Les paramètres physico-chimiques (pH, température et conductivité) ont été déterminés in situ, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon, en utilisant un multi-paramètre portatif. Les échantillons ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène après avoir été filtrés et acidifiés pour être analysés au laboratoire. Les analyses ont été effectuées au laboratoire selon les techniques standard (Rodier, 1984) [9]. Les nitrates, les sulfates et les chlorures ont été dosés au spectrophotomètre type DR2000 (HACH), tandis que le calcium, le sodium et le potassium par spectrophotomètre à flamme. Le magnésium est déterminé par complexométrie et déduit de la différence (TH - Ca²⁺). Les concentrations en CO₃²⁻ et HCO₃⁻ ont été analysés par titrimétrie.

4. Résultat et discussion

4.1. Qualité des eaux pour la consommation et l'utilisation agricole

Le Tableau 1 montre la variabilité des paramètres physico-chimiques des eaux de CT, ainsi que les normes de potabilité des eaux de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS 2004) [10]. La comparaison avec les valeurs guides de l'OMS, montre que les eaux de complexe terminal sont non potables, elles sont très minéralisées et présentent des teneurs en éléments majeurs (sodium, magnésium, sulfate, chlorure et calcium) dépassant les normes recommandées par l'OMS.

Tab. 1 Variations des paramètres physico-chimiques des eaux de complexe terminal.

Paramètres	pH	CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	O ₃ ⁻ (mg·L ⁻¹)	Cl ⁻ (mg·L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ (mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ (mg·L ⁻¹)	Na ⁺ (mg·L ⁻¹)	K ⁺ (mg·L ⁻¹)	Mg ²⁺ (mg·L ⁻¹)	Ca ²⁺ (mg·L ⁻¹)
Moy	8,24	4992,73	205,04	745,36	32,02	1070,52	496,18	30,02	188,97	170,40
Max	8,52	5880,00	247,05	900,00	43,00	1238,00	580,00	44,30	258,60	187,00
Min	7,94	4600,00	183,00	681,00	15,30	888,00	437,00	24,00	148,50	152,50
Ecart-type	0,16	355,04	16,94	54,98	7,19	110,67	43,84	5,42	28,08	10,62

Pour étudier la qualité des eaux pour usage agricole, on s'est basé sur les normes de Riverside (Richard, 1954) [11] qui combine deux paramètres: le SAR (Sodium Adsorption Ratio) et la conductivité électrique. La représentation des échantillons sur le diagramme de richard montre quel s'arrangent selon deux classes (Fig.4):

a.eaux médiocres (C4S2): Les eaux sont fortement chargées en sels, elles sont susceptibles de convenir à l'irrigation des plantes tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.

b.eaux mauvaises (C4S3): Ces eaux ne conviennent pas à l'irrigation, leur utilisation en l'irrigation doit faite en sols très perméables avec bon lessivage pour des plantes très tolérantes au sel.

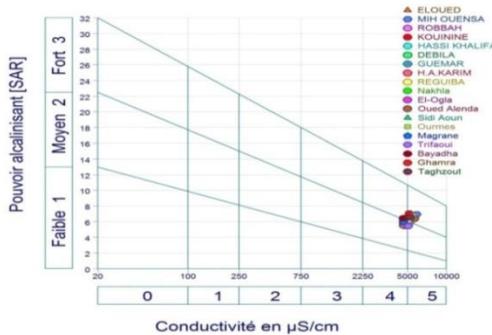


Fig.4. Diagramme de Richards des eaux du complexe terminal d'El Oued (mars 2017).

4.2. Facies chimique des eaux

Le diagramme Piper (1944) [12] a été utilisé dans le but de caractériser l'eau de l'aquifère complexe terminal. La représentation des résultats d'analyses des eaux échantillonnées sur le diagramme donne quatre faciès chimiques : sulfaté sodique (36.84 %), chloruré sodique (26.31 %), chloruré calcique (21.05 %) et sulfaté calcique (15.80 %).

4.3. L'origine de minéralisation des eaux de complexe terminal

4.3.1. La relation Na^+-Cl^- : Le graphe (Fig. 5a) montre un alignement des points, ce qui indique la même origine des deux éléments chimiques qu'est probablement la dissolution d'Halite [13]. Cependant, quelques points présentent un excès de sodium, d'autres un excès des chlorures. Cette relation se confirme par l'existence du faciès chloruré sodique.

4.3.2. La relation $\text{Na}^+-\text{SO}_4^{2-}$: Le graphe (Fig. 5b) montre une évolution proportionnelle des sulfates et du sodium, cependant le sulfate est en excès par rapport au sodium, indiquant une autre origine de sulfate, il s'agit peut être de gypse et/ou d'anhydrite. Cette relation confirme également l'existence du faciès sulfaté sodique de 36,84% des points d'eaux analysées.

4.3.3. La relation $\text{Ca}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}$: L'examen de la relation entre Ca^{2+} et SO_4^{2-} montre une évolution de sulfate indépendamment de calcium (Fig. 5c). Cette relation traduit un excès de sulfate (provient d'une origine autre que le gypse et l'anhydrite). La relation ($R= 52\%$) entre ces deux éléments est confirmée par l'existence du faciès sulfaté calcique (15.80 %).

4.3.4. La relation $\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}$: Le graphe (Fig. 5d) montre une évolution absolue des sulfates et du magnésium. Cette relation traduit la dissolution des sulfates de magnésium d'origine salifère de type méribilité (MgSO_4) formations évaporitiques caractéristiques des régions sahariennes.

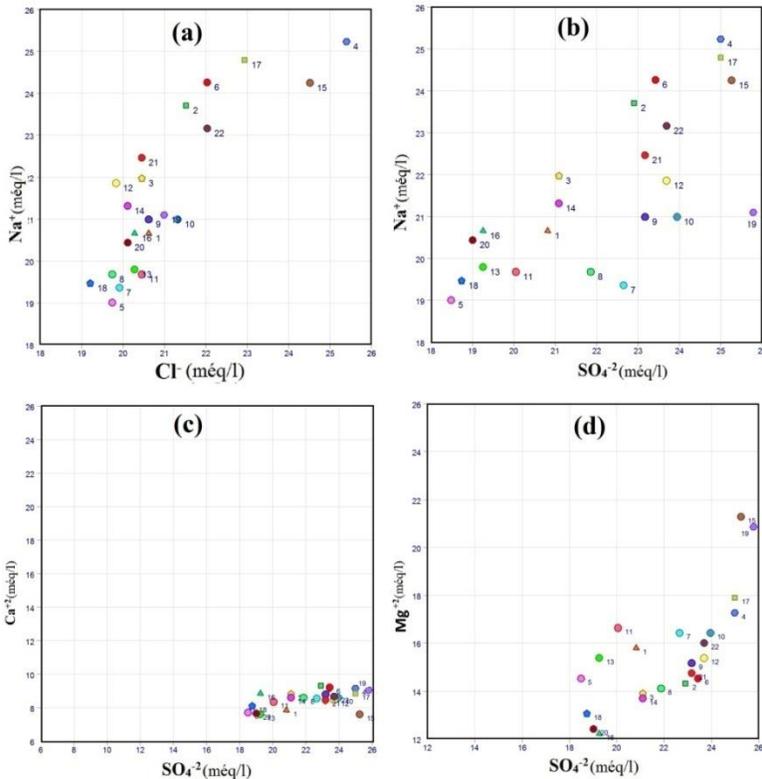


Fig.5. Relations entre les éléments majeurs: (a) Na^+ vs Cl^- ; (b) Na^+ vs SO_4^{2-} ; (c) Ca^{2+} vs SO_4^{2-} ; (d) Mg^{2+} vs SO_4^{2-} .

4.3.5. Indice d'échange de base : L'échange de base entre les eaux souterraines et les formations sablo-argileuses et argilo-sableuses de l'aquifère est mis en évidence par la relation $[(Mg^{+2} + Ca^{+2}) - (SO_4^{+2} + HCO_3^-)]$ en fonction de $(Na^+ + K^+ - Cl^-)$ [14, 15]. Cette relation permet d'éliminer les ions issus éventuellement des réactions de dissolutions de l'halite, de l'anhydrite et de gypse, en particuliers très abondants dans le réservoir de l'aquifère de CT.

Les résultats montrent une augmentation des teneurs de $(Na^+ + K^+)$ en relation avec la diminution des teneurs de $(Mg^{+2} + Ca^{+2})$ pour la majorité des échantillons.

4.3.6. Indice de saturation des eaux de complexe terminal : Etude de l'indice de saturation montre que le calcul de l'indice de saturation de la calcite et la dolomite par le programme WATEQ montre des degrés de saturation différents. En effet, celui de la calcite varie de + 0.27 à + 0.85, et celui de la dolomite varie de + 0.44 à + 1.57. À l'instar de ces résultats on peut dire que la majorité des eaux prélevées est saturée par rapport à ces minéraux. Quant aux minéraux évaporitiques (gypse, anhydrite et halite), ils montrent un état de sous saturation.

6. Conclusion

La vallée d'El Oued Souf située au Sud-Est algérien, occupe une superficie de 11738 km² et englobe un nombre de population de 523 656 habitants. Le système aquifère d'El-Oued est constitué de trois nappes de haut en bas, on distingue : nappe libre, la nappe de complexe terminale et la nappe de continentale intercalaire. La nappe de complexe terminale englobe des assises perméables du Sénonien carbonaté au Mio-Pliocène. En effet on distingue trois aquifères, séparés localement par des horizons semi-perméables ou imperméables. La carte piézométrique de la nappe établie en mars 2017, montre que l'écoulement des eaux est orienté de sud vers le nord.

L'interprétation des analyses chimiques des eaux montre la dominance des faciès évaporitiques (sulfaté sodique, chloruré sodique, chloruré calcique et sulfaté calcique). Ces eaux sont non potables, car elles sont très minéralisées et présentent des teneurs en éléments majeurs (sodium, magnésium, sulfate, chlorure et calcium) dépassant les normes recommandées par l'OMS pour l'eau potable. Elles sont aussi de qualité médiocre à mauvaise pour l'irrigation selon le diagramme de salinité américain (Richards 1954).

L'étude des rapports caractéristiques entre les éléments majeurs ont permis de montrer que la minéralisation des eaux de l'aquifère de complexe terminal est liée à la dissolution des évaporites (gypse et halite en particulier) et au phénomène d'échange de base.

REFERENCES

- [1] [1] B. BOUSELSAL et N. KHERICI. Effets de la remontée des eaux de la nappe phréatique sur l'homme et l'environnement : cas de la région d'El-Oued (Sud-Est Algérie). *Afrique Science*, 2014 Vol.10, N°3.
- [2] [2] G. Busson. Le Mésozoïque saharien. 2ème partie : Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. Edit., Paris, « Centre Rech. Zones Arides », 1970, pp 11-811.
- [3] [3] G. Busson. Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Edit., Paris, 1971, 464p.
- [4] [4] G. Castany. Bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Algérie-Tunisie). Aquifère du Continental Intercalaire et du Complexe terminal. Bull. BRGM 2 III (2), 1982, pp 127-147.
- [5] [5] UNESCO. Etude des Ressources en Eau de Sahara Septentrional. (7 vols. et annexes). UNESCO, Paris, France, 1972.
- [6] [6] OSS (Observatoire Sahara et Sahel). Système aquifère du Sahara septentrional: gestion commune d'un bassin transfrontière. Rapport de synthèse. OSS, Tunisie, 2003, 322p.
- [7] [7] A.H. Guendouz. Contribution à l'étude hydrochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara septentrional, Algérie. Ph.D. Thesis, Univ. Paris XI, Orsay, France, 1985.
- [8] [8] B. BOUSELSAL, N. KHERICI, S. HADJ-SAID. Vulnérabilité et risque de Pollution de la nappe libre d'El-Oued (SE Algérie) : application de la Méthode DRASTIC. *Bulletin du Service Géologique National*, 2015, Vol. 26, n° 1, pp 1-21.
- [9] [9] J. Rodier. L'analyse de l'eau, 7ème édition DUNOD, 1984, 1353p.
- [10] [10] OMS (Organisation Mondiale de la Santé). *Directives pour la qualité de l'eau de boisson, Vol 1 Recommandations, 3ème édition*, OMS, Genève. 2004.
- [11] [11] J.A.M. Piper. Graphical interpretation of water analysis, Transactions of the American Geophysical Union. 1944, 25: pp 914-923.
- [12] [12] L.A. Richards. Diagnosis and improvement of saline alkali soils. Washington, DC: US Department of Agriculture, Handbook no. 60. 1954.

- [13] [13] A. Alassane, Trabelsi, R., Devonon, L.F., Odeloui, D.J., Boukari, M., Zouari, K., & Mama, D. Chemical evolution of the continental terminal shallow aquifer in the south of coastal sedimentary basin of Benin (west-Africa) using multivariate factor analysis. *Journal of water resource and protection*, 2014, 7, pp 496-515.
- [14] [14] W. MC LEAN, J. JANKOWSKI and N. LAVITT. Groundwater quality and sustainability in alluvial aquifer, Australia. In: *Sililo et al., eds. Groundwater, past achievement and future challenges*. Rotterdam: Balkema., 2000, pp 567–573.
- [15] [15] M.G. GARCIA, M. DE HIDALGO and M.A. BLESA. Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province Argentina., *Journal of Hydrology*, 2001, 9, pp 597–610.

Effets de l'érosion hydrique dans la commune d'Attécoubé, Abidjan Côte d'Ivoire

Brou Etienne N'dri¹, Kadio Hilaire Niamke², Kouadio Boyossoro Hélène³.

¹Côte d'Ivoire, Université Jean Lorougnon GUEDE de Daloa, BP 150 Daloa, +225 48612450, nbekondo@gmail.com

²Côte d'Ivoire, Université Félix HOUPHOUET-BOIGNY d'Abidjan, 22 B.P 582 Abidjan 22+225 58149427, niamkehilaire@yahoo.fr

³Côte d'Ivoire, Université Félix HOUPHOUET-BOIGNY d'Abidjan, 22 B.P 801 Abidjan 22+225 08302583

Résumé

Cette étude, qui est essentiellement un travail de terrain, fait l'inventaire des effets de l'érosion hydrique dans la commune d'Attécoubé. Munis d'un appareil photo et de ruban métrique, nous avons visité zones où les indices et les effets de l'érosion hydrique sont manifestes. Les effets causés par l'érosion hydrique en amont sont des pertes énormes de terre avec pour conséquences des déracinements d'arbres, des écroulements d'édifices et même des mouvements de masse. En aval, les conséquences sont plus importantes. Les particules arrachées depuis les sommets et flans des plateaux, transportées par le ruissellement puis déposées causent d'énormes désagréments environnementaux. Le spectacle qui se dessine est l'envasement et l'engloutissement des maisons, des dépôts de boue dans les maisons, des inondations et des ensablements des routes. A tout cela, il faut ajouter le traumatisme des populations à chaque évènement pluvieux.

Mots clés : Erosion hydrique, conséquences observées, Attécoubé, aval, amont, traumatisme

Abstract

This study draws up the inventory of the effects of water erosion in the district of Attécoubé. With a camera and a tape measure, we visited places within the study area where it is likely for us to meet the effects of erosion. The effects of water erosion upstream are the wash of sediments away with consequences being mass-wastings, the collapse of structures built on plateaux. Downstream, the consequences are more significant. Particles removed from top and side of plateaux, transported by runoff then deposited, cause serious environmental troubles. The result of this is the silting up and engulfment of houses, some mud deposit in houses, floods and roads sanding over. Among the effects of water erosion in the district of Attécoubé is the traumatism of population during rainy seasons.

Key Words: water erosion, Attécoubé, downstream, upstream, traumatism

I. INTRODUCTION

L'érosion hydrique des sols a souvent été présentée comme un danger majeur pour les sols car elle décape les horizons superficiels jusqu'à la roche (Roose, 1993). Ces conséquences sont nombreuses, dramatiques et coûteuses pour l'économie et constitue de ce fait, aujourd'hui une préoccupation mondiale (N'Go, 2000). Le cas urbain reste peu étudiés, pourtant cet aspect est à l'origine de véritables catastrophes tels que des problèmes environnementaux, psychologiques, surtout socio-économiques. Certains de ces aléas vont au-delà de la commune d'étude pour s'étendre à toute la ville d'Abidjan. L'objectif de ce travail est de présenter les conséquences observées de l'érosion hydrique dans la commune d'Attécoubé.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Pour mener à bien cette étude, plusieurs visites de terrain ont été menées sur le paysage vallonné de la commune d'Attécoubé. Celles-ci ont permis d'observer et répertorier les dégâts générés par l'érosion hydrique dans la commune d'Attécoubé. Les travaux de terrain comprennent les observations détaillées des effets de l'érosion hydrique, des mesures diverses ainsi que des prises de vue. Le matériel utilisé est composé d'un appareil photographique pour les prises de vue numérique et d'un ruban métrique pour les caractéristiques métriques des phénomènes observés.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Conséquences à l'amont

Les rigoles et les ravines incisées par le ruissellement sur les flancs des plateaux constituent des menaces les habitations construites en amont (**Figure 1**). L'occupation de ces zones «dangereuses» ou «à risque» est fréquente dans cette commune. Ce comportement est à l'origine des mouvements de masse.



Figure 1. Habitations construites en amont de pente, menacées d'écroulement, sous l'action de l'érosion de versant qui s'y opère (Santé II, juin 2005) (Photo N'BRI B. E)

3.2. Conséquences à l'aval

- Envasement et engouffrement des bâtiments par la boue

Les sédiments arrachés depuis le sommet des pentes se déposent dans les zones basses. Ce qui provoque l'envasement des dépressions. Au quartier Agban village, les dépôts des sédiments arrachés et transportés par les eaux de pluie et de ruissellement provoquent l'engouffrement des maisons (**Figure 2**). Ces sédiments se déposent également à l'intérieur des maisons construites dans les dépressions (**Figure 3**). On observe aussi la destruction des maisons, causée par la descente rapide des masses de terre.



Figure 2. Maisons construites en bas de pente, engouffrées par la boue, dont les toitures ne sont plus qu'environ à 1 m du sol, Agban village, mai 2005 (Photo N'BRI B. E)



Figure 3. Dépôt de sédiments à l'intérieur d'une maison située au bas de pente, suite à un glissement de terrain (Agban-Attii, juin 2006) (Photo N'BRI B. E)

- Phénomènes d'ensablement

L'érosion provoque aussi des dégâts sur les routes (figure 4). La terre exportée se dépose sur la chaussée et comble les réseaux de collecte des eaux. La principale route d'Attécoubé (Rive droite) en est constamment victime.



Figure 4 : Ensablement de voies bitumées, provoquées par le dépôt de sédiments, produits d'érosion, juin 2006 (Photo N'BRI B. E)

- **Obstructions des caniveaux.** Les eaux de ruissellement entraînent en plus des particules de sol détachées, d'autres objets dont l'ensemble cause l'obstruction des caniveaux (figure 5).



Figure 5. Caniveau obstrué, Mossikro (Photo N'DRI B. E.)

- **Inondations.** L'obstruction des caniveaux déjà rares couplé à la construction anarchique des maisons de fortune dans les vallées entrave le drainage régulier et normal des eaux de ruissellement. Cette situation crée de véritables « mares d'eau » pendant les saisons de pluies. La figure 6 présente une cours inondée après une demi-journée de pluie.



Figure 6. Inondation d'une cour à Mossikro après une pluie diluvienne (juin 2005) (Photo N'BRI B. E)

- **Instabilité des flancs et effondrement des ouvrages.** Les glissements des talus (figure 7) sont fréquents au niveau des quartiers comme Gbébouto, Agban-Attié et constituent le paroxysme de l'érosion hydrique à Attécoubé. Leur déclenchement entraîne des dégâts matériels énormes (destruction de maisons, abandon et invasion de boue de maisons) ainsi que des pertes en vies humaines.



Figure 7 Glissement de terrain (pente 75 %), causant la destruction d'habitations avec des pertes en vies humaines (Agban-Attié) (Photo N'BRI B. E)

3.3. Traumatisme des populations

La saison des pluies constitue pour les populations de la commune d'Attécoubé un véritable cauchemar eu égard aux scènes dramatiques qu'ils ont retenues des événements antérieurs. En effets, les manifestations passées des inondations et des mouvements de terrain ont provoqué de nombreux blessés et des pertes en vies humaines. Ce qui suscite naturellement, lorsqu'il pleut, un sentiment de peur.

DISCUSSION

L'érosion des sols est à l'origine de deux types de problèmes.

D'une part, on a les conséquences sur site où peu d'eau s'infiltré dans le sol et plus d'eau ruisselle. Il y a dégradation du sol. Les zones où cet effet se fait ressentir se situent au niveau des parties convexes où le sol est moins épais. La perte de sol contribue à la détérioration de l'environnement. D'autre part, les problèmes générés par l'érosion ne sont pas que limités aux zones de perte de sol, car les sédiments érodés doivent atterrir quelque part. Les particules détachées, épanchus peuvent facilement être emportés, drainés par les eaux de ruissellement et sédimentent dans des milieux récepteurs favorables.

Ces sédiments s'accumulent au bas des versants et contribuent à la détérioration des routes, pouvant aller jusqu'à la fermeture de celles-ci. Ils sont aussi à l'origine régulièrement l'obstruction des systèmes de canalisation des eaux, Ces sédiments terreux concourent également l'ensablement et à la pollution des eaux de surface (lagunes), Les conséquences de l'érosion in situ et hors site n'ont pas toutes la même importance ni la même durée dans le temps. Le recouvrement des caniveaux, l'ensablement des routes sont des conséquences à court terme. Ces problèmes posent peu de difficultés techniques en ce sens qu'ils peuvent être résolus par des interventions. L'impact le plus important à long terme est la perte du sol. La formation par exemple, d'un centimètre de sol à partir de matériau transporté peut prendre des milliers d'années. A l'échelle de générations humaines, le processus peut être considéré comme *quasi* irréversible.

CONCLUSION

L'examen de l'érosion hydrique dans la commune d'Attécoubé révèle que celle-ci cause des effets variés. Au sommet des plateaux, l'on assiste au détachement de particules causant l'amincissement de plus en plus du sol, et même provoquant l'instabilité des flancs. Au bas des pentes et dans les nombreuses dépressions, les effets et conséquences sont très diversifiés. Les particules arrachées par le ruissellement depuis les sommets vont se déposer dans ces zones. On assiste alors aux phénomènes d'engloutissement des maisons, d'envasements des maisons, d'ensablement des routes, d'obstruction des canalisations, d'envasement et de pollution de la lagune. Les conséquences ne se limitent pas uniquement à la dégradation de l'environnement terrestre puisque les populations sont habitées par une hantise à l'approche et pendant les moments pluvieux.

Références

- [1] BNETD, Quartiers précaires d'habitats à Abidjan. Atelier d'urbanisme d'Abidjan, (1992) 3-87.
- [2] Le Bisonnais Y., Thorette J., Bardet T. C., Daroussin J, L'érosion hydrique des sols en France. Rapport d'activités. Institut Français de l'Environnement, Institut National de la Recherche Agronomique 2002.
- [3] N'dahoulé Y.R., Les risques naturels en milieu urbain, cas de Santé III Mossikro dans la commune d'Attécoubé Mémoire de Maîtrise, Université de Cocody, Côte d'Ivoire 1999.
- [4] N'dri B.E., Analyse des facteurs et quantification du ruissellement et de l'érosion hydrique par les outils de télédétection et systèmes d'information géographique dans la commune d'Attécoubé (Abidjan, Sud de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de doctorat de l'Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire 2008.
- [5] N'go Y. A., Etude de l'érosion des sols de la région de Buyo : analyse des facteurs et essai d'évaluation des risques par la télédétection et les SIG, thèse de doctorat de 3e cycle, Univ. Abobo-Adjamé 2000.
- [6] RGPH, Rapport national sur l'état de la population et de l'habitat en Côte d'Ivoire, phase 1, (1998).
- [7] Roose E. J., Innovation dans la conservation et la restauration des sols. Cah. ORSTOM, série Pédologie, vol. XXIII, n°2, (1993)147-155.
- [8] Roose E. J. ET Chéroux M., Les sols du Bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire. ORSTOM Adiopodoumé (1966).
- [9] Traoré D., Dotation d'une collectivité locale d'outil de pilotage social : Mairie d'Attécoubé. DESS, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire 2002.

Modélisation du transport solide et étude analytique de quantification de l'envasement dans le barrage de l'oued Siliana

Mohamed Habib Sellami¹ et Kochta Mohamed¹

Ecole Supérieure des Ingénieurs de Medjez El Bab, IRESA, Université de Jendouba

Sellami.fac@gmail.com, mh.sellami@planet.tn

Résumé

Dans ce travail nous nous intéressons à proposer un modèle de quantification des envasements menaçant les ouvrages hydro-agricoles en générale et les barrages en particulier. Ce modèle se basent sur l'application des équations d'équilibre de masse, d'énergie et de mouvement et en utilisant des formulations empiriques du transport solide et de l'hydraulique fluviale. De même les interfaces entre les équations introduites et les outils du système d'information géographique seront détaillées afin de présenter les résultats sous formes de carte numériques faciles à exploiter pour la prise des décisions. Une première application de ce modèle au bassin versant d'oued Siliana et pour son barrage a été faite.. Nous avons évalué l'érosion pour tout le bassin versant, calculé le débit hydrique et le transport solide pour oued Siliana, estimé l'envasement dans le retenue du barrage. Une comparaison des calculs aux mesures bathymétriques. Les résultats sont très satisfaisants.

Mots clés : Transport solide, érosion, envasement, modélisation, Barrage Siliana

Modeling the solid transport and analytical quantification study for siltation quantification in Siliana river dam

Abstract

In this work we are developing a model for quantifying siltation threatening hydro-agricultural structures in general and dams in particular. The basic equations used are the energy balance equation, the mass balance equations and motions balance equations. Also we have applied many empirical formulas for fluvial hydraulic and solid transport.. The interface between the equations used and the geographical information system tools was well explained. And results were presented in numerical maps format in order to serve simply in the decision making process. A first application of the model to Siliana river watershed and its dam was done. We have evaluated the erosion in all the watershed, calculated water flow and solid transport in the river and estimated the siltation in Siliana dam . A comparison of calculus to a bathymetric survey in the lake of the dam was done. Results are well satisfying.

Key Words: Transport, erosion, siltation, modeling, Siliana river dam

1. Introduction

Les ouvrages hydrauliques tels que les barrages et les lacs collinaires, considérés comme principales techniques de récupération des eaux de ruissellement, sont menacés par les effets du changement climatique manifestés par la rareté des pluies douces et des apports solides intenses. Proposer des formules et développer des modèles pour l'estimation exacte des apports solide et hydrique au niveau des bassins versants dans le but de gérer de façon optimale le fonctionnement des retenues des barrages est un axe de recherche très demandé [1, 2, 4]. Nous voulons dans ce travail mener une étude de comparaison entre différentes formules établies dans différentes conditions afin d'estimer les apports solides et hydriques dans le bassin versant de l'oued Siliana

2. Théorie de base du modèle

L'étude de modélisation du transport solide ne peut pas se séparer de l'étude de modélisation de l'écoulement hydrique dans le bassin versant. De se fait les équation de base à utiliser sont les mêmes et nous citons celles de Navier Stokes sous les urs formes générales et sous leurs formes simplifiées lorsque nous introduisons des hypothèses sur le fluide en écoulement à savoir principalement fluide Newtonien et les variations verticales sont négligées devant les variations horizontales. Elles se présentent encore comme la combinaison entre les équations de conservation de la masse (équation de continuité) et celles de conservation des mouvements et de l'énergie. Elles sont écrites dans le cas général sous la formulation différentielle suivante [4, 5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V}) = 0$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \vec{\tau} + \rho \vec{F}$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \vec{\nabla}[(\rho E + p) \vec{V}] = \vec{\nabla}(\vec{\tau} \cdot \vec{V}) + \rho f \vec{V} - \vec{\nabla} \vec{q} + \vec{R}$$

Dans ces équations : t : Le temps (unité SI : s) ; ρ : La masse volumique du fluide (unité SI : $kg.m^{-3}$) ; \vec{V} (u, v, w) : La vitesse d'une particule fluide (unité SI : $m.s^{-1}$) ; p désigne la pression (unité SI : Pa) ; $\vec{\tau} = (\tau_{i,j})_{i,j}$: Le tenseur des contraintes visqueuses (unité SI : Pa) ; \vec{F} : La résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide (unité SI : $N.kg^{-1}$) ; E : L'énergie totale par unité de masse (unité SI : $J.kg^{-1}$) ; \vec{q} : Le flux de chaleur perdu par conduction thermique (unité SI : $J.m^{-2}.s^{-1}$) ; \vec{R} : La perte de chaleur volumique due au rayonnement (unité SI : $J.m^{-3}.s^{-1}$). $\vec{\nabla}$: L'opérateur Nebla

La résolution de ces équations nous permet de formuler les puissances qui accompagnent l'écoulement hydrique et par la suite la matière solide transportée (5). Une expression théorique du débit de transport solide sont les suivantes :

$$q_s = 5.75 \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} h_1 C_{ch-sol}^{h_0} \left(\frac{h_0}{1 - \frac{h_0}{h_1}} \right)^b \left\{ \log \left(\frac{30.2 h_1 F_{cor}}{d_{65}} \right) \int_{\frac{h_0}{h_1}}^1 \left(\frac{1-h}{h} \right)^b dh + \int_{\frac{h_0}{h_1}}^1 \left(\frac{1-h}{h} \right)^b \log(h) dh \right\}$$

h_0 : Hauteur de l'eau au niveau du lit de l'oued ou du fond de la lame d'eau, $C_{ch-sol}^{h_0}$: Concentration de la charge solide à la

hauteur h_0 , b: Constante d'intégration entre 0 et 5, F_{cor} : Facteur de correction pour des conditions, h: Une altitude dans*

l'eau

3. Analyse analytique de quantification de l'envasement dans barrage de Siliana

3.1. Caractéristique morphologiques et Délimitation du bassin versant principal

Le bassin versant Oued Siliana est situé au nord ouest de la Tunisie à environ 125 Km de la capitale Tunis ; il prend naissance depuis les hauteurs de Makther où il est nommé oued Ousafa [3]. Il est orienté Sud-Nord et il est bordé au Sud par la dorsale tunisienne, au nord par la ligne des reliefs collinaires Masouages et El Arab, à l'Est par jebel Bargou.. Une délimitation du bassin versant est dans la figure suivante

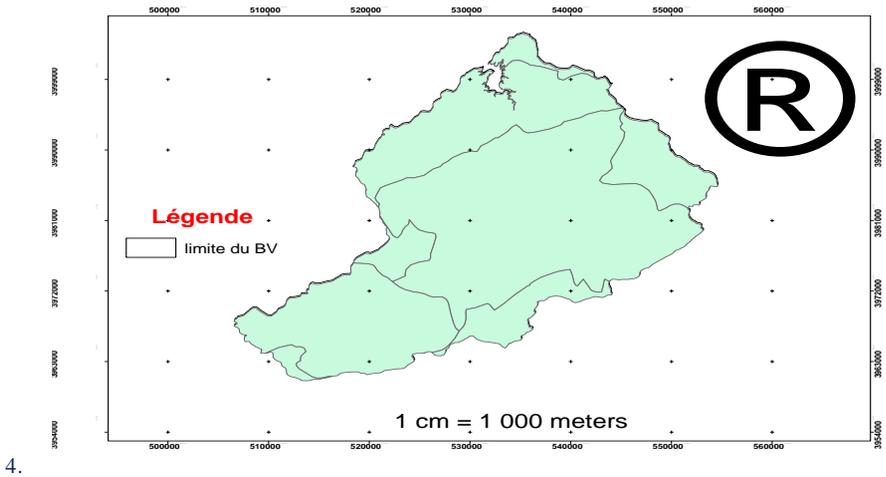


Figure 1 : Délimitation du bassin versant d'oued Siliana

Le bassin versant occupe une superficie de 1040 km² et un périmètre de 183.318 km. La forme de ce bassin versant est allongée avec un talweg principal de longueur 34 km, un temps de concentration de 10.8 h et une vitesse de concentration de 8 km/h. La courbe hypsométrique (figure n° 2) montre que l'altitude est entre 350 m et 1250 m. Soit une médiane de 680 m.

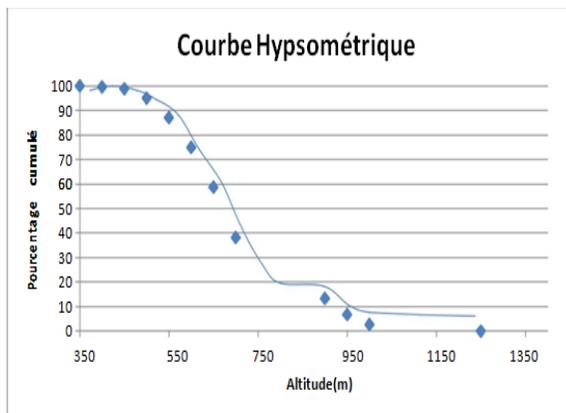


Figure n° 2 : Courbe hypsométrique du bassin versant oued Siliana

3.2. Analyse hydrologique et de l'envasement dans le bassin versant

Nous allons prendre, le barrage d'oued Silina, comme système autour duquel nous analysons les apports solide et liquide du bassin versant. Nous avons calculé les différents termes du bilan hydrologique sur une période allant de l'année 2000 jusqu'à l'année 2011 [3]. La figure suivante présente la variation du volume d'eau recueilli dans la retenue du barrage [3].

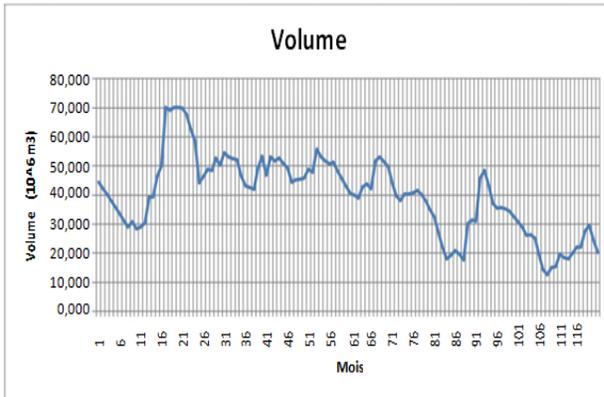


Figure 3 : La variation du volume de la retenue depuis l'an 2000 jusqu'à 2011.

Nous remarquons que le volume d'eau dans la retenue du barrage est globalement en diminution. Ce volume a passé d'un maximum de l'ordre $70\ 000\text{M m}^3$ à $12\ 000\text{M m}^3$. Cette évolution a été expliquée en analysant aussi bien les apports liquide et solide. En fait **nous** avons assisté à une diminution des apports en pluie, une augmentation de l'évaporation et une augmentation de l'envasement. En effet nous trouvons un ruissellement de 30mm, valeur comparable à celle trouvée par les formules de Tixeront, Algérienne et Chaumont. Soit un apport hydrique moyen annuel de $33\ 10^6\text{ m}^3$. Pour l'estimation des apports solide, nous avons utilisé plusieurs formules. Ces apports peuvent atteindre selon la formule jusqu'à 2 t/an. Le tableau suivant récapitule nos principaux résultats

Tableau 1 :Analyse quantitative des apports solides

Formule utilisée	E(t/km ² /an)	E (10 ⁶ .t/an)
La formule de Sami	11	0.01
La formule de Tixeront	190	0.2
La formule Sogreah	587	0.61
La formule de Fournier	1863	1.94
La formule de Coyne et Bellier	789	0.82
La formule de la DG/CES (projet FAO/SIO)	1421	1.48

Conclusion

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à la modélisation des apports hydriques et solide dans le bassin versant d'oued Siliana. Nous avons essayé de comparer entre plusieurs formules afin de chercher celle qui s'adapte le plus aux conditions locales. Nous avons constaté que le volume d'eau dans la retenue du barrage a passé d'un maximum de l'ordre $70\ 000\text{M m}^3$ à $12\ 000\text{M m}^3$ entre la période allant de l'année 2000 à 2011. Cette évolution a été expliquée en analysant aussi bien les apports liquide et solide. En fait nous avons assisté à une diminution des apports en pluie, une

augmentation de l'évaporation et une augmentation de l'envasement. En effet nous trouvons un ruissellement de 30mm, valeur comparable à celle trouvée par les formules de Tiexeront, Algérienne et Chaumont. Soit un apport hydrique moyen annuel de $33.10^6 m^3$. Pour l'estimation des apports solide, nous avons utilisé plusieurs formules. Ces apports peuvent atteindre selon la formule jusqu'à 2 t/an.

Références bibliographique :

- [1] Alain RECKING 2008 'Evaluation des formules de transport solide en rivière avec prise en compte de l'échelle temporelle' Pôle Grenoblois d'Etude et de Recherche, ISERE
- [2] Erwan LE BARBU 2011 " Méthodologie de mesure du transport solide en Loire » CETE Normandie Centre – Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois
- [3] Kochta Mohamed 2016 « Etude des apports solides et hydrique du barrage de l'oued Siliana » PFE, encadré par Mohamed Habib Sellami, ESIM.
- [4] Sellami Mohamed Habib 2015 " Hydraulique: De la théorie à l'application. Hydraulique Agricole : Mise en équation, conception et dimensionnement » EdLivres, France, 142 pages ISBN: 978-2-332-98572-9
- [5] Sellami Mohamed Habib 2016 « Evaluation des impacts environnementaux des projets. Aspects théorique et de modélisation. Outils de base pour la quantification des impacts des projets. Etude des cas pour les inondations et la réutilisation des eaux usées traitées » Livre Edition Universitaires Européenne, 104 pages, ISBN 978-3-639-80672-4

Devenir des sources hydriques dans les villages kabyles

Sadjia Halit¹, Abderrezak Iddir²

¹Doctorante en Architecture, institut d'architecture et d'urbanisme de Blida, Beni-Douala centre Tizi-Ouzo +213 696 453 171, sadj.halit@yahoo.com

² Maitre conférence A, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 63, rue des frères Belhocine, commune de Tizi-Ouzou) +213 549 345 779, email : id.rezak@gmail.com

Résumé

Toutes les implantations humaines sont faites en fonction de la disponibilité de l'eau dans les sites choisis. Ce phénomène est également observé en Kabylie. En effet, tous les villages de Kabylie regorgent de sources d'eau souvent très importantes et abondantes, elles sont matérialisées par des fontaines, évidemment avec des formes qui évoluent à travers le temps. Ces dernières ont acquis une place importante dans la vie quotidienne et substantielle des villageois, notamment dans leurs pratiques socioculturelles.

Il est à signaler qu'après l'acheminement de l'eau potable dans les foyers, les fontaines ont été pratiquement désertées et abandonnées au profit de la sédentarité sachant que les villageois, particulièrement les femmes, étaient éreintées de cette corvée. Toutefois, ces dernières années un retour vers les fontaines a été observé dans beaucoup de villages, accompagné d'une prise de conscience de ces espaces qui restent un patrimoine et un legs de nos ancêtres

Notre recherche s'appuie sur des observations, des entretiens et questionnaires pour les habitants, les usagers et les services des autorités publiques concernées. En premier lieu, nous allons tenter de comprendre le devenir de ces fontaines, à l'heure où les déséquilibres planétaires et environnementaux ont touché les quatre coins du globe. Il s'agira déjà de retracer le processus de vie de ces fontaines. Dans un second lieu, comprendre comment sont réintégrées et réappropriées ces sources hydriques dans la vie quotidienne des villageois, notant bien que même les autorités y contribuent.

Mots clés : Fontaines, eau, villages, la Kabylie, devenir, réappropriation

Becoming water sources in kabyle villages

Abstract

All the human implantations were done according to the availability of water in the choosing sites. This phenomenon is also observing in Kabylie. Indeed, all the villages have many water sources, often very important and abundant. They were materialized by fountains, oblivious with shapes that evolve through time.

This one had an important place in the substantial and daily life of the villagers, especially in their socio-cultural practices.

It should be noted that after the delivery of drinking water to homes, the fountains were deserted and abandoned in favor of sedentary lifestyle. Knowing that the villagers especially women were exhausted from this chore. However, this last year, a return to the fountains is observed in many villages, accompanied by an awareness of these spaces, which are a heritage and legacy of our ancestors.

Our research is based on observations, interviews and questionnaires, for inhabitants, users and the public authorities concerned. In the first time, we will try to understand the future of these fountains, at the time of global and environmental imbalances have touched the four corners of the globe.

In the second time, understand how are these reintegrated and appropriated in the daily life of the villagers. Noting that even the authorities contribute for this.

Key Words: fountains, water, Kabylie, villages, appropriation, becoming

I. INTRODUCTION

La présence de l'eau dans une région donnée est une caractéristique fondamentale pour la création et l'implantation d'établissements humains, et ce depuis la création du monde. Cette eau se manifeste sous plusieurs formes: lacs, rivières, eaux souterraines, etc. cela est observé dans toutes les régions, notamment dans la région de Kabylie, où les villages regorgent de beaucoup de sources d'eau souvent importantes et abondantes. Ces sources sont matérialisées et aménagées en fontaines, ayant évoluées et pris plusieurs formes au fil du temps. Cette évolution formelle est suivie par une évolution fonctionnelle, pouvant être croissante ou décroissante. Sachant bien que ces fontaines occupent une place très importante dans la vie quotidienne des villageois. Cette importance est d'ordre substantielle, sanitaire, hygiénique, économique mais également socio—culturelle. Dans cette recherche, basée sur des observations, des entretiens, des questionnaires ainsi que des supports photographiques, nous tentons de retracer cette évolution observée sur les fontaines dans beaucoup de villages, puis comprendre comment sont réintégrées dans la vie villageoise aujourd'hui.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

a. Identification du contexte d'étude

La fontaine ou les fontaines, représentent un espace fondamental et structurant dans l'architecture villageoise de Kabylie; appelée en langue kabyle « tala ». En effet, un village peut regorger plusieurs fontaines. Cette présence d'eau en Kabylie est due à la situation des villages dans ou entre les massifs montagneux; la délimitation par la mer Méditerranéenne du côté nord; ainsi que le taux de pluviométrie assez important, atteignant une moyenne de précipitation annuelle de plus 1000mm/an en 2011 dans la commune de Larbaa-n'Ath-Irathen (révision PDAU, 2016, P.6). Tous cela renforce la présence de nappes phréatiques qui restent abondantes au long de l'année, se manifestant en source jaillissante.

b. Le rôle de la fontaine

En Kabylie, la fontaine a occupé un rôle important dans la vie quotidienne des villageois, cette importance se manifeste sur plusieurs plans: économique, socio-culturel, sanitaire, etc. le coté socio-culturel reste le plus imposant, si bien que le dictionnaire de la culture berbère en Kabylie définit la fontaine comme «un très important lieu de socialisation dans la vie féminine, qui permettait aux femmes de sortir de la maison et de faire bien des rencontres diverses..., les femmes s'y retrouvaient, y échangeaient les nouvelles ... »(Lacoste-Dujardin, 2005). Cette espace était destiné principalement aux femmes; de ce fait, une organisation des horaires était mise en place par les villageois, des heures destinées aux femmes et des heures où les hommes étaient autorisés à s'y rendre.

Cette définition met le point également sur les autres aspects. Du point de vue économique, « il semble que Tala, à proximité de quelques potages irrigués... » (Lacoste-Dujardin, 2005), sachant que le capital économique en Kabylie était basé sur l'agriculture, l'oléiculture et l'élevage; les villageois s'appuient sur ces fontaines pour arroser leurs potages, leurs arbres fruitiers: mais aussi, les hommes ramènent leurs troupeaux, généralement en fin de journée, aux abreuvoirs aménagés à proximité (Bourdieu, 2015).

Du point de vue sanitaire et hygiénique, les villageois puisent de l'eau pour leurs besoins quotidiens (cuisine, ménage), cependant, il est à noter que la plupart des tâches ménagères y sont effectuées sur place (laver le linge, la laine, les ustensiles...), « les femmes fréquentaient la fontaine au moins deux fois par jour, matin et soir, pour l'approvisionnement de la maison en eau, et elles y venaient aussi y laver le linge » (Lacoste-Dujardin, 2005); mais surtout prenaient leurs douches et y effectués leurs toilettes et ablutions. Des pierres et des bassins sont aménagés pour effectuer ces différentes tâches, leur permettant d'acquérir une certaine hygiène.



Photo 1 ancienne photo de fontaine, source: Encyclopédie berbère-revue.org |

c. **Evolution de l'usage des fontaines**

Cette importance des fontaines a prévalu, jusqu'à l'acheminement de l'eau potable dans les villages. En effet, après l'indépendance, beaucoup de villages en Kabylie ont été raccordés, au fur et à mesure, en eau potable. Les villageois, particulièrement les femmes, étant éreintées par les conditions de vie très difficiles, ont alors adopté cette nouvelle commodité, qui leur offrait beaucoup de confort. Néanmoins, les fontaines étaient fréquentées que par une minorité de gens, à défaut de pratiques religieuses, de rituels sacrés ou dans les rares périodes où l'eau diminuait dans les robinets.

Cet abandon n'était pas sans conséquences pour cet espace, du fait que, d'importantes dégradations des sources et des fontaines ont été constatées dans toute la région, particulièrement les sources les plus éloignées du tissu villageois ; ces fontaines sont devenues alors insalubres, inaccessibles et impliquant même la disparition ou l'aridité de certaines.

Toutefois ; ces dernières années, un retour important vers les fontaines est observé, les citoyens s'y rendent de plus en plus vers cet espace pour puiser l'eau.

Aujourd'hui de nouvelles formes de fontaines sont apparues ; Elles consistent en des « puits et forages » réalisés par des acteurs privés, des villageois ou des citoyens, ayant trouvé de l'eau dans leurs propriétés, et qu'après des installations et analyses biophysiques et chimiques nécessaires, plutôt coûteuses, généralement réalisées par des équipes étrangères, certains propriétaires ont mis ces forages et ces puits à disposition des villageois, voire même, des agglomérations et des villages voisins.

Photo 2. les fontaines en période estivale, source : auteur



d. **Questionnements et enquêtes réalisées**

Pour la réalisation de ce travail, en plus des observations et des visites répétées, nous avons eu recours à des enquêtes par des entretiens et des questionnaires, avec des villageois et des usagers de ces espaces. Nous nous sommes intéressés à deux villages situés dans la même région, (commune de «Laarba N'ath Irathen»), présentant deux cas de figures différents ; le premier est le village de « Taourirt Mokren », disposant de beaucoup de fontaines dans différents quartiers. Le second est le village de « Ait Atteli », disposant d'une seule fontaine fonctionnelle, (forage depuis 2009), située à une certaine distance du village, sachant que les fontaines dont il disposait ont toutes disparu, certaines taries et d'autres enterrées sous des éboulements de terres. Pour notre enquête nous avons pris un échantillon de 20 familles pour chaque village, auxquels nous avons posé principalement les questions suivantes :

-Question 1 :« Puisez-vous de l'eau de la fontaine ? OUI / NON»

Et dans le cas de réponse positive nous posons la seconde question :

-Question 2 :«Vous puisez l'eau : -quotidiennement, -souvent, -rarement » ?

Nous avons également poussé nos enquêtes par des entretiens avec d'autres villageois, les comités de villages et les services d'hygiène de l'APC de Laarba n'Ath Irathen, avec lesquels nous avons effectué des sorties et des visites d'inspection des fontaines.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Présentation des résultats de l'enquête

Les résultats obtenus sont très pertinents et nous confirment notre postulat de départ du fait qu'un retour en masse vers les fontaines est observé, les tableaux suivants présentent les résultats quantitatifs primaires obtenus.

Tableau 1. Résultats de la 1ere question du questionnaire dans les deux villages.

Question 1 : « Puisez-vous de l'eau dans la fontaine ? »		
Réponse	OUI	NON
Le village		
Taurirt Mokren	18	2
Ait Atteli	13	7

Tableau 2. Résultats de la 2e question du questionnaire dans les deux villages.

Réponse	Question 2 : « Puisez-vous de l'eau : quotidiennement, souvent, rarement ? »		
	Quotidiennement	Souvent	Rarement
Taurirt Mokren	12/18	4/18	2/18
Ait Atteli	5/13	5/13	3/13

3.2. Réintégration et réappropriation des fontaines

Dans les villages de Kabylie, un retour aux fontaines est observé ces dernières années. Les villageois se sont réappropriés ces espaces en les réintégrant dans leur vie villageoise, en puisant de l'eau quotidiennement et en remplissant des bouteilles ou des jerricans. Contrairement aux temps anciens, où les usagers se rendaient à pied ou sur un âne ; aujourd'hui, même les voitures peuvent y accéder dans la mesure du possible.

Cette réappropriation et réintégration se concrétise par la mise en place d'aménagements et de réaménagements, qui sont d'ordre fonctionnels et esthétiques.

3.2.1. Aménagement et réaménagement des fontaines

Du point de vue fonctionnel : cela consiste en la mise en place de tuyaux, robinets et dallages, facilitant le remplissage des bidons, tout en limitant le gaspillage de l'eau, autrefois versé dans les champs et potages de proximité. Ces installations se complètent par la construction d'un ou de deux réservoirs (selon la capacité de la fontaine), permettent aussi de réserver cette eau pour les périodes de crise tout en gérant la distribution aux gens.



Photo 3 aménagement fontaine village Igwersafen, source: auteur



Photo 4 aménagement fontaine village Tifaredoud, source: auteur

Du point de vue esthétique, l'aménagement ou le réaménagement est reflété par la mise en place de revêtements, de faïences et de pierres de taille qui sont des éléments fondamentaux. Bien que ces derniers s'avèrent aussi sanitaires et nécessaires, du fait qu'ils permettent la propreté et la pureté des lieux, ainsi que la facilité de leur nettoyage. On ajoute subséquemment, la mise en place d'éléments de décoration et d'objets artisanaux tels les jarres, les troncs d'arbres ou autres, qui rappellent dans un certain sens, les traditions ou l'aspect architectural des villages et des maisons kabyles.

Ces aspects permettent d'intégrer les fontaines comme des éléments d'aménagement urbain, qui participent à l'embellissement et à l'amélioration de la qualité des espaces, des quartiers et des villages. Elles sont mises en valeur par beaucoup de villages, notamment lors du concours du village le plus propre, organisé annuellement pour les villages de la Kabylie initié par la wilaya de Tizi-Ouzou.

3.2.2. Apport des institutions publiques

Plusieurs facteurs de taille ont poussé les institutions publiques à revenir vers les sources hydriques (fontaines, puits.), en effet, la diminution du taux de pluviométrie, les déséquilibres planétaires ont engendré une sécheresse importante ces dernières années, n'arrivant plus à satisfaire la demande des citoyens. En parlant d'institutions publiques, nous entendons précisément l'Algérienne des eaux, les services de l'hydraulique, et les services d'hygiène de l'assemblée populaire communale.

Pour y remédier, partiellement et répondre à cette forte demande des citoyens surtout en période estivale, ces dernières ont pris conscience de cette richesse disponible sur leur territoire, en occurrence les sources et les fontaines, aménagées ou non aménagées. Plusieurs actions sont proposées ou mises en place, souvent avec l'entraide des comités et associations des villages. Leurs actions consistent alors:

- Au suivi continu des fontaines en effectuant des analyses nécessaires (des analyses bactériologiques et dans la mesure du possible des analyses biophysiques et chimiques périodiquement
- Injection de galets de chlore environ chaque mois, qui se fait après la détermination analytique du taux de chlore présent dans l'eau par les services d'hygiène de l'APC (un galet de chlore pour 5 m³ d'eau).
- Des aides de financement pour l'aménagement et ou le réaménagement des sources, pour assurer une hygiène et une bonne fonctionnalité de ces dernières.
- Des campagnes de prévention pour les villageois, afin de les sensibiliser sur cette richesse, les inciter à sa sauvegarde mais surtout les informer des bienfaits de cette eau.

CONCLUSION

Les sources hydriques demeurent une richesse importante de nos jours, vu la forte demande et le manque de plus en plus considérable. De ce fait la réintégration et la réappropriation des fontaines dans la vie quotidienne et substantielle des villageois s'avère être une solution durable que les villageois ont adopté. L'intégration s'est faite par les aménagements et les réaménagements mais aussi par l'introduction des éléments nécessaires à leur bon fonctionnement. L'entre-aide entre les citoyens et les autorités publiques participe vivement à l'intégration et la mise en valeur de cet important richesse naturel et héritage matériel et immatériel, que toute communauté se doit de faire.

Références

- [1] A. Rappoport, pour une anthropologie de la maison, collection : aspect de l'urbanisme, eds. Dunod, Paris, 1983.
- [2] C. Lacost Dujardin, Dictionnaire de la culture berbère en Kabylie, eds la découverte, France, 2005.
- [3] M. Chegrani, Organisation et urbanisation de l'espace montagnard, cas de LARBAA N'AT IRATHEN, une commune du Djurdjura, mémoire de magistère en urbanisme, EPAU, Algérie, 1988.
- [4] M. Hadibi, WEDRIS une totale plénitude, eds Zyriab, Alger, 2003.
- [5] M. Remond, au cœur du pays kabyle, eds. Baconnier-hélio, Alger, 1933, 198.
- [6] N. Berthier, Les techniques d'enquête en science sociale, eds. Armand Colin, France 1998.
- [7] O. Aliane, Patrimoine bâti et Savoir-faire vernaculaire : cas d'Ait El Kaid (les Ouadhias), mémoire de magister en architecture, option : architecture et développement durable, université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2009.
- [8] P. Bourdieu, Sociologie de l'Algérie, Ed. Tafat, Algérie, 2015, 180.
- [9] P. Merlin, F. Choay, Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement, eds, Quadrige et Dicos Poche, presse universitaire de France, 2010.
- [10] R. Toubal, M. Dahli, la Kabylie entre performances et recomposition spatiale, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, Algérie, 2008.
- [11] T. Djerroud, carnet de la Kabylie, scènes de vie entre marasme et espoir, eds. El Bayazine, Alger, 2012, 152.

Hydrogeological Modelling using Gardenia Model in the Koda catchment, Mali.

Oumou DIANCOUNBA ^{1*}, Nourddine GAALOUL ², Hamadoun BOKAR³, Adama TOURE ³, Taoufik HERMASSI², Zoubeida BARGAOUI⁴ and Nelly .C. KELOME⁵

¹. Graduate Research Program on Climate and Water Resources, West African Science Service Center on Climate Change and Adapted Land Use (WASCAL), Department of Applied Hydrology, University of Abomey-Calavi, Cotonou, Abomey-Calavi BP 2008, Benin. oumoudianc@gmail.com

². Institut National des Recherches en Génie Rural Eau et Forêts (I.N.R.G.R.E.F), Tunis, Tunisia. Ngaaloul2003@yahoo.fr, taoufikhermassi77@gmail.com

³. Ecole Nationale d'Ingénieurs Abderhamane Baba TOURE, ENI-ABT, Bamako, Mali. hamadounbokar@yahoo.com, adamamca@yahoo.fr

⁴. Ecole Nationale d'Ingénieurs ENIT, Tunis, Tunisia. zoubeida.bargaoui@laposte.net

⁵. Faculté des Sciences et Techniques, Cotonou, Benin, nkelome@yahoo.fr

* correspondence : oumoudianc@gmail.com, Tel : +223 60 49 44 44

Abstract

The infiltration and exploitation of aquifers in arid and semi arid areas present some particular problems that must be taking into account in modelling process.

In arid and semi arid regions, groundwater is the main source of water used for the population supply because the surface water is more and more unavailable due to climate variability and high evaporation process. In addition, the high population growth with inadequate infrastructures available for surface water supply led to the implantation of more boreholes and wells. In the Koda catchment, groundwater is abstracted through boreholes and shallow hand dug wells. Groundwater recharge is then strongly influenced and controlled by many parameters such as climate change; land use and land cover change, soil types, slope, etc.

The advantage of hydrogeological modeling of the study catchment is to use the available data (precipitation, groundwater level and evapotranspiration data) for making an accurate estimation of the missing data (discharge data). The simulation of water cycle in a watershed through a set of data such as precipitation, evapotranspiration, infiltration, and runoff allows to model the interaction Rainfall-Discharge-Groundwater level and also to estimate the groundwater recharge. Gardenia model was used in the Koda catchment, southeastern part of Taoudeni basin using hydrological and hydrogeological data (1985-2016).

The hydrogeological modelling of the Koda catchment using Gardenia model was a great tool of the calculation of the water budget components and the estimation of groundwater recharge. The results of the hydrogeological modelling of the Koda catchment in the steady state flow seem good and ranged with those values found in similar hydrogeological regions.

Key words: Hydrogeological modelling, Water budget components, Infiltration Gardenia model, Koda Catchment, Mali

Modélisation hydrogéologique en utilisant le modèle Gardénia, cas du bassin de Koda, Mali.

Résumé En zone aride et semi aride, les nappes d'eaux souterraines ont des caractéristiques hydrogéologiques particulières ce qui induit leur réalimentation et exploitation assez délicate. Et aussi ces conditions particulières doivent être tenues compte lors de leur modélisation. En milieu aride et semi aride, les ressources en eau souterraines sont les principales sources d'eau pour la population car les eaux de surface sont devenues de plus en plus indisponibles due à la variabilité climatique et l'augmentation de la température. A ces changements, s'ajoutent le manque d'eau de surface, la croissance démographique et aussi l'inexistence d'infrastructures pour l'exploitation des eaux de surface ce qui rendent l'implantation de plus en plus de puits et de forages répandues pour exploiter les ressources en eau souterraines. Dans le souci de mieux exploiter les ressources en eau souterraines sans épuiser leurs réserves, les scientifiques ont développés des modèles mathématiques pour modéliser les eaux de surface et des eaux souterraines. L'avantage principal de ces modèles consiste à intégrer toutes les données disponibles afin de faire une estimation fiable des manquantes. Le modèle Gardenia a été utilisé dans le bassin de Koda, la partie Sud-Ouest du

bassin de Taoudeni en utilisant les données hydrologiques et hydrogéologiques datant de 1985-2016. La modélisation hydrogéologique du bassin de Koda en utilisation du modèle Gardénia nous a permis d'estimer les différents termes du bilan hydrologique. Les valeurs obtenues nous semblent bonnes et très proches des valeurs obtenues lors des travaux antérieurs.

Mots clés: Modélisation hydrogéologique, Bilan hydrique, Modèle Gardénia, Bassin du Koda, Mali.

I. INTRODUCTION

The study area is Koda catchment located in the southern part of Mali, where the main activity is agriculture. All the activities of the population depend upon groundwater resources. With the area of about 4921 Km², the Koda catchment has as climate type sudano-sahelian. The mean annual temperature: 28.3°C with minimal 23-24 °C in December–January and the maximal up to 33°C generally occurred in April- May.

The overall annual average of rainfall for the last 30 years (1987-2016) is 500.4 mm in 1992 and 1164.3 mm in 1988 at Katibougou station, while the overall mean over 30 years (1987-2016) is 836 mm.

Two types of seasons characterize the climate of Koda catchment, the rainy season from June to October and the dry season from November to May[1].

The geology of the Koda is mainly constituted by Infracambrian Tabular Sandstones.

The main objective of the use of the Gardénia model to model Koda catchment is to simulate the water cycle of the Koda catchment. The specific objectives are to estimate the groundwater recharge, to make an accurate estimation of the missing data (discharge data) and to model the interaction Rainfall-Discharge-Groundwater level.

The results of the hydrogeological modelling of the Koda catchment will be used as a guide for the future studies and also an important tool for water resources management.

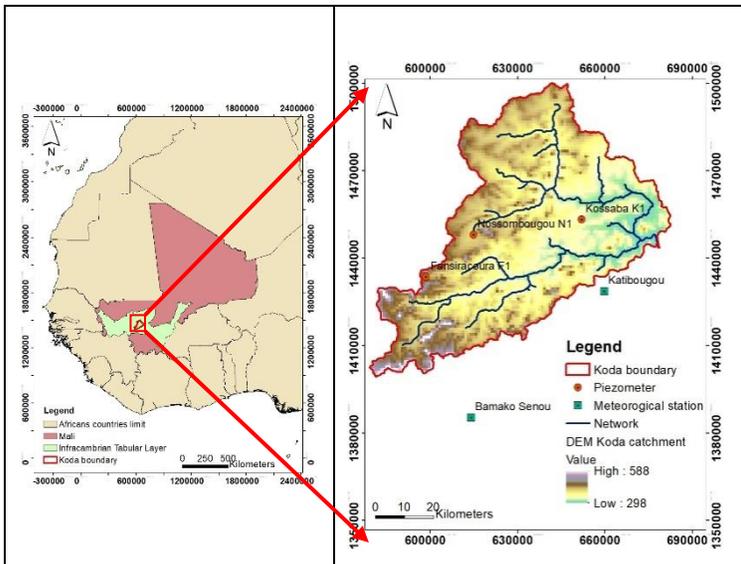


Fig. 1 – Localization of the study area.

2. MATERIALS AND METHOD

Some mathematics models have been developed by scientists to help to understanding surface and groundwater systems. Modèle Global À Réservoirs pour la simulation de DÉbits et de Niveaux Aquifères) acronym GARDENIA is a lumped hydrological model developed by the BRGM. GARDENIA model is focused on the water balance equation for aquifers. Gardenia model uses three (3) reservoirs for the identification of production and transfer functions. Flow equations are applied in the catchment under steady state using transmissivity parameter, storage coefficient and infiltration coefficient. For a given catchment, GARDENIA simulates the main water cycle mechanisms by applying simplified laws of physics of flows through three (3) successive reservoirs (production and transfer). The three (3) main

inputs required to run GARDENIA model are: rainfall data, potential evapotranspiration data, and river flow data and/or groundwater level budget data. The data should have the same length of period. For the detailed description, refers to [2; 3]. Great simulation to determine the recharge of aquifers using the numerical model such as Gardenia. Gardenia model has been widely done in different geological and climatic conditions [4; 5].

In the current study, we have used the data of the nearest meteorological station because there was no station inside the study area. The historical rainfall data from 1987 to 2016 of Katibougou station used have been collected from National Meteorology Service of Mali.

The Potential Evapotranspiration (PET) data were estimated using Penman montheih, Thornwaite method and BlaneyCriddle 1960 method. The values obtained from the Blaney and Criddle 1960 method are much closed to the mean values of three methods, therefore, the PET values estimated from Blaney and Criddle 1960 method were used as PET input data. Refers to [6] for the detail of the ETP calculation process.

The GroundWater Level (GWL) data used of three (3) piezometers have been used as input data for Gardenia model **Piezometer Fansiracoura FI**: The GWL data are available for 8 years (2008-2016). The data were recording manually and weekly as frequency.

Piezometer Nossombougou NI: The water level data is available only for 16 months (Feb 2016 to May 2017). The water level was recorded automatically every minute.

Piezometer Kossaba KI: the data is available from 1986 to 1991 recording at weekly time step.

The historical piezometric data have been collected from National Hydraulic Service of Mali and from the field.

The length of the whole input data used were from 1987 - 2016, the rainfall and PET data present a complete dataset for the 30 years period but, the missing data of the GWL data were completed by 9999 as required.

To run the model, we also used the hydrodynamics parameters of the aquifers, those values were from the hydrogeological synthesis of Mali [7].

3. RESULTS ET DISCUSSION

3.1. Calibration process

Gardenia model was calibrated for the period 2007-2016 for the piezometer Fansiracoura FI, period 2016-2017 for the piezometer Nossombougou NI and 1985-1991 for the piezometer Kossaba KI. The good simulation have been done for the piezometer Nossombougou NI and Kossaba KI with the coefficient of R^2 more than 0.90 and the Nash more the 0.80 while the piezometer Fansiracoura is calibrated with R^2 equal to 0.60 and 0.31 as Nash coefficient value. The low values of the parameters of calibration of the Piezometer FI may due to the long distance between the piezometer to the rainfall station (61 Km). As for, the distance between Kossaba KI and Nossombougou NI they are 25 Km and 46 Km respectively.

The results are outlined in the table 1

Table 1 – Coefficient of correlation R^2 and Nash coefficient obtained after the model calibration.

Piezometers	Coefficient correlation R^2	Nash coefficient
Fansiracoura FI	0.60	0.31
Kossaba KI	0.91	0.83
Nossombougou NI	0.99	0.99

3.2. Determination of water budget components of the Koda catchment

The components of water budget of the Koda catchment for the last 30 years (1987-2016) are outlined in the table 1 and the minimal, maximum and the mean annual ratio recharge over annual rainfall are shown in the table 2 :

Table 2 – Water balance components of the Koda catchment 1987-2016.

Piezometers	Mean an rainfall (m)	Effective Rainfall (m)	AET (m)	Runoff (mm)	Recharge (mm)	Diff stoc (mm)
Fansiracoura FI	1056	380	676	260	119	0.26
Kossaba KI	1056	422	633	175	246	2.50
Nossombougou NI	1056	310	746	205	103	0.52

The mean recharge values were ranged from 10 % to 23% of the annual rainfall. Different researchers have estimated recharge of aquifers in the same region. According to some authors [8], the mean annual recharge using Gardenia model of the year 1985 are ranged from 125 mm to 267 mm in a sudano-sahelian basin of Burkina Faso. The project DNHE-PNUD [7] states that in the infracambrian tabular aquifers of Mali where the Koda is located, recharge as between 140mm and 220 mm (10 % and 20 %) using GARDENIA model for the period 1983 - 1985. An investigation of recharge using interpreted GRACE-derived net, estimates recharge as percentages of rainfall 8.7 % - 26.8% for Bamako 2002-2008 located in the sudano sahelian zone like Koda [9]. A study using a lumped model (Earth model) estimates the recharge of the Klela catchment located in the Primary Sandstones as the study area, found recharge 13.3 % and 14 % as percentage of rainfall for the period 2012-2013 [10]. Other estimates the groundwater recharge in the infracambrian sandstones aquifers in Mali and found 7% of mean precipitation as recharge value [11].

An investigator used various method to estimate recharge in the semiarid zone (North Iraq) and found 17% to 24 % of annual rainfall representing the recharge amount [12]. These values are consistent with those found in this work.

Table 3 – Annual ratio recharge/rainfall (%)

Piezometers	Mean annual ratio recharge/rainfall (%)		
	Min	Max	Mean
Fansiracoura FI	8	12	10
Kossaba KI	19	29	23
Nossombougou NI	7	12	10

3.3. Interaction Rainfall, GWL and Recharge at Monthly scale for the period 1987-2016

The Groundwater Level GW, the mean monthly rainfall (recharge were also correlated to the rainfall; however, sometimes recharge lags rainfall by approximately one month. Example, the peak of recharge occurs in September; and the peak rainfall in August one month later.

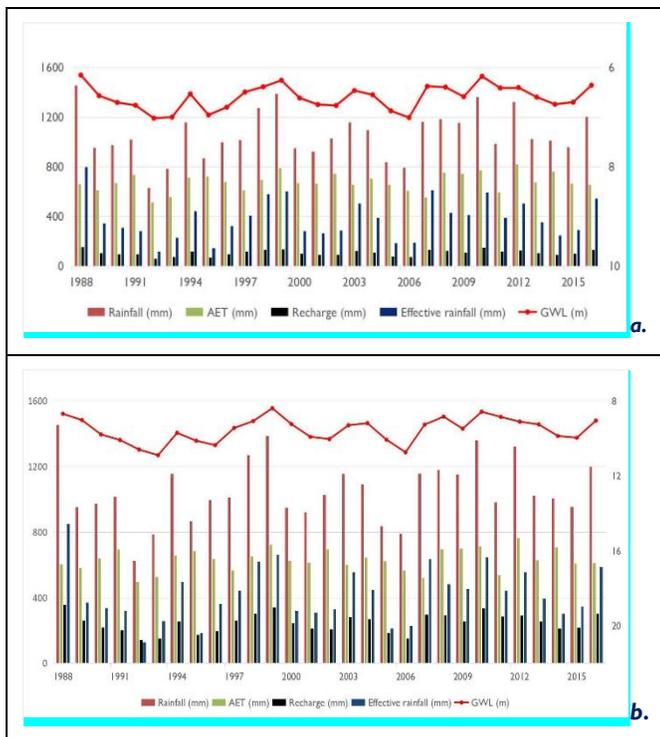
The highest amount of recharge was in July, August and September. The lowest amounts of recharge occurred from February to May, It means that it takes the significant rainfall of June to infiltrate the column and to drive the water presents in the storage to the bottom layer.

3.4. Interaction Rainfall-GWL-AET- Effective rainfall and Recharge at yearly scale for the period 1987-2016

The plots showed that the GWL was following the same trend as the rainfall. Therefore, the rainfall was the main source of the groundwater recharge. The amount of the recharged water was varying year to year mainly depending on the amount of the annual rainfall. Different investigators had confirmed that hypothesis [7; 9; 10].

The highest value of the precipitation was recorded in the year 1988 while the lowest in the year 1992 (500.4 mm) over the Koda catchment. During the year 1988 (1164.3 mm of rainfall), the highest values of groundwater recharge were varying from 152 mm to 220 mm for three piezometers while the lowest values of the groundwater recharge representing in the year 1992, were 45 mm to 141 mm. Those values were not representing the same amount of percentage of precipitation (6 to 29 % of annual rainfall), that let us confirm that the precipitation is not the only parameter to influence the groundwater recharge. The infiltration is depending on the saturation state of the soil and the stock of water before the rainfall season.

The total rainfall is considering as the sum of the Effective Rainfall and the Actual Evapotranspiration (Rainfall=Eff Rainfall+ AET). The amount of the AET was estimated from 60% to 67% of the annual rainfall. The high values of the AET were due to the high values of the temperature over the study area. The overall annual effective rainfall was varying from 310 mm to 422 mm corresponding to 23 % and 40 % of the annual rainfall.



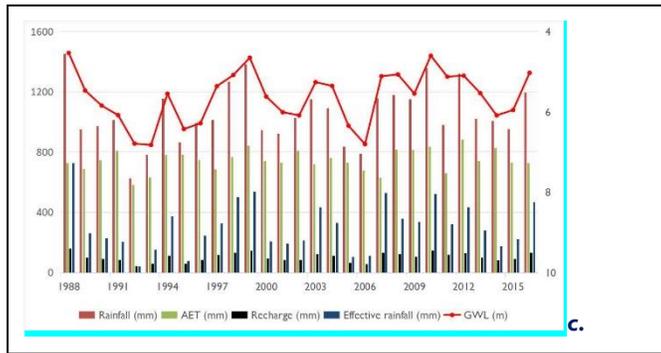


Fig. 2 – Interaction Rainfall-GWL-Recharge- Effective rainfall and AET at yearly scale for the period 1987-2016a. Piezometer Fansiracoura FI, b. Kossaba KI and c. piezometer Nossombougou N.

CONCLUSION

The simulation of piezometric levels, discharge and recharge in the period 1987-2016 from available piezometric permitted the evaluation of the variability of recharge.

Recharge in the study area was varying from 117 mm to 246 mm corresponding respectively to 10% and 23 % of annual rainfall. The outputs of the model showed that, in the absence of surface flow measurements, it is not possible to estimate the storage coefficient of aquifers. The hydrogeological modelling of the Koda catchment using Gardénia model was a satisfactory tool for the calculation of the water budget components and the estimation of groundwater recharge. The results of the hydrogeological modelling of the Koda catchment in the steady state seem good and ranged with those values found in similar hydrogeologic regions.

References

- [1] USAID, Plan de securite alimentaire commune rurale de diebe 2008- 2012, 2006 pp 1–17. <https://doi.org/IAC-14-D3.1.8>.
- [2] P.Roche and D.Thiery, *Simulation globale de bassins hydrologiques. Introduction à la modélisation et description du modèle GARDENIA*, (1984). Rapport BRGM no 84 SGN 337 EAU. Rodier, J. A. (1975) *Evaluation de l'Écoulement Annuel dans le Sahel Tropical Africai*.
- [3] D.Thiery, *Didacticiel du code de calcul Gardénia v8.1. Vos premières modélisations* (2013), <https://doi.org/BRGM/RP-64997-FR>
- [4] D.Thiery, Analysis of long-duration piezometric records from Burkina-Faso used to determine aquifer recharge. NATO Advanced Research Workshop on Estimation of natural recharge of groundwater, Antalya, Turqui. *In Estimation of Natural Groundwater Recharge*, Ed. I. Simmers, Dordrecht: Reidel, (NATO ASI Series C. Mathematical and Physical Sciences, 222 (1987), 477–489.
- [5] D.Thiery, *Influence de la variabilité du climat sur les performances des méthodes d'évaluation des ressources en eau*, (1988 e).
- [6] FAO, *FAO Irrigation and Drainage Paper Crop. Irrigation and Drainage* (Vol. 300), (1998), <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- [7] DNHE-PNUD, *Synthesis of hydrogeology of Mali* 1984.
- [8] C. Filippi, F.Milville, D. T. Evaluation de la recharge naturelle des aquifères en climat soudano-sahélien par modélisation hydrologique globale: Application à dix sites au burkina faso. *Hydrological Sciences Journal*, 35(1), (1989), 29–48. <https://doi.org/10.1080/02626669009492403>
- [9] H. Chris , *An integrated approach to estimating groundwater recharge and storage variability in southern mali , africa*, B.Sc., University of Ottawa, 2006.
- [10] A. Toure, B. Diekkrüger, & A. Mariko, Impact of Climate Change on Groundwater Resources in the Klela Basin, Southern Mali (2016). *Hydroogy*. <https://doi.org/10.3390/hydrology3020017>
- [11] H.Bokar, A. Mariko, F. Bamba, D.Diallo, B. Kamagaté, A. Dao, P.Kassogue, Impact Of Climate Variability On
- [12] Groundwater Resources In Kolondieba Catchment Basin , Sudanese Climate Zone In Mali. *IJERA*, 2(5), (2012) 1201–1210.
- [13] H. Jassas and B.Merkel, Estimating groundwater recharge in the semiarid Al-Khazir: Gomal basin, north
- [14] Iraq, *Water (Switzerland)*, 6(8), (2006), 2467–2481. <https://doi.org/10.3390/w6082467>.

Apport de la modélisation pour l'aide à la décision sur la stratégie d'irrigation des cultures-résultats préliminaires

Nesrine Kalboussi^{1,2}, Sébastien Roux², Bruno Cheviron³, Jérôme Harmand⁴, Alain Rapaport², Carole Sinfort¹

¹ UMR ITAP, IRSTEA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France,
nesrinekalboussi@gmail.com, carole.sinfort@supagro.fr

² UMR MISTEA, Univ. Montpellier, INRA, Montpellier, France,
sebastien.roux@inra.fr, alain.rapaport@inra.fr

³ UMR G-EAU, IRSTEA, Montpellier, France,
bruno.cheviron@irstea.fr

⁴ LBE, Univ Montpellier, INRA, Narbonne, France,
jerome.harmand@inra.fr

Résumé

Un modèle mathématique en petite dimension qui prend en compte les spécificités de la plante et du sol a été développé et validé, en vue d'être couplé à un modèle de traitement des eaux. Les résultats de validation sont très satisfaisants pour différentes années climatiques et différentes stratégies d'irrigation. Ce modèle a été capable de reproduire, grâce à l'ajustement de ses paramètres, les sorties du modèle « Optirrig » développé par IRSTEA, beaucoup plus complexe issu de plusieurs connaissances de la littérature et qui a été déjà validé sur des données expérimentales. L'objectif est de coupler le modèle simple proposé avec un modèle de traitement de l'eau afin de piloter en continu la production d'eau en sortie de la STEP selon les besoins de la plante au fur et à mesure de son développement.

Mots clés : irrigation, culture, modèle mathématique, système dynamique

Contribution of modeling to the decision support for agriculture reuse of treated wastewater

Abstract

A mathematical model in low dimension that takes into account the specificities of the crop and soil has been developed and validated, in order to be coupled with a water treatment model. The validation results are very satisfactory for different climatic years and different irrigation strategies. This model has been able to reproduce, by adjusting its parameters, the outputs of the much more complex model « Optirrig » developed by IRSTEA, based on knowledge of the literature and that has already been validated on experimental data. The aim is to couple the proposed model with a water treatment model in order to continuously monitoring the water production at the output of the WWTP according to the needs of the plant during its development.

Key Words: irrigation, crops, mathematical model, dynamical system

I. INTRODUCTION

L'agriculture assure la sécurité alimentaire des populations, crée des emplois, fournit des matières premières à l'industrie agro-alimentaire et contribue fortement à la progression des revenus de la population. Le secteur de l'agriculture est le plus gros consommateur d'eau à l'échelle mondiale. Toutefois, les ressources conventionnelles en eau risquent de manquer à cause des changements climatiques, de l'importante croissance démographique et des pollutions humaines et industrielles. L'exploitation de ressources non conventionnelles, telles que les eaux usées traitées, pourrait permettre de minimiser les impacts de ces changements sur la production agricole et préserver la ressource en eau de qualité pour la production d'eau potable. De plus, la réutilisation des eaux usées traitées pour irriguer les cultures permet de valoriser les nutriments présents dans ces eaux, tels que l'azote et le potassium, à des fins agronomiques et réduire ainsi l'utilisation des engrais chimiques. Les besoins de la plante en eau et nutriments varient selon ses spécificités, le climat et son stade de croissance. Pour permettre la meilleure utilisation possible et limiter l'ajout des intrants, il est nécessaire d'optimiser les apports d'eau – et sa qualité – aux plantes. Pour cela, il peut être utile de recourir à la modélisation dans l'optique de développer un outil de pilotage de la quantité et de la qualité d'eau usée traitée apportée par irrigation en fonction des besoins de la végétation et des objectifs de rendement. Les coûts de traitement de l'eau étant de plus en plus importants, cette optimisation est nécessaire pour rendre cette réutilisation économiquement acceptable. Dans la littérature, plusieurs types de modèles de culture sont proposés. Ces modèles sont soit très spécifiques (tels que AZODYN [1] et INFOCROP [2]), soit très génériques comprenant un grand nombre de grandeurs empiriques (tels que STICS [3] et AquaCrop [4]) [5]. Ces modèles sont trop complexes pour servir de base à l'optimisation des besoins des plantes. C'est la raison pour laquelle il faut d'abord les simplifier. Dans ce premier travail, on montre la possibilité de couplage d'un premier modèle de culture avec un modèle de traitement d'eau afin de piloter le fonctionnement d'une STEP en fonction des besoins de la végétation. Un premier modèle de culture simple et générique qui relie la variation du taux d'humidité dans le sol à la production de la plante en biomasse est proposé. Ce modèle est validé sur un modèle complexe développé par IRSTEA et codé dans le logiciel « Optirrig » [6,7], logiciel initialement développé pour générer, analyser et, à terme, optimiser des scénarios d'irrigation.

2. COUPLAGE ET DESCRIPTION DU MODELE

La plante a besoin essentiellement d'eau et d'azote en proportions variables au cours de son développement. Il est indispensable alors de déterminer le meilleur compromis entre qualité et quantité d'eau usées traitées qui garantit une croissance optimale de la plante. Il s'agit d'un problème d'optimisation. Pour résoudre efficacement ce problème d'optimisation, notamment à l'aide des outils de la théorie de la commande optimale, il faut un modèle de culture simple et générique où on puisse piloter le débit d'eau et la quantité d'azote en entrée, afin de calculer une commande optimale qui maximise la production en biomasse de la plante, sur un horizon de temps fixé. Dans ce contexte, on propose un premier modèle baptisé « ToyCrop » qui se limite dans cette première version à la modélisation de la production en biomasse en fonction de l'eau disponible pour la plante, en vue de l'étendre par la suite pour tenir compte des apports en nutriments (l'azote en particulier). La figure A.1, donnée en annexe, résume le couplage du modèle simplifié « ToyCrop » avec un modèle de traitement d'eau usée afin de piloter en continu le fonctionnement d'une STEP en fonction des besoins de la plante en eau.

Dans « ToyCrop », la teneur en eau du sol S [sans dimension, comprise entre 0 et 1] est le rapport entre le volume de l'eau disponible et le volume du sol. Le pas de temps du modèle développé étant la journée (indiquée j), le volume de l'eau dans le sol est défini par un bilan hydrique journalier (cf. équation (1)) résultant de la différence entre les apports et les pertes en eau. Les apports sont effectués par précipitation R [m^3/m^2] et/ou irrigation I [m^3/m^2]. Les pertes sont dues à la transpiration de la plante T [m^3/m^2], l'évaporation du sol E [m^3/m^2] et le drainage de l'eau, d [m^3/m^2], dans les nappes profondes inaccessibles à la plante. Le volume du sol par m^2 de surface est le produit de sa porosité φ [sans dimension] par la profondeur de sol exploitée par les racines Z [m].

$$S_j = S_{j-1} + \frac{1}{\varphi Z} (R_j - T_j - E_j + I_j - d_j) \quad (1)$$

Les précipitations journalières R_j sont des données climatiques. Le débit d'irrigation journalière I_j est une sortie du modèle de traitement des eaux. Il varie selon les demandes journalières de la plante et les objectifs de production. La quantité d'eau transpirée par la plante par jour est modélisé par l'Eq (2) :

$$T_j = K_S(S_{j-1}) RIE_j ET_0 \quad (2)$$

avec $K_S(S)$ [sans dimension, comprise entre 0 et 1] une fonction de limitation de la transpiration en fonction du taux d'humidité disponible à la plante (cf. fig A.2), selon :

$$K_S(S) = \begin{cases} 0, & S \leq S_w \\ \frac{S - S_w}{S^* - S_w}, & S_w < S \leq S^* \\ 1, & S^* < S \end{cases} \quad (3)$$

$K_S(S)$ est régie par deux seuils de teneur en eau : S^* [sans dimension] le point du début de fermeture des stomates au-dessous duquel la plante ferme progressivement ses stomates afin de limiter les pertes par transpiration ($0 <$

$K_s(S) < 1$) et S_w [sans dimension] le point de flétrissement d'une plante à partir duquel la plante flétrit. La transpiration dépend aussi de la quantité de l'énergie solaire reçue par son feuillage traduit par le RIE (en anglais « radiation interception efficiency ») qui est une fonction de l'indice foliaire de la plante LAI [sans dimension], selon l'équation (4) :

$$RIE_j = 1 - \exp(-c LAI) \quad (4)$$

avec c un paramètre sans dimension à calibrer. ET_0 [m^3/m^2] représente l'évapotranspiration potentielle du jour. C'est une donnée climatique qui traduit l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface cultivée, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau. La fraction non recouverte de sol par la végétation ($1 - RIE_j$) perd de l'eau par évaporation selon l'équation (5) :

$$E_j = K_r(S_{j-1}) (1 - RIE_j) ET_0 \quad (5)$$

$$K_r(S) = \begin{cases} 0, & S \leq S_h \\ \frac{S - S_h}{1 - S_h}, & S \geq S_h \end{cases} \quad (6)$$

avec $K_r(S)$ [sans dimension, comprise entre 0 et 1] une fonction de limitation de l'évaporation en fonction de l'humidité du sol (cf. fig A.2). En effet, moins le sol est humide, plus la quantité d'eau perdue par évaporation diminue car les forces de capillarité s'opposent plus fortement à son départ jusqu'à atteindre le point hygroscopique S_h [sans dimension] qui est un seuil d'humidité au-dessous duquel l'évaporation ne se produit pas [5]. La croissance de la biomasse est modélisée en multipliant la transpiration journalière par un coefficient de limitation W^* [5], selon l'équation suivante :

$$B_j = B_{j-1} + W^* K_s(S_{j-1}) RIE_j ET_0 \quad (7)$$

3. VALIDATION DU MODELE

3.1. Méthodologie de validation

La validation du modèle consiste à examiner sa capacité à reproduire, en ajustant ses paramètres, différents jeux de données. Pour ce faire, on a généré différentes sorties qui correspondent à différentes années climatiques et à différentes conditions d'irrigation avec le logiciel « Optirrig ». Le modèle mathématique du logiciel « Optirrig » a été validé sur un large ensemble de données expérimentales couvrant plusieurs années de culture de différentes végétations (maïs, blé dur) sous différents scénarios d'irrigation. Ce modèle est complexe et comprend de très nombreux paramètres à identifier ou à déterminer empiriquement. De fait, son éventuel couplage avec un modèle de station de traitement de l'eau augmenterait encore le nombre de paramètres à identifier ce qui rendrait un tel modèle inutilisable pour des tâches d'optimisation et de synthèse de contrôleurs. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de développer un modèle plus simple (cf. équation (1) -(8)) et adapté à la commande. Une fois la structure du modèle simple est proposée, il faut en estimer les paramètres, à partir de jeux de données générés par « Optirrig », afin que ce modèle reproduise le plus fidèlement possible les données simulées. Les paramètres ont été identifiés pour chaque cas à l'aide d'un solveur d'optimisation globale programmé sous MATLAB appelé « GlobalSearch ». Ce solveur fait appel à la fonction d'optimisation non-linéaire sous contraintes "fmincon". Cette fonction est lancée par le solveur, à partir de différentes conditions initiales des paramètres du modèle « ToyCrop », θ_0 , afin de déterminer le jeu de paramètres permettant de minimiser une fonction objectif. La fonction objectif du problème d'identification correspond à la somme des moindres carrés des déviations des prédictions (\hat{S}_j et \hat{B}_j) du modèle proposé par rapport aux sorties d'« Optirrig » (S_j et B_j) (taux d'humidité du sol et production en biomasse du semis jusqu'à la fin de l'année climatique), comme le montre l'équation (8) :

$$J(\theta) = \sum_{j=1}^{365} \frac{(S_j - \hat{S}_j)^T (S_j - \hat{S}_j)}{\max S_j^2} + \frac{(B_j - \hat{B}_j)^T (B_j - \hat{B}_j)}{\max B_j^2} \quad (8)$$

avec θ les paramètres du modèle « ToyCrop » à identifier qui sont S_w, S^*, c, S_h et W^* . Comme on somme des carrés de grandeurs différentes (S et B), on a choisi de les normaliser par rapport à leurs valeurs maximales. L'efficacité du modèle à reproduire les données de validation a été évaluée par le calcul de coefficient de détermination R^2 . Ce coefficient détermine l'écart entre les prédictions du modèle « ToyCrop » et les sorties du logiciel « Optirrig », tel que :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

\hat{y}_i : Les valeurs prédites par le modèle « ToyCrop » ;

y_i : Les valeurs de données de validation générées par « Optirrig » ;

\bar{y} : La moyenne de valeurs de données de validation ;

l, n : Les nombres de données ;

3.2. Résultats de validation

Les résultats d'identification représentés sur les figures 1-4 montrent qu'il est possible de trouver un jeu de valeurs des paramètres du modèle « ToyCrop » qui permet de prédire d'une manière satisfaisante les sorties du logiciel « Optirrig » pour deux années climatiques : 1996 et 2011 et pour deux stratégies d'irrigation différentes : pluviale et par tour d'eau. Les coefficients de détermination R^2 obtenus pour chaque ajustement sont indiqués sur les figures 1-4. L'ajustement de la variation de la biomasse dépasse 90% pour les différentes années climatiques et les stratégies d'irrigation testées.

La stratégie pluviale correspond à une seule irrigation juste au semis. Par contre, la stratégie par tour d'eau correspond à une irrigation selon un calendrier. Pour le cas testé, l'irrigation par tour d'eau se fait chaque 7 jours si la somme de pluie et d'irrigation reçue ne dépasse pas un certain seuil. Le tableau 1 récapitule les valeurs des paramètres du modèle « ToyCrop » correspondantes au meilleur ajustement du modèle sur les sorties d'« Optirrig » de chaque cas. Ces valeurs sont différentes d'une année à l'autre et d'une stratégie d'irrigation à l'autre, ce qui montre la généricité du modèle.

Table 1 - Conservation and Creation of Clean Water Environment.

Année	Stratégie	W^*	S_h	S_w	S^*	c
1996	Pluviale	0.37	0.7	4.9 10 ⁻⁹	0.36	0.73
	50% ETM	0.22	0.93	0.09	0.10	2.91
2011	Pluviale	0.32	0.50	2.26 10 ⁻⁷	0.16	1.01
	50% ETM	0.26	0.89	0.18	0.18	2.07

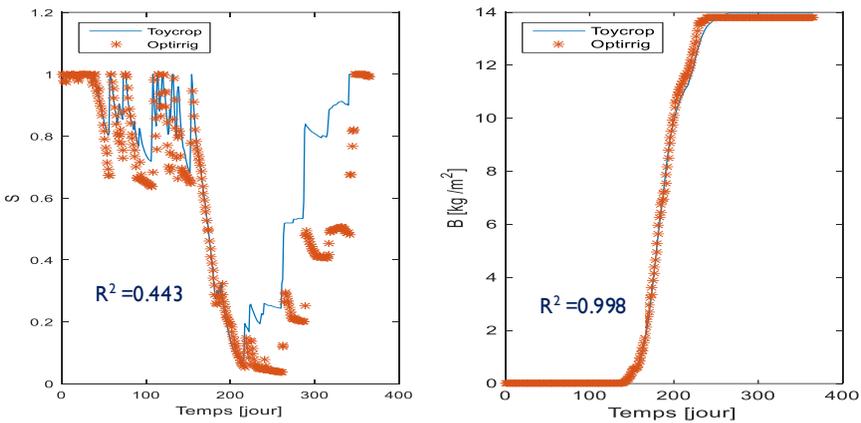


Fig. 1 – Simulation du taux d'humidité dans le sol et la production en Biomasse, stratégie pluviale, année 1996

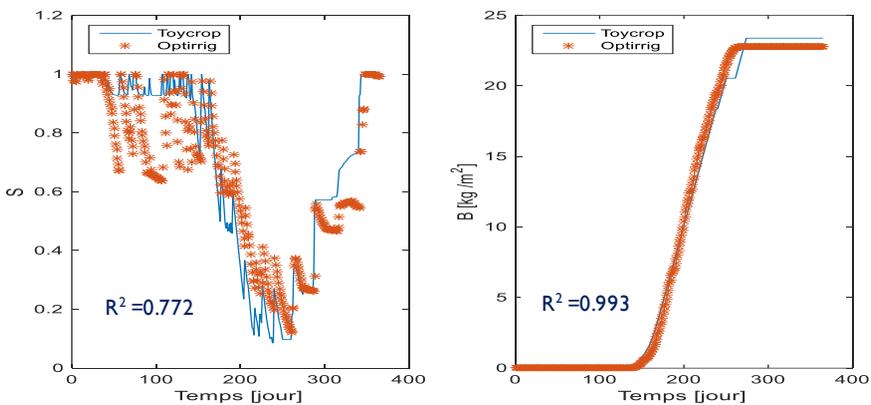


Fig. 2 – Simulation du taux d'humidité dans le sol et la production en Biomasse, stratégie tour d'eau, année 1996

CONCLUSION

Malgré sa simplicité et sa structure réduite, le modèle « ToyCrop » proposé a été capable de reproduire fidèlement les sorties d'un modèle beaucoup plus complexe. Cela ouvre des perspectives intéressantes pour l'utilisation de ce modèle pour des fins d'optimisation et de contrôle. Le caractère innovant de ce travail réside dans le fait que la production de la station d'épuration peut ainsi être modulée en tenant compte du caractère dynamique de la demande en eau des végétations. Les perspectives de ce travail comprennent aussi la modélisation des besoins de la plante en nutriments en fonction de sa croissance et le pilotage de la qualité et la quantité de l'eau traitée à la sortie de la STEP en fonction de ses besoins, notamment en azote.

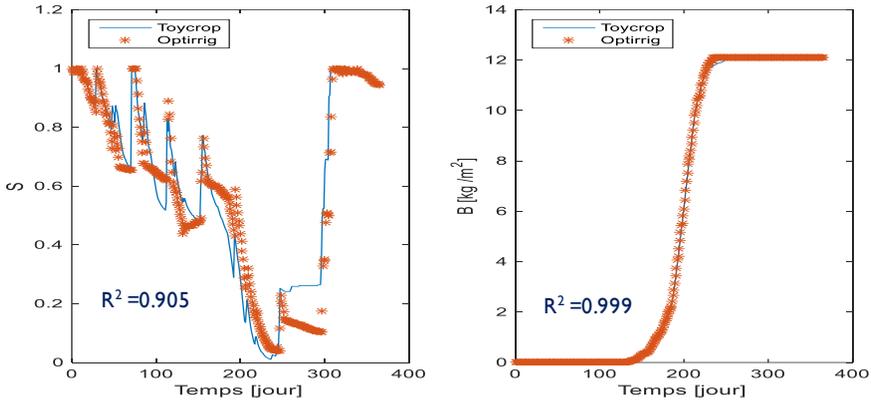


Fig. 3 – Simulation du taux d'humidité dans le sol et la production en Biomasse, stratégie pluviale, année 2011

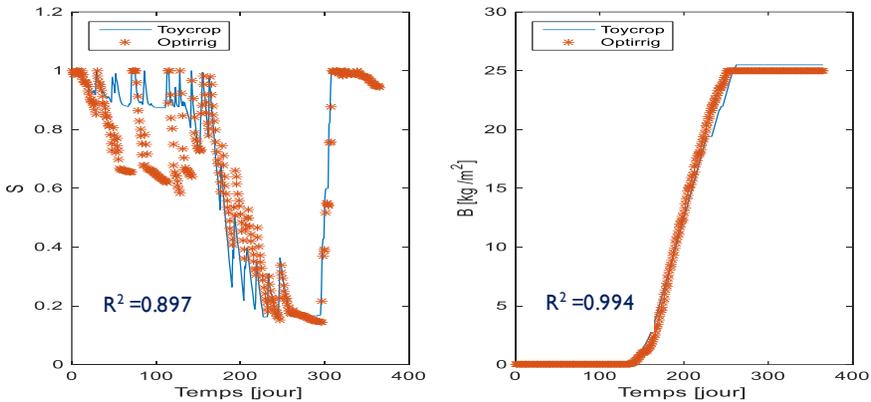


Fig. 4– Simulation du taux d'humidité dans le sol et la production en Biomasse, stratégie tour d'eau, année 2011

Références

- [1] JEUFFROY, M.-H. et RECOUS, S. Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *European journal of Agronomy*, 1999, vol. 10, no 2, p. 129-144.
- [2] AGGARWAL, P. Kalra, KALRA, N., CHANDER, S., et al. InfoCrop: a dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. *Agricultural systems*, 2006, vol. 89, no 1, p. 1-25.
- [3] BRISSON, Nadine, GARY, Christian, JUSTES, Eric, et al. An overview of the crop model STICS. *European Journal of agronomy*, 2003, vol. 18, no 3-4, p. 309-332.
- [4] STEDUTO, Pasquale, HSIAO, Theodore C., RAES, Dirk, et al. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 2009, vol. 101, no 3, p. 426-437.
- [5] PELAK, Norman, REVELLI, Roberto, et PORPORATO, Amilcare. A dynamical systems framework for crop models: Toward optimal fertilization and irrigation strategies under climatic variability. *Ecological Modelling* 2017, vol. 365, p. 80-92.

- [6] OPTIRRIG, logiciel pour la génération, l'analyse et l'optimisation des scénarios d'irrigation des cultures : <http://www.irstea.fr/innovations/optirrig-logiciel-generation-analyse-optimisation-scenarios-irrigation>
- [7] CHEVIRON, B., VERVOORT, R.W., ALBASHA, R. DAIRON R., LE PROL, C. and MAILHOL, C., A framework to use crop models for multi-objective constrained optimization of irrigation strategies. Environmental Modelling & Software, 2016, vol. 86, p. 145-157.

ANNEXE

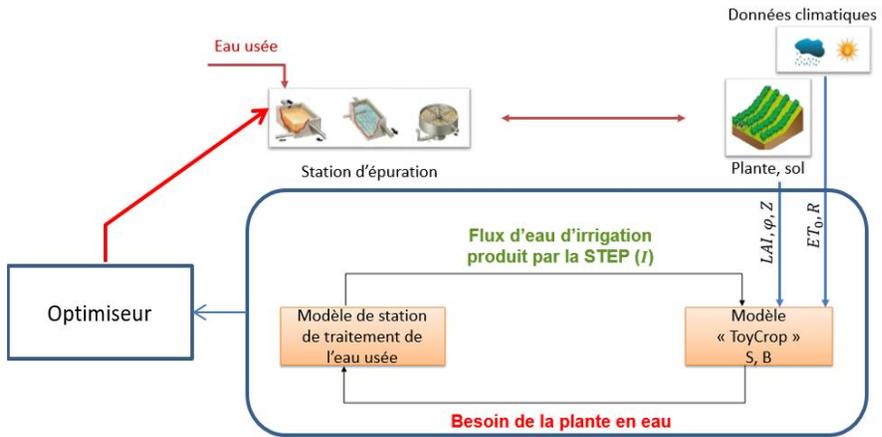


Fig. A.1 – Schéma du couplage du modèle « ToyCrop » avec un modèle de station de traitement de l'eau usée

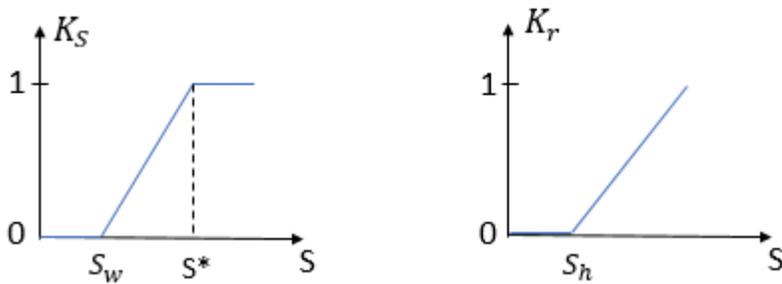


Fig. A.2 – à gauche la fonction de limitation de la transpiration et à droite la fonction de limitation de l'évaporation

Évaluation de la contamination mercurielle des eaux de surface Cas du barrage de Zit-Emba, wilaya de Skikda, nord-est algérien.

Mohamed Zine BELHADJ ¹, Abderrahmane BOUDOUKHA ²,

*1^{er} Département génie civil, Faculté de Technologie, Université 20 août 1955 Skikda ;
Laboratoire de recherche en hydraulique appliquée, Université Benboulaïd Batna 2,
Email : betgic@yahoo.fr.*

*2^{ème} Laboratoire de recherche en hydraulique appliquée, Université Benboulaïd Batna 2,
Département hydraulique, Faculté de Technologie, Université Benboulaïd Batna 2
Email : boudoukha_abderrahmane@yahoo.fr*

RÉSUMÉ :

La détermination de l'origine de la pollution par des micropolluants des eaux surface du bassin versant du barrage de Zit-Emba a été abordée, d'une part, à l'aide d'une exploration spatio-temporelle des paramètres physiques, des éléments majeurs et des métaux lourds et, de l'autre part, par l'exploration géographique, géologiques et métallogéniques de la région d'étude.

Les résultats de l'étude hydro-chimique ont montré que les eaux se trouvant dans ce barrage et en amont sont affectées par une pollution urbaine et agro-industriel (DBO5 comprise entre 20 et 50 mg/l). Ces niveaux correspondent à la classe de qualité : pollution excessive, pendant la période de basses eaux. En période de hautes eaux, les prélèvements à deux stations (St1 et St2) présentent des valeurs supérieures à la norme (Hammam Ouled Ali et Bouâti-M). Ces niveaux correspondent à la classe de qualité entre passable et médiocre. Le rapport DCO/DBO5 supérieur à 3, qui peut atteindre 7,2, traduit le fait que des effluents agro-industriels sont plus ou moins difficilement biodégradables. En même temps la présence notable d'éléments traces métalliques comme le mercure, avec des moyennes qui varient entre les stations: St1, St2, St3, St4 comme suit : 0,053 - 0,029 - 0,012 - 0,088 mg/l. Pour le plomb, à l'émergence, les teneurs sont importantes en période de basses eaux et atteignent des moyennes qui varient entre les stations St1, St2, St3 et St4 comme suit : 0,224 - 0,222 - 0,278 - 0,194 mg/l. Cela étant, dans l'espace les concentrations décroissent d'amont en aval. Ces teneurs limitent l'utilisation de cette eau notamment pour l'alimentation en eau potable (AEP) et présentent une menace à long terme pour la santé de la population qui l'utilise.

Mots clés : Eaux de barrage, pollution urbaine, micropolluants métalliques, mercure, dégradation de la qualité.

Mercury Contamination Evaluation in Surface Water Of Zit-Emba Dam, (Skikda, North East Algeria).

Abstract:

The determination of the origin of the pollution by micro-pollutants of surface waters of the basin discharging in Zit-Emba dam has been addressed using a spatial-temporal exploration of the physical parameters, major Elements and heavy metals from one hand, and the geographic; geological and metal-genic exploration of the area of the study from the other hand.

The results of the hydro-chemical study has shown that the waters located in this dam and upstream are contaminated by an urban and an industrial pollution (including DBO5 between 20 and 50 mg/l) with a high pollution quality during the low water period. During the high water's period, two sampling stations have shown high values in comparison with the stander St1 and St2 (Hammam Ouled Ali and Bouâti-M~) which classify them between fair

and poor quality and a report of DCO/DBO5 higher than 3 which reaches 7,2 translating that the contribution of the agro-industrial affluent is more or less not readily biodegradable. At the same time, the presence of metal traces elements such as mercury with average which successively changes on the sampling stations: St1, St2, St3, St4 as follows: (0.053 to 0.029 - 0.012 to 0.088 mg/l). For the emergence of the Lead, its contents are important in times of low water which reach a successively averages on the sampling waters of St1 to St4 as follow: the sampling stations St1 to St4 as follows (from .224 to .222 - .278 to .194 mg/l) but its evolution in space on the four sampling stations is decreasing. These levels limit the use of this water particularly for drinking water supply (AEP) and have a long-term threat to the health of the population that uses it.

Key words: Waters of the dam, urban pollution, metallic micro-pollutants, mercury, quality's deterioration statistics, modelling.

Introduction :

La présente étude concerne les eaux du barrage de Zit-Emba, qui contrôle un bassin versant d'une superficie de 485 km², qui se trouve au sud-est de la wilaya de Skikda (fig.1). Il alimente cette dernière et ses environs en eau potable. Il permet aussi l'irrigation du périmètre de Zit-Emba de superficie totale de 6000 ha, la où plus de 2700 ha sont équipés et irrigués [14].

Cette étude à pour objectif d'appréhender l'état de contamination du milieu aquatique du barrage de Zit-Emba et de faire une appréciation de la qualité de cette eau. Pour cela, nous allons apprécier et interpréter les données physico-chimiques d'échantillons d'eau pris le long d'Oued El-Hammam de l'émergence de la source thermal, jusqu'à la distribution d'eau potable au niveau de la ville de Skikda

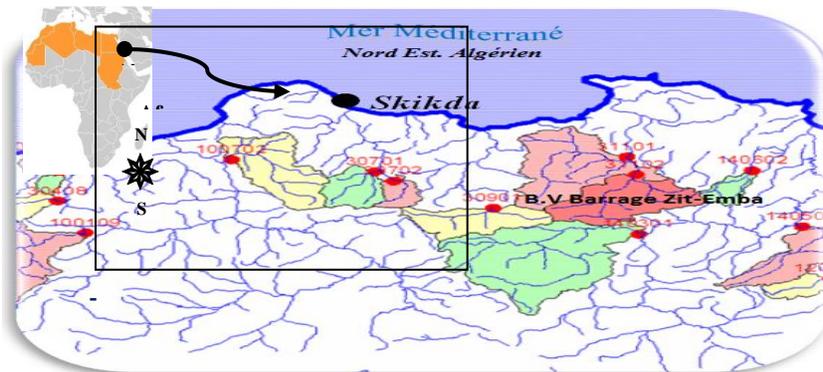


Fig. 1 : Situation du de Zit barrage Emba

1. Présentation de la zone d'étude

Les prospections géologiques et minières effectuées dans la région ont permis de mettre en évidence la présence de certains gisements miniers localisés essentiellement dans la partie méridionale du bassin versant et le nord ouest de ce dernier. On y trouve des carbonates de zinc ($ZnCO_3$), du sulfure d'antimoine (Sb_2S_3) avec des traces de cinabre (HgS), de la calamine ($Zn_4Si_2O_7$)OH₂ et de la barytine ($BaSO_4$) et du plomb arsenicaux ainsi que de l'arséniate de zinc [5] [9][10][11][12]. La présence et l'exploitation de ces gîtes métallifères a également contribué à la détérioration de la qualité des eaux de surface et souterraine de la région [2][3][4] [6] [7]. En dehors de toutes mesures de protection de l'environnement, la ressource en eau de surface se trouve exposée à des risques potentiels d'altérations chroniques ou épisodiques [1][4].

2. Matériel et méthodes

2.1. Stratégie d'échantillonnage

La détermination de l'origine de la contamination et la pollution de ces eaux superficielles ont été abordées à l'aide d'une exploration spatio-temporelle des paramètres physiques, des éléments majeurs et des métaux lourds. Pour aboutir à une vision aussi claire que possible de la qualité des eaux du barrage Zit Emba, il est important d'étudier le comportement de certains éléments chimiques qui sont à l'origine de la contamination ou de la pollution industrielle, urbaine ou agricole. Pour cela nous avons réalisé un certain nombre de mesures des paramètres physico-chimiques et des éléments traces métallique (CE, pH, T, O₂, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, MES, DCO, DBO₅, et As²⁺, Pb²⁺, et Hg²⁺). Les sites de prélèvement d'échantillons ont été choisis selon la distribution spatiale des sources de pollution et de contamination. Quatre (4) stations ont été sélectionnées (St1, St2 en amont du barrage, St3 au niveau de la cuvette du barrage et St4 à l'aval de ce dernier au niveau système de distribution des eaux de la ville de skikda). Les échantillons sont au nombre de 48, La période d'observation s'étale sur six mois, de juillet 2004 à février 2005, ce qui nous permet de suivre l'évolution de la qualité des eaux pendant les deux périodes hydrologiques (basses et hautes eaux).

2.2. Méthodes d'analyse statistique

Le traitement statistique des données a pour but de mesurer et de présenter ces observations d'une manière telle qu'on puisse prendre connaissance aisément de la qualité des eaux de l'oued El-Hammam régularisé par le Barrage Zit-Emba. L'inférence statistique permet d'étudier ou de généraliser, dans certaines conditions, les conclusions obtenues et cela à l'aide de tests statistiques, mais en prenant un certain risque d'erreur qui est évalué en utilisant la théorie des probabilités. Concernant le présent travail, nous avons utilisé : (1) la statistique descriptive ; (2) le test de l'analyse de la variance (ANOVA) ; (3) la corrélation linéaire ; (4) l'analyse en composantes principales (ACP) ; (5) et la classification ascendante hiérarchique (CAH). Tous les calculs ont été réalisés par le biais du logiciel Minitab (X, 2011) sur la matrice des données de la station N°04 (AEP de la ville de skikda) et sur la matrice globale des moyennes des quatre (4) stations.

3. Résultats et discussions

3.1. Variation spatio-temporelle du chimisme d'eau

Dans l'ensemble, l'évolution spatio-temporelle des teneurs des paramètres physico-chimiques sur toutes les stations de prélèvements est inférieure à la norme de potabilité établie par l'organisation mondiale de la santé.

La comparaison de la pente (positive) des courbes de tendance des différents éléments physicochimiques avec celle du volume d'eau de la cuvette (négative), permet de dire que, excepté le pH, les nutriments et les MES, l'augmentation de ces éléments est en liaison entre autre avec la diminution du volume d'eau au niveau de la cuvette du barrage.

3.2. Les éléments traces et métalliques (ETM)

Les teneurs en Hg^{++} et en Pb^{++} retrouvées dans les eaux de surface de la région sont très élevées et dépassent les normes admissibles [13], témoignant d'une contamination des eaux du barrage destinées à l'agriculture et à l'approvisionnement en eau potable.

Les moyennes des résultats des différentes analyses ont été reportées dans le tableau I suivant :

Tableau I : Concentrations moyennes de l'arsenic, du plomb et du mercure.

Stations De Prélèvements	As (mg/l)	Pb (mg/l)	Hg (mg/l)
Station (1) HAMMAM OULED ALI	0,0028	0,224	0,053
Station (2) COM. BOUATI. M.	0,001	0,222	0,029
Station (3) BARRAGE ZIT-EMBA	0,00054	0,278	0,012
Station (4) AEP de la ville de SKIKDA	0,0026	0,194	0,088

Seul le mercure, dans ces eaux, dépasse de loin la teneur préconisée par l'OMS (0.0001mg/l). Pour le plomb, les plus fortes valeurs sont observées pendant la période de basses eaux de la cuvette du barrage à la suite d'une concentration par évaporation, avec une valeur maximale égale à 0,907mg/l. Au contraire, pour l'arsenic, les faibles concentrations observées aux différentes stations de prélèvement sont inférieures à la norme de potabilité recommandée par l'OMS (0.05mg/l) et ne présentent aucun danger.

3.2.1. Analyses statistiques descriptives des éléments trace métallique

Les résultats de la description des données obtenues dans chaque station et pour chacune des variables mesurées et en particulier (Hg^{2+} et Pb^{2+}) sont notés dans le tableau 2 suivant :

Tableau 2 : Résumé des résultats statistiques descriptifs des ETM (meq/l).

Variable	Stations	Mean	StDev	Minimum	Maximum
Hg^{2+}	1	0,000534	0,000277	0,000160	0,000930
	2	0,000292	0,000161	0,000130	0,000630
	3	0,000119	0,000094	0,000040	0,000380
	4	0,000879	0,000081	0,000680	0,000980
Pb^{2+}	1	0,002166	0,001961	0,000610	0,006310
	2	0,002142	0,002090	0,000510	0,006360
	3	0,05280	0,17480	0,00060	0,60770
	4	0,001874	0,001211	0,000900	0,005130

3.2.2. Analyse en composantes principales A.C.P

Une ACP centrée réduite a été réalisée avec les données hydrochimiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , NO_2^- , pH, Pb, Hg et CE) issues des eaux de surface du bassin versant de l'oued El-Hammam (fig.2). Le but de ce traitement est de déterminer les principaux facteurs qui contrôlent le chimisme de ces eaux et les différentes sources de contamination et de pollution.

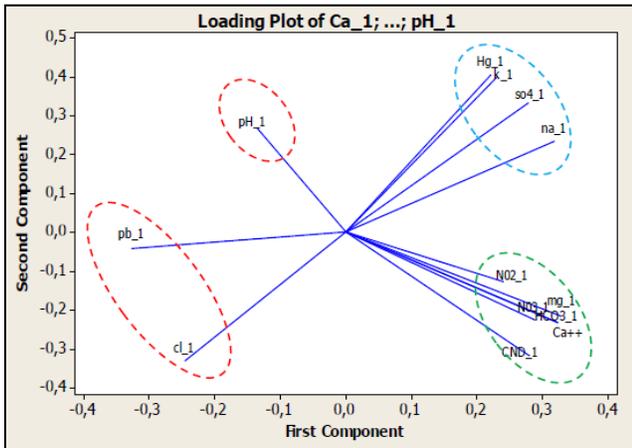


Fig. 2 : Analyse en composantes principales.

Deux composantes principales (CP) ont été retenue, elle représente 87% de la variance totale, ce qui est assez bon et peut être utilisée pour identifier les principales variations dans l'hydrochimie. L'étude des liaisons avec les différents facteurs montre que la premier composante CPI représente 59,1% de la variance est déterminée positivement par la minéralisation (contamination naturelle) qui s'est traduite avec une bonne corrélation de ce facteur avec : Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , et Hg. (Fig.2). Les différents éléments obtenus à partir de l'ACP retenu indiquent que les paramètres responsables des variations de la qualité des eaux de surface de la région sont principalement liés à la présence et la dissolution de certaines formation contenant certains minéraux carbonatés, dolomitiques et évaporitiques dans ces eaux, issu des processus normaux et de l'interaction d'eau-roche durant le ruissellement et l'écoulement.

3.2.3. Classification ascendante hiérarchique des variables

Cette méthode d'analyse de groupement a été employée pour déterminer si les échantillons des eaux peuvent être groupés dans des groupes hydrochimiques statistiquement distincts qui peuvent être significatifs des différents contextes géochimiques (qualité, contamination et pollution..). Le graphique de la classification et de regroupement des variables au moyen du lien simple et de la distance basée sur le coefficient de corrélation établis par le logiciel Mintab, montre tout d'abord la participation des paramètres mesurés, mais à des degrés variables, et donne cinq groupes homogènes, pour un taux de similarité de 75 %, qui sont les suivants (fig. 3).

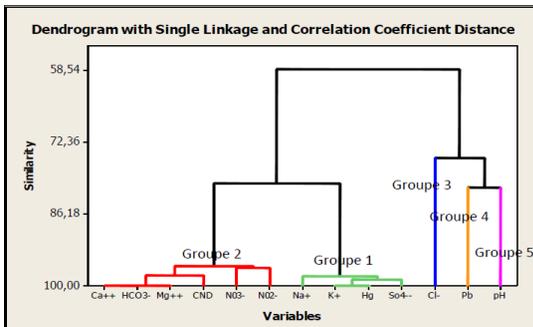


Fig. 3 : Dendrogramme du regroupement des 13 variables.

Le premier groupe (I) est constitué par les variables (Na^+ , SO_4^{2-} , K^+ , Hg^{2+}) ; avec une étroite corrélation entre le potassium (K^+) et le mercure (Hg^{2+}), avec un niveau de similarité très proches de 100% (99,9%) et qui sont liés, à leur tour, aux sulfates et avec le sodium avec des niveaux de similarité (98,88% et 98,24%).

3.3. Indice de contamination

L'appréciation de la pollution métallique dans l'environnement aquatique peut se baser sur la détermination de l'indice de contamination (IC) pour évalué la pollution [Belamie et al., (1982), Boust et al., (1981), Rosso et al., (1993), Bennasser et al., (2000), El Morhit, (2009)]. IC est défini pour un métal donné comme étant le rapport entre la teneur mesurée à une station donnée et la teneur naturelle optimale fixée comme référence par l'organisation mondiale de la santé (OMS). Pour un IC proche de 1, on considère que le site n'est pas ou peu contaminé par les métaux. En général, c'est au-delà de 2 que les auteurs admettent que le site est soumis à un début de contamination. Lorsque IC est inférieur à 1 il s'agit soit d'une dilution soit d'une erreur analytique [Boust et al., 1981].

3.3.1. Calcul des Indices de Contamination Moyens (ICM)

Les indices de Contamination Moyens (ICM) du mercure, du plomb et de l'arsenic, sont calculés en se référant à la norme de l'OMS pour chaque élément (Tableau 5 et Figure 4).

Tableau 5 : Indices de Contamination Moyens (ICM) de Hg, Pb et As.

Désignation	Mercure		Plomb		Arsenic	
	ICM	Observation	ICM	Observation	ICM	Observation
St Hammam Ouled Ali	53	Contamination excessive	2,24	Contaminé	0,056	Absence contamination
St (2) Bou Mahmoud	29	Forte contamination	2,22	Contaminé	0,02	Absence contamination
St (3) Barr Zit-Emba	12	Forte contamination	2,78	Contaminé	0,0108	Absence contamination
St (4) AEP Skikda	88	Contamination très excessive	1,94	Contaminé	0,052	Absence contamination

L'analyse comparative des ICM de ces eaux avec un seuil de tolérance pour chaque élément montre que pour :

- **le mercure** : toutes les valeurs sont très supérieures au seuil de tolérance de l'ICM, indiquant une forte contamination de ces eaux pendant toute la période des prélèvements ;
- **pour le plomb** : la majorité des valeurs de ICM est supérieure à 1, indiquant que les eaux sont considérées comme contaminées pendant la période des prélèvements ;
- et pour **l'arsenic** : toutes les valeurs sont inférieures au seuil de tolérance de l'IC, indiquant ainsi une absence de contamination.

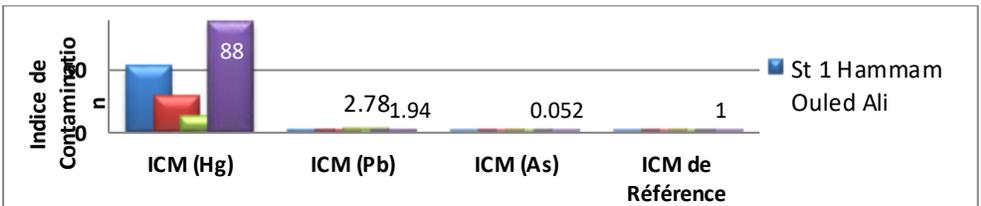


Fig. 4 : Évolutions des indices de contaminations moyens (ICM) sur les stations de prélèvements.

L'analyse des indices de contamination moyens (ICM) pour l'ensemble des éléments permet d'établir dans l'ordre d'importance la classification suivante : **ICM Hg > ICM Pb > ICM As.**

4. Conclusion

La présence des éléments traces métalliques toxiques s'est avérée importante dans ces eaux depuis la source thermale jusqu'à l'eau distribuée au niveau de la ville de Skikda. **Les teneurs en Hg et en Pb retrouvées dans ces eaux de surface sont très élevées et dépassent les normes admissibles**, témoignant ainsi d'une contamination naturelle de ces eaux liée à la géologie de la région mercurielle de Azzaba et Zit-Emba. A cet effet et pour pouvoir contrôler les teneurs en mercure avec des fréquences acceptables, le développement d'un modèle de prévision des concentrations de mercure dans l'eau livrées à la population s'avère nécessaire.

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Belhadj Med. Z. (2007) *Etude de la pollution des eaux de surface du barrage de Zit El Emba. Région Est de Skikda. NE algérien.* Mémoire de Magister Dép. Hydrau. Univ. Batna.
- [2] Belhadj Med.Z. et BOUDOUKHA A. (2011) *Qualité des eaux de surface et leur impact sur l'environnement dans la wilaya de Skikda (Nord-est de l'Algérie). Contamination naturelle par le mercure.* European Journal of Scientific Research. Vol 56 N°(2) pp 204-211.
- [3] BOUDOUKHA A. et Belhadj Med. Z. (2012) *Impact d'une pollution anthropique et d'une contamination naturelle sur la qualité des eaux du barrage de Zit Emba. Est algérien.* Revue La Houille Blanche, n° 4, 2012, p. 34-41
- [4] Belhadj Med. Z, (2017) : *Qualité des eaux de surface et leur impact sur l'environnement dans la wilaya de Skikda.* Thèse de Doctorat en sciences Spécialité : Sciences Hydrauliques (option) : hydraulique, Dép : Génie Civil et Hydrau, faculté des Sciences et de la technologie Univ. Biskra.
- [5] Bouarroudj .M.T (1989) *Les Minéralisation A Hg, Pb, Zn, Cu, Ba, De La zone Nord numidique du Nord de L'Algérie orientale - métallogénie et recherche de guides de prospection.* Thèse Docteur ingénieur, université Pierre et marie curie, Paris VI 242 Pages.
- [6] Benhamza. M (2005) *Application de l'analyse en composante principale à l'évaluation de la pollution mercurielle dans la région de Azzaba (1999, 2000, 2001)* 1^{er} colloque euro-méditerranéen en biologie végétale et environnement le 28, 29 et 30 novembre 2005 université Badji Mokhtar (Algérie). 7 p
- [7] Benhamza M. et Kherici N. (2007) *Contamination par les micropolluants métalliques des eaux souterraines de la zone mercurielle nord numidique (Azzaba), Nord Est algérien.* 2ème Colloque International sur l'Eau et l'Environnement : Sidi Fredj les 30 et 31 Janvier 2007, p287-295.
- [8] Kemoukh S. (2007) *Dégradation de la qualité des eaux du barrage de Zerdezas suite à une pollution naturelle w.de Skikda.* Magister Hydraulique : Batna, Université El Hadj Lakhdar : faculté des sciences de l'ingénieur.
- [9] Vila J.M. (1967) *Analyse stratigraphique et structurale du flysch de Penthèvre (Nord Constantinois) Algérie.*
- [10] Vila J.M. (1971) *Essai d'interprétation structurale d'un profil transversal du nord-est de la Berbérie entre les régions d'Annaba (Bône) et de Guelma.*

- [11] Vila J.M et MAGNE .J. (1969) *Le cadre structural du Djebel Debar (nord du constantinois, Algérie)*. Extrait du bulletin de la société géologique de France, 7e série, t.XI pp 75 à 81
- [12] Vila J.M, BUSNARDO. R, DEVRIES. A, MAGNE .J et SIGAL.J. (1968). *Données stratigraphiques sur la série renversée et charriée du DJEBEL BOUSBA et étude de son cadre structural (Région de Guelma, Constantinois, Algérien)* Extrait du bulletin de la société géologique de France, 7e série, t .X,P.206 à 212, année 1968.
- [13] WHO, 2011. *World Health Organization-Guidelines for Drinking Water Quality. Recommendations.* 4th ed. Switzerland. www.hcsc.gc.ca/ehp/dhm/catalogue/dpc_pubs/lrqepdoc_appuilnitrate.pdf.
- [14] ONID, 2007. *Office National de l'Irrigation et du Drainage, Etats signalétique des périmètres en exploitation en Algérie - année 2007.*

État de la ressource en eau superficielle au Nord-Ouest de l'Algérie

Célia Kebir I, Hanane Laari 2

1 Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène, Institut des sciences de la Terre, BP 32 Alia, Bab Ezzouar-Alger. Tel (213-2)24.79.51, Fax :(213-2)51.50.19,

celiakibir14@gmail.com

2 Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène, Institut des sciences de la Terre, BP 32 Alia, Bab Ezzouar-Alger. Tel (213-2)24.79.51, Fax :(213-2)51.50.19,

lamarihanane23@live.fr

Résumé

Consciente des défis à relever en matière de ressource en eau, l'Algérie a pris des mesures importantes pour tenter de sortir et d'atténuer la situation de stress hydrique. Notamment, dans la région Nord-Ouest du pays qui reçoit une pluviométrie moyenne comprise entre 200 et 500 mm. Devant un tel potentiel hydrique déficitaire, nous avons voulu faire le point sur la ressource en eau superficielle dans la région hydrographique Oranie-Chott Chergui (OCC) connue pour son déséquilibre en matière de répartition de la ressource en eau et de sa population importante. Avec un potentiel en eau superficielle de 898 millions de m³ et un apport moyen annuel estimé à 702 millions de m³, la région hydrographique OCC est de loin la région la plus aride du Nord du pays. Pour cela, de gros moyens ont été mis en œuvre pour mobiliser de nouvelles ressources en eau. 44 % des apports moyens annuels sont déjà mobilisés par les grands ouvrages hydrauliques. Le reste des apports, soit 393,2 millions de m³, sont considérés comme étant des eaux résiduelles non-mobilisables. Suite à cela, d'autres options d'aménagement ont été projetées, notamment le transfert des eaux des régions excédentaires vers des régions déficitaires, c'est ce qui a justifié le grand transfert des eaux du Cheliff (MAO), à hauteur de 155 millions de m³ annuellement, pour alimenter en eau potable le couloir Mostaganem-Oran-Arzew.

Mots clés : Potentialités en eau, ouvrages hydrauliques, stress hydrique, ressource en eau superficielle, région hydrographique Oranie-Chott Chergui.

State of places of the resource in surface water in the north west of Algeria

Abstract

Conscious of the challenges to take up as regards management of water resources, Algeria took important measures to try to leave (to exit) and attenuate (mitigate) the hydrous situation of stress which affects the country. In particular in the north-west area of Algeria which annually receives an average rainfall between 200 and 500 mm. Before such a water potential in deficit, we wanted to take stock of the water resources in the Oranie-Chott Chergui hydrographic region is known for its imbalance in terms of distribution of the water resources and its important population. With a potential in surface water of 898 million m³ and an average input of annual water estimated at 702 million m³, the Oranie-Chott-Chergui is the driest region in the north of country. For this, large means hydraulic systems have been implemented to mobilize new water resources. 44 per cent of average annual inflows are already mobilized by the large hydraulic works. The rest of the inputs, which represent 393,2 million m³, are considered as residual waters "not mobilisable". Following this, other options of landscaping have been projected. Including the transfer of waters of the surplus regions to the deficit regions, it is this which has justified the large transfer of water of Cheliffoued (MAO), at the height of 155 million m³ every year to provide potable water to the Corridor Mostaganem-Oran-Arzew.

Key Words: Potentialities of water, hydraulic works, water stress, resources surface water, hydrographic region OCC.

I. INTRODUCTION

Consciente des défis à relever en matière de gestion de la ressource en eau, l'Algérie a pris des mesures importantes pour tenter de sortir et d'atténuer la situation de stress hydrique qui touche le pays, notamment dans la région Nord-

Ouest de l'Algérie, qui reçoit annuellement une pluviométrie moyenne comprise entre 200 et 500 mm. En vue de pallier au stress hydrique et de satisfaire les besoins en eau pour assurer le développement socio-économique de la région, de gros moyens ont été mis en œuvre pour mobiliser de nouvelles ressources en eau.

Devant un tel potentiel hydrique déficitaire, nous avons voulu faire le point sur la ressource en eau superficielle dans la région hydrographique Oranie-Chott Chergui (OCC), connue pour son déséquilibre en matière de répartition de la ressource en eau et de sa population importante.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Nous avons structuré notre travail en deux parties ; la première consiste à faire une synthèse des données les plus récentes disponibles liées à la ressource en eau, à travers laquelle nous avons pris connaissance du potentiel hydrique de la région. La seconde, s'inscrit dans une vision de faire un état des lieux de la ressource en eau superficielle et des grandes options d'aménagement réalisées et projetées pour mobiliser de nouvelles ressources pour satisfaire les besoins en eau des différents secteurs de la région.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Présentation de la région d'étude

D'une superficie de 77 169 Km², la région hydrographique de l'Oranie-Chott Chergui s'étend à l'extrême Ouest de l'Algérie, entre les fuseaux horaires 2°16'12" Ouest et 2°3' Est pour la longitude et entre les méridiens 32°42' à 35°22' Nord pour la latitude. Elle est limitée au Nord par la Méditerranée, à l'Est par la limite orographique de la région hydrographique du Chélif-Zahrez, au Sud par la bordure Nord de l'Atlas Saharien et à l'Ouest par la frontière Algéro-Marocaine.

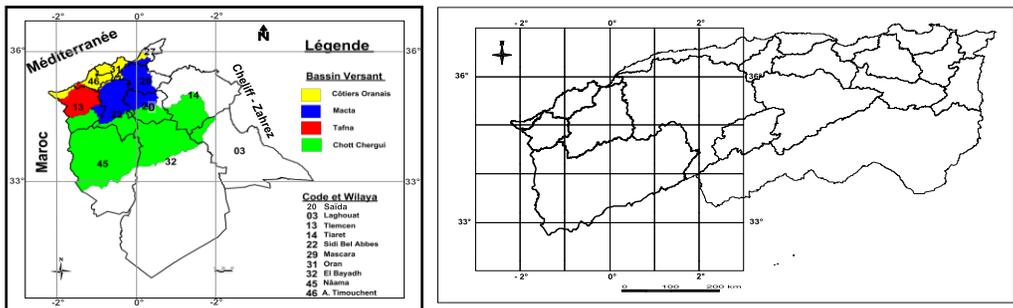


Fig. 1 - Limites et découpage géographiques de la région hydrographique OCC

La région présente de forts contrastes sur le plan morphologique, orogénique et structural. À tout cela se mêle une répartition inégale des paramètres climatiques, aboutissant à une projection du climat contrasté, soit plus frais et humide pour la partie Nord, soit plus chaud et sec pour la partie Sud. Ces fortes disparités de reliefs confèrent à la région deux systèmes hydrologiques opposés :

- Des oueds à écoulement exoréique¹ et relativement abondant au Nord (bassins subhumides à humides du Tell et des plaines côtières) ;
- Des oueds à écoulement endoréique², manifestation modeste au Sud (bassins semi-arides à arides des Hautes Plaines et des paiements de l'Atlas Saharien).

Dans les zones à grande perméabilité, notamment les zones calcaires et les plaines alluviales, le réseau est généralement peu développé à cause des taux d'infiltrations importants. Alors que les zones à faibles perméabilités, présentent une densité du réseau hydrographique assez importante conjuguée à un très fort relief et une abondance pluviométrique relative.

3.2. État des lieux de la ressource en eau superficielle

1 L'écoulement de l'eau se fait vers la mer.

2 L'écoulement de l'eau se fait vers l'intérieur du continent.

L'étude d'évaluation des ressources en eau superficielles par la méthode pluie-débit, faite par BETURE/CARI BRO/CES SALZIGITTER en 1997, a permis de faire un bilan sur les potentialités en eau superficielle dans la région, qui sont estimées à 898 millions de m³ et un apport moyen annuel de 702 millions de m³ répartie comme suit :

- 547 millions de m³ pour les bassins tributaires de la méditerranée (Côtiers Oranais, Tafna et Macta) ;
- 155 millions de m³ pour les bassins endoréiques (le Chott Chergui et le Chott El Gharbi).

Le volume actuel mobilisé est de 307,4 millions de m³, ce qui représente seulement 34 % sur l'ensemble des apports moyens annuels estimés à 701,9 millions de m³. Le volume résiduel quant à lui est estimé à 393,2 millions de m³ et ce dernier n'est pratiquement pas mobilisable en raison de l'absence de site favorable à la création de retenues importantes. En effet, sur les 308,7 millions de m³ d'eau mobilisable 307,4 millions de m³ sont déjà mobilisés à travers des ouvrages de stockage tels que les barrages, les prises et retenues collinaires. (Voir tab.1)

Table 1 - Potentialités de la ressource en eau superficielle (PNE 2010).

Bassin versant	Apports annuels (Hm ³)	Volumes mobilisés (Hm ³)	Volume mobilisable 2030	Volume résiduel (Hm ³)	Taux de mobilisation 2030
Tafna	232	168,9	168,9	63,1	72,8 %
Macta	210,5	138,5	138,5	72	65,8 %
Côtiers Oranais	104,6	0	1,25	103,4	1,2 %
Chott Chergui	154,7	0	0	154,7	0 %
Total	701,9	307,4	308,7	393,2	44 %

Au niveau des deux (02) principaux bassins versants en matière d'apport qui sont la Tafna et la Macta, le taux de mobilisation est conséquent ; plus de 72 % pour la Tafna et 66 % pour la Macta. Les autres bassins que sont les côtiers Oranais et le Chott Chergui n'offrent aucune possibilité de mobilisation. En effet, les conditions topographiques et le taux de ruissellement ne se prêtent pas à la réalisation d'ouvrage de stockage en raison de l'absence de site favorable. Suite à cette contrainte, les apports résiduels estimés à plus de 393 millions de m³ pour l'ensemble de la région ne sont pratiquement pas mobilisables.

• **Mobilisation par les petits barrages et retenues collinaires**

En raison du phénomène d'érosion important que connaît l'Algérie septentrionale, sur les 132 retenues inventoriées dans la région, seule 44 d'entre elles sont en exploitation et 86 ne sont plus exploitables suite à un taux d'envasement important et une détérioration avancée.

Les ressources en eau actuellement mobilisées dans la région sont relativement faibles, elles sont évaluées à 22 millions de m³. À long terme, le volume est évalué à 30 millions de m³ avec la concrétisation du programme de réalisation de plusieurs retenues collinaires à travers la région.

• **Système de transfert MAO (Mostaganem - Oran - Arzew)**

Le système d'aménagement du MAO permet de transfert un volume de 155 Hm³/an d'eau superficielle à partir des deux barrages Cheliff et Kerrada, localisés dans les limites du bassin versant du Cheliff, pour l'alimentation en eau potable du couloir Mostaganem-Arzew-Oran, répartie comme suit : 45 Hm³/an pour Mostaganem et 110 Hm³/an pour la wilaya d'Oran.

Ce projet est composé de plusieurs grandes structures hydrauliques, à savoir le barrage de dérivation du Cheliff (50 millions de m³), le barrage de stockage de Kerrada (70 millions de m³), la station de traitement d'eau de Sidi Adjel (560 000 m³/j), une station de pompage de 800 000 m³ et un réseau de conduites d'adduction de 91 Km de longueur.

• **Mobilisation des ressources en eau par les grands barrages**

La région hydrographique de l'Oranie-Chott Chergui compte 10 barrages en exploitation, totalisant une capacité de stockage de 606 millions de m³. Cette capacité était initialement de l'ordre de 687 millions de m³ puis a perdu plus de 81 millions de m³ suite à l'envasement important qu'ont connu ces ouvrages, notamment le barrage de Fergoug qui a perdu 98 % de sa capacité initiale et le barrage de Bouhnifia qui ne compte plus que 50 % de sa capacité.

Le volume régularisé pour une année pluviométrique normale par les barrages est estimé à 328 Hm³/an, toutefois, ce volume reste théorique. En effet, les prélèvements à partir des barrages sont moindres et ils seraient de l'ordre de 130

Hm³/an. Puisque le Nord-Ouest de l'Algérie reste la région du pays la plus touchée par la sécheresse qui a sévi ces dernières années.

Table I - Grands barrages de la région hydrographique OCC (MREE, 2015)

Barrage	Wilaya	Mise en eau	Capacité Initiale (Hm ³)	Capacité actuelle (Hm ³)	Volume régularisé (Hm ³ /an)
Beni Bahdel	Tlemcen	1952	63	55	48
Meffrouche	Tlemcen	1963	15	15	10
Sidi Abdeli	Tlemcen	1988	110	107	38
H.Boughrara	Tlemcen	1999	177	175	59
Sikkaka	Tlemcen	2004	27	27	25
Sarno	S.BAbbès	1954	22	21	10
Ouizert	Mascara	1985	100	94	Transfert
Bou Hanifia	Mascara	1948	73	38	Transfert
Fergoug	Mascara	1970	18	4	93
Cheurfa II	Mascara	1992	82	70	45
Total			687	606	328

CONCLUSION

Pour une pluviométrie moyenne annuelle n'excédant pas les 500 mm sur la majeure partie de la région Oranie Chott-Chergui, le potentiel hydrique est estimé à 898 millions de m³. Les apports en eau superficielle sont quant à eux de l'ordre de 702 millions de m³ dont 307,4 millions de m³ sur les 308,7 millions m³ mobilisables sont déjà mobilisés à travers les grands barrages, les retenues collinaires et les prises d'eau. Une bonne partie des apports soit 393,2 millions de m³ sont considérés comme étant des eaux résiduelles. En effet, ces derniers ne sont pratiquement pas mobilisables, en raison de l'absence de site favorable à la création de retenues importantes.

Devant une situation de pénurie importante des ressources en eau locale, la solution s'est orientée vers une politique de transfert de l'eau des régions excédentaires vers les régions déficitaires. C'est ce qui a justifié le grand transfert des eaux du Cheliff (MAO), à hauteur de 155 millions de m³ annuellement, pour alimenter le couloir Mostaganem-Oran-Arzew.

D'autres solutions ont été envisagées, notamment l'interconnexion des barrages tels que le système triplex Ouizert-Bouhnia-Fergoug pour augmenter les capacités de stockage des eaux superficielles pour assurer la disponibilité de la ressource pour l'approvisionnement en eau potable, en eau d'irrigation et le maintien des débits réglementaires en termes de soutien des étiages.

Références

- [1] A. MEDJERAB, L. HENIA, Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie Nord-occidentale. Revue Géographique de l'Est Vol.45/2 Climat, sécheresse et canicule, 12 p.
- [2] DAR EL HANDASSAH, Étude du Programme Nationale des Retenues Collinaires- Lot N°03 : région hydrographique Oranie-Chott Chergui, rapport de synthèse, 2008, DMRE/MREE.
- [3] ANRH, Notice explicative de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord à l'échelle de 1/500.000, 1993.
- [4] BETU/CARL/CESSALZGITTER, Plan National de l'Eau. Rapport de synthèse, région OCC, DGAI, 1997.
- [5] H.NASSO POULOS, Les impacts du changement climatique sur les ressources en eau en méditerranée. Thèse de Doctorat, université Paris-Est. HAL Archives, 2012.
- [6] D. SACI, Utilisation des grands transferts : cas de l'Oranie. Thèse de Magister, université, Tlemcen, Algérie, 2008.
- [7] B. BATES et al., Le changement climatique et l'eau. Document technique VI du GIEC, PNUE, OMM, groupe de recherche intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2008.
- [8] C. KEBIR, Synthèse hydrologique et hydrogéologique de la région hydrographique Oranie-Chott Chergui, Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Alger, Algérie, 2017.

Aléa inondation et cartographie des zones inondables dans la région d'Ain Temouchent- Algerie

Mostafia Boughalem¹, Zakaria Ouzerbane², Hafida Boucherit³, Aminata Kone⁴ et Ahmed Kettab⁵
¹Ctr Univ Ain Temouchent, Laboratory of Applied Hydrology and environment/DGRSDT, BP 284- 46000 Ain Temouchent, Algeria. Tel : +213 774 521 277, email : boughalem_2000@yahoo.fr
²Université Moulay Ismail, BP 11201, Zitoune, Meknes, Maroc. Tel : +212 665 473 528, email : ouzerbanegeophy@gmail.com
³Centre universitaire de Naâma, BP 66, Naâma, Algérie Tel : +213 791 887 544, email : hboucherit@hotmail.fr
⁴Université panafricaine des Sciences de l'Eau et de l'Energie (PAUWES), Tlemcen, Algérie. Tel : +213 555 330 467, email : syleami4@gmail.com
⁵Ecole polytechnique Alger, Avenue Hacén Badi El harrach. 16200. Alger. Tel : +213 771 440 405, email : kettab@yahoo.fr

Résumé

L'objectif de la présente étude est l'identification et la cartographie des zones inondables de la Daïra d'Ain-El-Kihal (sud-ouest d'Ain Temouchent) à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). La reconnaissance des zones susceptibles d'être inondées de la zone d'étude, peuvent servir de base à l'élaboration d'un plan d'aménagement anti-inondation adapté aux conditions du milieu. Pour ce faire, une carte de localisation des zones inondables, au niveau du bassin versant (BV) d'Ain-El-Kihal, correspondant au croisement de trois cartes thématiques, a été établie. Les principaux facteurs de risque d'inondation considérés dans ce travail sont : la pente du terrain, l'altitude et l'exposition des versants. La carte obtenue permet de mettre en évidence les zones vulnérables nécessitant un aménagement prioritaire. Elle comporte quatre classes allant d'une faible vulnérabilité à une très forte vulnérabilité à l'inondation. Les zones sensibles affectent la presque totalité de la zone d'étude ce qui reflète l'état actuel de dégradation des sous bassins versants.

Mots clés : vulnérabilité, cartographie, risque, inondation, SIG

Flooding and mapping alea of flood zones in the region of Ain Temouchent- Algeria

Abstract

The objective of the present study is the identification and the mapping of flood areas in Ain-El-Kihal Daïra (southwest of Ain Temouchent) by means of a geographic information system (GIS). The detection of areas likely to be flooded in the study areas itself can be used as a basic for the elaboration of a flood control plan adapted to the environmental conditions. For this, a localization map of flood areas at the level of Ain-El- Kihal watershed corresponding to the combination of three thematic maps has been set up. The main flood risk factors taken into account in this work are the ground slope, the altitude and the slope exposure. The elaborated map enables the highlighting of vulnerable zones that require a priority development. It comprises four categories ranging from low vulnerability to very high vulnerability to flooding. Sensitive areas affect almost the entire study area, reflecting the present state of the sub-watershed degradation.

Key Words: vulnerability, mapping, risk, flood, GIS

1. INTRODUCTION

Les inondations sont largement répandues dans les pays du bassin de la Méditerranée [1 ; 2 ; 3]. Elles résultent de la conjonction de plusieurs facteurs : agressivité des pluies ; érodibilité des sols ; dissection du relief ; exposition des versants ; faiblesse du couvert végétal... La reconnaissance des zones ravinées et la précision des caractéristiques climatiques et hydriques de la zone d'étude, peuvent servir de base à l'élaboration d'un plan d'aménagement anti-inondation adapté aux conditions du milieu.

Plusieurs auteurs ont étudié le phénomène d'inondation [4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8] et donc plusieurs approches de modélisation des crues ont été proposées pour le choix d'une structure adaptée [9 ; 10 ; 11]. Dans ce travail, nous avons voulu tester une démarche méthodologique simple, basée sur l'intégration et le traitement des données par les procédures de superposition des SIG, au niveau de la Daïra d'Ain-El-Kihal. Trois facteurs principaux ont été considérés : la topographie, l'altitude et l'exposition des versants. Il en découle la production d'une carte faisant ressortir des zones homogènes d'intervention par ordre de priorité.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

La Daïra d'Ain-El-Kihal est située à quelques kilomètres au sud-ouest de la ville d'Ain Témouchent au nord-ouest de l'Algérie (figure 1). Elle est caractérisée par un climat de type méditerranéen semi-aride, avec une influence maritime plus que continentale. Les pluies annuelles varient de 280 à 600 mm. Elles sont déterminées par une irrégularité spatiotemporelle et par un régime de courte durée et à forte intensité. Le réseau hydrographique est constitué principalement de l'oued Kihel qui traverse le chef-lieu du nord au sud. Il est généralement sec et sert comme collecteur pour les eaux usées.



Fig. 1 –Situation géographique de la zone d'étude

La démarche méthodologique est basée sur l'intégration et le traitement des données par les procédures de superposition des SIG. Elle repose sur l'élaboration et le croisement des cartes thématiques. L'imagerie satellitaire provenant du capteur TM de Landsat-5 et divers documents cartographiques sont utilisés : la carte d'Algérie REMCHI (NI-30-XXIII-8 Est) à échelle 1/50.000 pour la délimitation du BV d'étude et des logiciels de traitement (MapInfo 8.0 pour la réalisation des cartes thématiques et ArcGIS 10.0 pour le croisement de ces dernières).

2.1. Élaboration des cartes thématiques

2.1.1. Carte des pentes : La carte des classes de pente (figure 2A), réalisée avec MapInfo 8.0 montre que les pentes les plus abruptes, très fortes à fortes, se concentrent dans les parties nord et sud-ouest du BV. Elles sont caractérisées par un relief accidenté. Les pentes modérées ainsi que les pentes faibles à très faibles sont réparties sur l'ensemble du BV. Mollenhauer [12] a montré que le ruissellement devient actif sur des pentes supérieures à 3 %. Dans cette étude, les valeurs de pente ont été regroupées en 4 classes de vulnérabilité à l'inondation (VAI) :

- Classe 1 : pentes faibles « 0 à 8% » : correspond à un relief de plaines où la VAI est très forte ;
- Classe 2 : pentes moyennes « 8 à 13% » : représente la zone de piémont, relief de glacis, collines avec une forte VAI ;
- Classe 3 : pentes fortes « 13 à 29 % » : correspond à une zone mixte qui regroupe le haut de piémont et les montagnes où la VAI est moyenne ;

- Classe 4 : pentes très fortes « 29 à 72 % » : représente un relief moyennement accidenté à accidenté avec une VAI faible.

2.1.2. Carte d'exposition : Les versants exposés nord sont plus ensoleillés que ceux exposés sud. Ils bénéficient d'un taux de recouvrement élevé garanti essentiellement par le couvert végétal. La présence de la biomasse assure une grande infiltration des eaux et lutte, par conséquent contre le ruissellement et l'inondation. Les versants exposés sud, quant à eux, sont vulnérables à l'inondation. La carte d'exposition des versants (figure 2B) laisse apparaître trois classes d'exposition, codées de 1 à 3, en fonction de leur capacité de protection du sol contre l'inondation.

- Classe 1 : versants exposés nord « 0- 45 deg et 270- 360 deg » (versants résistants à l'aléa inondation).
- Classe 2 : versants exposés sud « 180- 270 deg » (versants très vulnérables à l'inondation).
- Classe 3 : versants exposés est ou ouest « 180 deg » (versants vulnérables à l'inondation).

2.1.3. Carte d'altitude : A Ain-El- Kihal l'altitude varie de 320 à 660 mètres (figure 2C). Les altitudes les plus faibles sont localisées essentiellement au nord et au sud-ouest. Les plus fortes sont réparties uniquement au sud-est. Les altitudes moyennes se situent au centre et au nord. La figure 2C laisse apparaître quatre classes d'altitude avec des VAI variables :

- Classe 1 : 320 à 420m : basse altitude où la VAI est très forte ;
- Classe 2 : 420 à 500m : altitude moyenne, avec une forte VAI ;
- Classe 3 : 500 à 580m : forte altitude où la VAI est moyenne ;
- Classe 4 : 580 à 660m : altitude très forte, avec une faible VAI.

La figure 2D représente la carte d'altitude de la région d'Ain-El-Kihal en 3 dimensions (coordonnées en UTM).

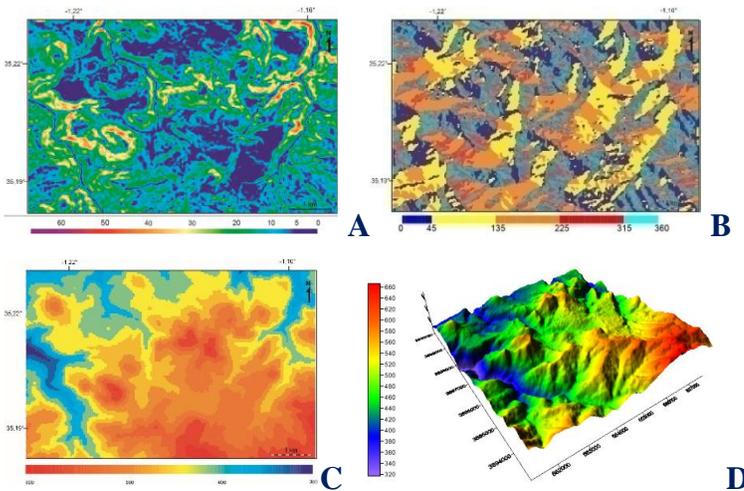


Fig. 2 -Paramètres utilisés pour obtenir la carte de vulnérabilité à l'inondation ; A) pentes, B) exposition des versants, C) altitude, D) altitude en 3D

2.2. Croisement des cartes thématiques

Le croisement des 3 cartes thématiques « pentes, altitude et exposition » par le logiciel ArcGIS nous a fait aboutir à une carte de sensibilité à l'inondation (figure 3).

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

La carte de vulnérabilité, issue du croisement des cartes thématiques, nous permet de distinguer quatre niveaux d'intensité pour l'aléa inondation suivant les valeurs prises par les critères retenus : aléa inondation très fort, fort, moyen et faible (figure 3). Les quatre classes de sensibilité des sols à l'inondation mises en évidence sur la carte de croisement sont :

- Classe 1 : sensibilité très forte à l'inondation ;
- Classe 2 : sensibilité forte à l'inondation ;

- Classe 3 : sensibilité moyenne à l'inondation ;
- Classe 4 : sensibilité faible à l'inondation.

La présente étude concerne la vulnérabilité des sols à l'inondation. Notons qu'une forte vulnérabilité correspond à un espace exposé sud, de pente forte et situé en basse altitude. Sur la carte de vulnérabilité (figure 3) on voit que le niveau de risque varie d'un versant à un autre. En effet, la partie nord est fortement vulnérable à l'inondation. Sur la partie sud, des classes de vulnérabilité moins importante apparaissent. Les programmes de lutte anti inondation doivent, à cet effet, différer sur les deux parties du bassin. Nos résultats montrent que 30 % des sols d'Ain-El-Kihal présentent une forte sensibilité à l'inondation.

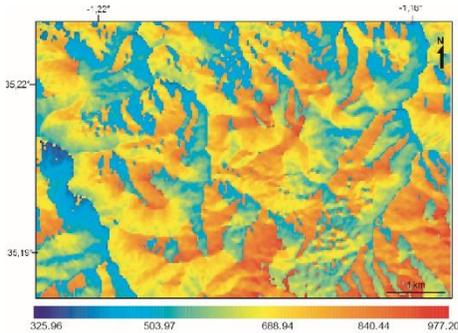


Fig. 3 -Carte de vulnérabilité des sols à l'inondation

CONCLUSION

Pour élaborer la carte de la vulnérabilité des sols à l'inondation, nous avons pris en compte les trois facteurs de risque dominants (exposition, pente et altitude) ; ceci nous a permis d'estimer l'agressivité résultante. Une solution SIG sous MapInfo 8.0 a été réalisée pour intégrer l'ensemble des informations et permettre un échange facile de données et de résultats entre les divers opérateurs. La carte finale permet de mettre en évidence trois grandes régions de vulnérabilités respectives : i) forte à moyenne principalement localisée au nord du bassin ; ii) faible, sur une partie du sud du bassin et iii) très faible ou nulle notamment au centre et au sud du bassin versant.

Références

- [1] J. M. Antoine, D. Desailly, F. Gazelle, Les crues meurtrières, du Roussillon aux Cévennes, *Annales de Géographie*, 622(2001) 597-623.
- [2] G. Arnaud-Fassetta, G. Beltrando, M. Fort, A. Plet, G. André, D. Clément, M. Dagan, C. Méring, D. Quisserne, Y. Rycx, La catastrophe hydrologique de novembre 1999 dans le bassin-versant de l'Argent Double (Aude, France) : de l'aléa pluviométrique à la gestion des risques pluviaux et fluviaux, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1 (2002) 17-34.
- [3] E. Gaume, V. Bain, P. Bernardara, O. Newinger, M. Barbuc, A. Bateman, L. Blaskovicova, G. Bloschl, M. Borgia, A. Dumitrescu, I. Daliakopoulos, J. Garcia, A. Irimescu, S. Kohnova, A. Koutroulis, L. Marchi, S. Matreat, V. Medina, E. Preciso, D. Sempere-Torres, G. Strancalie, J. Szolgay, I. Tsnaï, D. Velasco, A. Viglione, A compilation of data on European flash floods, *Journal of Hydrology*, 367(2009) 70-78.
- [4] V. Homar, R. Romero, D. J. Stensrud, C. Ramis, S. Alonso, Numerical diagnosis of a small, quasi-tropical cyclone over the western Mediterranean : Dynamical vs. boundary factors, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 129 (2003) 1469-1490.
- [5] C. Staes, J. C. Orenge, J. Malilay, J. Rullan, E. Noji, Deaths due to flash-floods in Puerto-Rico, January 1992 : implications for prevention, *International Journal of Epidemiology*, 23(1994) 968-975.
- [6] B. E. Montz, R. Grunfest, Flash flood mitigation : recommendations for research and applications, *Environment Hazards*, 4 (2002) 1-15.
- [7] T. Grothmann, F. Reusswig, People at risk of flooding : why some residents take precautionary action while others do not, *Natural Hazards*, 38(2006) 101-120.
- [8] L. Ruin, J. C. Gaillard, C. Lutoff, How to get there ? Assessing motorists' flash flood risk perception on daily itineraries, *Environmental Hazards*, 7(2007) 235-244.
- [9] Ghidaglia J-M et Rittaud B, 2004. La simulation numérique, *La recherche*, 380 (2004) 73-76.
- [10] M. B. Abbott, S. Lindberg, K. Havno, The fourth generation of numerical modeling in hydraulics, *Journal of hydraulic Research*, 29 (1991) 581-600.
- [11] D. P. Harvey, A Generic Modelling Framework Component for Htdroinformatics Systems, PhD thesis, University of Bridtol, Bristol, U.K. xix, 2002.
- [12] K. Mollenhauer, Land use in water protection areas. In : the Boodt M, Gabriel D'eds. *Assessment of erosion*, New York : John Wiley et Sons, (1980) 271- 284.

Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur l'évolution des paramètres physico-chimiques des eaux du système aquifère de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest Algérien)

Laouni Benadela¹, Laouni Gaidi², Belkacem Bekkoussa³

^{1,2,3} Laboratoire des sciences et technologies de l'eau- Faculté des sciences et technologies- Université de Mascara, Algérie.

¹ E-mail : Laounhyd@Gmail.com; ² E-mail : lgaidi@yahoo.fr; ³ E-mail : Bekkoub@yahoo.fr;

RÉSUMÉ :

La surexploitation des ressources hydriques de la plaine de Ghriss, qui sont actuellement des ressources relativement limitées, à savoir uniquement les eaux souterraines de la nappe Plio-Quaternaire, et l'apparition de quelques cas de contamination menacent conjointement la pérennité de cette ressource vitale pour la région. L'objectif de ce travail est de mieux comprendre les mécanismes de fonctionnement de cette nappe, depuis ses conditions aux limites jusqu'à ses caractéristiques hydrodynamiques et physico-chimiques, ainsi que les questions d'ordre environnemental, à savoir la présence de polluants et leurs origines. Ce travail a été mené à partir des résultats d'analyses de paramètres physico-chimiques des eaux et s'est appuyé sur un échantillon de 35 forages. La méthodologie appliquée est basée sur une approche statistique multivariées, (ACP) et Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), ainsi que la cartographie. L'interprétation de ces données a révélé ce qui suit : - La dégradation qualitative des eaux souterraines a été notamment observée au niveau de la nappe des alluvions superficielles. Par ailleurs, la nappe profonde des calcaires dolomitiques du jurassique se trouve elle aussi menacé par cette pollution, car les échanges entre les nappes sont appréciables particulièrement au sud de la plaine. Cette dégradation provient essentiellement d'une forte salinité influencée par la lithologie de la nappe et les facteurs climatiques (les précipitations et les températures). On note aussi la présence de quelques polluants, provient essentiellement des activités agricoles et des rejets urbains et avec un moindre degré des activités industrielles implantées dans la région.

MOTS-CLÉS : Pollution, eau souterraine, géochimie, origine, nappe plio-quaternaire, plaine de Ghriss.

Influence of lithology and climatic conditions on the evolution of the physico-chemical parameters of the aquifer system of the Ghriss plain (North-West Algeria)

Abstract :

The overexploitation of the water resources of the Ghriss Plain, which are currently relatively limited resources, namely only the groundwater of the Plio-Quaternary aquifer, and the appearance of a few cases of contamination jointly threaten the sustainability of this vital resource for the region. The objective of this work is to better understand the mechanisms of operation of this water table, from its boundary conditions to its hydrodynamic and physico-chemical characteristics, as well as the environmental issues, namely the presence of pollutants and their origins. This work was conducted on the basis of the results of physico-chemical parameters analyzes of the water and relied on a sample of 35 boreholes. The applied

methodology is based on a multivariate statistical (PCA) and Hierarchical Ascending Classification (CAH) approach, as well as mapping. The interpretation of these data revealed the following: - The qualitative degradation of groundwater was particularly observed at the level of the surface alluvial aquifer. In addition, the deep sheet of dolomitic limestone of the Jurassic is also threatened by this pollution, because the exchanges between the aquifers are appreciable particularly south of the plain. This degradation comes mainly from a high salinity influenced by the lithology of the aquifer and climatic factors (precipitation and temperatures). There are also some pollutants, mainly from agricultural activities and urban discharges and to a lesser extent from industrial activities in the region.

Key Words: Pollution, groundwater, geochemistry, origin, plio-quadernary aquifer, Ghriss plain.

I. INTRODUCTION

La présente étude s'ajoute à de plus anciens travaux de recherche, et ce pour donner un aperçu scientifique sur l'état actuel de la nappe plio-quadernaire de la plaine de Ghriss, du point de vue qualitatif et quantitatif. La qualité des eaux de cette région a subi ces dernières années une certaine détérioration, à cause de rejets urbains non contrôlés, de l'utilisation intensive d'engrais chimiques et de fertilisants dans l'agriculture ainsi que de son exploitation désordonnée. Ces éléments modifient le chimisme de l'eau et la rendent impropre aux usages souhaités [1]. Dans cette étude, nous allons essayer de mieux comprendre l'impact des paramètres lithologiques et des conditions climatiques sur la qualité de cette ressource souterraine et d'optimiser l'interprétation des analyses physico-chimiques en utilisant des moyens plus adéquats

2. SITUATION GEOGRAPHIQUE

La plaine de Ghriss correspond à une cuvette d'effondrement à topographie plane et à sédimentation alluvionnaire argilo sableuse. Elle est bordée de reliefs constitués de différentes formations géologiques. La plaine proprement dite fait partie du bassin hydrologique de la Macta, sous forme d'une dépression elliptique d'une superficie de 14 389 Km², couvrant ainsi tout le sous bassin de l'oued Fekan. La plaine de Ghriss occupe 34% du territoire de la wilaya de Mascara et représente 56% des terres irriguées de cette la wilaya. L'eau d'irrigation est à plus de 96% d'origine souterraine. Elle dispose de fortes réserves mobilisables (évaluées à 33 Hm³ pour Mascara), mais elle est située dans une zone agricole très développée et donc très fortement sollicitée par l'irrigation. L'hydrographie est très faiblement marquée. Seuls quelques petits oueds comparables à de véritables ruisseaux sillonnent la plaine. Avec cette rareté des eaux superficielles, les aquifères souterrains restent le seul moyen de mobilisation des eaux en vue de satisfaire les demandes en eau [2]. L'irrigation des terres et l'alimentation en eau potable des agglomérations sont assurées par le pompage dans un grand nombre d'ouvrage captant toutes les nappes.

La plaine de Ghriss est limitée au Nord par les Monts de Béni Chougrane, au Sud par les Monts de Saida, à l'Ouest par les Monts de Bouhanifia, et à l'Est par le plateau de Tighennif (Fig.1).

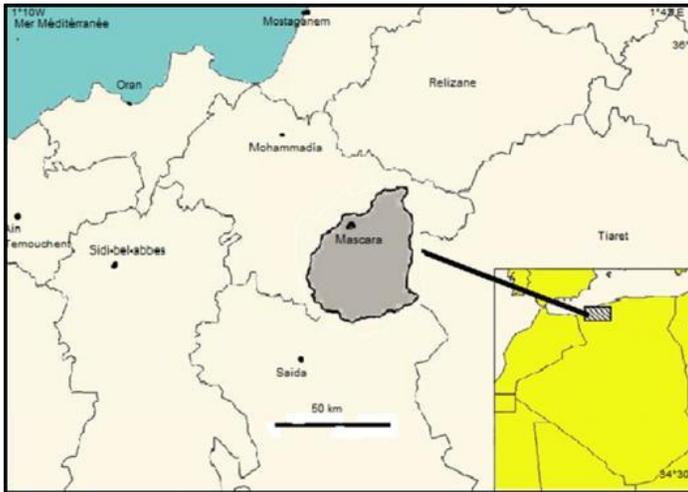


Fig. 1 -Situation géographique et carte topographique de la zone d'étude.

3. LE CLIMAT

En raison de l'importance des précipitations dans les études climatologiques, une carte de la pluviométrie moyenne annuelle sur l'Algérie du nord, à été réalisée par l'ANRH (1922-1960 / 1968-1989), qui a montrée que la pluviométrie moyenne annuelle de la plaine de Ghriss est comprise entre 300 et 600 mm/an, avec une moyenne interannuelle de 420mm/an. La plaine est soumise à la fois aux influences climatiques méditerranéennes et sahariennes [3]. Le climat est semi-aride caractérisé par l'irrégularité des précipitations d'une année à l'autre, la diminution de la précipitation du Sud au Nord, et une large période de sécheresse ayant favorisée la surexploitations et la vulnérabilité des ressources.

4. HYDROGEOLOGIE

La nappe de Ghriss est une identité hydrogéologique indépendante, formée par une superposition de couches perméables aquifères séparées par des formations imperméables qui retiennent ou mettent en charge ces nappes [4]. Trois différentes nappes ont pu être identifiées, soit de haut en bas, de la plus récente à la plus ancienne (Fig. 2) :

1- La nappe superficielle ou libre (nappe Alluvionnaire) : Elle est contenue dans les dépôts alluvionnaires natifs de la désagrégation des grès, des calcaires lacustres, des calcaires dolomitiques et des marnes des bordures du bassin versant de la plaine.

2- La nappe des calcaires lacustres, Sables et grès du Pliocène : Cette nappe libre dans les monts des Béni Chougrane au niveau des affleurements, se met en charge sous la plaine. Elle est constituée de calcaire blanc, crayeux du pliocène. Leur perméabilité diminue vers l'exutoire de la nappe qui est la source d'Ain Tizi.

3- La nappe des calcaires dolomitiques du Jurassique supérieur : Cette nappe s'étend sur une grande partie de la plaine, elle est contenue dans des calcaires dolomitiques fissurés du jurassique supérieur (Kimméridgien). Il s'agit donc d'une nappe de type Karstique. Elle est considérée comme la plus importante de ce système multicouche de par son étendue, ses potentialités et la qualité de ses eaux.

Le mur de cette nappe est la formation elle-même compacte, non fissurée. Le toit est formé par les marnes bleues et vertes du Miocène ou les argiles rouges détritiques de l'Oligocène. La nappe des calcaires dolomitiques contribue à l'alimentation de celle du Plio-Quaternaire par l'intermédiaire des dépôts de pentes constituées de graviers, de galets et conglomérats. Les aquifères sont caractérisés par une perméabilité en grande importance, mise en évidence en deux points et communique directement avec la nappe phréatique sur une grande superficie : Ain Fekane constitue l'exutoire naturel de la nappe [5].

Alimentation et exutoires :

- **Nappe superficielle ou libre** : Cette nappe libre ayant pour exutoire Ain Fekane est alimentée suivant trois processus qui sont : Alimentation directe par sa propre surface, Alimentation par les aquifères adjacents (soit infiltration latérale directe, soit par l'intermédiaire de sources), Alimentation par les oueds principalement en période de crue.

- **Nappe des calcaires lacustres** : Grâce à une position haute, favorable à une bonne pluviométrie, cette nappe est bien alimentée (alimentation directe par son impluvium à perméabilité de fissures). Cette nappe est interconnexion avec celle du Plio-Quaternaire. L'exutoire de cette nappe est constitué par la source de Tizi.

- **Nappe des calcaires dolomitiques** : Les monts de Nesmot, Enfouss et Bou Rhadou constituent l'impluvium de cette nappe. Cette dernière est drainée par de nombreuses sources dont les plus importantes sont les résurgences d'Ain Fekane [5].

ANALYSES ET METHODOLOGIE

Les analyses physico-chimiques accomplies concernent les concentrations des éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^-) et les paramètres physiques (conductivité électrique, résidu sec et pH). La caractérisation de la composition de l'eau fait appel à différents procédés ; L'échantillonnage pour l'analyse des éléments chimiques (anion et cation) a été effectué dans des flacons en polyéthylène de 150 ml et conservés à 4°C. Les anions (Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^-) ont été analysés par chromatographie ionique en phase liquide et les bicarbonates (HCO_3^-) par Titration d'alcalinité. Les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) sont analysés par spectromètre d'absorption atomique au laboratoire de l'ANRH.

Les paramètres physico-chimiques sont mesurés sur terrain lors de l'échantillonnage. Les valeurs de la conductivité ont une précision de $\pm 1 \mu\text{S}/\text{cm}$ et les valeurs du pH sont données à $\pm 0,05$ unités pH [6].

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'étude des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la zone étudiée est basée sur l'échantillonnage et l'analyse des eaux de (35) points d'eau (Fig.3).

Les points d'échantillonnage correspondent à des puits et forages répartis le long de la bande de la plaine.

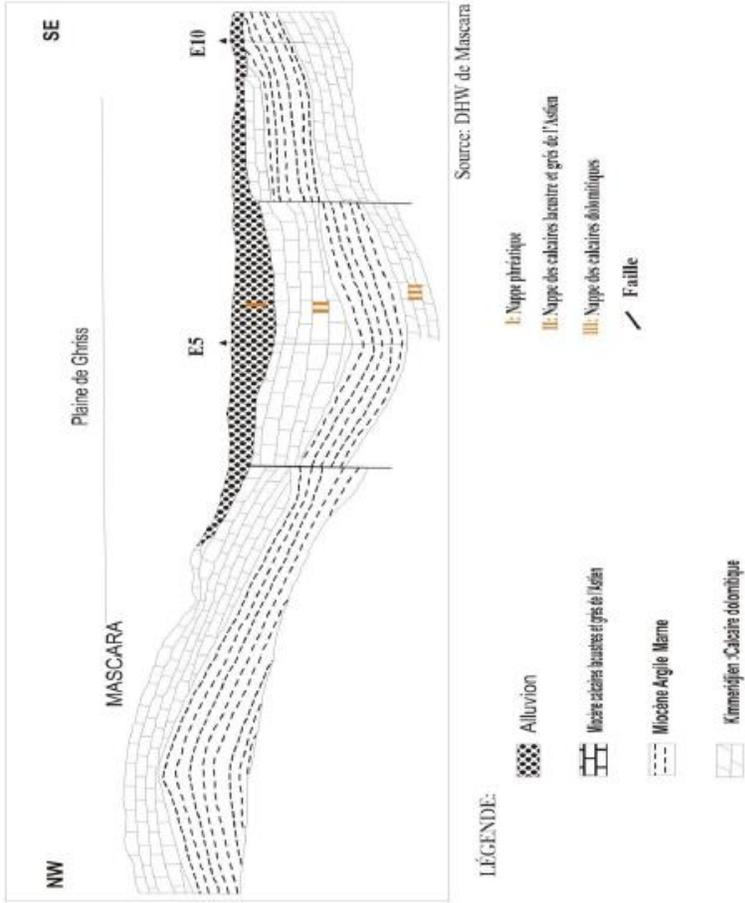


Fig. 2 - Coupe géologique et hydrogéologique de la plaine de Ghriiss (ANRH, 2012).

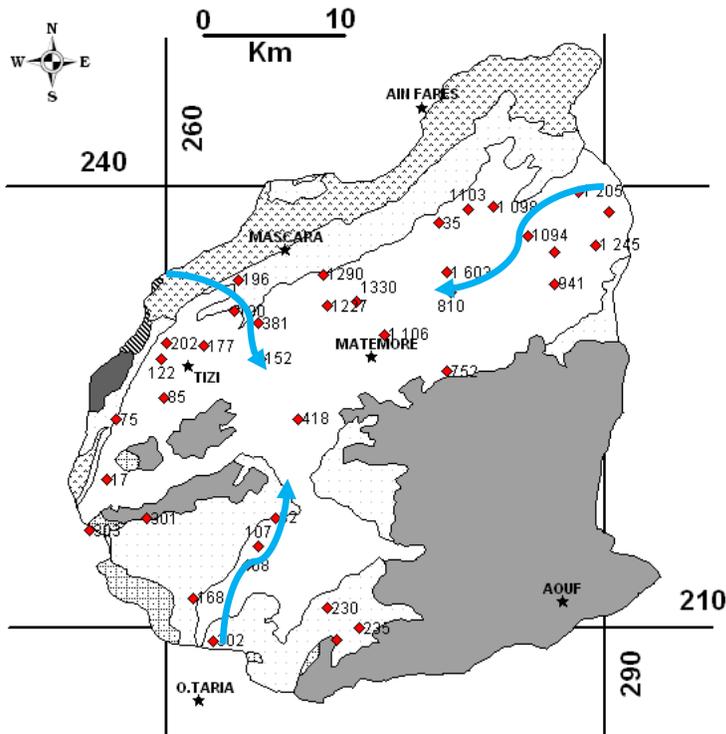


Fig. 3 -Position des puits échantillonnés et lignes d'écoulements.

ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE (ACP)

Les résultats présentés à la figure 04 ont été obtenus par une ACP effectuée sur la matrice de corrélation. L'objectif est de faire représenter les différents résultats des analyses physico-chimiques sous forme de facteurs, ce qui permettra des tendances et de préciser des groupages d'éléments.

Dans l'espace des variables le premier Axe (F1) exprime 52.94 % de la variance totale, regroupant les principaux éléments chimiques qui représentent la minéralisation des eaux (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , Cl^-), la conductivité et le résidu sec. On remarque aussi l'existence d'une relation inverse entre la salinité et le pH exprimé par une coordonnée négative sur cet axe.

Le deuxième Axe (F2) exprime 11.96 % de la variance totale d'où les sulfates (SO_4^{-2}) s'individualisent. L'origine de ces derniers peut être expliquée par la dissolution des dépôts évaporitiques gypseux ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Les sulfates qui existent dans les eaux de la nappe plio-quaternaire, notamment dans la partie Nord (puits N°202 et N°122) et la partie extrême Sud Ouest (puits N°302), ne peuvent pas être d'origine agricole vue l'absence de corrélation avec les nitrates.

Le troisième Axe (F3) 10.83 % est représenté par les bicarbonates. Il peut être interprété par une alimentation venant des formations carbonatées du jurassique.

Le quatrième Axe (F4) exprime 8.90% de la variance totale regroupe essentiellement les nitrates et le potassium. Il pourrait donc représenter la pollution des eaux. Des concentrations de NO_3^- supérieures à 50 mg/l sont observées à l'extrême Sud de la plaine de Ghriiss (puits N°235 et N°252), au Nord de la ville de Sidi Kada (puits N°941 et N°622) et dans la partie Nord Est de la plaine (puits N°1094, N°1098, N°1230 et N°1205), ce qui témoigne d'une pollution d'origine agricole et urbaine. Cette dernière étant plus importante dans la partie Nord Est.

Le cinquième Axe exprime (F5) 6.87 % de la variance totale, d'où le pH s'individualise indiquant son rôle dans le chimisme des eaux dans le système.

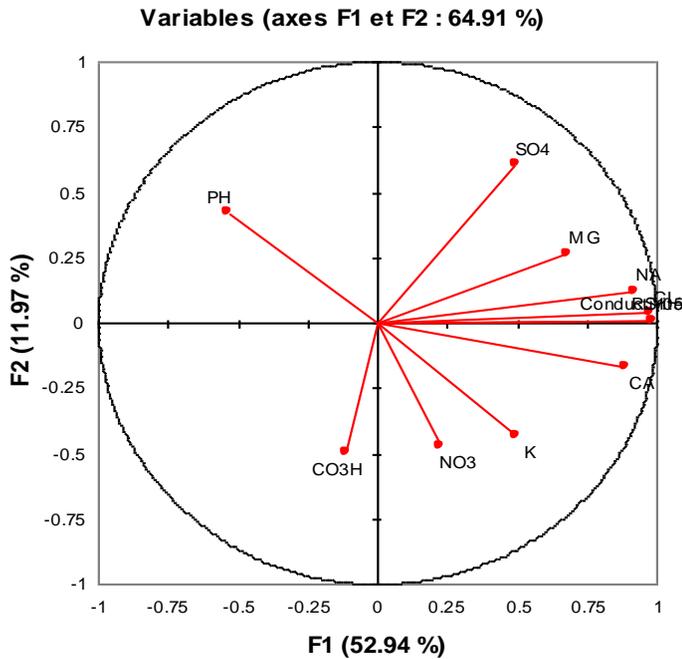


Fig. 4 - Projection des variables sur le plan I-II.

CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE (CAH)

Pour faire classer les puits échantillonnés ayant des caractéristiques hydrochimiques similaires, on a appliqué la méthode à la campagne mensuelle du mois d'Avril, cette dernière à été choisie par privilège de nombre de puits analysés. 5 groupes représentant les principaux types d'eau ont été retenus (Fig.5).

La classe N°1 regroupe des puits qui se situent au sud-ouest de la ville de Mascara. La composition chimique des eaux prélevée à partir de ces puits est très riche en ions chlorures (de 774 à 1825 mg/l) et sulfates (de 241 à 572 mg/l). La conductivité électrique des eaux de cette classe dépasse la valeur de 3300 $\mu\text{s/cm}$.

Les puits contenus dans la classe N°2 sont tous pollués par les nitrates (concentration en NO_3 supérieure à 71 mg/l). Ils occupent deux positions géographiques : le Sud-Ouest de la ville de Mascara (près de la zone industrielle de Khessibia) et le Sud-Ouest de la ville de Tighennif. La minéralisation de ces eaux est variable (de 1600 à 3370 $\mu\text{s/cm}$).

La classe N°3 rassemble la majorité des puits qui se répartissent sur toute la plaine. Les eaux de ces puits constituent vraisemblablement des mélanges.

Les classe N°4 et N°5 contiennent des puits dont la minéralisation est très élevée (conductivité électrique supérieure à 3900 $\mu\text{s/cm}$) et dont les teneurs en Ca, Na et Cl sont les plus importantes. Ils se situent au Nord-Est et à l'extrême Sud de la plaine en contact avec des formations évaporitiques.

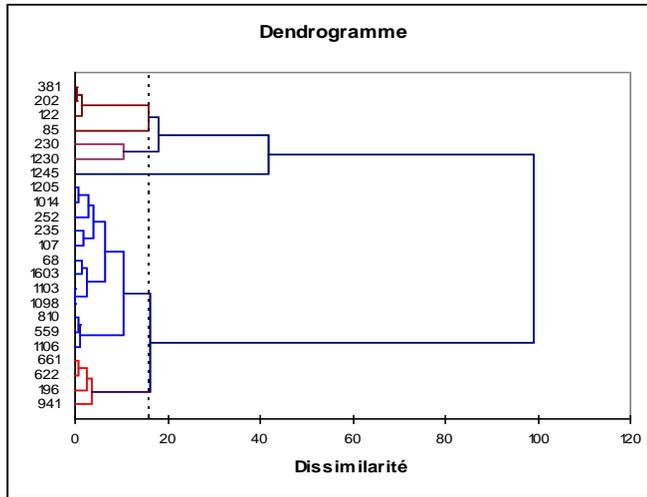


Fig.5: Dendrogramme de la CAH des observations (compagne d'Avril).

6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les eaux souterraines de la plaine de Ghriss jouent un rôle très important dans l'approvisionnement en eau de la population de Mascara. C'est une ressource qui a tendance à être de plus en plus exploitée.

Le climat méditerranéen de type semi-aride a été mis en évidence avec un hiver froid et pluvieux, et un été chaud et sec. L'étude hydrogéochimique permet de dire que les eaux sont caractérisées par une forte minéralisation et par la présence de trois faciès dominants, qui sont le chloruré magnésien, le chloruré calcique et le bicarbonaté magnésien.

Les ions Na^+ et Cl^- qui existent dans les eaux de la nappe superficielle (nappe plio-quaternaire) proviennent majoritairement de la dissolution de la halite. Cependant, un enrichissement en ion Cl^- provient d'une contamination anthropique qui affecte toute la nappe étudiée avec des proportions différentes.

Les ions Ca^{+2} , Mg^{+2} et HCO_3^- proviennent principalement de la dissolution des formations carbonatées du jurassique. L'alimentation au nord par les formations des calcaires lacustres du pliocène représente un apport secondaire en ions Ca^{+2} et HCO_3^- .

L'ion calcium est issu également de la dissolution des formations évaporitiques gypseuses localisées notamment dans le nord-ouest de la plaine.

Il est impératif d'oeuvrer pour une protection de cette ressource tant du point de vue de la qualité que du point de vue de la quantité. Pour cela, la mise en place de périmètres de protection à cette ressource, si importante dans le développement socio-économique de la région, s'avère indispensable.

Il faut réaliser une étude de modélisation des écoulements souterrains pour connaître les mécanismes de transfert des polluants, ce qui peut beaucoup aider à la protection de la nappe contre la pollution.

Références

- [1] Gouaidia, L. Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de Meskiana nord-est algérien. Thèse de doctorat (130 p) 2008.
- [2] S.Ouis, Impact des fluctuations climatiques sur la quantité et la qualité des eaux souterraines d'une région semi-aride : cas de la plaine de Ghriss (nord-ouest algérien), Larhyss Journal, 11 (2012) 119-131

- [3] Matari, A, Douguedroit, A, Chronologie des précipitations et des sécheresses dans l'ouest Algérien. Les stratégies pour le contrôle des sécheresses. 9eme Conférence régionale afro-asiatique des Irrigations et du Drainage. Alger, 5 et 6 juin 1995 : 266–278.
- [4] Lakhdari, F, Contribution à la connaissance de la stygofaune d'Algérie: Etude de la qualité de l'eau et la faune aquatique des puits de la région de Mascara (Nord Ouest Algérien). Thèse de Magister, université Abou bakr belkaid -Tlemcen, Algérie (81 p). 2014.
- [5] Sourisseau, B, Etude hydrogéologique de la plaine de Ghriss. Rapport Agence Nationale des Ressources Hydraulique, Alger, Algérie. 1972
- [6] Lalbat, F, Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère du miocène du bassin de Carpentras. Thèse de doctorat, université d'Avignon et des pays du Vaucluse, France (231 p). 2006.

Evaluation des flux souterrains par l'utilisation des isotopes du carbone, application aux aquifères karstiques des Monts de Tlemcen (Nord-Ouest Algérien)

H. Azzaz¹, B. Bekkoussa¹, A. Hamimed² & M. Zaagane²

¹Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau (LSTE), Université Mascara, Algérie, Email: azzazh@yahoo.fr Fax : 0021345802905

²Laboratoire de Recherche sur les Systèmes Biologiques et la Géomatique (LRSBG), Université Mascara, Algérie, Fax : 002134580416

Résumé

L'utilisation des méthodes isotopiques à travers le carbone-14 et carbone-13 nous a permis d'avoir une estimation des temps de séjour de l'eau et de comprendre le fonctionnement des systèmes karstiques des Monts de Tlemcen. La répartition des deux isotopes du carbone indique d'une façon générale quatre types d'eau à savoir : les eaux récentes des systèmes karstiques perchés ; les mélanges d'eaux récentes et actuelles ; les eaux actuelles et les eaux anciennes. La comparaison du $\delta^{13}C_{CMTD}$ calculé avec ce mesuré nous a permis de classer les systèmes selon leur degré d'ouverture sur le CO_2 biogénique du sol. Ainsi, on distingue : les eaux issues d'une évolution en système ouvert sur le CO_2 du sol ; les eaux issues d'une évolution en système fermé ; les eaux dont les teneurs sont intermédiaires entre les deux groupes précédents, peuvent avoir évolué sous des conditions mixtes ou bien encore résulter de mélanges. La datation des eaux souterraines par l'utilisation de la décroissance radioactive du ^{14}C en relation avec les teneurs en tritium nous a également permis de distinguer : eaux récentes ; eaux actuelles et eaux anciennes.

Mots clés : Fonctionnement hydrodynamique, Isotopes du carbone, Karst, Monts de Tlemcen

Evaluation of underground flows by the use of carbon isotopes, application to karst aquifers of the Tlemcen Mountains (North-West Algeria)

Abstract

The use of isotopic methods through carbon-14 and carbon-13 allowed us to estimate water residence times and to understand the functioning of the karst systems in the Tlemcen Mountains. The distribution of carbon isotopes generally indicates four types of water, namely: recent waters of perched karst systems; recent and present water mixtures; present waters and old waters.

The comparison of the calculated $\delta^{13}C_{CMTD}$ with this measured allowed us to classify the systems according to their degree of openness to the biogenic CO_2 of the soil. Thus, we distinguish: the waters resulting from an evolution in open system on the CO_2 of the soil; the water from a closed system evolution, intermediate waters between the two preceding clusters, may have evolved under mixed conditions. The dating of groundwater by the use of radioactive decay of ^{14}C in relation to tritium contents also allowed us to distinguish: recent waters; present and old waters.

Key Words: Hydrodynamic functioning, Carbon isotopes, Karst, Tlemcen Mountains

1. INTRODUCTION

La compréhension du fonctionnement des systèmes karstiques et l'estimation du temps de séjour des eaux dans l'aquifère à travers les Monts de Tlemcen est un préalable nécessaire à toute étude hydrogéologique visant à apprécier le renouvellement de la ressource en eau. Ceci peut être mené à bien grâce à l'étude des isotopes du carbone (carbone-14 et carbone-13). Le carbone est présent dans l'eau sous différentes formes : HCO_3^- , CO_2 dissous, carbone organique dissous, CO_3^{2-} . Selon son origine, il a une composition isotopique particulière. Du fait des coefficients de fractionnement entre les formes du carbone, le marquage en isotopes du carbone d'une eau varie également avec la répartition des espèces carbonées. Près de 31 échantillons d'eaux prélevés dans différentes zones des Monts de Tlemcen à partir des sources et de forages ont fait l'objet d'analyses isotopiques pour notre étude.

2. GEOCHIMIE DU CARBONE ET DATATION DES EAUX

La répartition des teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ et a^{14}C ne montre aucune évolution régionale. Ce sont des conditions litho-structurales et piézométriques locales relativement complexes qui contrôlent les infiltrations et conditionnent les écoulements. Ceci indique aussi une prédominance des transferts verticaux sur d'hypothétiques écoulements régionaux.

- **Le carbone-13** varie entre -14,4 et -9,4‰ V-PDB. La moyenne est de 11,8‰ avec un Ecart-type -1,4 ‰. 76% des échantillons montrent des teneurs comprises entre 13,5 et 11,0‰ V-PDB. Ceci indique l'importance de l'influence de la dissolution des carbonates marins dans ces systèmes aquifères [1]. En effet, au niveau de la zone de recharge, les eaux d'infiltration sont en équilibre avec le CO_2 du sol. Dans cette région relativement tempérée (région occupée par une végétation de type C_3), les teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ sont à peu près de -21 ‰ V-PDB [2] (IAEA, 1995; [3] Clark et Fritz, 1997). L'enrichissement en $\delta^{13}\text{C}$ (-14,4 à -9,4 ‰ V-PDB) est engendré par la dissolution de la calcite dont la teneur varie entre 0 et 2 ‰.
- **Les activités ^{14}C** des eaux souterraines dans les Monts de Tlemcen varient entre 43 et 114 pcm avec exception de la source N°12 (a^{14}C =16 pcm).

2.1. Classification des systèmes selon les teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ équilibrant calculées

Les données ont été réparties en trois familles classées selon le degré d'ouverture des systèmes, classement suggéré par les teneurs en carbone-13 équilibrant calculées. Ainsi, on distingue les types d'eaux suivants.

- Les eaux issues d'une évolution en système ouvert sur le CO_2 du sol, dont les teneurs en carbone-13 équilibrant sont comprises entre -22,10 et -17,24‰ est donc proches de la signature isotopique du CO_2 du sol, c'est à dire proche de -21‰. Les activités ^{14}C de ces eaux sont supérieures à 90 pcm. Les pCO_2 sont quant à elles plutôt faibles de l'ordre de -1,7 et le pH est généralement proche de 7,01 (les valeurs relativement élevées pour certains systèmes ouverts pourraient être engendrées par une pollution anthropique). Les teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ équilibrant de ce groupe montrent une dispersion relativement importante ;
- Les eaux issues d'une évolution en système fermé dont les teneurs en carbone-13 équilibrant sont inférieures à 16‰, c'est à dire enrichies par rapport au $\delta^{13}\text{C}$ biogénique du sol. Ceci indique la participation de la matrice carbonatée ($\delta^{13}\text{C} \approx 0$ ‰) à la teneur isotopique du carbone minérale total dissout (CMTD). Les activités carbone-14 de ces eaux sont faibles, ce qui atteste d'un long temps de séjour dans l'aquifère. Le $\delta^{13}\text{C}$ du CMTD est relativement enrichi, de l'ordre de -9,5 ‰. De façon générale, la pCO_2 est légèrement plus faible que dans le cas du système ouvert précédemment décrit. Les températures sont élevées de l'ordre de 30°C ;
- Les eaux dont les teneurs sont intermédiaires entre les deux groupes précédents peuvent avoir évolué sous des conditions mixtes ou bien encore résulter de mélanges.

La relation entre le $\delta^{13}\text{C}$ du CMTD et l'activité en ^{14}C (indicateur du temps de séjour) des eaux souterraines est généralement inversement proportionnelle. La figure n° 1, met nettement en évidence un enrichissement isotopique en carbone-13 en relation avec la diminution de l'activité carbone-14. La répartition des points prend l'aspect d'une relation pseudo-logarithmique caractéristique des aquifères carbonatés [4] ; [5] ; [6] ; [7]. Les eaux correspondant à une évolution en système ouvert présentent des teneurs en carbone-13 appauvries et de fortes activités en carbone-14. Les eaux provenant d'un système fermé ont une signature isotopique en $\delta^{13}\text{C}$ enrichie et des activités ^{14}C faibles. Les eaux intermédiaires se retrouvent logiquement entre ces deux pôles. Néanmoins, il semble que les eaux préalablement déterminées comme issues d'un système ouvert soient tout de même affectées par des phénomènes d'échange avec la matrice de l'aquifère, étant donné leur position décalée par rapport à une évolution en système ouvert strict qui suppose une évolution uniquement par décroissance radioactive. Les eaux intermédiaires et issues d'un système fermé sont quant à elles marquées à la fois par l'influence du carbone-13 du CO_2 du sol et par la signature isotopique de l'encaissant carbonaté, ce qui explique l'enrichissement progressif des teneurs avec la décroissance de l'activité.

2.1. Comparaison entre le carbone-13 mesuré et le carbone-13 calculé

La comparaison des teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ mesuré avec celles calculées montre des différences significatives. A partir des différences entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées en système fermé et ouvert on va donc répartir les différents systèmes karstiques en trois familles selon leur degré d'ouverture sur le CO_2 du sol.

En effet l'enrichissement des teneurs en ^{13}C mesuré par rapport au $\delta^{13}\text{C}$ calculé en système ouvert indique que les eaux ont évolué en système fermé vis à vis du CO_2 , car en système ouvert le marquage isotopique du carbone restera toujours imposé par celui du CO_2 . En d'autres termes, les valeurs du $\delta^{13}\text{C}$ mesuré les plus proches de celles calculées en système fermé impliquent une évolution des eaux en zone saturée enrichie en ^{13}C .

Ainsi il est possible de distinguer :

- les eaux issues d'une évolution en système ouvert sur le CO_2 du sol, dont la différence des teneurs entre le $\delta^{13}\text{C}$ mesuré et le $\delta^{13}\text{C}$ calculé en système fermé est comprise entre 2,70 et 7,57 ‰ ;
- les eaux issues d'une évolution en système fermé sur le CO_2 du sol, dont la différence des teneurs entre le $\delta^{13}\text{C}$ mesuré et le $\delta^{13}\text{C}$ calculé en système fermé est à 1,50 ‰ ;
- les eaux issues d'une évolution en système intermédiaire entre les deux familles précédentes avec une différence des teneurs entre le $\delta^{13}\text{C}$ mesuré et le $\delta^{13}\text{C}$ calculé en système fermé comprise entre 2,0 et 2,5 ‰ ; dans ce système, on peut avoir le mélange d'eau provenant de la zone non saturée et des eaux de la zone saturée.

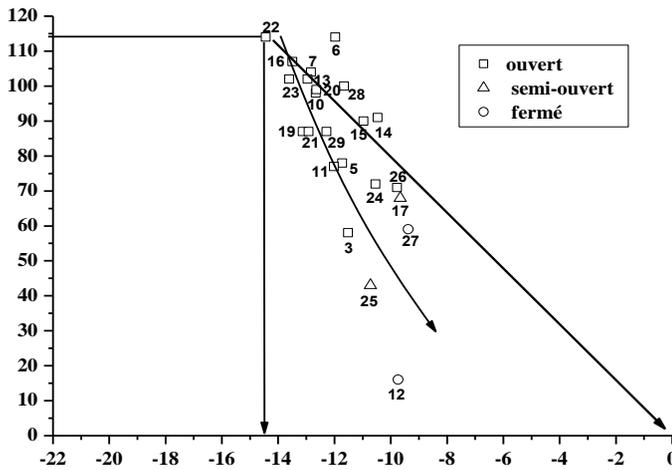


Fig n° 1 : Relation $\delta^{13}\text{C} / \text{a}^{14}\text{C}$ dans les eaux des systèmes karstiques des Monts de Tlemcen

2.2. Activité initiale a_0 du carbone-14 et temps de séjour des eaux souterraines

Nous avons utilisé la décroissance radioactive du ^{14}C afin de dater les eaux souterraines des aquifères karstiques des Monts de Tlemcen. Pour parvenir à une estimation de a_0 , on a recouru à plusieurs modèles de correction d'activité qui tiennent compte, de façon plus ou moins complète, des différents phénomènes affectant les isotopes du carbone lors du parcours des eaux dans le système aquifère. Nous comparerons les résultats de 7 modèles : Tamers [8] (Tamer, 1967), Pearson [9] (Ingerson et Pearson, 1964), Mook [10] (Mook, 1980), Fontes et Garnier [11] (Fontes et Garnier, 1979), AIEA [12] (Salem et al. 1980), Evans [13] (Evans et al. 1979) et Eichinger [14] (Eichinger, 1983). Les activités initiales calculées donnent, pour les modèles de Pearson et de F&G, des âges très proches. Nous remarquons d'une façon très générale l'adéquation des âges déterminés par ces deux derniers modèles avec les teneurs en tritium.

- Eaux récentes, caractérisées par des activités en ^{14}C supérieure à 90 pcm et des teneurs en tritium supérieures à 3 UT. Ces eaux modernes résulteraient d'une minéralisation du carbone en système ouvert sur le CO_2 gazeux du sol. Ce dernier implique une signature isotopique de la phase gazeuse indépendamment de celle des carbonates solides ;
- Eaux actuelles, représentées par la majorité des eaux de la région. Les teneurs en ^{14}C sont comprises entre 40 et 90 pcm. Les valeurs du tritium ont mis en évidence l'existence d'un mélange par les eaux modernes d'un certain nombre de points d'eau en fonction de leur proximité des zones de recharge et de la tectonique. Les très faibles valeurs en

tritium mesurées dans certains nombres de points (5, 24, 26 et 27) ne peuvent pas être interprétées comme une absence de recharge actuelle. La présence d'eaux récentes est attestée par leurs teneurs en nitrates qui varient entre 20 et 80 mg/l. Les eaux du forage 25 qui montrent une activité en ^{14}C de 43 pcm avec une teneur en tritium négligeable, pourraient correspondre à un mélange d'eau ancienne et actuelle ce qui s'accorde avec sa localisation plus en aval et leurs teneurs en carbone-13 (-10,72‰) et en nitrate (10 à 11 mg/l).

- Eaux anciennes, localisées dans la zone captive au Nord des Monts sous une épaisse couche de marne miocène (forage 12). Ces eaux sont piégées par le biseautage de l'aquifère carbonaté sous le Miocène marneux, ce qui interrompt la continuité hydraulique vers le Nord. Les activités en carbone-14 décroissent jusqu'à 16 pcm avec des valeurs en tritium de 1 UT. Le forage 25, montre un mélange d'eau actuelle et ancienne avec des activités ^{14}C de 43 pcm et des valeurs en tritium au-dessous de la limite de détection (Figure n° 2).

Les activités ^{14}C (16 - 114 pcm) et les teneurs en tritium comprises entre non détectable et $27,7 \pm 1,7$ en relation avec les teneurs en $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMD}}$ nous ont permis de distinguer trois types d'eau caractérisant le fonctionnement des systèmes karstiques des Monts de Tlemcen. Des valeurs intermédiaires résultent de mélange ou d'évolution par décroissance radioactive.

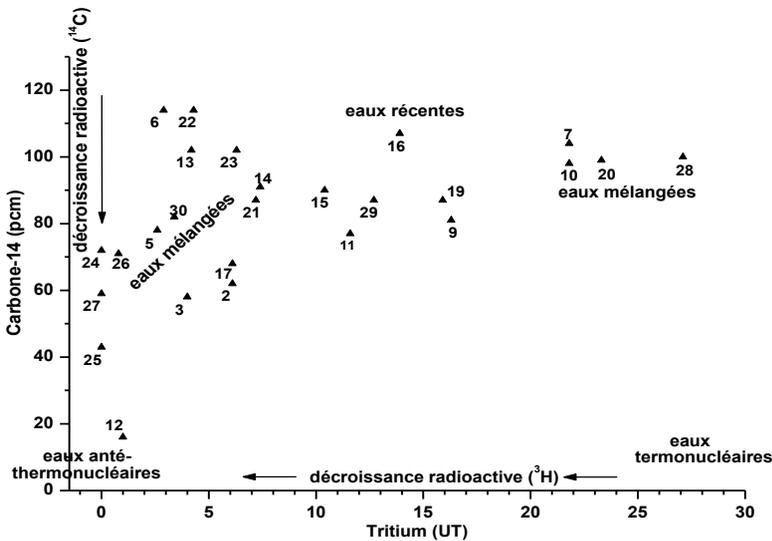


Fig 2 : Relation entre les activités carbone et tritium dans les eaux souterraines des systèmes karstiques des Monts de Tlemcen

CONCLUSION

Les activités ^{14}C et les teneurs en $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ en relation avec les teneurs en tritium permettent de distinguer trois types d'eau correspondant à trois catégories de systèmes karstiques. Des valeurs intermédiaires résultent de mélange des eaux ou d'évolution par décroissance radioactive.

- ✓ Eaux récentes : ces eaux dérivent généralement des aquifères superficiels libres. Ces eaux ont une évolution en système ouvert sur le CO_2 atmosphérique.
- ✓ Eaux "anciennes", qui proviennent des systèmes karstiques captifs, relativement profonds. Ces eaux évoluent généralement en système fermé sur le CO_2 atmosphérique.
- ✓ Eaux provenant de mélanges. Ce type d'eau montre deux principales familles :
 - la première famille correspond au mélange d'eau récente avec des eaux « thermonucléaires » ;
 - la deuxième famille est caractérisée par le mélange d'eau récente avec des eaux "ante-thermonucléaires". Ces types d'eau représentent la plus forte proportion des eaux souterraines dans les Monts de Tlemcen. Dans ces eaux mixtes, l'apport des eaux provenant de la zone non saturée est relativement important.

Références

- [1] G. Pilla, E. Sacchi, G. Zuppi, G. Braga, G. Ciancetti. Hydrochemistry and isotope geochemistry as tools for groundwater hydrodynamic investigation in multilayer aquifers: a case study from Lomellina, Po plain, South-Western Lombardy, Italy. *Hydrogeology Journal* (2006) 14: 795–808
- [2] IAEA. Reference and intercomparison materials for stable isotopes of light elements, *Proc. of a consultants meeting held in Vienna. I-3/10/1993. IAEA Vienna. (1995) TECDOC- 825: 165*
- [3] D. Clark i, P. Fritz. Environmental isotopes in hydrogeology. *Lewis Publishers, (1997) 328 p.*
- [4] L. Dever. Approches chimiques et isotopiques des interactions fluides-matrice en zone non saturée carbonatée. Thèse Doct. d'Etat Sc. Nat., Univ. Orsay, (1985) 196 p.
- [5] W.M. edmunds, W.G. darling, D.G. kinniburgh, L. Dever, P. Vachier. Chalkgroudwater in England and France: hydrogeochemistry and water quality. *British Geological Survey Eds., (1992) 126 p.*
- [6] W. Kloppmann, L. Dever, M. Edmundsw. Residence time of chalk groundwater in the Paris Basin and the North German Basin: a geochemical approach. *Applied Geochemistry, (1998) 13(5), 593-606.*
- [7] F. Barelol. Approche géochimique des mécanismes de salinisation des aquifères côtiers, chronologies ^{14}C – ^{226}Ra . Thèse Doct. Univ. Paris IX, (1999) 261p.
- [8] Tamers. Surface water infiltration and groundwater movements in arid zones of Venezuela. In: *Isotopes in Hydrology. I.A.E.A. (Int. At. Energy. Agency), Vienna, (1967) pp. 339-351.*
- [9] E. Ingerson, JR. Pearson, FJ., . Estimation of age and rate of groundwater by the ^{14}C –method, in: *Recent Resarches in the fields of Atmosphere, and Nuclear Geochemistry, Sugawara Festival Volum: Maruzen Co., Tokyo, (1964) pp. 263-283.*
- [10] WG. Mook. Carbon-14 in hydrogeological studies, in: Fritz, P., Fontes, J.-Ch. (Eds), *Handbook of Environment, A, Vol 1, Elsevier, New York, NY, (1980) pp. 49-74.*
- [11] JC. Fontes, JM. Garnier. Determination of the initial ^{14}C activity of the total dissolved carbon: a review of the existing models and a new approach. *Water Resour Res (1979) 15:399–413*
- [12] O. Salem, J.H. visser, M. Dray, R. Gonfiantini. Groundwater flow patterns in the western Lybian Arab Jamahiriya. In *Arid-zone hydrology: investigations with Isotope Techniques, Vienna, IAEA, (1980) 165-179.*
- [13] GV. Evans, RL. Otlet, RA. Downing, RA. Monkhouse, G.rae. Some problems in the interpretation of isotope measurements in United Kingdom aquifers. In: *Proc Int Symp Neuherberg. Isotope Hydrology, IAEA, Vienna, (1979) pp 679–708*
- [14] L. Eichinger. A contribution to the interpretation of carbone-14 groundwater ages considering the example of a partially confined sandstone aquifer. In *Stuiver M. Ad Kra R.S., eds, Proceedings of the 11th International carbone-14 Conference. Radiocarbon, (1983) 25(2), 347-356.*

Prediction of monthly stream flow using the hybrid discrete wavelet transform with support vector machine based on particle swarm optimization.

Yazid Tikhamarine¹, Souag-Gamane Doudja², Soumia Mellak³

¹, ², ³LEGHYD, Civil Engineering Faculty, University of Sciences and Technology Houari Boumediene, BP 32 AlAlia, Babezouar 16111 Algiers, Algeria, ¹ytikhamarine@usthb.dz, +213660 85 07 56, ²souagd@yahoo.fr ³mellak.soumia@yahoo.com

Abstract

Planning and rational management of water resources in watersheds cannot be achieved without forecasting. Monthly stream flow forecast contributes to improve long and short-term water resources management, especially in extreme cases of flood and drought. The nonlinear relationship between the predictors and predictive requires a very high performance model. The support vector machine is able to handle different performances with the complex relationship between the observed input and output data.

This paper investigates the performance of hybrid wavelet transform with support vector machine (W-SVM), compared with the single support vector machine (SVM) for one-month ahead forecast. The particle swarm optimization technique (PSO) was used for tuning (SVM) parameters. Furthermore, the monthly stream flow data from the Boucheouf gauge station on Seybouse watershed eastern area of Algeria (code 14.05.01) is used in this study. In addition, the four quantitative standard statistical performance evaluation measures; the Nash–Sutcliffe efficiency coefficient (NSE), coefficient of correlation (R), root mean squared error (RMSE), and mean absolute error (MAE), were employed to evaluate the performances of developed models.

The results obtained indicate that the hybrid models performed better than single support vector machine and that hybrid can be a useful tool to resolve several forecasting issues.

Keywords: stream-flow prediction, support vector machine, wavelet transform, Seybouse watershed, particle swarm optimization.,

Prévision du débit mensuel par l'application du modèle hybride de transformée en ondelettes discrète avec les machines à vecteurs support basé sur l'optimisation par l'essaim de particules.

Résumé

La planification et la gestion rationnelle des ressources en eau dans les bassins versants ne peuvent être réalisées sans la prévision. Les prévisions mensuelles du débit des cours d'eau contribuent à améliorer la gestion des ressources en eau à long et à court terme, en particulier dans les cas extrêmes de l'inondation et de la sécheresse. Car la relation non linéaire entre les prédicteurs et prédits nécessite un modèle très performant. Les machines à vecteurs support sont capables de gérer différentes performances avec la relation complexe entre les données d'entrée et de sortie observées.

Ce travail étudie la performance de l'hybridation de la transformée en ondelettes avec machine à vecteurs support (W-SVM), comparée avec la machine à vecteur support seul (SVM) pour un mois de prévision. La technique d'optimisation de l'essaim de particules (PSO) a été utilisée pour déterminer les paramètres du SVM. Dans cette étude les données mensuelles des débits de cours d'eau de la station hydrométrique de Boucheouf, dans le bassin versant de Seybouse, à l'est de l'Algérie (code 14.05.01) sont utilisées. Les quatre critères d'évaluation de la performance statistique; (NSE, R, RMSE et MAE) ont été utilisés pour évaluer les performances des modèles développés.

Les résultats obtenus indiquent que les modèles hybrides sont plus performants que les modèles SVM seuls et que l'hybridation peut être un outil utile pour résoudre plusieurs problèmes de prévision.

Mots-clés: Prévision, machine à vecteur support, transformée en ondelettes, Seybouse.

1. INTRODUCTION

Hydrological modeling and forecasting provides a wide range of significant applications in the regulation of water resources management activities, where it is influenced by the temporal and spatial variability of watershed, variability of climate and local regional heterogeneity in precipitation and temperature patterns [1]. For resolving that problem, a high performance model was needed to handle this complex phenomenon. Moreover, the non-linear relationship between the predictors and predicted variables in streamflow forecasting makes a scientific challenge.

The conventional regression-based approaches like stochastic and conceptual models are unable to model the streamflow data accurately. They exhibit a weak performance in nonlinear regression and non-seasonal relationship [2]. In recent years, artificial intelligence has demonstrated a high accuracy in many prediction issues in the field of hydrology, (AI) has proved to be a very popular and successful forecasting and prediction tool. The support vector machine (SVM) was applied in different hydrology prediction issues; sediment transport modeling [3]. In ground water level prediction [4]. Predict long-term discharges [5]. Other researchers used the support vector machine in flood prediction, whilst other using it for predict drought prediction [6]. Furthermore, streamflow forecasting field was tackled by researchers who applied SVM as artificial intelligence model to predict daily and monthly streamflow [7].

Recently, The application of wavelet transform, for improving forecasting model's accuracy, has received much attention [8], and [9].

All these studies showed that the conjunction of wavelet transform with artificial intelligence could perform better than the single artificial intelligence.

The purpose of this paper is to investigate the performance of coupled wavelet transform with support vector machine in monthly streamflow for one-month ahead forecast and compared the results with the single support vector machine based on particle swarm optimization technique.

2. Methods

2.1. Support Vector Machine:

Support vector machine (SVM) is a relatively new machine-learning approach in data-driven research fields introduced by Vladimir Vapnik, based on statistical learning theory and principle of structural risk minimization [10].

SVM can learn from experience, estimates any complex functional relationship with high accuracy, and resolves problems of nonlinear classification regression and prediction: SVC for classification and SVR for regression. More details can be found in 'Support Vector Machines for Classification and Regression [11].

2.1. Wavelet support vector machine (W-SVM):

W-SVM is the conjunction of wavelet decomposition and support vector machine, which decomposes an input time series into approximations and details components using wavelet transform. There are several wavelet mothers decompositions; Haar, Daubechies, Coiflets, Symlets, Bior Splines and others. In this study, the Daubechies mother wavelet is used, because it is one of the most widely used and popular wavelet [12] and [9]. Several decomposition wavelet levels were tested to determine the ideal wavelet mother and its level for a given problem. After that, the decomposed signals were used as inputs to SVM model for building a new hybrid wavelet support vector machine (W-SVM). The models developed are presented in the Table 1.

Table 1. Different input combinations considered for forecasting future streamflow.

Models	INPUTS	OUTPUT
M1	Q_t	Q_{t+1}
M2	$Q_t + Q_{t-1}$	Q_{t+1}
M3	$Q_t + Q_{t-1} + Q_{t-2}$	Q_{t+1}
M4	$Q_t + Q_{t-1} + Q_{t-10} + Q_{t-11}$	Q_{t+1}
M5	$Q_t + Q_{t-1} + Q_{t-3} + Q_{t-4} + Q_{t-5} + Q_{t-9} + Q_{t-10} + Q_{t-11}$	Q_{t+1}
M6	$Q_t + Q_{t-1} + \dots + Q_{t-11}$	Q_{t+1}

2.3. Performance criteria Indicators :

In this paper, the model performance is examined by the Root Mean Squared Error (RMSE), Mean absolute percentage error (MAE), Correlation Coefficient (R) and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE).

2.4. Study area and dataset:

The time series of the Bouchegouf gauge station on Seybouse watershed (N 36°, 27', 00", E 7°, 34', 12") in eastern of Algeria is chosen in this study, which drains an area of 550 km², the average elevation is 127 m. and the average yearly runoff is 1.965 m³/s.

The data from September 1970 to February 1988 is used for training (70%) whilst that from March 1988 to August 1995 is used for testing (30%).

I. Résultats and discussion :

To obtain a useful SVM model, the three parameters of RBF kernel: C, ϵ and σ have to be determined using PSO technique [13], Since, the PSO is a robust and effective algorithm that belongs to the family of swarm intelligence.

The first step of study is used the previous streamflow data as inputs to the SVM model and find the best SVM parameters in every single model developed using PSO algorithm. The best three parameters C, ϵ and σ in the best model (M5) are selected as 5.46801, 0.02301 and 0.07539, respectively by employing the maximum value of Nash as objective function. The performances of the six models developed are tabulated in Table 2.

Table 2. Performances of different predicted models using SVM-PSO

Models	Training (70%)			Testing (30%)				
	RMSE (m ³)	MAPE (m ³)	R	Nash	RMSE (m ³ /s)	MAPE (m ³)	R	Nash
M1	3,7355	1,3952	0,5725	0,2419	1,9618	0,999	0,5531	0,282
M2	3,6705	1,3222	0,6655	0,2682	2,0314	1,0648	0,4985	0,2302
M3	3,4973	1,1797	0,6582	0,257	2,5715	1,4408	0,4122	0,1037
M4	2,9654	0,7855	0,8278	0,5224	2,1139	1,2989	0,4091	0,1664
M5	2,9911	0,8796	0,8142	0,5140	1,8736	1,1253	0,5985	0,3452
M6	4,0078	1,5745	0,4995	0,1275	2,1715	1,0068	0,4685	0,1203

The second step decomposed the date into approximations and details by using discrete wavelet transform which were used as inputs to the model developed. Whilst, the best three parameters C, ϵ and σ in the best model (M2) are selected as 91.06457, 0.00685 and 0.05991, respectively.

Furthermore, for all forecast models, each hybrid model developed was decomposed using the most popular wavelet Daubechies (db), whereas the optimum decomposition level was usually determined through Nourani formula [14], The best vanishing moments was varying between 1 to 20 until finding the best one using optimum criterias. The performances of the six models developed are shows in Table 3.

Table 3. Performances of different predicted models using W-SVM-PSO

Models	Best moi wavelet	Optimum decomposition level	Training (70%)			Testing (30%)				
			RMSE (m)	MAE (m3)	R	Nash	RMSE (m)	MAPE (m)	R	Nash
M1	db-10	2	3,2777	1,3906	0,7163	0,4165	1,5667	0,8674	0,7685	0,5421
M2	db-17	2	0,3746	0,1767	0,9962	0,9924	0,4723	0,3446	0,979	0,9584
M3	db-17	2	0,2987	0,1657	0,9973	0,9946	0,7431	0,535	0,9621	0,9252
M4	db-13	2	0,6401	0,3348	0,9888	0,9777	0,7381	0,5199	0,9479	0,8984
M5	db-13	2	0,5934	0,2991	0,9905	0,9809	0,8511	0,5735	0,931	0,8649
M6	db-13	2	2,1166	1,0458	0,9212	0,7567	1,1567	0,6916	0,9027	0,7504

The best decomposition level and best vanishing moment for each developed model were represented in the Table.3. While the best WSVM predictive model and the best SVM model versus the observed in the testing period are shown in Fig. 2

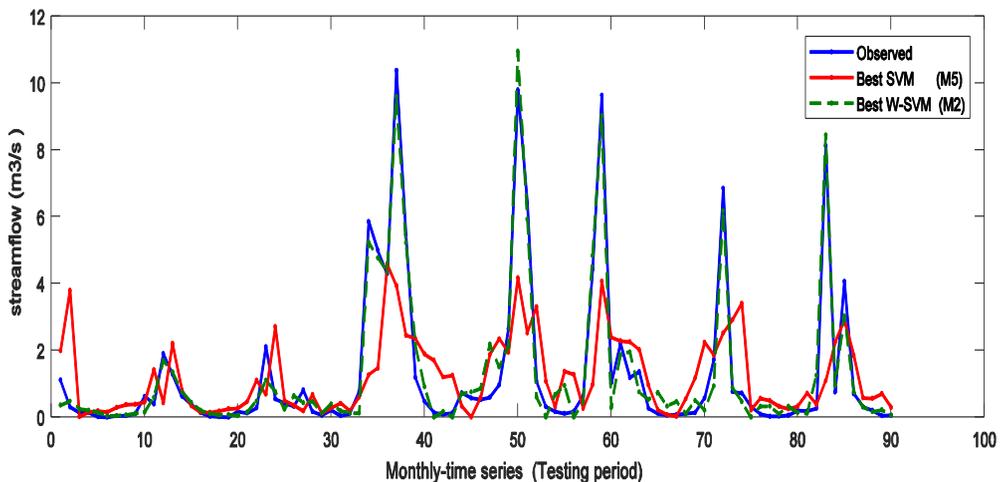


Fig. 1 - Best performance of the SVM and W-SVM models versus observed values in the testing period.

CONCLUSION

L'ensemble In this study, discrete wavelet transform was used to decompose monthly streamflow data into approximations and details, which were used as inputs to SVM model to develop the conjunction hybrid W-SVM and compared it with SVM, which uses the previous streamflow as inputs to predict one-month ahead forecast in the Bouchegouf gauge station.

It is found, through comparison of W-SVM appropriate performance results and single SVM that the conjunction of W-SVM is better and more efficient than SVM alone, which consider the root mean square error (RMSE) and Nash (NSE) as criteria of performance for all inputs combinations.

This means that the performance increased after using discrete wavelet transform. Moreover, a best accuracy has been achieved without increasing the number of inputs by using less input levels. This new hybrid model presents an interesting prospect for streamflow forecasting data and it can be investigated further for hydrological forecasting issues.

Références

- [1] Z. M. Yaseen et al., « Novel approach for streamflow forecasting using a hybrid ANFIS-FFA model », *Journal of Hydrology*, vol. 554, p. 263-276, nov. 2017.
- [2] M. Shafaei et O. Kisi, « Lake Level Forecasting Using Wavelet-SVR, Wavelet-ANFIS and Wavelet-ARMA Conjunction Models », *Water Resources Management*, vol. 30, n° 1, p. 79-97, janv. 2016.
- [3] S. Rashidi, M. Vafakhah, E. K. Lafdani, et M. R. Javadi, « Evaluating the support vector machine for suspended sediment load forecasting based on gamma test », *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 9, n° 11, août 2016.
- [4] M. Alizamir, O. Kisi, et M. Zounemat-Kermani, « Modelling long-term groundwater fluctuations by extreme learning machine using hydro-climatic data », *Hydrological Sciences Journal*, vol. 63, n° 1, p. 63-73, janv. 2018.
- [5] J.-Y. Lin, C.-T. Cheng, et K.-W. Chau, « Using support vector machines for long-term discharge prediction », *Hydrological Sciences Journal*, vol. 51, n° 4, p. 599-612, août 2006.
- [6] A. Belayneh, J. Adamowski, B. Khalil, et B. Ozga-Zielinski, « Long-term SPI drought forecasting in the Awash River Basin in Ethiopia using wavelet neural network and wavelet support vector regression models », *Journal of Hydrology*, vol. 508, p. 418-429, janv. 2014.
- [7] T. Asefa, M. Kemblowski, M. McKee, et A. Khalil, « Multi-time scale stream flow predictions: The support vector machines approach », *Journal of Hydrology*, vol. 318, n° 1-4, p. 7-16, mars 2006.
- [8] « Kisi et Cimen - 2011 - A wavelet-support vector machine conjunction model.pdf ».
- [9] S. Djerbouai et D. Souag-Gamane, « Drought Forecasting Using Neural Networks, Wavelet Neural Networks, and Stochastic Models: Case of the Algerois Basin in North Algeria », *Water Resources Management*, vol. 30, n° 7, p. 2445-2464, mai 2016.
- [10] V. N. Vapnik, *The nature of statistical learning theory*. New York: Springer, 1995.
- [11] Steve Gunn, « Support Vector Machines for Classification and Regression, Image Speech & Intelligent Systems Research Group, University of Southampton. », 1998.
- [12] S. G. Mallat, « A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation », *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, n° 7, p. 674-693, juill. 1989.
- [13] Kennedy, J., & Eberhart, R. C, « Particle swarm optimization. In Proceedings of the IEEE international conference on neural networks IV (pp. 1942-1948). Piscataway: IEEE. », 1995.
- [14] V. Nourani, M. Komasi, et A. Mano, « A Multivariate ANN-Wavelet Approach for Rainfall-Runoff Modeling », *Water Resources Management*, vol. 23, n° 14, p. 2877-2894, nov. 2009.

Modélisation Hydrologique des Tributaires de la Lagune AGHIEN à la Périphérie de la Ville d'Abidjan en Côte d'Ivoire

Amidou DAO¹, Ehouman Serge KOFFI¹, Djibril NOUFE¹, Gneneyougo Emile SORO¹, Jean Thierry KOFFI¹, Seydou DIALLO¹, Bamory KAMAGATE¹, Droh Lanciné GONE¹,

¹Université Nangui Abrogoua, Laboratoire de Géosciences et Environnement, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire,

Luc SEGUIS², Jean-Louis PERRIN²

²Université de Montpellier2, IRD, UMR Hydrosociétés,

Représentation IRD-Abidjan

08 BP 3800 Abidjan 08 Côte d'Ivoire

Auteur correspondant : daoamidou@hotmail.fr

Résumé

La lagune AGHIEN dont les deux tributaires BETE et DJIBI qui font l'objet de cet article, est située à la périphérie de la ville d'Abidjan au Sud de la Côte d'Ivoire. Le bassin versant de cette lagune a été choisi comme cadre expérimentale par notre projet de recherche financé par le Contrat de Désendettement et de Développement (C2D) entre la Côte d'Ivoire et la France à travers le Partenariat renouvelé au Service du Développement en Côte d'Ivoire (PreSed-CI). La question de recherche suscitée par cette recherche est de savoir si cette lagune pourrait servir de réserve d'eau à la ville d'Abidjan, confrontée à un sérieux problème d'alimentation en eau potable depuis près de deux décennies. Notre objectif est de faire une modélisation hydrologique des deux tributaires sous le modèle ATHYS (Atelier Hydrologique Spatialisé) afin de comprendre le fonctionnement de la lagune. Pour y parvenir, un vaste réseau de mesure de données hydro-climatiques a été mis en place à partir de 2015. Le calage et la validation du modèle sur la période 2016-2017 a permis d'obtenir des résultats préliminaires relativement stables pour des valeurs de critères de performance acceptables. Le paramètre S de la fonction de production du modèle qui représente la capacité de rétention des sols, se situe entre 292 et 428 mm sur l'ensemble des deux sous-bassins. Les vitesses de transfert V_0 relativement faibles, sont de 0,62 m/s et 0,76 m/s respectivement à la BETE et à la DJIBI. Le paramètre de propagation K_0 est fixé à 0,7 aux deux sous-bassins versants. Enfin, les paramètres caractérisant les phénomènes de vidange w et ds sont respectivement de 0,2 j-1 et de 1,09 j-1 à la BETE et respectivement de 0,11 j-1 et 1,26 j-1 à la DJIBI.

Mots clés : Modélisation hydrologique, ATHYS, Lagune AGHIEN, Abidjan-Côte d'Ivoire

Hydrological modelling of AGHIEN lagoon tributaries on Abidjan city periphery in Côte d'Ivoire

Abstract

The AGHIEN lagoon including the two tributaries BETE and DJIBI which are the subject of this article is located on the periphery of Abidjan city in the south of Côte d'Ivoire. This watershed was chosen as an experimental framework by our research project funded by the Contract of Debt Reduction and Development (C2D) between Côte d'Ivoire and France through the renewed Partnership for Development in Côte d'Ivoire (PreSed-CI). The research question raised by this research is whether this lagoon could serve as a reserve for Abidjan city, faced with a serious problem of drinking water supply for nearly two decades. Our objective is to make a hydrological modelling of the two tributaries under the model ATHYS (Hydrologic Spatialized Workshop) in order to understand the functioning of the lagoon. To achieve this, a large network of hydro-climatic data has been set up since 2015. The calibration and validation of the model over the 2016-2017 period has resulted in relatively stable preliminary results for acceptable performance criteria values. The S parameter of the model production function, which represents the soil holding capacity, is between 292 and 428 mm for the two sub-basins. The relatively low transfer rates are 0.62 m/s and 0.76 m/s respectively at BETE and DJIBI. The propagation parameter K_0 is set at 0.7 at the two subwatersheds. Finally, the parameters characterizing the draining phenomena w and ds are respectively 0.2 d-1 and 1.09 d-1 at the BETE and 0.11 d-1 and 1.26 d-1 respectively at the Djibi.

Key Words:Hydrological modelling, ATHYS, AGHIENlagoon, Abidjan-Côte d'Ivoire

INTRODUCTION

L'eau est source de vie donc un besoin naturel et un droit pour tout être vivant. Mais son inégale répartition à travers le monde, cause un exode massif des populations à la recherche d'un mieux être et cela est souvent source de conflit. Cela amène les survivalistes à dire que la prochaine guerre mondiale sera liée à une pénurie d'eau. Selon [1] plus de 800 millions de personnes dans le monde (11% de la population totale) ont difficilement accès à l'eau. Le cas est très alarmant en Afrique sub-saharienne d'où les ressources en eau sont vulnérables au changement climatique [2], [3], [4]. Cette situation est d'autant plus préoccupante dans cette région car chaque année 1,8 million de personnes dont 90% d'enfants de moins de cinq ans, meurent de maladies diarrhéiques dues à la consommation de l'eau malsaine [5]. Par ailleurs, les besoins en eau potable de cette région se sont accrues à cause de la forte croissance démographique (environ 3% par an). Cette croissance est plus forte dans les zones urbaines (85%) alors que malheureusement, le développement des infrastructures tarde surtout dans les zones à faible revenu [6].

La Côte d'Ivoire à l'instar des autres pays de l'Afrique sub-saharienne, est confrontée ces dernières décennies à d'énormes problèmes d'approvisionnement en eau. Ces problèmes sont liés d'une part à une forte croissance démographique non corrélée aux infrastructures réalisées depuis les années 1970 [7]. D'autre part, ces problèmes sont dus à un fort niveau de variabilité climatique conduisant à des déficits de recharge dans les aquifères à partir desquels les besoins quotidiens des populations sont prélevés [8]. Dans le cas particulier de la ville d'Abidjan, située dans un environnement sédimentaire bordant l'océan Atlantique, la nappe phréatique est atteinte dans toute sa partie méridionale par une intrusion marine qui dégrade sa qualité entraînant son abandon [9]. La ville d'Abidjan et ses environs, mégapole constituée de 10 communes avec plus de 6 millions d'habitants [10] et un taux d'accroissement de 6,1%, sont alimentés exclusivement par la nappe du Continental Terminal appelée nappe d'Abidjan qui représente 68% de la production nationale. Le volume maximal de prélèvement envisageable sans danger pour cette nappe est de 140 millions m³/an. La production actuelle des neuf unités de traitement d'eau potable hormis les prélèvements d'eau par des forages privés, se situe autour de 400 500 m³/j soit environ 146 millions m³/an. Le volume d'eau actuellement prélevé dans la nappe d'Abidjan dépasse donc sa capacité de renouvellement. Bien que la limite d'exploitation de la nappe soit atteinte, les besoins actuels en eau potable de la métropole ne sont pas satisfaisants car évalués à 204 millions m³/an, soit un déficit de 58 millions m³/an à mobiliser [7]. En plus de l'augmentation croissante des besoins en eau, une explication donnée de ce déficit serait liée à la réduction de la recharge de la nappe. Celle-ci serait due à la baisse de la pluviométrie dans la zone d'Abidjan et à l'imperméabilisation croissante des surfaces par l'urbanisation [11]. Face à cette problématique, l'Etat ivoirien a exploré d'autres sources pour répondre au besoin urgent d'eau potable de la ville d'Abidjan. Ainsi, les eaux du lac Bakrè, du fleuve Comoé, de la nappe de Bonoua et de la lagune Aghien plus ou moins éloignées, ont été identifiées [12]. Le bassin versant qui draine les eaux vers la lagune Aghien, une source d'eau douce à la périphérie d'Abidjan (Figure 1), a été choisie comme cadre expérimentale par notre projet de recherche financé par le Contrat de Désendettement et de Développement (C2D) entre la Côte d'Ivoire et la France à travers le Partenariat renouvelé au Service du Développement en Côte d'Ivoire (PreSeD-CI). Cette lagune est alimentée principalement par deux rivières dont l'écosystème est encore préservé : la BÈTE et la DJIBI. En plus de ces deux rivières, la lagune semble recevoir des eaux de la rivière ME en période de hautes eaux influencées par les ondes de marées provenant de l'océan atlantique (Figure 2). La question de recherche suscitée par cette recherche est de savoir si cette ressource pourrait servir de réserve à la ville d'Abidjan en cas de pénurie.

Pour comprendre le fonctionnement de la lagune Aghien, nous nous sommes fixés pour objectif dans cet article, de modéliser le comportement hydrologique des deux tributaires. Pour atteindre cet objectif, un vaste réseau de mesures de données hydrométéorologiques a été mis en place depuis 2015. Le modèle hydrologique expérimenté sur le bassin versant est ATHYS (Atelier Hydrologique Spatialisé) développé par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement).

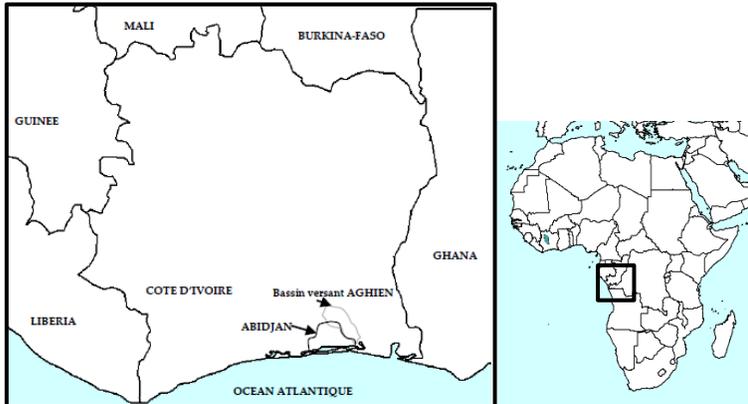


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de lagune Aghien

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Matériel

La lagune Aghien, occupe une superficie de 20 km² pour un volume estimé à 113 Mm³ [12]. Ses tributaires, notamment la Bété a une superficie de 216 km², près de 3 fois celle de la Djibi(Figure 2). Ce bassin est sous l'influence du climat tropical de transition caractérisé par 4 saisons : une grande saison de pluie (Avril-juin) et une petite saison de pluie (septembre-octobre). Les deux autres périodes correspondent aux saisons plus ou moins sèches.

Les données d'entrée du modèle ATHYS sont les chroniques pluviométriques de la période 2016-2017 issues d'un réseau de six pluviographes répartis sur l'ensemble du bassin versant de la lagune Aghien. Six limniographes installés sur les bassins parmi lesquelles celles de la Bété et de la Djibi sont les exutoires des sous-bassins qui font l'objet de cette étude. En plus des données de précipitations et de débits, le Modèle Numérique de Terrain (MNT) fait partie des "input" du modèle réglé à pas de temps une heure.

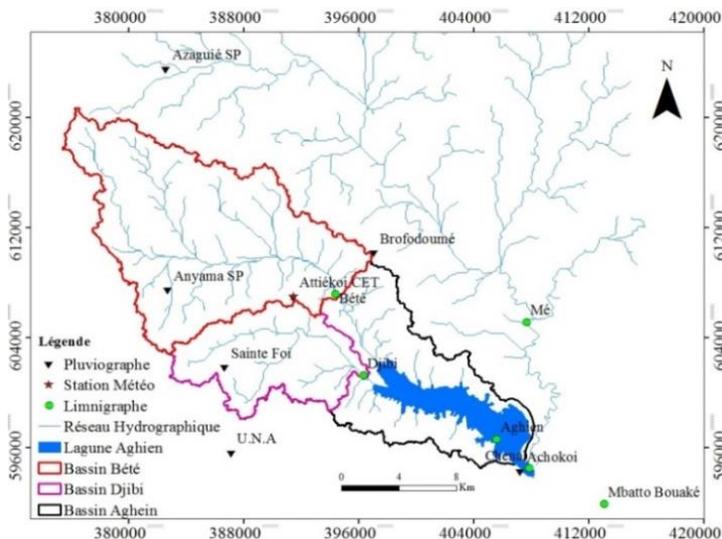


Figure 2 : Réseau de mesure des données hydro-climatiques sur le bassin versant de lagune Aghien

2.2. Méthodes

La modelisation des tributaires de la lagune Aghien est basée sur la conception du modèle ATHYS constitué de 4 modules : SPATIAL qui est la plate-forme d'interpolation spatiale ; VICAIR pour le traitement des données géographiques spatialisées ; VISHYR permettant de traiter les données hydro-climatiques et MERCEDES la plate-forme de modélisation distribuée. Il permet d'appliquer une panoplie de modèles distribués et de générer une série chronologique de débits sur base des pluies observées après un calage automatique de paramètres pris par défaut sur une période de pluies et débits connus, ceci en termes de données horaires. Il a été développé par l'IRD pour des applications diverses : gestion de la ressource en eau, prévision ou prédétermination des événements extrêmes, études d'impact liées à des modifications anthropiques ou climatiques. Pour plus d'informations, veuillez consulter le lien : <http://www.athys-soft.org/>. Dans le cadre de ce travail, nous allons utiliser la plateforme MERCEDES (Maille Elementaire Regulier Carré pour l'Etude Des Ecoulements Superficiels). Il propose un grand nombre de fonctions de production et de transfert, applicables dans un environnement homogène et convivial.

2.1.1 Fonction de production

La fonction de production utilisée, est la fonction SCS (Soil Conservation Service). [13] a montré qu'elle relie le cumul de la pluie efficace P_e au cumul de la pluie brute P_b selon l'équation suivante:

$$P_e = \frac{(P_b - I_a)^2}{(P_b - I_a) + S} \quad \text{Équ 1}$$

Où I_a (mm) désigne les pertes intervenant en début d'événement et S (mm) la capacité de rétention en eau du sol. Le modèle exprime l'évolution du coefficient de ruissellement $C(t)$ à 0, lorsque le cumul de pluie brute P_b est inférieur à I_a à l'infini. Selon [14], l'expression $C(t)$ pour $I_a = 0,2S$ s'écrit :

$$C(t) = \left(\frac{P(t) - 0,2S}{P(t) + 0,8S} \right) \left(2 - \frac{P(t) - 0,2S}{P(t) + 0,8S} \right) \quad \text{Équ 2}$$

La fonction de production (SCS) considère un réservoir sol de capacité S , alimenté par infiltration et vidangé proportionnellement au niveau du réservoir, à l'aide d'un coefficient ds . Une fraction ω de la vidange ($0 < \omega < 1$) est acheminée à l'exutoire du bassin, l'autre fraction $1 - \omega$ correspond à des pertes par évaporation ou par percolation profonde. Ce modèle est appliqué à chacune des mailles, avec les mêmes paramètres, mais avec des entrées de données pluviométriques différentes, interpolées d'après les observations disponibles [15].

$$Vid(t) = ds \cdot S(t) \quad \text{Équ 3}$$

$$Exf(t) = Pe(t) + \omega \cdot Vid(t) \quad \text{Équ 4}$$

Avec $Vid(t)$: la vidange en fonction du temps,
 $Exf(t)$: la perte en fonction du temps

2.1.2 Fonction de transfert

MERCEDES propose deux modes de transferts : le transfert en mailles indépendantes et le transfert en mailles interactives. Dans le cas des mailles indépendantes, le transfert s'applique exclusivement à la pluie efficace produite par la maille. Cette pluie est transférée intégralement à l'exutoire, sans prendre en compte les apports des mailles voisines, ni les pertes possibles dans le lit de la rivière. Or, en mode interactif, le transfert est réalisé maille par maille, de l'amont vers l'aval. En tenant compte des apports amont, du stock initial au début du pas de temps, du volume écoulé vers l'aval. Il s'agit là du modèle de l'onde cinématique, modèle à base physique mais demandant un grand nombre de données sur la géométrie et la rugosité du bassin versant [16].

En mode mailles indépendantes, chaque maille produit à chaque pas de temps un hydrogramme élémentaire à l'exutoire. La sommation des hydrogrammes élémentaires calculés sur toutes les mailles et à chaque pas de temps, fournit l'hydrogramme complet de la crue [17]. Ce calcul dépend des directions de drainage indiquées le long du parcours et de la position de la maille sur le bassin (Figure 3).

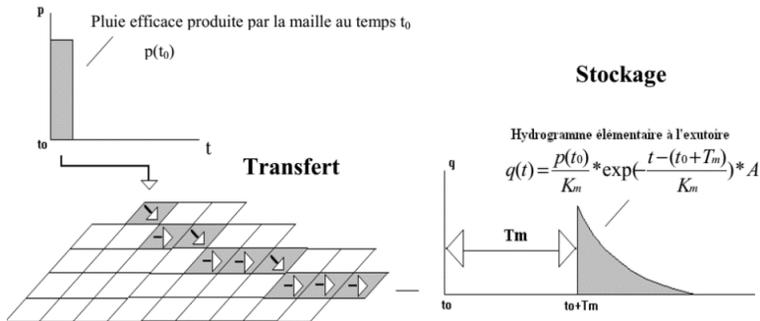


Figure 3 : Représentation de la fonction de transfert sous MERCEDES [17]

Ce modèle est basé sur la définition d'un temps de propagation $T_m(s)$ et d'un temps de diffusion $K_m(s)$ pour chaque maille m , estimés selon les distances maille l_m à l'exutoire.

$$T_m = \frac{l_m}{V_0} \text{Équ 5}$$

$$K_m = K_0 * T_m \text{Équ 6}$$

où V_0 est la vitesse de propagation (m/s), et K_0 un coefficient sans dimension. Le débit élémentaire $q(t)$ (m^3/s) à l'exutoire, correspondant au transfert du ruissellement (Δ) généré à la maille m entre les temps t_0 et $t_0 + \Delta$, est :

$$q(t) = 0 \text{ si } t < t_0 + T_m \text{Équ 7}$$

$$q(t) = \frac{R(\Delta t)}{K_m} \exp\left(-\frac{t-(t_0+T_m)}{K_m}\right) * A \text{ si } t > t_0 + T_m \text{Équ 8}$$

A : superficie de la maille (m^2) ; R : la pluie efficace (mm).

2.1.3 Optimisation de MERCEDES

Parmi les 6 paramètres que disposent le modèle, seul S , ω , ds et V_0 sont calés ; K_0 et l_a/S sont fixés. La méthode de calage repose sur des hypothèses a priori sur la signification des paramètres du modèle. Dans la fonction SCS de base, sans vidange du réservoir, ce sont les paramètres S et V_0 qui permettent de simuler les hydrogrammes de crue. Pour rappel, le paramètre S , homogène à une capacité de rétention potentielle maximale des sols, règle l'évolution empirique du coefficient de ruissellement sur le bassin versant lié à la génération du ruissellement de surface. Les paramètres ds et ω sont introduits dans une seconde phase pour simuler les écoulements retardés. L'idée est alors de caler dans un premier temps les paramètres V_0 et S sur la pointe de crue, le paramètre K_0 est fixé arbitrairement à 0,7, et l_a/S à 0,2 pour limiter les problèmes d'équifinalité [15].

Dans un deuxième temps, les paramètres ds et ω sont calés sur le reste de l'hydrogramme. L'objectif est d'obtenir des valeurs plus constantes (moins ambiguës) des paramètres, qui pourront être ensuite interprétées physiquement, ou comparées d'un sous-bassin à un autre. Le proxy-bassin test est une méthode qui permet de caler le modèle sur un premier bassin et le valider sur un deuxième, et inversement. A cet effet, nous avons calé dans un premier temps le modèle sur le sous-bassin de la BETE et le valider sur le sous-bassin de la DJIBI et vis versa. L'algorithme du simplex de Nelder et Mead est utilisé pour caler les paramètres du modèle. Il s'agit de minimiser la distance entre les hydrogrammes observés et les hydrogrammes simulés par le modèle. Le critère de Nash est utilisé pour évaluer la performance du modèle. Selon [14] et [18], trois autres critères sont développés sous ATHYS, ce sont : EAM (Ecart Arithmétique Moyen), EQM (Ecart Quadratique Moyen) et critère de Crec. Le calage est satisfaisant si ces trois critères tendent vers 0 et leurs expressions sont les suivantes :

$$EAM = \frac{\sum |X_i - Y_i|}{\sum Y_i} \text{Équ 9}$$

$$EQM = \frac{\sqrt{\sum (X_i - Y_i)^2}}{\sum Y_i} * \sqrt{N} \text{Équ 10}$$

$$CREC = \sum \left(1 - \frac{X}{Y_i}\right) * \sum \left(1 - \frac{Y_i}{Y}\right) * \frac{1}{N} \text{Équ 11}$$

Avec N = nombre d'observation,

X_i désignent les valeurs calculées et Y_i les valeurs observées.
 \bar{X} et \bar{Y} représentent les volumes moyens ruisselés dans le cas d'un critère volumétrique.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

Les resultats de la modélisation des écoulements des bassins de la BÉTÉ et de la DJIBI par le module MERCEDES sous ATHYS sont présentés comme suit : d'abord, la paramétrisation du modèle, ensuite la simulation des hydrogrammes et enfin l'estimation des volumes d'eau écoulés.

3.1.1 Paramétrisation du modèle

Les tableaux 1 et 2 présentent respectivement les paramètres de calage et de validation du modèle sur la période 2016-2017. Les critères de performance Nash obtenus par le proxy-basin testsont globalement satisfaisants à l'exception de la BÉTÉ en 2016. En validation ces critères se dégradent énormément à la Bété (0,39) en 2016 et à la Djibi (0,24) en 2017, mais garde des valeurs acceptables en 2016 à la Djibi (0,71) et à la Bété (0,55) en 2017.

Les critères EAM, EQM, Crec sont dans l'ensemble des valeurs qui se rapprochent 0. Ces resultats montrent que le modèle semble mieux simuler les débits en calage qu'en validation. Dans la fonction de production, le paramètre S représentant la capacité maximale du réservoir en calage et validation est de 427,39 mm. Le w designant l'humidité du sol est faible sur la période d'étude et se situe entre 0,10 et 0,20. Ce paramètre traduit l'écoulement retardé qui provient de la vidange des profils supérieurs des sols. Le ds varie entre $0,96 j^{-1}$ et $1,3 j^{-1}$. La vitesse de la fonction de transfert V_0 relatifemnt faible, est en moyenne 0,57 m/s en 2016 et de 0,72 m/s en 2017 pour un coefficient de transfert K_0 calé à 0,7.

Tableau 1 : Paramètres de calage du modèle

Bassin	Événement	Fonction de production				onction de transfert		Critères de performance			
		S (mm)	la/S	w	ds (j-1)	V_0 (m/s)	K_0	Nash	Crec	EAM	EQM
Bété	2016	427,39	0,2	0,10	0,96	0,75	0,7	0,52	2,23	0,63	1,01
Djibi		339,83	0,2	0,11	1,28	0,38	0,7	0,78	0,55	0,37	0,74
Bété	2017	292,79	0,2	0,20	1,09	0,62	0,7	0,73	0,41	0,45	0,71
Djibi		300,05	0,2	0,11	1,26	0,76	0,7	0,69	0,54	0,48	1,02

Tableau 2 : Paramètres de validation du modèle

Bassin	Événement	Fonction de production				onction de transfert		Critères de performance			
		S (mm)	la/S	w	ds (j-1)	V_0 (m/s)	K_0	Nash	Crec	EAM	EQM
Bété	2016	339,83	0,2	0,11	1,28	0,38	0,7	0,39	2,6	0,71	1,2
Djibi		427,39	0,2	0,10	0,96	0,75	0,7	0,71	0,59	0,42	0,85
Bété	2017	300,05	0,2	0,11	1,26	0,75	0,7	0,55	0,46	0,56	0,92
Djibi		292,79	0,2	0,20	1,09	0,62	0,7	0,24	0,86	0,89	1,7

3.1.2 Simulation des hydrogrammes annuels

• Cas de la BÉTÉ

La figure 4 represente les enregistrements de débit de la rivière BÉTÉ au cours de l'année 2016 (janvier à décembre) à pas de temps 60 mn. Les résultats graphiques montrent un meilleur synchronisme entre les débits observés et les débits calculés aussi bien en calage qu'en validation. Les basses eaux sont bien simulées dans l'ensemble. Cependant, les crues au delà de 10 m3/s correspondant à la grande saison pluvieuse, sont sous-estimées en relation avec un mauvais Nash < 0,6 (60%) évoqué plus haut.

La figure 5 represente les enregistrements de débit de la rivière BÉTÉ au cours de l'année 2017 (janvier à décembre) à pas de temps 60 mn. Le synchronisme entre débits observés et calculés reste le même en basses eaux. Mais contrairement à 2016, les débits de pointe de la grande saison pluvieuse sont mieux simulés. Cette fois-ci, le déphasage des hydrogrammes s'observe majoritairement pendant la petite saison de pluie.

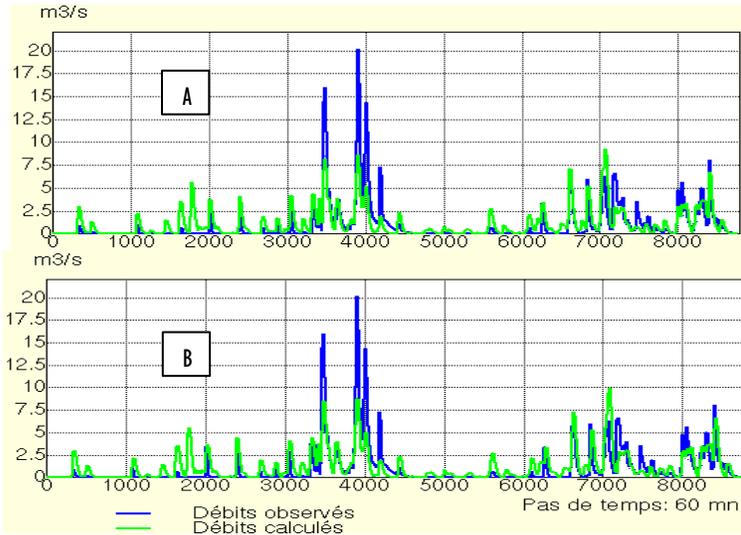


Figure 4 : Hydrogrammes annuels observés et calculés à la Bété en phase de: A-) calage et B-) validation (2016)

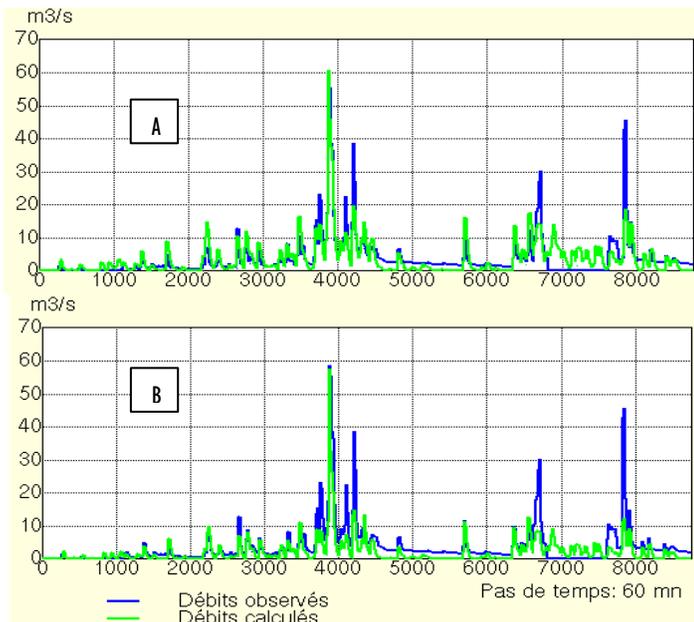


Figure 5 : Hydrogrammes annuels observés et observés à la Bété en phase de: A-) calage et B-) validation (2017)

- Cas de la DJIBI

La figure 6 et 7 representent les enregistrements de débit de la rivière DJIBI au cours des années 2016 et 2017 (janvier à décembre) à pas de temps 60 mn. L'observation générale montre que la dynamique des écoulements observés et calculés est la même aussi bien en calage qu'en validation. Le modèle sous-estime les crues en hautes eaux surtout en 2016. Cependant, des similarités importantes existent entre les hydrogrammes au niveau des pointes de crue observées pendant des étiages. Les pics de crues sont sous-estimés et les décrues sont bien simulées en calage comme en validation, les basses eaux sont dans l'ensemble sont bien simulées.

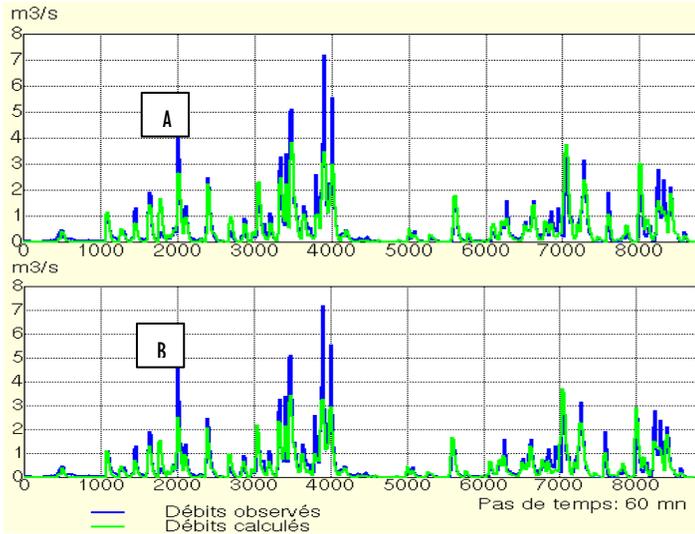


Figure : 6 Hydrogrammes annuels observés et calculés à la Djibi en phase de : A-) calage et B-) validation. (2016)

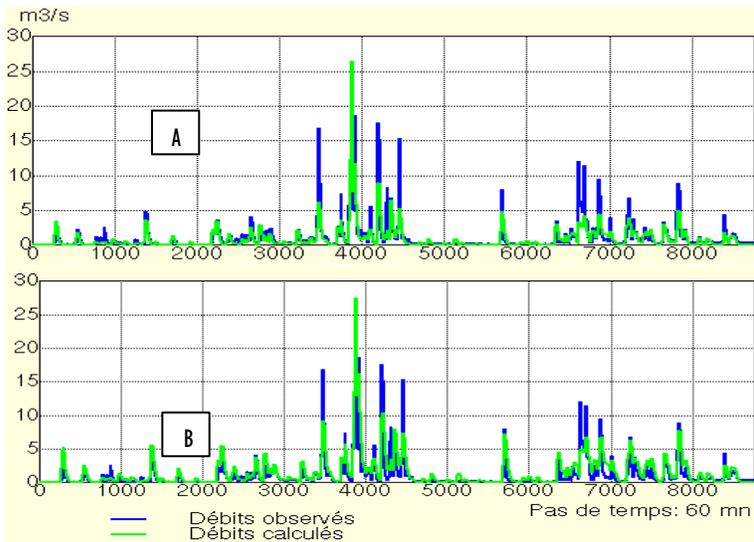


Figure 7 : Hydrogrammes annuels observés et calculés à la Djibi en phase de : A-) calage et B-) validation (2017)

3.1.3 Estimation des volumes d'eau

Les tableaux 3 et 4 présentent les volumes d'eau observés et calculés en calage et validation. On peut remarquer que les déphasages observés sur les hydrogrammes en période des hautes eaux, ont une influence sur les volumes d'eau. Par exemple en phase de calage en 2016, le Volume d'eau écoulé (V.E) de 56,35 Mm³ observé à la BETE est estimé par le modèle à 28,94 Mm³ contre une augmentation du volume d'eau ruisselé (V.R.) de 23,02 Mm³ à 28,94 Mm³. Cette remarque est confirmée par une hausse du Q_{max} de 20,26 m³/s à 9,57 m³/s. En phase de validation en 2017, le V.E de 39,65 Mm³ observé à la DJIBI est estimé par le modèle à 37,86 Mm³ contre une augmentation du V.R. de 21,91 Mm³ à 37,86 Mm³. Cela est

confirmé par une hausse de Q_{max} de 18,75 m³/s à 26,66 m³/s. Sur les deux années d'observation, le ruissellement (V.R.) a eu tendance à dominer l'écoulement.

Tableau 3 : Volumes d'eau écoulés (V.E) et volumes d'eau ruisselés (V.R) en calage

Calage		Valeurs observées			Valeurs calculées		
Stations	Année	V.E. (Mm3)	V.R. (Mm3)	Q_{max} (m3/s)	V.E. (Mm3)	V.R. (Mm3)	Q_{max} (m3/s)
Bété	2016	56,35	23,02	20,26	28,94	28,94	9,57
Djibi		30,6	11,41	7,22	11,43	11,43	3,82
Bété	2017	97,88	95,98	58,74	95,32	95,32	57,08
Djibi		39,65	21,92	18,75	21,27	21,27	26,66

Tableau 4 : Volumes d'eau écoulés (V.E) et volumes d'eau ruisselés (V.R) en validation.

		Valeurs observées			Valeurs calculées		
Stations	Année	V.E (Mm3)	V.R (Mm3)	Q_{max} (m3/s)	V.E (Mm3)	V.R (Mm3)	Q_{max} (m3/s)
Bété	2016	56,35	23,02	20,26	31,1	31,1	9,93
Djibi		30,6	11,41	7,22	10,39	10,39	3,75
Bété	2017	97,88	95,98	58,74	59,99	59,99	56,93
Djibi		39,65	21,92	18,75	37,86	37,86	26,66

3.2. Discussion

La qualité du calage obtenu sur l'ensemble des hydrogrammes des sous bassins versants de la lagune Aghien dépend de la qualité des données hydro-pluviographiques utilisées. En effet, la simulation de l'hydrogramme par le couplage SCS-LR a sous-estimée dans la majorité des cas les pointes des crues, Cela peut s'expliquer par par d'éventuelles pertes qui n'ont pas été prises en considération ou qui n'ont pas été bien optimisés lors de la simulation. Les pertes par percolation et par évapotranspiration sont difficiles à modéliser pour des pas de temps horaires, et sans connaissance de l'état du sol initial lors de la simulation ainsi que sa texture et également les écoulements hypodermiques qui ne sont pas pris en considération par le modèle [13].

Le paramètre S_d de la fonction de production obtenusur l'ensemble des calages et validations, se situent entre 292 et 428 mm. Ces valeurs sont comparables à ceux obtenus sur le bassin versant Gardon à Anduze par [15]. Selon [16], la taille S_d du réservoir « sol » représente le déficit hydrique initial. Il est importante ($S_d > 200$ mm) lors d'un étiage prolongé ou lorsque le bassin est sec. Il est faible ($S_d < 200$ mm) lorsque le bassin est plus humide. Les observations pluviométriques des années 2015 et 2017 sont excédentaires tandis que celle de 2016 est déficitaire. Ainsi, la péjoration des précipitations de 2016 pourrait expliquer l'amplitude de S_d déterminé en 2017. En effet, la faible précipitation a reconstitué en parti la réserve souterraine des sous bassins versants. Pour cela, la pluie tombant sur un sol très peu humide aura tendance à s'infiltrer et reconstituer la réserve souterraine c'est le cas du Stock de 2017. Le paramètre S_d influence la fonction de production qui joue un rôle essentiel dans la représentation du débit en montée de crue. Le paramètre w (compris entre 0 et 1) est associé à l'écoulement retardé, d'origine sub-superficielle ou profonde. Le rôle de w consiste surtout à bien positionner la décrue, mais il n'a qu'une influence minime sur les débits de pointe de crue [15], [16]. Les faibles valeurs de w dénotent de la faible contribution des apports hypodermiques à l'exutoire. Aussi, les fortes pertes par évapotranspiration ou par percolation peuvent justifier l'exfiltration qui participe au ruissellement. Le paramètre ds contrôle l'amplitude des pointes de crue. L'augmentation de ds pour pour effet, la diminution du coefficient de ruissellement des pluies à venir, et vice versa. Le ds est élevé et supérieur à 1 dans la zone d'étude, mais la part exfiltrée participant au ruissellement (w) est minime. La vidange ds est acheminée à l'exutoire sous la forme d'un écoulement de base et permet à la fois un bon soutien des écoulements retardés et une bonne représentation de l'évolution de l'état hydrique de l'hydrosystème. Concernant le transfert, les vitesses atteintes pour le transport des écoulements sont faibles (0,24 à 0,76 m/s) pour une valeur moyenne de 0,54 m/s. Les valeurs de V_0 sont inférieures à celles calculées par Marchandise [15],[16]et [17]. Ces auteurs ont travaillé en événementiel et ont modélisé uniquement les pointes de crues et ont mis en exergue les vitesses à laquelle la crues se propageaient pour la conception des ouvrages ou créé un système d'alerte précoce en vue des inondations éventuelles. Or, la simulation effectuée dans le cadre

de ce travail porte sur l'hydrogramme annuel, sachant que l'hydrogramme est une alternance de crues et de décrues, les faibles vitesses sont en quelque sorte la moyenne de celles-ci d'où les faibles valeurs calculées.

CONCLUSION

L'objectif de ce travail consistait à modéliser les tributaires de la lagune Aghien. A l'issue de cette étude, le schéma de SCS Vidange/Lag&Route proposé a permis de déterminer sous le modèle ATHYS, des paramètres relativement stables des sous-bassins BETE et DJIBI. Leurs réponses hydrologiques dans l'ensemble sont décrites par une capacité de rétention importante des sols et par des vitesses de transfert faibles de 0,62 et 0,76 m/s respectivement à la BETE et à la DJIBI. Le paramètre de propagation K_p est fixé à 0,7 aux deux sous-bassins versants. Les paramètres caractérisant les phénomènes de vidange w et d sont respectivement de 0,2 j-l et de 1,09 j-l à la BETE et respectivement de 0,11 j-l et 1,26 j-l à la DJIBI. La contribution de ces deux tributaires à la lagune Aghien permet de combler largement le déficit annuel de 58 Mm³ nécessaire pour satisfaire aux besoins en eau de la ville d'Abidjan

Les résultats de ce travail préliminaire, peuvent d'ores et déjà servir de base à la prévision du comportement des tributaires de la lagune Aghien. Cependant, une meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique de la lagune, nécessite de prendre en compte les apports de la rivière ME et l'influence des ondes de marée.

REFERENCES

- [1] OMS/UNICEF(2012). Rapport du Programme commun OMS/UNICEF, 2012.
- [2] S. Ardoin-Bardin. (). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne, Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II 2004.
- [3] B.Kamagate, L.Seguis, D.L.Gone, G.Favreau, K. Koffi, Processus hydrogéochimiques et séparation d'hydrogrammes de crue sur un bassin versant en milieu soudano-tropical de socle au Bénin (Donga, haute vallée de l'Ouémé), Revue des sciences de l'eau, 21 (2008)363-372.
- [4] T.Lebel, A.Ali, Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). Journal of Hydrology, 375 (2009) 52-64.
- [5] S.Ayoob et A. K. Gupta. Fluoride in Drinking Water, A Review on the Status and Stress Effects. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 36 (2006)433-487.
- [6] M.A.C.Schouten, R.W.Mathenge, Communal sanitation alternatives for slums: A case study of Kibera. Kenya. Physics and Chemistry of the Earth, 35 (2010)815-822
- [7] Sogreah Ingénierie, Etude de la gestion et de la protection de la nappe assurant l'alimentation en eau potable d'Abidjan; Etude sur modèle mathématique; Rapports de phase 1 et 2, République de Côte d'Ivoire, Ministère des Infrastructures Economiques, Direction et Contrôle des Grands Travaux (DCGTx, actuel BNETD) ,1996.
- [8] I. Savané, C.Kapo et P.Gion, Variabilité climatique et ressources en eau souterraine dans la région semi montagneuse de Man. Revue sécheresse, 12(2001)232-237.
- [9] A.Traore, G.Soro, K.E.Ahoussi, B.S.Bamba, Soro N. et J. Biemi, Niveau de contamination en métaux lourds des sédiments d'une lagune tropicale : la lagune Aghien (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Afrique Science, 10(2014)73-88.
- [10] INS, Institut National de Statistique, 1998
- [11] N. Soro, T. Lasm, B.H. Kouadio, G. Soro, K.E. Ahoussi, Variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan. Sud Sciences et Technologies, 14(2006)30-40.
- [12] K. J. P.Koffi, Y. A.N'go, K. M.Yeo, D. Koné. & I. Savané, détermination des périmètres de protection de la lagune Aghien par le calcul du temps de transfert de l'eau jusqu' à la lagune. Larhyss Journal 19 (2014) 19-35.
- [13] I.Abdl et M.Meddi, Modélisation pluie-débit distribuée dans deux bassins versants de l'est de l'Algérie. Larhyss Journal ISSN 1112-3680, 23 (2015)7-22.
- [14] O. Laganier, Un couplage de modèles hydrologique et Hydraulique adapté à la modélisation et à la Prévision des crues à cinétique rapide - Application au cas du bassin versant du Gardon (France). Thèse de Docteur. École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, France, 2014
- [15] C. Bouvier, F. Delclaux , ATHYS: a hydrological environment for spatial modelling and coupling with a GIS, Proceedings HydroGIS96, Vienna, Austria, AHS publication, 235 (1996) 19-28.
- [16] M.Coustau, C.Bouvier, V.Borrell-Estupina, H.Jourde, Flood modelling with a distributed event-based parsimonious rainfall-runoff model: case of the karstic Lez river catchment, Natural Hazards and Earth System Science, 2(2012)1119-1133.
- [17] A. Marchandise, Modélisation hydrologique distribuée sur le Gardon d'Anduze ; étude comparative de différents modèles pluie-débit, extrapolation de la normale à l'extrême et tests d'hypothèses sur les processus hydrologiques. Thèse de Doctorat. Université Montpellier II. Montpellier2007.

Approche à l'étude physico chimique des eaux de surface dans une région aride (Nord-est Algérien)

Nawel Boussaada¹, Nabila Hammad¹

Laboratoire de Géologie du Sahara, Université KasdiMerbah, BP 511 Ouargla 30000, Algérie. E-mail : nawelmabedi@gmail.com

Résumé

Avec le développement de l'urbanisation et de l'industrialisation, ainsi que l'évolution des modes de consommation, les rejets d'eaux dites "usées" ont considérablement augmenté en quantité et dégradé en qualité.

La région d'étude, sise dans le Sud Est algérien, connaît depuis plusieurs années une dégradation de la qualité de ses eaux de surface. D'importantes quantités d'eaux excédentaires de drainage sont déversées, sans aucun traitement préalable, dans le canal d'Oued Righ, pour enfin joindre le Chott Merouane. Ces eaux sont issues de l'irrigation des palmeraies et celles des eaux usées des régions proches et limitrophes.

Cette pollution hydrique, menace, à terme d'affecter les caractéristiques écologiques du chott. Cette situation est à analyser par l'observation de l'évolution spatio-temporelle des données physico-chimiques sur le parcours du canal évacuateur. L'étude physico-chimique des eaux nous permet de tirer des conclusions sur la qualité des eaux de la région.

Les résultats obtenus montrent que la variation de la concentration des éléments chimiques dans l'espace est fortement liée à la répartition des formations géologiques, à la morphologie et à la topographie de la vallée généralement plane, qui ne facilite pas le drainage des eaux excédentaires. Par contre, leur variation dans le temps est due aux effets de la température (évaporation) ainsi qu'aux activités anthropologiques.

Mots clés :Qualitédes eaux, Sahara septentrional, Pollution, irrigation, Nappe phréatique.

Approach to the physico-chemical study of surface water in an arid region (North-East Algeria)

Abstract

With the development of urbanization, industrialization, as well as changes in consumption patterns, so-called "spent" water discharges have considerably increased in quantity and deteriorated in quality.

The study area, located in the south-east of Algeria, has for several years been experiencing deterioration in the quality of its surface water. Significant quantities of excess drainage water are discharged, without any prior treatment, in the Oued Righ canal, to finally join the Chott Merouane. These waters come from the irrigation of palm groves and those of wastewater from neighboring regions.

This water pollution threatens to eventually affect the ecological characteristics of the chott. This situation is to be analyzed by observing the spatio-temporal evolution of the physicochemical on the course of the evacuating channel. The physico-chemical study of the waters allows us to draw conclusions about the quality of the waters of the region. The results obtained show that the variation in the concentration of chemical elements in space is strongly related to the geological distribution, morphology and topography of the generally flat valley, which does not facilitate drainage of excess water. On the other hand, their variation over time is due to the effects of temperature (evaporation) as well as to anthropological activities.

Key Words: Water quality, Northern Sahara, Pollution, Irrigation, Groundwater.

1. INTRODUCTION

Aujourd'hui les méthodes d'interprétations des résultats sont nombreuses et répondent à toutes les questions posées par l'opérateur. Dans un contexte particulièrement difficile, la qualité des eaux risque de poser problème, les plus souvent évoqués sont ceux relatifs à des réseaux de distributions. Ce qui explique les méthodes choisies.

Pour étudier le faciès chimique et la qualité des eaux superficielles, des échantillons d'eau sont prélevés le long du canal oued Righ à partir des stations de jaugeages. L'évolution s'est faite sur une observation de 04 années à savoir : une campagne en 2004, une au mois d'Aout 2006, une autre au mois de Juin 2007 et enfin au mois de Février 2012. Les analyses physico-chimiques des eaux de la vallée de l'oued Righ ont fait l'objet de mesures partielles, effectuées au laboratoire d'hydraulique à l'université d'Ouargla, au Centre de Recherche et de Développement (CRD) de Hassi Messaoud et au laboratoire de L'ANRH (OUARGLA).

2. EVOLUTION DES PARAMETRES PHYSIQUES : PH, RESIDU SEC ET CONDUCTIVITE

Le pH permet indirectement l'évaluation de l'agressivité chimique des eaux. A oued Righ, il est généralement supérieur à 7 (Fig.1). Cette faible alcalinité des eaux s'explique par l'abondance du CO₂ dissout. Ces valeurs correspondent à des eaux fortement chlorurées sodiques ce qui est le cas de la majorité des eaux analysées pendant les différentes campagnes [1]. Le résidu sec représente la minéralisation totale de l'eau. Elle est en relation directe avec la conductivité électrique de la solution. Dans le cas de la zone étudiée, les valeurs de la minéralisation se situent généralement entre 12.25 g/l en 2012 pour la station de Bouffegoussa et 19.7 g/l en 2004 enregistré à la station de Ranou. Cependant, cette gamme de valeurs peut être localement dépassée, attribuée à l'effet de la lithologie (nature évaporitique) à la qualité de l'eau d'irrigation préalablement salée, aux conditions climatiques très arides produisant une forte évapotranspiration qui concentre la solution du sol [2], et surtout à l'inefficacité du réseau de drainage mal entretenu. En effet, la forte conductivité électrique des eaux du canal provenant des stations est essentiellement influencée par les chlorures et le sodium, ainsi qu'au phénomène d'évaporation.

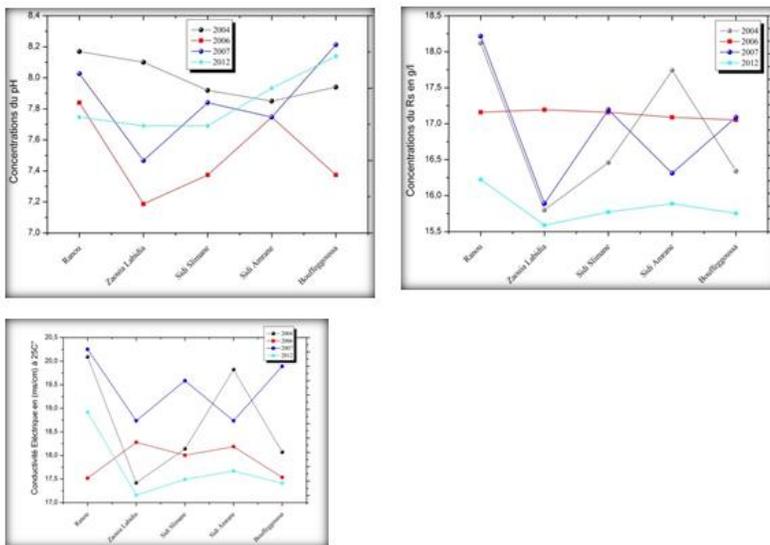


Figure 1 : variation des paramètres physiques.

3. EVOLUTION DES PARAMETRES CHIMIQUE

3.1. Variation dans le temps et dans l'espace des cations

Les cations analysés sont le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium.

Sur le plan hydro chimique et d'une manière générale, les eaux sont fortement minéralisées, très dures (Fig.2). Le caractère dur de ces eaux est en partie dû à la contamination par les eaux d'irrigation et les eaux usées domestiques qui se jettent dans le canal. Par ailleurs, une autre cause probable de cette dureté élevée, serait due au lessivage des roches traversées par les eaux lors de leurs circulations dans les formations aquifères et du temps de séjour qui leur permet de s'enrichir en sels minéraux.

Le sodium peut prévenir du lessivage des formations géologiques riches en Na Cl et surtout de l'évaporation. L'augmentation des valeurs est due aux eaux chargées provenant de la dissolution des sels de la croûte superficielle, par les eaux d'irrigations et les rejets des eaux usées.

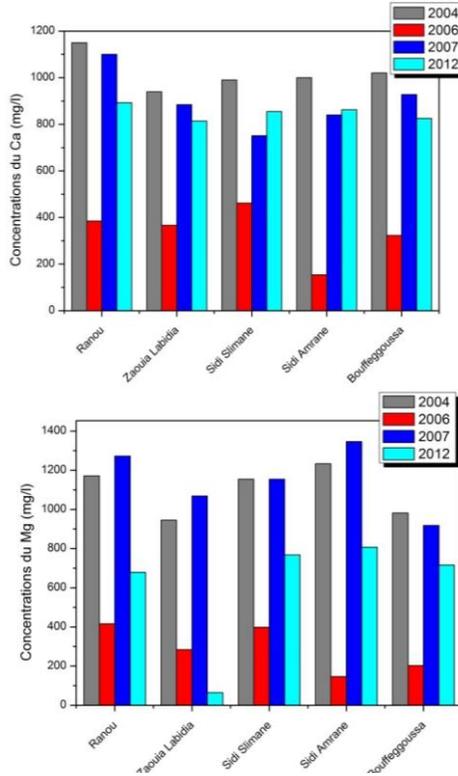


Figure 2: Variation spatio-temporelle des cations

3.2. Variation dans le temps et dans l'espace des anions

Les résultats des analyses (Fig.3), ont permis de noter des valeurs élevées en chlorures et en sulfates dans le temps et dans l'espace. Ces éléments peuvent provenir de la solubilité des formations gypseuses ou au lessivage des niveaux argileux et marneux, des Rejets d'eaux usées et des eaux de drainage ainsi que de l'évapotranspiration intense dans les régions.

Les bicarbonates sont le résultat de l'équilibre physicochimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique.

Les bicarbonates proviennent de la dissolution des roches carbonatées en fonction de la tension en CO₂, de la température, le pH de l'eau et la nature lithologique des terrains traversées.

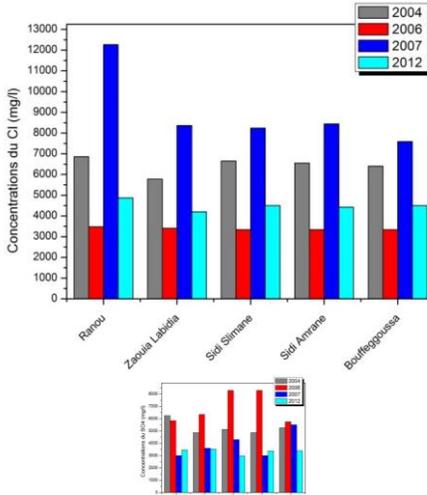


Figure 3: Variation spatio-temporelle des anions

4. Classification des eaux

4.1. Classification de Stabler (formule caractéristique)

Table I - Formules ioniques et faciès chimiques des eaux du canal.

Stations	2004		2006		2007		2012	
	Formule ionique	Faciès chimiq	Formule ionique	Faciès chimiq	Formule ionique	Faciès chimiq	Formule ionique	Faciès chimiq
Ranou	$r Cl > r SO_4^{2-} > r Na^{++}K^{+} > r Mg^{2+} > r Ca^{2+}$	Chloruré sodique	$r SO_4^{2-} > r Cl > r HCO_3^- > r Na^{++}K^{+} > r Ca^{2+} > r Mg^{2+}$	Sulfaté Sodiq	$r Cl > r SO_4^{2-} > r HCO_3^- > r Na^{++}K^{+} > r Mg^{2+} > r Ca^{2+}$	Chloruré sodique	$r Cl > r HCO_3^- > r Na^{++}K^{+} > r Ca^{2+} > r Mg^{2+}$	Chloruré sodique
Zaouia Lab	$r Cl > r SO_4^{2-} > r Na^{++}K^{+} > r Mg^{2+} > r Ca^{2+}$	Chloruré sodique	$r SO_4^{2-} > r Cl > r HCO_3^- > r Na^{++}K^{+} > r Ca^{2+} > r Mg^{2+}$	Sulfaté Sodiq	$r Cl > r SO_4^{2-} > r HCO_3^- > r Na^{++}K^{+} > r Mg^{2+} > r Ca^{2+}$	Chloruré sodique	$r Cl > r SO_4^{2-} > r HCO_3^- > r Na^{++}K^{+} > r Ca^{2+} > r Mg^{2+}$	Chloruré sodique
Sidi Sliman	$r Cl > r SO_4^{2-} > r Na^{++}K^{+} > r Mg^{2+} > r Ca^{2+}$	Chloruré sodique	$r SO_4^{2-} > r Cl > r HCO_3^- > r Na^{++}K^{+} > r Ca^{2+} > r Mg^{2+}$	Sulfaté Sodiq	$r Cl > r SO_4^{2-} > r HCO_3^- > r Na^{++}K^{+} > r Mg^{2+} > r Ca^{2+}$	Chloruré sodique	$r Cl > r SO_4^{2-} > r HCO_3^- > r Na^{++}K^{+} > r Ca^{2+} > r Mg^{2+}$	Chloruré sodique
Sidi Amran	$r Cl > r SO_4^{2-} > r Na^{++}K^{+} > r Mg^{2+} > r Ca^{2+}$	Chloruré sodique	$r SO_4^{2-} > r Cl > r HCO_3^- > r Na^{++}K^{+} > r Ca^{2+} > r Mg^{2+}$	Sulfaté Sodiq	$r Cl > r SO_4^{2-} > r HCO_3^- > r Na^{++}K^{+} > r Mg^{2+} > r Ca^{2+}$	Chloruré sodique	$r Cl > r SO_4^{2-} > r HCO_3^- > r Na^{++}K^{+} > r Ca^{2+} > r Mg^{2+}$	Chloruré sodique
Bouffegoussa	$r Cl > r SO_4^{2-} > r Na^{++}K^{+} > r Ca^{2+} > r Mg^{2+}$	Chloruré sodique	$r SO_4^{2-} > r Cl > r HCO_3^- > r Na^{++}K^{+} > r Ca^{2+} > r Mg^{2+}$	Sulfaté Sodiq	$r Cl > r SO_4^{2-} > r HCO_3^- > r Na^{++}K^{+} > r Ca^{2+} > r Mg^{2+}$	Chloruré sodique	$r Cl > r SO_4^{2-} > r HCO_3^- > r Na^{++}K^{+} > r Ca^{2+} > r Mg^{2+}$	Chloruré sodique

Toutes les eaux présentent un faciès chloruré sodique sauf pour les eaux de l'année 2006 le faciès est sulfaté sodique due à la très forte évaporation (prise de la compagne au mois d'Aout).

4.2. Classification de Piper

L'examen des représentations graphiques obtenues, permet de déduire que, comme pour la formule ionique, les diagrammes de Piper montrent que les échantillons coïncident sur les pôles caractérisant les faciès Chloruré sodique et Sulfaté sodique.

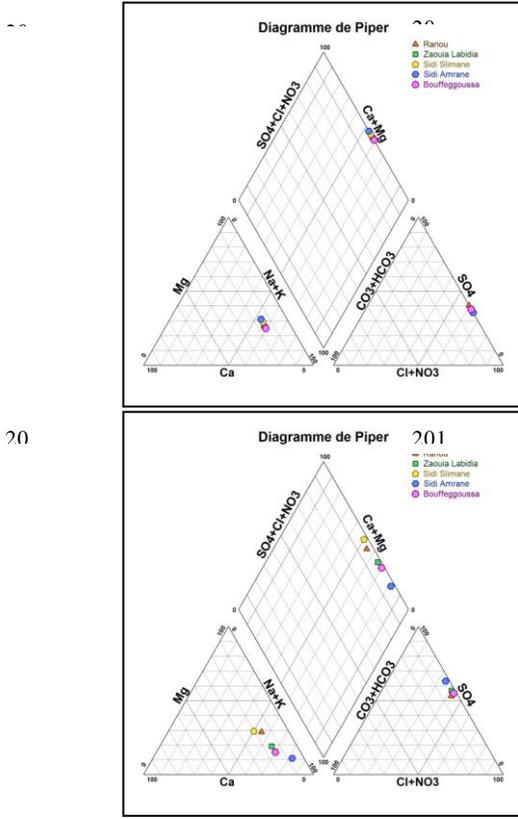


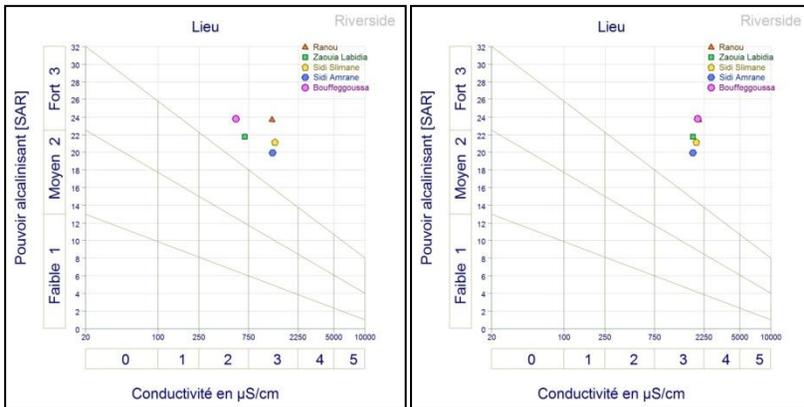
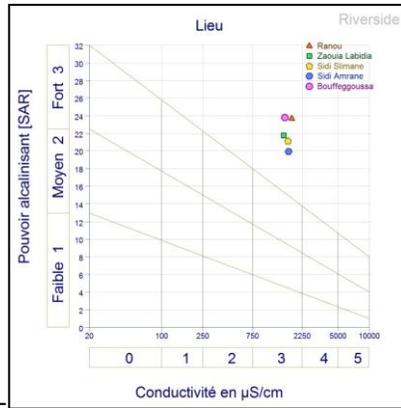
Figure 4: Diagrammes losangiques de Piper des eaux du canal Oued Righ

4.3. Diagramme de Richards

Les analyses chimiques ont révélées des fortes teneurs en chlorure de sodium où la destination des eaux à l'irrigation peut rencontrer le risque de salinité évidemment en climat hyper aride. A ceci s'ajoute la forte conductivité électrique (CE) des eaux de l'Oued Righ.

Un autre risque majeur est celui de l'alcalinisation des sols par suite d'échanges ioniques, concernant surtout le sodium le calcium et le magnésium, entre l'eau et les argiles du sol. De fortes teneurs en sodium modifient la structure des sols et leur perméabilité. Ainsi, le développement des plantes est très faibles ou nul dans les sols saturé en sodium.

D'après les diagrammes de RIVERSIDE de la classification des eaux d'irrigation (Fig.5), les eaux de la région sont situées dans la classe C3S4, ce qui explique que les eaux sont extrêmement chargées en sel et fortement sodique. La statistique des données des eaux superficielles montre une qualité très mauvaise pour l'irrigation.



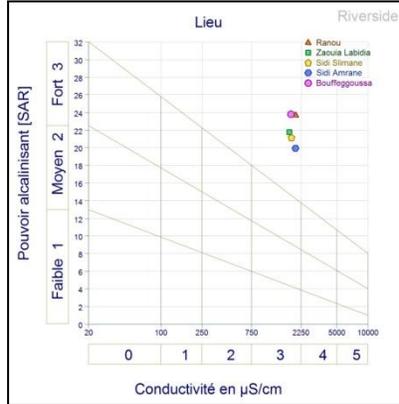


Figure 4: Diagrammes de Richards des eaux du canal Oued Righ

CONCLUSION

La variation de la concentration des éléments chimiques dans l'espace est liée à la répartition des formations géologiques, à la morphologie et à la topographie de la vallée généralement plane, qui ne facilite pas le drainage des eaux excédentaires. Par contre les variations dans le temps sont dues aux activités de l'Homme ainsi qu'à l'effet de la température (évaporation).

Références

- [1] I. N, Boussaada, La télédétection au service des ressources en eaux. Application à la gestion des ressources en eaux dans la vallée d'Oued Righ, Thèse de doctorat, Université d'Annaba 2007.
- [2] C, L. Chevery, M. Robert, La dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau : une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la méditerranée. Etude et Gestion des Sols, 5, 4 (1998) 217-226.

Modélisation du phénomène de cavitation dans les conduites fermées

Wahiba Mokrane^{1,2}, Ahmed Kettab¹

¹Laboratoire de recherche des sciences de l'eau,Lrs-eau, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger

² Département d'Hydraulique Urbaine, Laboratoire de recherche MVRE, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique de Blida. E-mail :mokranewah@yahoo.fr

Résumé

Contre une augmentation de la vitesse dans une conduite, une chute de pression peut aboutir à une vaporisation à température constante. Par conséquent une érosion de paroi de matériau peut surgir. C'est la cavitation, un phénomène caractérisé essentiellement par l'apparition de bulles d'air. La maîtrise de ce phénomène nécessite un modélisation mathématique adéquate capable de simuler la réalité physique. C'est dans ce contexte qu'entre l'objectif de notre travail. Nous appliquons le modèle de Raleigh Plesset basé sur l'hypothèse de la sphéricité de la bulle d'air et reliant sa dimension au champ de pression. Nous proposons aussi d'utiliser le modèle parabolique de diffusion de l'air sous l'hypothèse d'une vitesse faible du milieu liquide contre celle de la phase gazeuse. D'après sa solution analytique, nous avons déduit que l'air diffuse lentement dans la conduite alors que sa solution numérique basée sur une décomposition en éléments finis montre que la distribution de l'air, en partie haute de la conduite se fait en un temps court ce qui est plus réel.

Mots clés : Pression, Vaporisation, Cavitation, Bulles d'air, Diffusion, Modélisation

Cavitation phenomenon modelling in closed pipes

Abstract

Against a velocity rising in a closed pipe, a pressure drop may lead to vaporization at a constant temperature. Thus, material wall erosion will appear. It is the cavitation, a phenomenon characterized essentially by the air bubbles apparition. The mastery of this phenomenon implies an adequate mathematical modeling able to simulate the physical reality. It is, In this background, the purpose of our work. We apply the Raighleih Plesset model based on the air bubble sphericity and relating its size to the pressure field. We propose also to use the parabolic air diffusion model with the hypothesis that middle liquid velocity is less than the gas phase one. According to the analytic solution, we have deduced that air diffuses slowly but the numerical solution based on finite element decomposition shows that the air distribution, in the upper part of the pipe occurs during a short time which is more really.

Key Words: pressure, vaporization, air bubbles, diffusion, modelling

1. INTRODUCTION

Lorsqu'un changement de phase, accompagné d'une génération de bulles d'air, a lieu dans un écoulement de liquide ; la cavitation se manifeste. Il s'agit d'un phénomène qui se crée suite à une chute de pression au-dessous la pression de vapeur. Qui est directement liée à une augmentation de vitesse. Mécaniquement, ce phénomène correspond à une rupture du milieu continu sous l'effet de contraintes excessives. Ce qui peut être identifié tout simplement comme étant la résultante d'une vaporisation au sein même de l'écoulement. Nous pouvons distinguer trois cas de cavitation ; la cavitation par formation de bulles d'air dans un liquide, la cavitation fixe correspondant à des poches d'air attachées à une paroi rigide et la cavitation sous forme de tourbillons. D'autre part et selon le processus de production, nous remarquons quatre types de cavitation ; la cavitation hydrodynamique se produisant sous l'effet d'un gradient de pression, acoustique, optique et particulaire [1]. Dans le présent travail, nous nous intéressons à la cavitation liquidienne par bulles d'air. Ces dernières ont incité la curiosité de plusieurs chercheurs depuis bien des années et les incitent jusqu'à nos jours [2][3][4]; vu l'intérêt de ce phénomène en industrie, en génie civil, en biologie et en médecine.

Or ce phénomène dynamique, de caractère aléatoire et complexe, dépend de plusieurs facteurs physiques. Ce qui a rendu son étude et sa prévision plus difficiles. Les travaux basés sur l'approche expérimental, font surgir deux problèmes relevant des perturbations créées par l'installation des appareils de mesure de pression ainsi que des faibles dimensions et durées d'existence des bulles[5]. L'approche mathématique, est devenue ainsi une nécessité. C'est le modèle de Rayleigh Plesset, décrivant le mouvement d'une bulle dans un liquide incompressible, qui est le plus répandu [2][3]. Vu que les bulles d'air sont entraînées par l'écoulement et finissent par disparaître en implosant, nous suggérons d'appliquer le modèle diffusif avec sa solution analytique en plus de sa solution numérique faisant appel à la méthode des éléments finis.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dans le but de suivre le développement de la phase air au sein d'un écoulement d'eau dans une conduite fermée, nous utilisons deux modèles mathématiques. Le premier vise l'évolution de la bulle d'air sous l'effet du champ de pression et du temps. Alors que le second s'intéresse à la distribution de la quantité d'air à travers l'écoulement.

1.1. Modèle classique de Rayleigh Plesset

En considérant un milieu liquide infini, un gradient de température constant, un fluide incompressible et une forme sphérique pour la bulle d'air de rayon $R(t)$. nous supposons aussi que la pression loin de la bulle est connue et qui peut être contrôlée. Pour un fluide Newtonien en mouvement dans la direction de r le rayon de la bulle, les équations de Navier Stokes s'écrivent [8] :

$$\frac{-1}{\rho_l} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} - \nu_l \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{2u}{r^2} \right] \quad (1)$$

Bien que le liquide peut s'avérer compressible, nous supposons que sa masse volumique ρ_l est constante et de même pour sa viscosité cinématique ν_l . La vitesse u d'un point matériel loin de la bulle sphérique est variable sous l'effet du changement de pression p dans le temps t . Le principe de conservation de la masse, traduit en coordonnées sphériques ; nous permet d'écrire :

$$4\pi r^2 u = 4\pi R^2 \frac{dR}{dt} \quad (2)$$

$$D'où : u = \frac{R^2}{r^2} \frac{dR}{dt} \quad (3)$$

R représente le rayon de la bulle à l'instant t . En remplaçant u par son expression dans la première équation (1) et en intégrant entre l'infini et R ; nous obtenons :

$$p(R) = p + \rho_l \left[R^2 \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \right] \quad (4)$$

La pression à l'infini est désignée par p , sachant que R est très petit devant r qui désigne la phase liquide. La pression dans la bulle p_b est composée de la pression de vapeur saturante p_v et de la pression partielle du gaz non condensable p_g . Elle est exprimée comme suit :

$$p_b = p_v + p_g \quad (5)$$

Le modèle classique de Rayleigh Plesset est représenté par l'équation suivante [5] :

$$\rho_l \left[R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \right] + \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} = -p - \frac{2\sigma}{R} + p_v + p_g \quad (6)$$

La tension superficielle, désignée par S est prise en considération dans l'équilibre dynamique à l'interface par les auteurs dans l'équation ci-dessus. Tenant compte des conditions initiales suivantes :

$$\mathbf{R}(t = 0) = \mathbf{R}_0 \text{ et } \frac{d\mathbf{R}(t=0)}{dt} = 0 \quad (7)$$

En adoptant une forme sphérique pour la bulle d'air et en négligeant la tension de surface ; l'équation de Rayleigh Plesset peut être formulée de la manière ci-après [5] :

$$\frac{dR}{dt} = - \left[\frac{2}{3} \left(\frac{p_v - p}{\rho_l} \right) \left(\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Le champ de pression est ainsi donné par :

$$\frac{p(r,t) - p_0}{p_0 - p_v} = \frac{R}{r} \left[\frac{R_0^3}{R^3} - 4 \right] - \frac{R^4}{r^4} \left[\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right] \quad (9)$$

1.2. Modèle de diffusion

La cavitation liquidienne consiste en un entrainement de bulles d'air dans l'écoulement. C'est un phénomène semblable à celui d'une diffusion de particules et comportant un caractère aléatoire. Sous l'effet du gradient de concentration de la phase air, les bulles d'air diffusent dans la conduite d'eau. Ce phénomène est régi par le modèle parabolique suivant [9] :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (10)$$

La concentration est représentée par c , le coefficient de diffusivité est désigné par D et la position par x . la solution analytique de cette équation est donnée par :

$$c(x,t) = \frac{1}{A \sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) \quad (11)$$

A représente la section de la conduite et c_0 la concentration initiale de l'air. Nous pouvons inclure La variable temporelle dans le terme :

$$T = 4Dt \quad (12)$$

D'autre part, moyennant la boite à outil de résolution des équations aux dérivées partielles de MATLAB2014, nous aboutissons à la solution de la diffusion de la phase air dans la conduite circulaire. Ceci en passant par l'introduction des données et d'un choix adéquat des conditions aux limites. De même pour le maillage puisque c'est la méthode des éléments finis qui est utilisée. Une fois le domaine de calcul déterminé, nous passons à son maillage avec possibilité de son raffinement en augmentant le nombre d'éléments pour obtenir une meilleure approximation de la solution. Puis nous spécifions les conditions aux frontières et par la suite la visualisation de la solution.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Nous procédons à deux applications, la première concerne la détermination des champs de pression en fonction des rapports des dimensions des deux phases. Ceci, pour divers cas d'évolution de la bulle d'air et en utilisant le modèle classique de Rayleigh Plesset. La seconde application vise le modèle de la diffusion en suivant les voies analytique et numérique pour présenter la solution.

3.1. Application du modèle classique

La solution du modèle classique est représentée dans la figure ci après. Le champ de pression $[(p-p_0)/(p_0-p_v)]$ en ordonnée et le rapport entre la dimension représentative de phase liquide r et celle qui désigne le rayon de la bulle R . cette figure regroupe quatre courbes ; chacune correspond à une valeur distincte du rapport entre le rayon initial de la bulle et le rayon à un instant donné. Nous remarquons que toutes ces courbes passent par un même point. Ce dernier correspond à une valeur du champ de pression égale à -1. Ce qui se traduit par le fait que la pression p à l'instant donné est égale à la pression de vapeur, c'est le point d'inception. La coordonnée horizontale, elle correspond à l'unité. Ceci veut dire que la dimension liquidienne est égale à celle de la phase air.

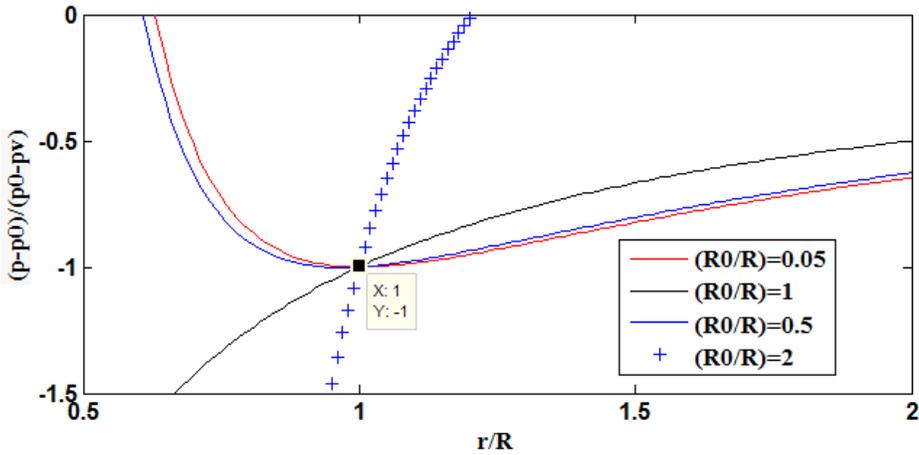


Fig. 1 - Evolution du champ de pression en fonction du rapport de phases

Pour des valeurs de (R_0/R) de 0.05 et 0.5 les deux courbes sont adjacentes. Le champ de pression chute fortement jusqu'au point d'inception ; puis se stabilise avec une remontée. Lorsque (r/R) est inférieure à l'unité la phase liquide a une dimension supérieure à celle de la phase d'air et nous observons les valeurs maximales de pression. Mais lorsque (r/R) dépasse l'unité ; c'est le rayon de la bulle qui évolue. Pour des valeurs de (R_0/R) de 1 et 2, nous remarquons une augmentation du champ de pression. Lorsque la valeur du rapport (r/R) est inférieure à l'unité la solution est insignifiante mais lorsqu'elle est supérieure elle traduit la diminution du rayon de la bulle d'air. C'est l'implosion.

3.2. Application du modèle de diffusion

Contrairement au modèle précédent ; ce n'est pas le développement de la bulle de cavitation qui nous intéresse, mais la distribution de l'ensemble des bulles d'air. Alors, c'est le modèle de diffusion qui va nous permettre d'étudier cela. Nous commençons d'abord par représenter la solution analytique dans la figure ci-après.

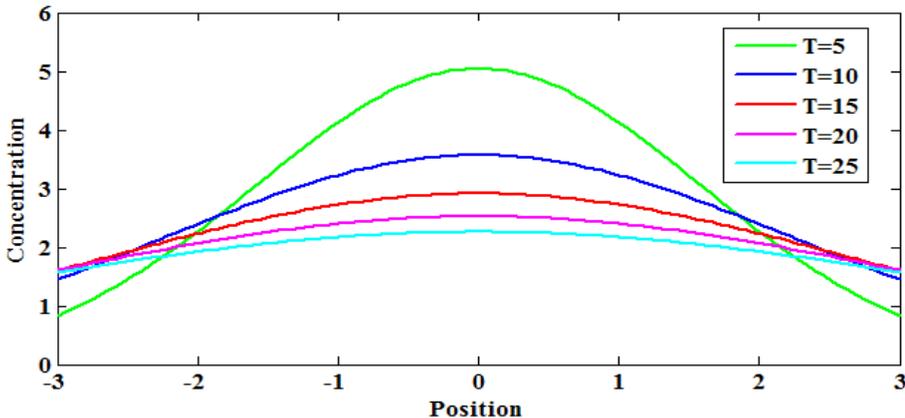


Fig. 2 - Variation de la concentration d'air en fonction de la position

La figure ci-dessus montre l'allure du transport de matière ou de masse composé d'un certain nombre de particules qui sont les bulles d'air. Ceci se fait le long d'un écoulement d'eau dans une conduite fermée. Nous considérons une vitesse suffisamment faible pour approcher l'hypothèse du repos. Les solutions sont tracées pour des valeurs de temps allant de quelques heures à quelques jours. Elles correspondent à des valeurs de T de 5, 10, 15, 20 et 25. La conduite d'essai a un diamètre de 0.005m et une longueur de 3m. Nous prenons une valeur du coefficient de diffusivité D, de l'air dans l'eau,

égale à 2.10-5[8]. D'après les courbes descriptives des solutions, nous remarquons que la phase air diffuse selon une allure Gaussienne ayant une forme de cloche et symétrique. Nous observons une valeur maximale de La concentration à l'origine des abscisses mais qui décroît avec le temps. La solution numérique que nous obtenons en utilisant la résolution de l'équation de diffusion aux dérivées partielles est montrée dans les deux figures 3 et 4. C'est en moyennant la boîte à outil MATLABR2014a, que nous avons pu déterminer ces solutions. Nous avons, spécifié notre domaine de calcul qui est un cercle de 0.05m de diamètre dans l'interface graphique d'utilisateur. Puis nous avons procédé au maillage de ce domaine que nous avons raffiné. Il est constitué de 557noeuds et de 1048 triangles. Nous avons spécifié aussi les paramètres du modèle en introduisant le coefficient de diffusivité et en adoptant des conditions aux frontières. Concernant le pas de temps de la solution, nous l'avons pris égal à 10 secondes. Ce dernier est relativement court par rapport à ceux que nous avons pris pour la solution analytique.

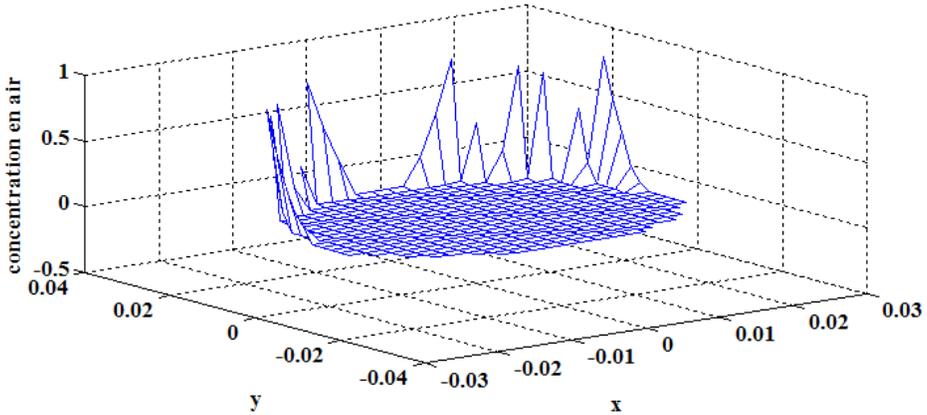


Fig. 3 - Concentration et distribution de l'air à travers la section circulaire discrétisée en éléments finis

Nous présentons la solution de l'équation de diffusion sous une autre forme dans la figure 4. Ce sont les couleurs de la barre qui nous permettent de distinguer les parties de regroupement des bulles d'air.

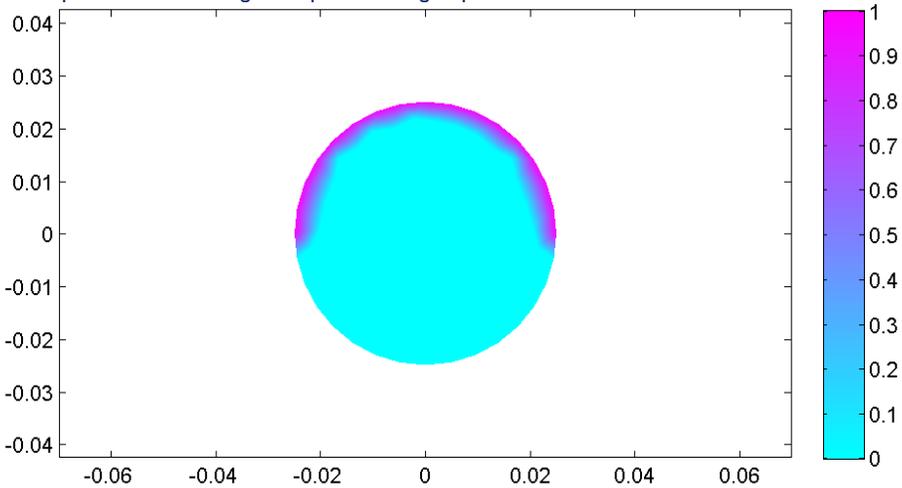


Fig. 4 - Distribution de l'air à travers la section circulaire de la conduite

La dégradation des couleurs, nous permet de détecter les zones à forte concentration en air. Nous considérons les faibles concentrations de 0 à 0.2, les moyennes de 0.2 à 0.5 et les plus importantes de 0.5 à 1. Ainsi, l'air a tendance de se diriger et s'étaler sur la couronne et sur les côtés. La phase air est presque absente dans La partie basse de la conduite.

Ce qui nous mène à conclure que cette simulation par éléments finis concrétise la réalité physique pour un pas de temps aussi court.

CONCLUSION

La cavitation liquidienne est un phénomène hydrodynamique complexe. Chercher à mieux le contrôler et mieux l'exploiter revient à le simuler de la manière la plus adéquate possible. Dans le présent travail, nous nous sommes intéressés à la modélisation mathématique et numérique de son développement. Ceci au sein d'un écoulement d'eau dans une conduite circulaire et fermée. Cependant, en se basant sur les équations de Navier Stockes et en considérant les phases air et eau simultanément ; nous avons suggéré l'application de deux modèles. L'équation de Rayleigh Plesset représentant le premier modèle dit classique. Le second est celui du transport de matière dit diffusif. Sous l'hypothèse de la sphéricité des bulles d'air, la solution du modèle classique nous a permis de prévoir l'évolution des bulles en termes de dimensions avec le champ de pression. S'intéressant à toute la section blanche et donc à l'ensemble des bulles d'air, nous avons suggéré l'utilisation du second modèle de diffusion. Sa solution analytique donne des valeurs maximales de concentration qui demeurent à l'origine de la conduite mais qui chutent avec le temps. Cette solution est significative pour de large pas de temps seulement. Ce qui contredit la réalité de la diffusion des bulles d'air dans l'eau. La solution numérique, basée sur une discrétisation du domaine en éléments finis, nous a permis de reproduire la distribution d'air dans de l'eau d'une conduite circulaire en partie haute et pour un temps de simulation court. Ce résultat est en concordance avec la réalité physique.

Références

- [1] F.R. Young, Cavitation, Imperial College Press, 1999, pp. 1 -5.
- [2] C. E. Brennen, Cavitation and bubble Dynamics, Oxford University Press, 1995, pp.40 -43.
- [3] R. H. Cole, Under water explosions, Princeton University Press, 1948, pp. 392-417.
- [4] Y. Lcoffre, Erosion et types de cavitation, Houille Blanche, No7/8, (1992), 587-593.
- [5] V. Daru et al, Simulation numérique d'écoulements liquide-gaz en approximation bas Mach: Proceeding du 19eme Congrè Français de Mecanique, Marseille, France, Aout 24-28(2009) 1 -6.
- [6] J. P. Franc and J. M. Michel, Fundamentals of Cavitation, Kluwer academic publishers, 2005, pp.7-9.
- [7] O. Miyatake et al, A simple universal equation for bubble growth in pure and binary solutions with a nonvolatile solute, Int.J. Heat Mass Transfer. Vol40, No7 (1997) 1577-1584.
- [8] C. E.Brennen, Cavitation and bubble Dynamics, Oxford University Press, 1995, pp.40-43.
- [9] W .Graf et M.S.Altınakar, Hydraulique fluviale, Tome2, Presses polytechniques et universitaires Romandes, 1993, pp282-284.

Surveillance des caractéristiques physico-chimiques et sédimentologiques de trois sources d'eau de la nappe Metline-Ras Jebel-Rafraf.

Sonia Dhaouadi¹, Salsabil Rajeb²

¹ et ² : Université de Carthage Laboratoire de Bio-surveillance de l'Environnement

Unité d'Hydrobiologie Littorale et Limnique Université de Carthage Faculté des Sciences de Bizerte / Jarzouna. 98 325 230. E-mail : sndhaouadi@gmail.com

Résumé

Les trois sources d'eau prospectées (Sounine, Cap Zbib et Saadan) appartiennent à la même nappe phréatique Metline - Ras Jebel - Rafraf (Bizerte). L'étude de 19 paramètres physicochimiques et de leur granulométrie montre des différences plus ou moins remarquables entre elles. Les trois sources présentent des textures du sol différentes. Le substrat de la source de Sounine est limono-sableux, la source de Cap Zbib est caractérisée par une texture argileuse alors que la source de Saadan est de texture limono-argileuse. La source de Sounine est la plus acide, la plus minéralisée, légèrement la plus dure (plus riche en calcium et en magnésium), la plus riche en bicarbonate, en éléments nutritifs (nitrate, nitrite) et en métaux lourds (aluminium, chrome et plomb). Les paramètres des sources de Cap Zbib et Saadan sont très proches malgré la localisation côtière de la première et la localisation franchement continentale de l'autre. La source de Cap Zbib est légèrement plus minéralisée, plus dure, plus riche en bicarbonate, en chrome que la source de Saadan qui est à son tour légèrement plus riche en éléments nutritifs (nitrate, nitrite) et en métaux lourds (aluminium, en plomb et en cadmium) que la source de Cap Zbib. L'analyse des dendrogrammes de similitude entre les stations, établie par le logiciel Primer 6,2 en tenant compte des paramètres abiotiques, permet de répartir les stations en 2 biotopes avec un indice de similarité de 93%. Cette répartition des biotopes est justifiée par des dissimilarités entre les sites par l'analyse Simper. L'examen des contributions relatives des variables environnementales des sources de Sounine et de Cap Zbib a montré des pourcentages de contribution intéressants, et ceci pour CO_3^{2-} (16,75%), TDS (12,00%), CE (10,92%), Tur (10,75%) et SO_4^{2-} (10,07%) pour atteindre un pourcentage cumulatif de dissimilarité de l'ordre de 60,49%. Les sources de Sounine et de Saadan ont montré les contributions relatives les plus importantes par le TDS (17,64%), CE (16,32%), CO_3^{2-} (16%,03), salinité (11,92%) et par le Cl⁻ (9,47%) pour atteindre un pourcentage cumulatif de dissimilarité de l'ordre de 71,38%. Pour Cap Zbib et Saadan constituant un même biotope, les paramètres qui contribuent à la dissimilarité sont essentiellement le sulfate qui contribue par 23,30%, la Turbidité par 17,18%, TDS par 9,72% et la CE par 9,42%, ceci pour atteindre un pourcentage cumulatif de dissimilarité de l'ordre de 59,62%.

Mots clés : Source d'eau, Nappe phréatique, physico-chimie, granulométrie, Bizerte, Tunisie.

Monitoring physicochemical and sedimentological characteristics of three groundwater sources Metline-Ras Jebel - Rafraf.

Abstract

The three prospected springs (Sounine, Cap Zbib and Saadan) belong to the same water table Metline - Ras Jebel - Rafraf (Bizerte). The study of 19 physicochemical parameters and their granulometry shows more or less remarkable differences between them. The three springs have different soil textures. The substrate of the Sounine is sandy loam; the one of Cape Zbib is characterized by a clay texture while the Saadan one is loam-clay texture. The spring of Sounine is the most acidic, the most mineralized, slightly hardest (richer in calcium and magnesium), the richest in bicarbonate, nutrients (nitrate, nitrite) and heavy metals (aluminum, chromium and lead). The parameters of Cape Zbib and Saadan are very close despite the coastal location of the first and the frankly continental location of the other. The spring of Cape Zbib is slightly more mineralized, harder, richer in bicarbonate, chromium than the spring of Saadan which is in turn slightly richer in nutrients (nitrate, nitrite) and heavy metals (aluminum, lead and cadmium) as the spring of Cape Zbib. The analysis of the dendrograms of similarity between the stations, established by the Primer 6.2 software, taking into account the abiotic parameters, makes it possible to divide the stations into 2 biotopes with a similarity index of 93%. This distribution of biotopes is justified by dissimilarities between sites by Simper analysis. Examination of the relative contributions of the environmental variables of the springs of Sounine and Cap Zbib showed interesting percentages of contribution, and this for CO_3^{2-} (16.75%), TDS (12.00%), CE (10, 92%), Tur (10.75%), and SO_4^{2-} (10.07%) to achieve a cumulative percentage of dissimilarity of the order of 60.49%. Springs of Sounine and Saadan showed the largest relative contributions by TDS (17.64%), EC (16.32%), CO_3^{2-} (16%, 03), and salinity (11.92%) and by Cl⁻ (9.47%) to reach a cumulative percentage of dissimilarity of the order of 71.38%. For Cape Zbib and Saadan constituting the same biotope, the parameters that

contribute to dissimilarity are mainly sulphate, which contributes 23.30%, Turbidity 17.18%, TDS 9.72% and EC 9.42% to reach a cumulative percentage of dissimilarity of the order of 59.62%.

Key Words: Source of water, phreatic water, physicochemistry, granulometry, Bizerte, Tunisia

1. INTRODUCTION

Les eaux souterraines comptent parmi nos plus grandes richesses puisqu'elles sont les principales sources d'approvisionnement en eau potable et elles sont largement exploitées dans les domaines agricoles et industriels. La nappe de Metline - Ras Jebel - Rafrat est une nappe côtière, alluvionnaire, très exploitée et menacée par l'utilisation de plus en plus accentuée d'engrais chimiques et de pesticides dans le domaine agricole, et par les rejets domestiques (détergents et autres ...) en absence de stations d'épuration fonctionnelles dans la région, sans oublier les rejets de la zone industrielle de Ras Jebel [1]. En effet, la ville de Ras Jebel est appelée "Capitale du jean " en raison du nombre d'industries de lavage de jeans qui y sont installés. Les niveaux de pollution résultant de trois industries majeures Lee Cooper, WIC et Denim Authority sont mis en doute dans cette étude. Trois sources d'eau, Cap Zbib, Sounine et Saadan appartenant à la nappe phréatique Metline - Ras Jebel - Rafrat ont été choisis d'une part pour leur appartenance à la même nappe et d'autre part, pour leurs proximité des sources de pollution les plus importantes.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dans le but de connaître les caractéristiques physico-chimiques des milieux prospectés et les impacts directs et indirects sur la qualité des eaux souterraines de la région, dix-neuf paramètres sont mesurés, les uns in situ et les autres dans différents laboratoires tel que l'INSTM (Tunis), CRDA (Bizerte) et FSB. Les caractéristiques sédimentologiques sont également déterminées. L'analyse statistique a été effectuée avec le logiciel PRIMER ver 6.0 pour Windows.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. - Paramètres physico-chimiques, éléments majeurs et éléments nutritifs

Dans le tableau I, nous avons rapporté les valeurs annuelles moyennes de 17 paramètres abiotiques des trois stations étudiées.

Table I - Valeurs moyennes annuelles des paramètres abiotiques pour les sources de Sounin, Cap Zbib et Saadane.

Parameters	Cap Zbib	Sounine	Saadane
Température de l'eau (°C)	19.16	19.13	18.75
Température, de l'air (°C)	23.167	19.133	18.75
Turbidité (NTU)	65.81	208.42	147.59
Salinité (‰)	1.39	5.10	0.9
TDS mg/l	1396.833	5006.666	888.5
Conductivité électrique (µs/cm)	507.28	1621.96	26.95
pH	6.95	6.66	6.84
Vitesse du courant (cm/l)	24.586	48.815	34.501
Mg ²⁺ (g/l)	0.554	0.673	0.439
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	319.816	935.391	947.650
Carbonates (CO ₃)	177.020	29.003	143.346
HCO ₃ ²⁻ (mg/l)	490.173	630.692	465.143
Cl ⁻ (mg/l)	1778	3258.5	1288.16
Ca ²⁺ (g/l)	46.308	78.808	39.633

PO ₄ ²⁻ (mg/l)	0.0062	0.0063	0.0062
NO ₂ ⁻	0.02	0.08	0.04
NO ₃ ⁻	1.99	2.65	2.14

La source de Sounine présente les teneurs les plus élevées de la majorité des paramètres étudiés par rapport aux autres sources. Elle est la plus acide, la plus minéralisée, légèrement la plus riche en calcium et en magnésium, la plus riche en bicarbonate, nitrate, nitrite, Aluminium, Chrome et en Plomb. Ces résultats sont probablement liés à la nature gréseuse de l'aquifère de cette source, à l'infiltration des rejets industriels énormes des sociétés de délavage de jeans Lee Cooper et WIC installées sur les oueds Gantra et Ali, à l'utilisation intense d'engrais et de biocides en agriculture maraichère et à l'intrusion marine importante issue de la surexploitation de la nappe de la région de Sounine par les forages multiples. Les sources de Cap Zbib et de Saadan présentent dans la plupart des cas des paramètres dont les valeurs sont moins importantes que celles de la source de Sounine grâce à leur éloignement de la pollution industrielle issue des usines de Lee Cooper et WIC et de la pollution agricole intense. Cependant, la source de Saadan est caractérisée par la température la plus élevée, elle est légèrement la plus riche en carbonate et en sulfate par rapport aux autres sources. La source de Cap Zbib est légèrement plus minéralisée, plus dure, plus riche en bicarbonate, en chrome que la source de Saadan qui est à son tour légèrement plus riche en nitrate, nitrite, aluminium, plomb et en cadmium que la source de Cap Zbib. Ceci est probablement dû à la nature différente de l'aquifère de ces deux sources.

En effet, malgré sa localisation dans un milieu très contaminé, les eaux de la source de Sounine ainsi que celles de Cap Zbib et de Saadan s'alignent aux Normes Tunisiennes Homologuées de potabilité et à la plupart des seuils de potabilité conçus par l'Organisation Mondiale de Santé.

3.2. Caractéristiques sédimentologiques

La figure 1 montre que les trois sources présentent des textures du sol différentes. Le substrat de la source de Sounine a la texture la plus grossière parmi les trois sources. En effet, l'analyse sédimentologique révèle une nature limono-sableuse. A Cap Zbib, on retrouve la texture la plus fine (argileuse). Alors que la Source de Saadan est de texture limono-argileuse.

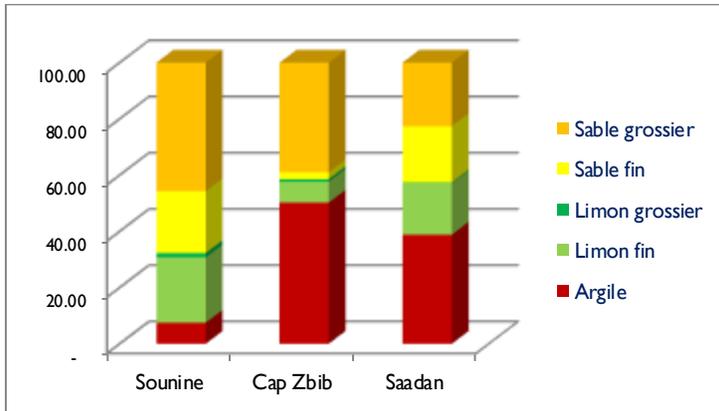
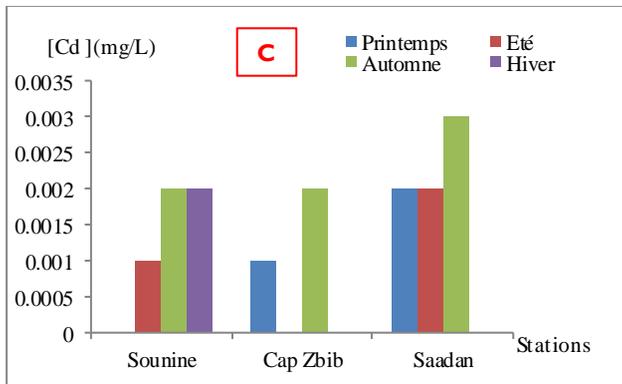
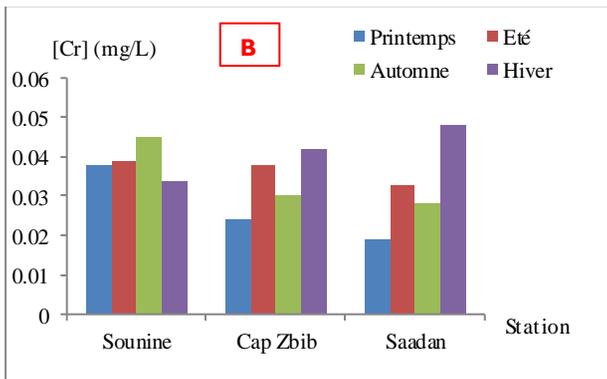
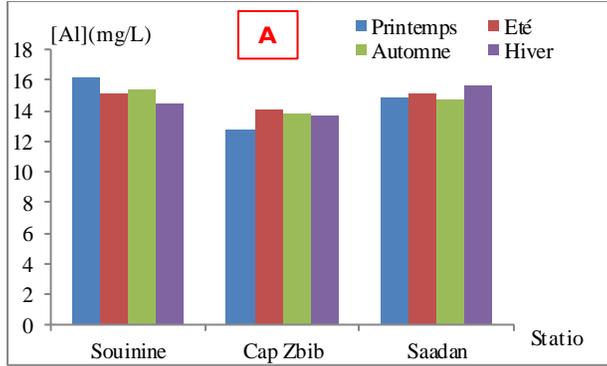


Fig. 1 - Pourcentages en sables totaux, argile et limon et texture des sédiments des trois sources prospectées

3.3. Métaux lourds

Quatre métaux lourds ont été mesurés dans les différentes stations étudiées. Les résultats sont illustrés par la figure 2 (A, B, C et D).

Les dosages effectués pour quatre métaux lourds à savoir l'aluminium, le Chrome, le Cadmium et le Plomb dans les eaux des trois sources prospectées permettent de constater que l'aluminium est le métal le plus abondant dans toutes les stations étudiées. Les niveaux enregistrés dépassent de loin la norme tunisienne approuvée (5 mg / L) et le seuil d'eau potable de l'OMS (0,2 mg / L).



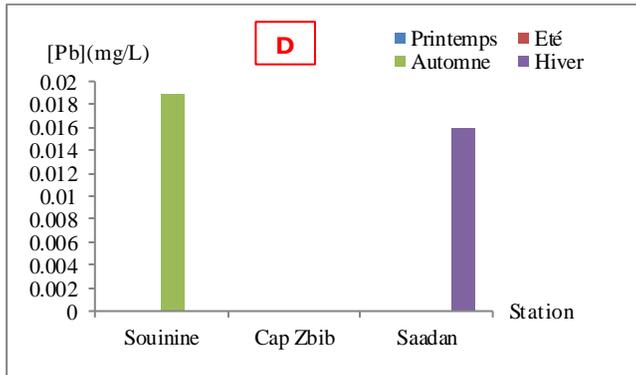


Fig. 2 - Variation spatio-temporelle des teneurs en Aluminium (A), Chrome (B), admium (Cd) et Plomb (Pb) dans les eaux des trois sources étudiées (Printemps 2012-Hiver 2013).

Le chrome (Cr) est un métal d'origine diverse, qu'il soit naturel (roche, plomb chromate (PbCrO₄)) [2], industriel (peintures, textiles, etc.) ou agricole (engrais) [3]. À Souinine, nous avons constaté des niveaux quasi stables mais élevés tout au long de la saison, sans doute en raison des rejets industriels intenses des sociétés Lee Cooper et WIC, mais également de l'utilisation excessive d'engrais et de biocides dans les cultures maraîchères. En effet, ces niveaux dépassent la norme tunisienne approuvée (0,01 mg / L) et sont très proches de la valeur limite de potabilité établie par l'OMS (0,05 mg / L). Les teneurs en cadmium sont faibles comparées aux deux métaux précédents. Les concentrations ne dépassent pas la norme tunisienne approuvée (0,05 mg / L) ni le seuil de potabilité établi par l'OMS (0,03 mg / L). Le Plomb est totalement absent à Cap Zbib. A Souinine et Saadan, nous l'avons détecté seulement en périodes pluvieuses (automne à Souinine et hiver à Saadan). Ses teneurs sont inférieures à la norme tunisienne homologuée (0,1 mg/L), mais dépassent le seuil de potabilité conçu par l'OMS (0,01 mg/L).

3.4. Analyse globale de l'affinité entre les stations: Ordination Cluster.

L'analyse des dendrogrammes de similitude entre les stations, établie par le logiciel Primer 6,2 en tenant compte des paramètres abiotiques, permet de répartir les stations en 2 biotopes avec un indice de similarité de 93% (Fig. 3).

- Un premier biotope, renfermant seulement la source de Souinine, caractérisée par une minéralisation importante due à des activités industrielles et agricoles intenses près de cette source.
- Un deuxième biotope, regroupant les deux sources de Cap Zbib et de Saadan avec un degré de similarité de 96,47%. Ce biotope est caractérisé par une minéralisation faible.

L'examen des contributions relatives des variables environnementales des sources de Souinine et de Cap Zbib a montré des pourcentages de contribution intéressants, et ceci pour CO₃²⁻ (16,75%), TDS (12,00%), CE (10,92%), Tur (10,75%) et SO₄²⁻ (10,07%) pour atteindre un pourcentage cumulatif de dissimilarité de l'ordre de 60,49 %.

Les sources de Souinine et de Saadan ont montré les contributions relatives les plus importantes par le TDS (17,64%), CE (16,32%), CO₃²⁻ (16,03), salinité (11,92%) et par le Cl⁻ (9,47%) pour atteindre un pourcentage cumulatif de dissimilarité de l'ordre de 71,38%.

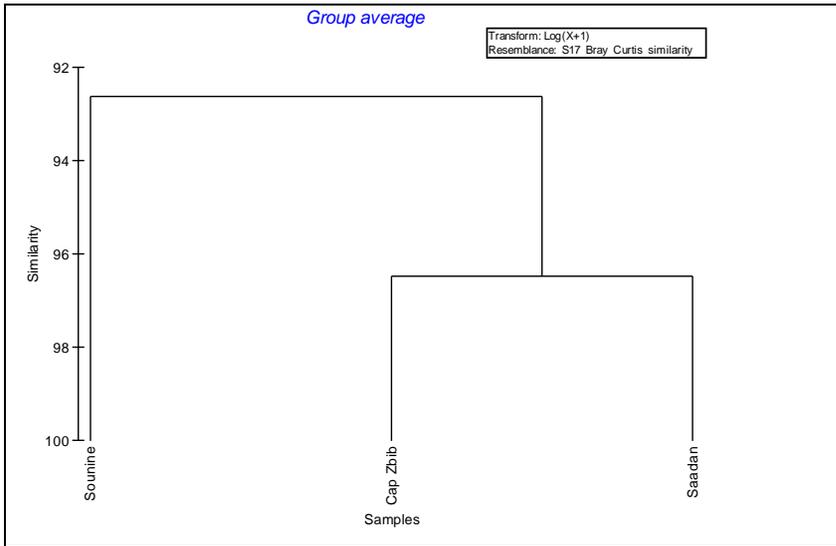


Fig. 3- Affinité physico-chimique globale entre les stations selon l'ordination Cluster sur la base de Bray-Curtis à une similarité de 93 %.

Pour Cap Zbib et Saadan constituant un même biotope, les paramètres qui contribuent à la dissimilarité sont essentiellement le sulfate qui contribue par 23,30 %, la Turbidité par 17,18%, TDS par 9,72% et la CE par 9,42%, ceci pour atteindre un pourcentage cumulatif de dissimilarité de l'ordre de 59,62%.

Par ailleurs, les différences remarquables entre la source de Sounine et les deux autres sources sont dues à la localisation de celle-ci dans un milieu fortement marqué par le balancement des marées et probablement par la possibilité de contamination de la source par des éléments qui n'ont pas été analysés.

CONCLUSION

La source de Sounine présente les teneurs les plus élevées de la majorité des paramètres étudiés par rapport aux autres sources. Elle est la plus acide, la plus minéralisée, légèrement la plus riche en calcium et en magnésium, la plus riche en bicarbonate, nitrate, nitrite, Aluminium, Chrome et en Plomb. Ces résultats sont probablement liés à la nature gréseuse de l'aquifère de cette source, à l'infiltration des rejets industriels énormes des sociétés de délavage de jeans Lee Cooper et WIC installées sur les oueds Gantra et Ali, à l'utilisation intense d'engrais et de biocides en agriculture maraichère et à l'intrusion marine importante issue de la surexploitation de la nappe de la région de Sounine par les forages multiples.

Les sources de Cap Zbib et de Saadan présentent dans la plupart des cas des paramètres dont les valeurs sont moins importantes que celles de la source de Sounine grâce à leur éloignement de la pollution industrielle issue des usines de Lee Cooper et WIC et de la pollution agricole intense.

Références

- [1] M.H. Hamza, A. Added, A. Francès, R. Rodriguez, M. Ajmi, et S. Abdel Jaoued. Evaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe côtière alluvionnaire de Meltine-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est tunisien) selon les méthodes paramétriques DRASTIC, SINTACS et SI, *Revue des Sciences de l'Eau*, 21 (1) (2008) 75-86.
- [2] D. Gaujous, La pollution des milieux aquatiques, 1995. ISBN: 2-7430-0021-X, 2^{ème} édition, Tec & Doc, 212p.
- [3] C.Biney, A.T. Amuzu, D. Calamari, N. Kaba, I.L. Mbome, H. Naeve, O. Ochumba, O. Osibanjo, V. Radeconde, et M.A.H.Saad, Etudes des métaux lourds. Revue de la pollution dans l'environnement aquatique africain. Archive de document de la FAO. Département des pêches (1992).

Evaluation de la qualité des eaux souterraines, Cas de la source Tahabort (Tamanrasset, Algérie)

BOUHOREIRA Abdelaziz¹, LABED Brahim², LAGHNAJ Abd Alfatah¹, SAGUENI Zineb¹

¹Laboratoire des sciences et de l'environnement, Département des Sciences de la Matière (C.U.Tamanghasset), 0662601543, abdealazizb@gmail.com

²Ecole normale supérieure -Ouargla, 0666925198, bahi6600@gmail.com

Résumé

Dans la wilaya de Tamanrasset (Sud algérien), les ressources en eau souterraines représentent une source importante d'approvisionnement en eau potable pour la population locale, passagère et pour la l'agriculture et l'élevage.

L'objectif de la présente étude est d'une part évaluer l'état actuel de la qualité d'eau de la source Tahabort, en se basant essentiellement sur l'étude des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux souterraines (fossile) et d'autre part définir les risques de la pollution des eaux.

Pour évaluer la qualité d'eau et le degré de la pollution bactériologique des eaux souterraines, nous avons faire une évaluation et caractérisation physico-chimique qui réalisée pendant les mois de Janvier à Avril 2017. pour cela ont été suivi et mesurés in situ à l'aide d'une sonde multi-paramètres, les paramètres physico-chimiques comme le pH, la température, la conductivité électrique et O₂ dissous, et d'autres paramètre comme la salinité, colorer, TA, TAC, DCO, DBO₅, NO₃⁻, PO₄³⁻, et le chlore analyser au niveau de laboratoire. Les résultats obtenus montrent que, du point de vue physique, les eaux de la source Tahabort ont un pH à tendance naturellement acide, La présence de quelques germes pathogènes comme ; E.Coli, Streptocoque et Coliforme qui sont des indicateurs de pollution et de contamination bactériologiques par les eaux usées, pourrait être due aux activités anthropiques et à la mauvaise gestion pour la conservation de qualité des eaux naturelle dans la zone.

Mots clés : Eaux souterraines, Qualité des eaux, Pollution, Tahabort

Evaluation of the quality of groundwater, Tahabort source case (Tamanrasset, Algeria)

Abstract

In the wilaya of Tamanrasset (southern Algeria), underground water resources represent an important source of drinking water supply for the local population, transient and for agriculture and livestock.

The objective of the present study is on the one hand to evaluate the current state of water quality of the Tahabort spring, based essentially on the study of the physicochemical and bacteriological parameters of the groundwater (fossil) and on the other hand define the risks of water pollution. To evaluate the water quality and degree of bacteriological pollution of groundwater, we have made a physicochemical evaluation and characterization carried out during the months of January to April 2017. for this were monitored and measured in situ using a multi-parameter probe, physicochemical parameters such as pH, temperature, electrical conductivity and dissolved O₂, and other parameters such as salinity, color, AT, ATC, CDO, BDO₅, NO₃⁻, PO₄³⁻, and chlorine analyze at the laboratory level. The results obtained show that, from the physical point of view, the waters of the Tahabort spring have a pH with a naturally acidic tendency, the presence of some pathogenic germs such as; E.Coli, Streptococcus and Coliform which are indicators of pollution and bacteriological contamination by wastewater, could be due to anthropogenic activities and mismanagement for natural water quality conservation in the area

Key Words: Groundwater, Water quality, Pollution

INTRODUCTION

Partout dans le monde, la pression sur les ressources en eau et en particulier sur les ressources en eau souterraines est à la hausse, principalement en raison de la demande croissante et de la dégradation de la qualité de l'eau. L'accès généralisé à l'eau potable, l'irrigation, l'expansion urbaine, le développement industriel et le tourisme sont autant de facteurs qui font augmenter ces pressions.

La composition chimique d'une eau issue du milieu naturel est très variable. Elle dépend de la nature géologique du sol d'où elle provient et aussi des substances réactives qu'elle aurait pu rencontrer lors de l'écoulement. Ainsi, la composition quantitative et qualitative de l'eau souterraine en matières en suspension et dissoutes, de nature minérale ou organique, détermine sa qualité [01]. Cependant, cette qualité peut être altérée lorsque des substances extérieures entrent en contact avec la nappe aquifère. Tel est le cas des substances indésirables et toxiques qui rendent l'eau souterraine impropre pour la consommation domestique [02].

La détérioration de la qualité des ressources en eau par prolifération des différentes sources de pollution (engrais et pesticides, rejets d'eaux usées non traitées, rejets de déchets solides non contrôlés, exploitation minière, urbanisation, et c..)

MATÉRIELS ET MÉTHODES

La présente étude concerne l'évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines (fossile) des aquifères jurassiques de la source Tahabort (à Tamanrasset (Sud algérien). Pour ce faire, une campagne d'échantillonnage a été entreprise pendant les mois de janvier à Avril 2017. Les paramètres physico-chimiques, mesurés In Situ et au laboratoire, ont servi pour la caractérisation de ces eaux.

La source Tahabort ou source Chapuis (alt.1600 m) situé sur l'axe de la piste Tamanrasset - Assekrem, d'une distance de 11 km de la ville de Tamanrasset, c'est une source acide et gazeuse

Les prélèvements d'eau ont été effectués directement à la source. En premier lieu les échantillons ont été mis dans des flacons en verre de 1500 ml préalablement stérilisés et ont été destinée à l'analyse bactériologique. Les flacons est rincées par l'eau de source puis remplis jusqu'au bout. Le bouchon est placé de telle façon qu'il n'y ait aucune bulle d'air et qu'il ne soit pas éjecté au cours du transport.[03].

Vingt-quatre paramètres ont été mesurés. Cinq de ces paramètres ont été mesuré in-situ : la température, la conductivité, le pH, potentiel redox et l'oxygène dissous à l'aide d'une multi-paramètre modèle SX736 pH/Mv/Cond/DO, et par la méthode de titrage Les autres paramètres physico-chimiques (dureté totale, nitrates, chlorures, DBO5 et DCO) ont été analysés au laboratoire [04]. Les méthodes utilisées au sien du laboratoire sont : la méthode colorimétrique pour la DCO, la DBO5, les chlorures, la dureté totale, On signale que l'analyse spectrophotométrique a été réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre DR3900. L'étude des paramètres bactériologiques a porté sur la recherche et le dénombrement des germes indicateurs de la pollution (germes totaux, coliformes totaux, streptocoques fécaux et coliformes fécaux). Les prélèvements ont été effectués dans des flacons stériles en prenant soin de ne pas contaminer ni modifier les échantillons et sont transportés immédiatement dans une glacière à + 4°C au laboratoire. L'analyse et le dénombrement des paramètres bactériologiques ont été effectués suivant le protocole d'analyse décrit par [04]

RÉSULTATS ET DISCUSSION

I. La température de l'eau

C'est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet celle ci joue un rôle dans la solubilité des gaz, dans la dissociation des sels dissous et dans la détermination du pH, Et d'une façon générale, la température des eaux est influencée par l'origine dont elles proviennent (superficielles ou profondes). [05]. Dans la zone d'étude, nous avons remarqué que la température indique une valeur moyenne entre les 19°C et 23°C ce qui montre que la qualité de l'eau de la source Tahabort est excellente selon la température [06].

2. Le Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H⁺ de l'eau. Ce paramètre est dépend de facteurs multiples, dont la température et l'origine de l'eau. [06-07]. Les valeurs du potentiel Hydrogène se situent entre 5.38 et 6.1 dans l'eau de la source, pour ce qu'est des eaux de la source Tahabort elles ne montrent pas de variations notables et ont tendance d'être acideque, réellement l'eau de la source est riche par gaz dioxyde carbone.

3. La conductivité électrique

La conductivité représente l'un des moyens de valider les analyses physicochimiques de l'eau, La conductivité est également fonction de la température de l'eau, elle est plus importante lorsque la température augmente. Elle sert aussi d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau [08-05]. Les valeurs enregistrées pendant les analyses sont importantes et on peut classer la qualité d'eau comme eau peu minéralisée.

a. L'oxygène dissous

L'oxygène dissous mesure la concentration du dioxygène dissous dans l'eau [05]. il participe à la majorité des processus chimiques et biologiques en milieu aquatique. La teneur moyenne dans les eaux de Tahabort est de l'ordre de 0.88mg/l et les eaux de la source se montrent alors faible oxygénées.

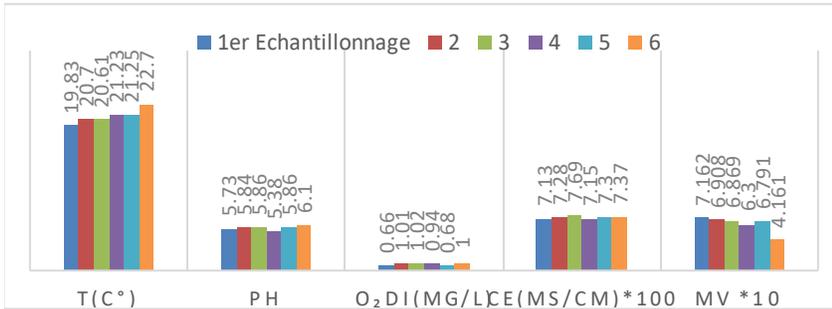


Fig.01 : la Variations de température, pH, O₂, CE, mV dans l'eau de Tahabort

Table I – Les analyses physicochimiques obtenus des années 2006, 2014, 2017

Paramètres	année		
	2006	2014	2017
T(°C)	27.5	24.2	27.52
pH	5.7	5.15	5.8
CE(µs/cm)	688	693	711
Salinité (g/l)	3.5	0.1	0.17

Sur la base des résultats obtenus, Salinité (<0.1), MES(-0.1), DBO5(25), CITtotal(0.1), nitrites(<0.6), Couleur (claire) et la dureté totale (29) enregistrent des valeurs inférieures aux normes recommandées. Nous constatons que la présence des Coliformes, Streptocoques et E.Coli dans les échantillons avec une concentration faible ; ceci indique une contamination d'origine animale de cette pollution.

D'après le tableau I on observe que la qualité d'eau toujours acide et il y a un changement notable de la salinité d'année 2006 à l'année 2014, Et aussi pour la conductivité. Ces variations peuvent être liées au changement climatique (Le taux précipitations) et changement de température.

CONCLUSION

Les résultats de cette étude sont exposés en discutant les valeurs moyennes relatives aux paramètres mesurés pendant la période d'étude, notamment les mesures effectuées in situ et celles effectuées au laboratoire. Les résultats de l'analyse physico-chimique des teneurs moyennes des principaux paramètres et indicateur de pollution présentés dans ce travail ont montré que le pH, la Température, la Salinité et l'oxygène dissous. Ainsi, les valeurs moyennes de la Température (21 °C), du pH (5.7) et l'oxygène dissous (0.8 mg/l) sont compatibles avec la norme Algérienne de potabilité. La conductivité électrique moyenne (au voisinage de 700 µS/Cm) ce qui permet d'évaluer la minéralisation globale et d'estimer la totalité des sels solubles dans l'eau.

Références

- [1] P.Jain, J.D.Sharma, D.Sohu, P.Sharma, Chemical analysis of drinking water of villages of Sanganer Tehsil, Jaipur District, Revue Int. Environ. Sci. Tech., 2(4), (2005) 373-379
- [2] SK .Traoré, K .Mamadou, A.Dembélé, P .Lafrance, P .Mazellier, P .Houenou. Contamination de l'eau souterraine par les pesticides en régions agricoles en Côte d'Ivoire (centre, Sud et Sud-Ouest). Journal Africain des Sciences de l'Environnement, 1, (2006) 1-9.
- [3] O. KHELIEL, L. YOUCEF, S. ACHOUR , QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES DE LA NAPPE DU MIOPLIOCÈNE DE LA RÉGION DE BISKRA ET RISQUE DE LA POLLUTION PAR LES NITRATES, Courrier du Savoir, 25, (2018), 135-142
- [4] J.Rodier, B.Legube, N.Merlet, L'analyse de l'eau, 9ème édition. Ed. Dunod Paris. 2009,pp 1475.
- [5] J. RODIER, L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Edition Dunod Paris, (1984).
- [6] D.GHAZALI, A.ZAID, ETUDE DE LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE ET BACTERIOLOGIQUE DES EAUX DE LA SOURCE AIN SALAMA-JERRI (REGION DE MEKNES –MAROC), Larhyss Journal, 12, (2013), pp. 25-36
- [7] D.CHAPMAN, V.KIMSTACH. Selection of water quality variables. Water quality assessments : a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2nd ed. E & FN Spon,London, (1996) pp. 59-126
- [8] M.B.PESCOD, Design, operation and maintenance of wastewater stabilization ponds in treatment and use of sewage effluent for irrigation. Ed Pescodand Arar, (1985). 93-114

Cartographie et étude de l'évolution de la qualité physicochimique des eaux de sources. Cas de la région de Taher (wilaya de Jijel, Nord-Est algérien)

CHINE Amal ¹, DEBIECHE Taha-Hocine ¹, MAYACHE Boualem ²

¹ Equipe de recherche Eau et Environnement, Laboratoire de Génie Géologique, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université Mohamed Seddik Benyahia - Jijel.

E-mails : chine.amal@yahoo.com, debieche@yahoo.fr

² Laboratoire de Biotechnologie, Environnement et Santé. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université Mohamed Seddik Benyahia - Jijel.

E-mail : mayacheboualem@yahoo.fr

Résumé

La région de Taher (Jijel, Nord-Est algérien) est caractérisée par la présence de plusieurs sources qui s'émergent naturellement à la surface. Elles sont très utilisées par la population pour s'alimenter en eau potable. Cependant, elles sont exposées aux diverses formes de pollutions, notamment agricole et urbaine, qui peuvent modifier leur qualité physico-chimique et provoquent un risque nocif sur la santé humaine. La présente étude a pour objectif d'évaluer et cartographier la qualité physico-chimique des eaux de source de la région d'étude en utilisant le système d'évaluation de la qualité de l'eau (SEQEaux souterraines). Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé une campagne de prélèvement et de jaugeage durant le mois de juillet 2017. Les résultats obtenus montrent que toutes les sources échantillonnées conviennent comme eau potable selon les normes algériennes. Néanmoins, la concentration des nitrates était parfois plus élevée que les limites admissibles, indiquant la présence d'une pollution. Elle est probablement d'origine inorganique (engrais) et/ou organique (déchets animaux, eaux usées...).

Mots clés :Source d'eau, SEQ-Eaux souterraines, Nitrates, Pollution, Jijel, Algérie.

Mapping and study of the evolution of physicochemical quality of spring waters. Case of the Taher region (Jijel Province, North-East Algerian)

Abstract

The region of Taher (Jijel, North-East Algerian) is characterized by the presence of several spring water, naturally emerging on the surface. They are widely used by the population for drinking water. However, they are exposed to various forms of pollution, particularly agricultural and urban, that can modify their physicochemical quality and cause a harmful risk to human health. The objective of this study is to evaluate and map the physicochemical quality of spring water in the study area using the water quality assessment system (SEQ-Groundwater). To achieve this objective, a sampling and gauging campaign was carried out during the month of July 2017. The obtained results shown that all sampled spring are suitable as drinking water according to Algerian standards. Nevertheless, the concentration of nitrate was sometimes higher than the allowable limits, which indicates pollution. Its origin is probably inorganic (fertilizers) and/or organic (animal waste, wastewater...).

Key Words : Spring water, SEQ-Groundwater, Nitrates, Pollution, Jijel, Algeria.

INTRODUCTION

Les sources d'eau représentent l'exutoire naturel d'un aquifère. Leur composition chimique est liée aux formations géologiques traversées et aux processus naturels (dissolution et précipitation des minéraux, vitesse des eaux souterraines, qualité des eaux de recharge et interaction avec d'autres types d'aquifères) et anthropiques (agricoles, industriels et urbains). Cependant, la pollution des eaux de source et la diversité des contaminants constituent aujourd'hui l'un des problèmes environnementaux majeurs dans la commune de Taher (Jijel, Nord-Est Algérien), vu que ces sources d'eau sont très utilisées par la population rurale et urbaine, pour s'alimenter en eau potable, et sans traitement préalable. Ce qui présente une menace sérieuse sur la santé humaine, d'où l'intérêt de cette étude, qui a pour objectif de faire un suivi régulier de la qualité des eaux, de la cartographie et de trouver des moyens pour protéger cette ressource en eau. Pour déterminer la qualité physicochimique des eaux de source, nous avons optés l'indice de la qualité de l'eau, issu de l'application du système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines (SEQ).

PRÉSENTATION DU SITE

La commune de Taher se situe à 18 km au Nord Est du chef-lieu de la wilaya de Jijel et s'étale sur une superficie de 6488 km² (fig. 1). Sa population est de 84 649 habitants (recensement de 2013) et son climat est de type méditerranéen.

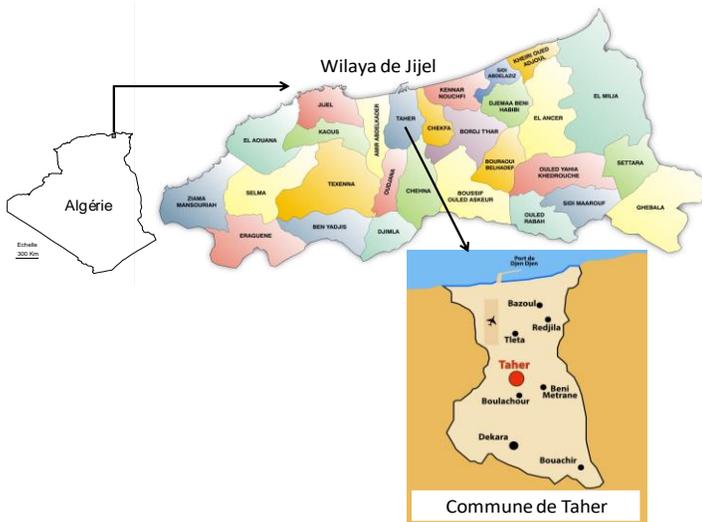


Fig. 1 – Situation administrative de la commune de Taher.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Une campagne de prélèvement a été réalisée sur 13 sources représentatives de la commune de Taher (fig. 2) durant le mois de Juillet 2017, on a suivi l'évolution spatial des éléments étudiés et le jaugeage. Les paramètres physicochimiques (pH et conductivité électrique (CE)) ont été mesurés in situ, à l'aide de multiparamètre de terrain du type WTW 350i. L'analyse des éléments chimiques a été faite au laboratoire de Génie Géologique (LGG) par deux méthodes : l'une titrimétrie (Ca²⁺ et Cl) et l'autre spectrométrie UV-Vis (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻ et SO₄²⁻) grâce au spectrophotomètre UV-1600PC de marque VWR [1]. Le jaugeage des sources a été réalisé à l'aide d'un récipient jaugé de 14 L [2]. L'opération est refaite 3 fois et le débit moyen est calculé par la formule suivante :

$$\bar{Q} = \frac{\frac{V_1}{t_1} + \frac{V_2}{t_2} + \frac{V_3}{t_3}}{3}$$

\bar{Q} est le débit moyen ; V est le volume ; t est le temps.

L'évolution de la qualité chimique des eaux de source a été étudiée en fonction du système d'évaluation de la qualité des eaux (SEQ -Eaux souterraines) qui repose sur la notion d'altération. Une altération est un regroupement de paramètres de même nature ou ayant le même effet perturbateur permettant de décrire les grands types de dégradation de la qualité de

l'eau. Pour rendre plus explicite cette appréciation de la qualité de l'eau, il a été conçu un indice de qualité qui varie entre 100 (eau de la meilleure qualité) à la valeur 0 (la mauvaise qualité) [3] et [4] (tableau 1).

Tableau 1 - Qualité des eaux selon l'indice de qualité par l'altération [4].

Indice de qualité	100 - 80	80 - 60	60 - 40	40 - 20	20 - 0
Couleur					
Qualité de l'eau de la classe	Eau de très bonne qualité	Eau de bonne qualité	Eau de qualité moyenne	Eau de qualité médiocre	Eau de mauvaise qualité

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le tableau (2), l'élaboration des cartes de qualité (Fig. 2) et la projection des résultats d'analyse des éléments physicochimiques sur le diagramme de l'indice de qualité des eaux souterraines (fig. 3) et la classification des sources selon l'indice (fig. 4) montrent que l'indice de la qualité pour l'altération :

- de valeur maximale du débit (0.66 L/s) est observée au niveau de la source Laouina. Cela peut être expliqué par l'effet des précipitations qui alimentent la nappe et donnent un apport d'eau supplémentaire aux sources et par les modalités de vidange de l'aquifère par les sources.
 - de conductivité électrique, présente une très bonne et bonne qualité successivement (15.39% - 89.56), (84.61 - 73.67). Elle est d'une minéralisation faible à moyenne et ne dépasse pas la norme algérienne de potabilité (2800 µs/cm). Elle est due au lessivage et la dissolution des formations géologiques [5].
 - du pH, présente très bonne qualité (53.85% - 91.38), bonne qualité (30.76% - 66.65) et qualité moyenne (15.38% - 54.2). Cette dernière est observée au niveau de deux sources Taghemert et Elballoute et peut être expliquée par la dégradation de la matière organique et l'infiltration des rejets des eaux usées brutes, d'origine urbaine, au système réservoir de la source.
 - du calcium, est de très bonne qualité (100% - 89.15). Il est dû à la dissolution des terrains traversés (calcite et dolomite).
 - du sulfates est généralement de très bonne qualité à bonne qualité (82.32% - 73.53) et (69.23% - 70.60). Son origine est liée à la dissolution des formations géologiques sulfatées (gypse). La source Bentahar est de qualité moyenne avec l'indice de 56.70.
 - du chlorure présente quatre classes de bonne à très mauvaise qualité (7.69% - 64.22), (30.77% - 49), (23.07% - 33.47), (30.77% - 9.37) qui peuvent être liées à la présence de l'halite et les rejets urbains comme l'eau de javel (NaClO) [6].
 - du nitrate, subit une variation significative, de qualité mauvaise (indice de 37.53) enregistrée au niveau de la source Belkehal et très mauvaise (indice de 13.05) observé dans la source Tourkna. Leurs teneurs sont supérieures à la norme algérienne (50 mg/L). Son origine est liée aux activités anthropiques : Les déchets organiques rejetés par les égouts et les fertilisants azotés [7].
- Les teneurs de l'ammonium (0 - 0.001 mg/l) < 0.5 mg/l, nitrite (0 - 0.006 mg/l) < 0.1 mg/l [8] sont inférieures aux normes algériennes de potabilité signifiant le milieu oxydant. Une seule contamination en phosphate a été observée au niveau de la source Adjari, elle peut être liée aux fuites des eaux usées (détergents).

Tableau 2 – Résultat d'analyse des éléments physicochimiques des eaux de source (juillet 2017).

Elément physicochimique	Unité	Valeur minimale	Valeur Maximale	Moyenne	Norme algérienne
CE	μs/cm	255	1238	707,692	2800
pH		6	7,110	6,521	6,5 -8,5
Débit	L/s	0,05	0,66	0,16	
Ca ²⁺	mg/l	17,64	56,11	30,58	200
SO ₄ ²⁻		11,05	112,23	54,40	400
Cl ⁻		71	301,75	170,13	500
NO ₃ ⁻		6,47	114,18	48,27	50
NO ₂ ⁻		0	0,006	0,000	0,1
NH ₄ ⁺		0	0,001	0,000	0,5
PO ₄ ³⁻		0	0,035	0,015	

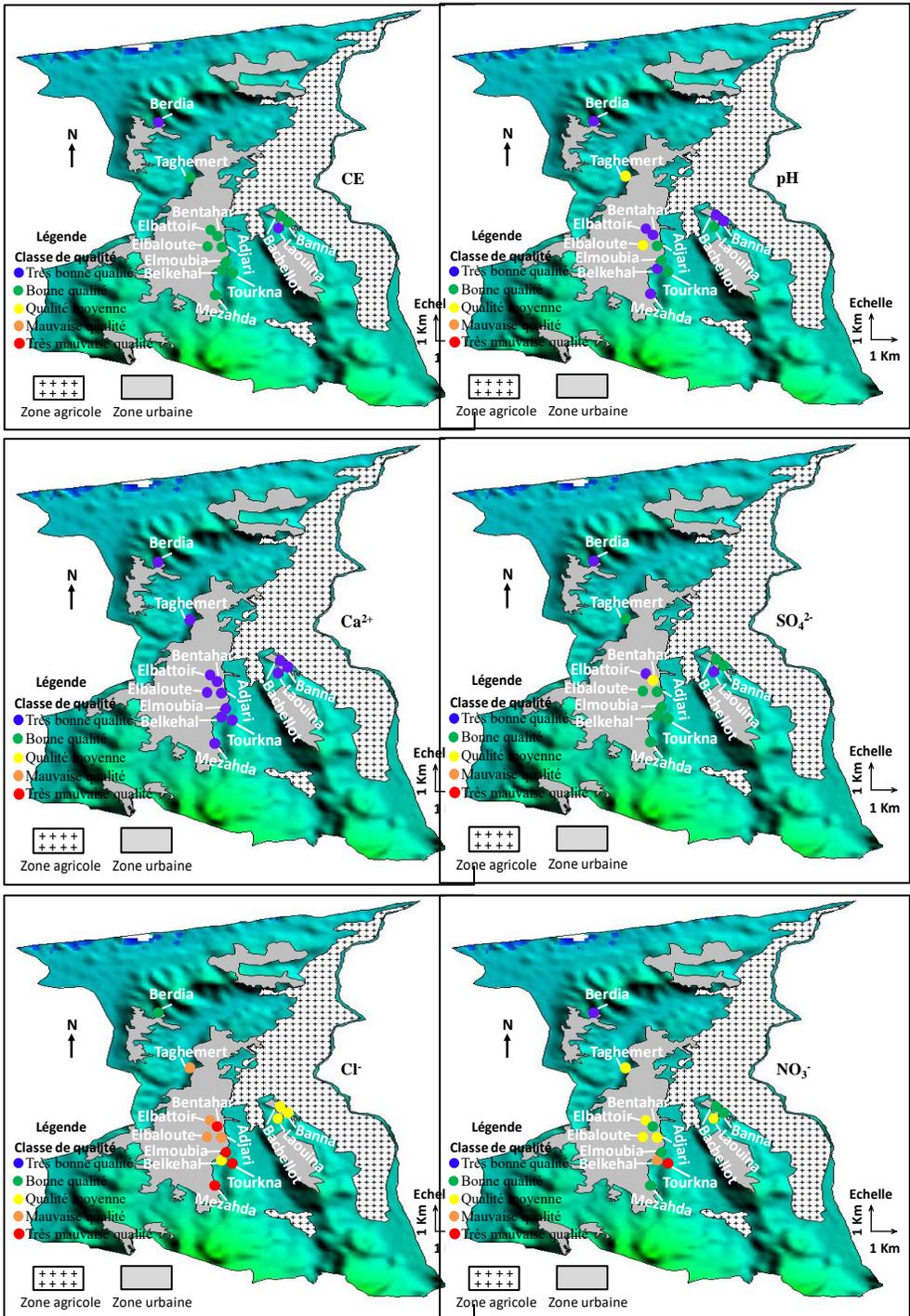


Fig.2 – Cartes de qualité pour l'altération des éléments physicochimiques (pH, CE, Cl, calcium, sulfate, nitrate) Page 180 sur 420

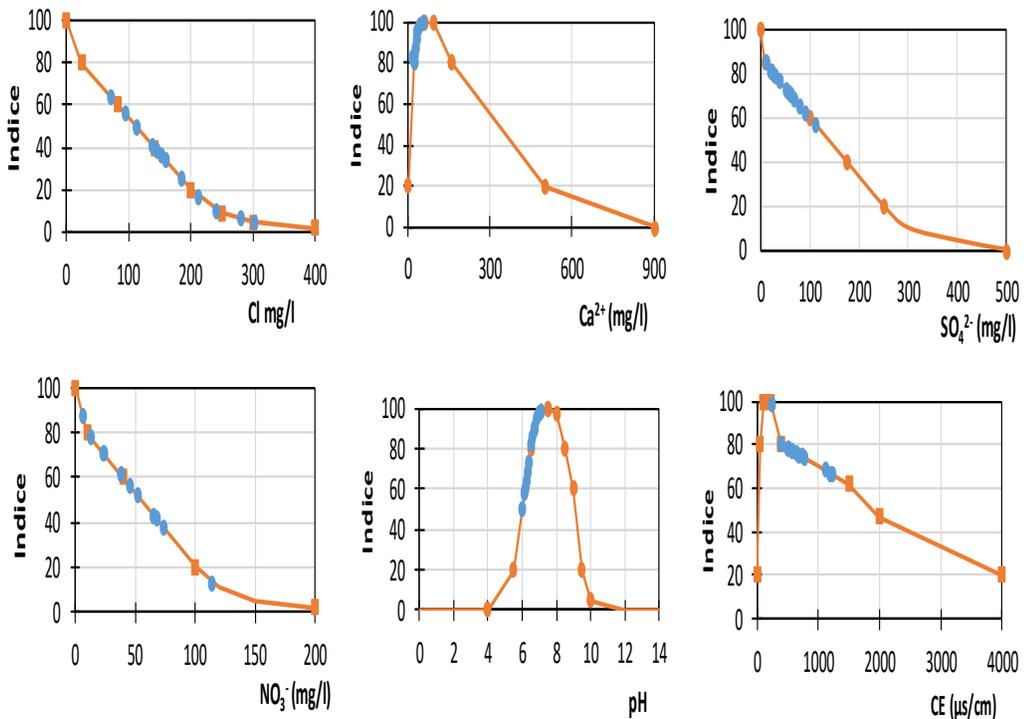


Fig.3- Diagramme de l'indice de qualité des eaux de source par l'altération des éléments majeurs, nitrate, conductivité électrique et pH.

Ca ²⁺	pH	SO ₄ ²⁻	CE	NO ₃ ⁻	Cl ⁻
Bachelot	Bachelot	Berdia	Berdia	Berdia	Berdia
Adjari	Berdia	Laouina	Laouina	Bachelot	Bachelot
Berdia	Mezahda	Elbattoir	Bachelot	Mezahda	Belkehal
Mezahda	Bentahar	Bachelot	Adjari	Bentahar	Laouina
Bentahar	Belkehal	Adjari	Mezahda	Banna	Banna
Elbaloute	Banna	Mezahda	Bentahar	Elmoubia	Adjari
Tourkna	Elbattoir	Elbaloute	Elbaloute	Adjari	Elbaloute
Belkehal	Adjari	Tourkna	Tourkna	Elbaloute	Taghemert
Taghemert	Tourkna	Belkehal	Belkehal	Taghemert	Elbattoir
Laouina	Laouina	Taghemert	Taghemert	Laouina	Mezahda
Banna	Elmoubia	Banna	Banna	Elbattoir	Bentahar
Elmoubia	Elbaloute	Elmoubia	Elmoubia	Belkehal	Tourkna
Elbattoir	Taghemert	Bentahar	Elbattoir	Tourkna	Elmoubia

Fig.4- Classification des sources de la région de Taher selon l'indice de qualité des eaux par l'altération des éléments majeurs, nitrate, conductivité électrique et pH.

CONCLUSION

Le système d'évaluation de la qualité constitue un modèle sous forme d'outil d'aide à la décision qui a pour ambition de faciliter l'exploitation et le traitement des données pour permettre une gestion de la qualité des eaux [9].

L'évaluation de la qualité des eaux de source de la région de Taher (Nord-Est, Algérie) en tenant compte de six altérations physicochimiques sont généralement de très bonne qualité et bonne qualité, pendant que la source Berdia semble propre de toutes éventuelles de pollution anthropique. Cependant un degré de pollution par le nitrate et le chlorure a été constaté dans certaines sources de la région d'étude. Le nitrate peut présenter un risque sur la santé humaine. Il conduit à une maladie de méthémoglobinémie du nouveau-né (syndrome du bébé bleu). La variation spatiale des paramètres physicochimiques (pH, conductivité électrique, Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} et SO_4^{2-}) est significative qui calculée par le test du Student ($p \leq 0.05$). Enfin, la surveillance périodique et la chloration régulières des eaux de sources pourraient significativement réduire le degré de contamination.

Références

- [1] Rodier, B. Legube, N Merlet, L'analyse de l'eau, 9^eeds Dunod Pris, 2009, pp 3-151 I.
- [2] J. R. DAUM, Méthodologie du jaugeage des sources, Rapport BRGM R38193 (1994) 2-68.
- [3] BRGM, Elaboration d'un système d'évaluation de la qualité de l'eau, Document 1 : caractérisation des fonctions de de leurs états, Rapport BRGM R39166 (1997) p 44.
- [4] Agences de l'eau, MEDD, Système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines : SEQ - Eaux Souterraines, Rapport de présentation Version 0.1 (2003) 3-50.
- [5] N. Nouayti, D. Khattach, M. Hilali, Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc), Journal Mater. Environ. Sci. 6, 4 (2015) 1068-1081.
- [6] A. Chine, T. H. Debieche, B. mayache, Qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de sources. Cas de la région de Taher (Jijel, Nord-Est Algérien), 4^{ème} Séminaire National sur l'Eau et l'Environnement, Chlef, 13-14 décembre (2016).
- [7] A. Chine, T. H. Debieche, B. mayache, Utilité du SEQ-Eau dans la détermination de la qualité physicochimique des eaux de sources. Cas de la wilaya de Jijel (Nord-Est Algérien), 1^{er} Séminaire National Géologie, Géotechnique et Géorressources, Jijel, Novembre 08-09 (2017) 41-45.
- [8] L. Djaaboub, Arrêté interministériel fixant les proportions d'éléments contenus dans les eaux minérales naturelles et les eaux de sources ainsi que de leur traitement ou les adjonctions autorisées, Journal officiel de la république algérienne 27 (2006) p 11.
- [9] B. D. Mohamed, O. Mouhaddach, A. Esshlaoui, A. Layachi, M, P. Kestemont, S. El Jaafari, Conception d'un SIG pour l'évaluation de l'impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux superficielles de la ville de Meknès (Maroc), Cahiers de l'ASEES 16 (2011) 17-25.

Modélisation du transport du cadmium et du plomb au niveau des sédiments confinés du lac sud de Tunis à l'aide du code HydroGéoSphère

Tesnim Ben Dekhil¹, Farouk Ben Abelghani²

¹Etudiante en master de recherche en géologie appliquée à l'environnement, Faculté des Sciences de Tunis, 20 Rue de Tolède, Tunis 2092, tel: 71 872 600, fax: 71 871 666, mail: fst.mu.tn

²Maitre assistant, Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologies de Sousse, Cité Taffala (Ibn Khaldoun) 4003 Sousse Tunisie, Tel: 73 382 656 fax: 73 382 658, mail: issatso@issatso.mu.tn.

Résumé

Les problèmes de contamination des matériaux extraits, rencontrés par tous les pays industrialisés, ont suscité la mise au point des procédures et des méthodes d'évaluation, permettant ensuite la prise des décisions de gestion. D'une manière générale, la gestion des ces problèmes de contamination des sédiments et de matériaux de dragage s'inscrit dans le contexte de gestion des risques. Cependant dans le contexte du dépollution des sols et précisément les sédiments lacustre, nous avons choisi de travailler sur le projet d'aménagement et d'assainissement du lac sud de Tunis et plus particulièrement le cas de la zone 5a. Ce travail consiste à modéliser la migration des polluants (Cd et Pb) dans les sédiments du remblai confinés dans la zone d'étude en utilisant le code numérique HydroGeosphere. Des données relatives aux années 2010 à 2015 ont été utilisées afin de quantifier les flux de polluants en fonction du temps et de la profondeur.

Des simulations pour des temps assez importants allant jusqu'à 50 ans, nous ont permis d'étudier l'ampleur de migration des polluants le long de la colonne des sédiments et leur mode de transport à travers les différentes couches de la colonne simulée.

Mots clés : sédiments lacustre, transport, simulation numérique, HydroGeoSphere, diffusion

Modeling of the transport of the cadmium and lead in the confined sediments of the South Lake of Tunis with the use of HydroGéoSphère code

Abstract

The problems of contamination of extracted sediments materials, faced by all industrialized countries, have sparked the development of procedures and methods of assessment, then to take management decisions. In general, the management of these problems of contaminated sediment and dredged material are in the context of risk management. However in the context of soil remediation and accurately lacustrine sediments, we chose to work on the development project and sanitation South Lake especially the 5a area. This work consists in modeling contaminant transport (Cd and Pb) in the sediments of the embankment confined in the study area by using the digital code HydroGeoSphere. Rainfall and contaminants concentrations were used to quantify the flow of pollutants function of time and depth. Simulations for rather important times of up to 50 years, have allowed us to study the extent of migration of pollutants along the column and sediment transport mode through the different layers of the simulated column.

Key Words: Lake sediments, transport, numerical simulation, HydroGeoSphere, diffusion.

INTRODUCTION

Le transport de polluants est un phénomène qui est fortement lié à l'écoulement du fluide qui le véhicule (eau pour une pollution miscible et phase non aqueuse). Le devenir d'un polluant dépend donc des lois et des paramètres descriptifs de l'écoulement de la phase liquide. Ces lois, variables et paramètres, en particulier la loi de Darcy et la loi de perméabilité, revêtent des formes différentes selon le nombre de phases et selon que l'on étudie la pollution dans la zone saturée ou non saturée.

Parmi les substances chimiques rejetées dans l'environnement, nombre d'entre elles s'accumulent dans les vases ou au niveau des boues constituants les sédiments, au fond des rivières et lacs ainsi que dans les estuaires et les fonds marins, il s'agit donc d'empêcher la diffusion d'un polluant dans l'environnement et l'aggravation de la situation par d'éventuelles interactions avec d'autres polluants ou de nouveaux polluants, protéger la santé publique et la qualité de vie, reconstruire

la ville sur elle-même pour limiter la périurbanisation, restaurer et protéger l'environnement, restaurer les terres et les rendre naturelle, améliorer le cadre de vie et adapter un état de site à un nouvel usage

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Lors des travaux d'assainissement du lac sud de Tunis, les sédiments dits « contaminés » dragués à partir du lac ont été stockés dans une zone, dénommée « aire de confinement 5a » située sur les berges au sud-ouest du lac. Cette aire est séparée du lac par un cavalier imperméabilisé, grâce à l'intégration, sur toute sa longueur, d'une géo membrane verticale placée dans le cavalier sableux et arrivant jusqu'à la couche imperméable située en dessous.

Dans la suite de nos essais numériques, on a étudié le cas 3D en utilisant le code HydroGeoSphere et ceci pour se rapprocher du cas plus réaliste. Pour cette fin on s'est basé sur une coupe à partir des travaux réalisés par (Kais, 2008). Le model conceptuel obtenu est montré sur la Figure 2. Dans notre cas nous avons pris une profondeur totale de 14 m, composée des 3 m de remblais contaminés (couche polluées mise en place, couche polluées dragués du lac et la dernière en surface est celle de recouvrement considérée comme peu ou non polluées) et de 1 m supplémentaire pour tenir compte de la géomembrane et 10 m supplémentaires constituées d'argile initialement en place. Pour ce modèle 3D, les paramètres suivants sont nécessaires à imposer au code HydroGeosphere:

Les unités d'espace (m) et de temps (jour);

La géométrie du système : profondeur, texture et paramètres du sol ;

Les données météorologiques: flux de précipitations imposé en surface uniforme ou variable selon le temps ;

Couche d'argile est de 10 m d'épaisseur;

Niveau piézométrique initial imposé à 13 m

Les caractéristiques hydrauliques des différentes formations sont ceux de la même étude réalisée par (Kais,2008), soient une conductivité hydraulique est de 1.2×10^{-4} m/s pour les quatre premiers mètres, et de $7 \cdot 10^{-7}$ m/s pour les 10 derniers mètres de sédiments. Une perméabilité de 10^{-10} m/s a été affectée à la géomembrane.

En faisant référence à l'étude de base réalisée dans le cadre des travaux de restauration (étude présentée à l'ANPE), la couche de recouvrement devrait être constituée par des matériaux propres de 0,35 m d'épaisseur. Il y a lieu donc de renforcer cette couche de recouvrement pour s'assurer à ce que tous les matériaux soient bien confinés et que ce risque soit nul. D'après l'ANPE, pour remédier à ce phénomène, il est recommandé de couvrir cette couche argilo-silteuse par des matériaux sableux qui ne présentent pas le risque de fixer la pollution, dans notre cas d'étude nous proposons de simuler cette couche pout une profondeur de 1 m pour évaluer l'efficacité de son ajout.

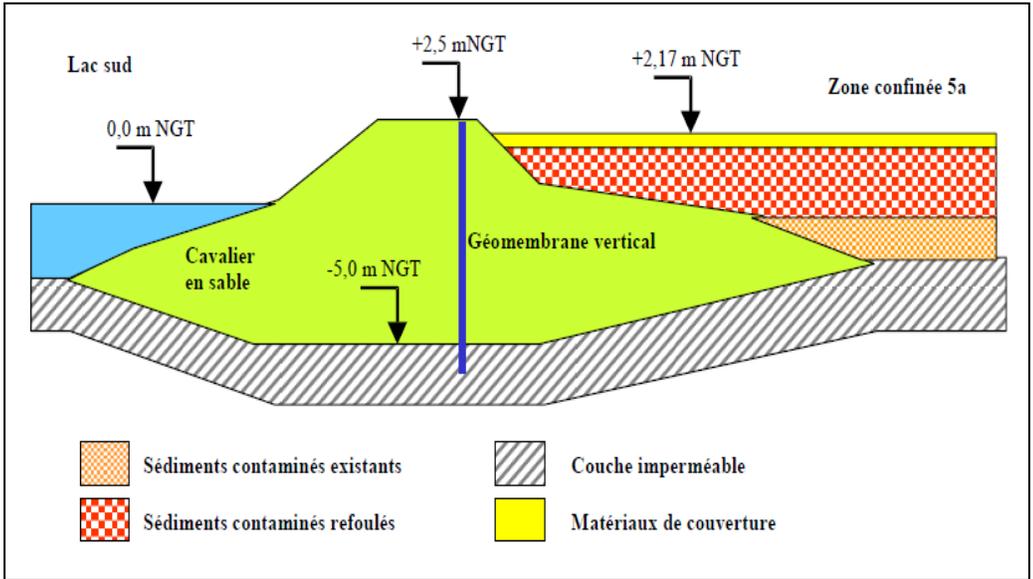


Figure 1 - Système de confinement mis en place sur les berges ouest du lac (Ben Charrada et Jouini, 2002).

le code de simulation utilisé dans ce travail HydroGéosphère, développés par R. Therrien et E.A Sudicky (université Laval et université de Waterloo, Canada). Ce code a été développé pour simuler les écoulements saturés et non saturés ainsi que le transport de contaminants dans les milieux poreux et fracturés (Therrien et al., 2001), permet de résoudre les équations d'écoulement couplées à surface libre et souterrain et le transport de contaminants dans les milieux non fracturés ou discrètement fracturés.

Ce modèle résout l'équation de l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux saturé ou non, en 1, 2 ou 3 dimensions, basé sur l'équation de Richards (Ippisch et al, 2006), donnée par la relation suivante (en 3D):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \nabla \cdot (K_{sat} K_r(\theta) \nabla H) = q$$

avec:

θ la teneur en eau (exprimée comme le produit de la porosité et de la saturation),

K_{sat} est la conductivité hydraulique à saturation,

K_r : la perméabilité relative,

H : la charge hydraulique,

q : un terme puits/source.

Le code HydroGeosphère est un modèle d'éléments finis qui utilise une approche globale pour résoudre simultanément l'équation de transport couplée à celle de l'écoulement. Ce logiciel intègre également de manière dynamique des composants clés du cycle hydrologique tels que l'évaporation des sols nus et des masses d'eau (Ben Abelhani, 2009). Dans notre cas, le maillage utilisé est constitué de 150 éléments en y, de 50 éléments selon x et un seul élément suivant z (par unité d'épaisseur).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

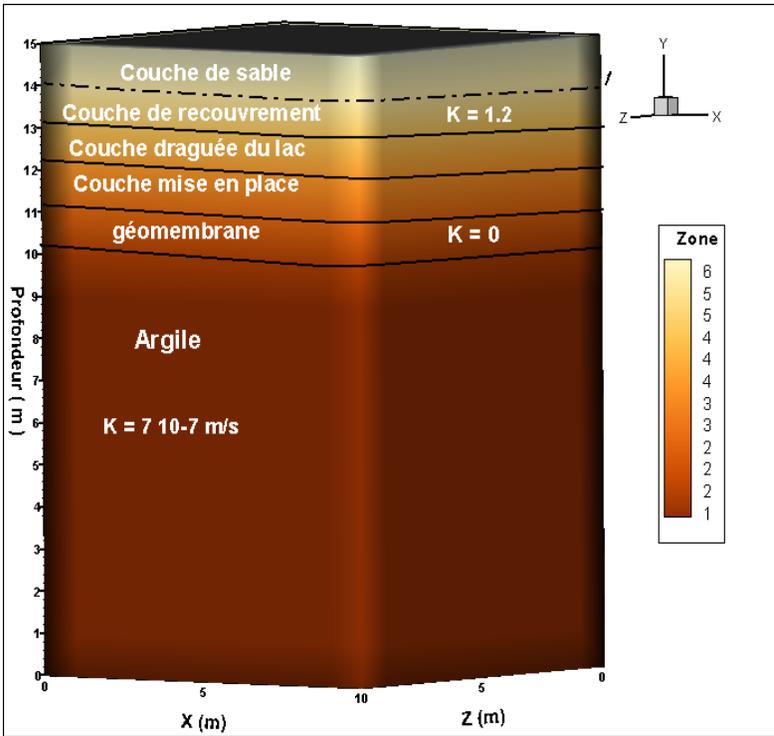


Figure 2 : Schéma du modèle conceptuel 3D simulé avec HydroGeosphere.

Pour la simulation du transport de polluants, on suppose toujours une concentration initiale égale l'unité à l'intérieur des sédiments et 0 ailleurs (afin de créer un gradient de concentration). Afin de mieux exploiter les résultats du code et suivre le comportement de chaque polluant dans les différents scénarios, le choix de polluants est basé sur la différence du coefficient de diffusion entre les métaux lourds. Les résultats fournis par HydroGeosphere nous permettent de dégager la concentration relative des polluants, variant dans un intervalle de 1 à 0, selon la courbe classique de 'Breakthroughcurve'. Cette dernière aboutit à une relation entre la concentration relative et la concentration réelle par:

$$C_{ppm} = C_{re} \times C_0 \quad C_{ppm} / C_0 = 1 \text{ lorsque } C_{t0} = 0;$$

avec;

C_{ppm} : est la concentration réelle calculée

C_{re} : est la concentration relative obtenu par HGS

C_0 : est la concentration initiale mesurée sur terrain

1- Les seuils d'intervention et de réhabilitation

L'objectif de ce cas d'études est de préciser le taux de pollution dans les différentes couches ciblées de la zone d'étude simulée (la couche de recouvrement, la couche de sable et le substratum) et la comparer avec le seuil de contamination montré dans le tableau 11 pour les quatre types de polluants, à savoir le Cd, Pb, Zn et HT. Pour pouvoir donner des éléments de gestion de la zone 5A, il est important tout d'abord de définir les valeurs standard définissant les seuils de la pollution. Les valeurs limites utilisées dans le cadre de ce projet pour les sédiments sont récapitulées dans le tableau suivant.

Tableau 1. Seuils de contamination utilisés (SEPTS, 2008)

	Cd ppm	Pb ppm	Zn ppm	HT ppm
Sédiments non pollués	< 3	< 300	< 150	< 300
Sédiments peu pollués	3--5	300-500	150-500	300-1500
Sédiments pollués	> 5	> 500	> 500	> 1500

2- Simulation 3D en fonction de la concentration en ppm

Cas de simulation cas réelle de la colonne de la zone 5a plus la couche du sable :

Pour le cas du Cd dans la figure si dessous, en calculant les valeurs de la concentration réelle en ppm et selon la figure 3, on peut déterminer le niveau de la pollution des couches étudiées dans les cinq pas du temps. La concentration du Cd varie ainsi de 4 ppm à 0 ppm, au niveau de la couche refoulée, la concentration atteint 3.6 ppm qui se diffuse vers la surface à 0.01 ppm à 14 m et s'annule au niveau de la couche du sable. Au niveau de la couche existante, la concentration du Cd est de 1.4 ppm, à partir de cette profondeur le cadmium commence à se diffuser de plus en plus dans le temps vers le bas et s'arrête au niveau de la géomembrane et s'annule au niveau de la couche argileuse.

selon ces résultats et en se référant au tableau 12 et 13, la couche draguée est considérée peu polluée où la valeur est considérée intermédiaire, tandis que les autres sont inférieures à 3 ppm, donc classées comme non polluées et comme valeurs objectives.

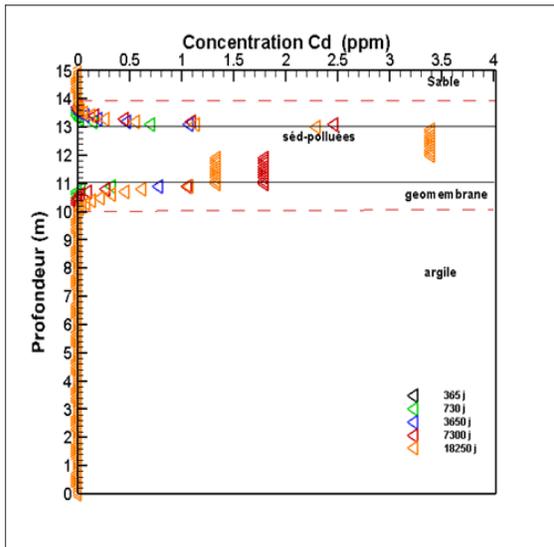


Figure 3 : Concentration en ppm du Cd en fonction du temps et de la profondeur

Concernant la concentration réelle du plomb, varie entre 300 ppm à 0 ppm. Au niveau de la couche refoulée (12 à 13 m) la concentration mesuré est fixe à 300 ppm et atteint la couche de recouvrement à un intervalle de concentration commençant à 50 ppm et se termine à 0 ppm au niveau de la couche du sable ainsi la couche en place a pour concentration 48 ppm et la migration est presque nulle dans deux ans et absent dans les deux sens de diffusions dans 10 et 20 ans et montre une faible migration dans 50 ans.

la couche de recouvrement et la couche du sable ainsi celle d'argile présentent des valeurs de concentration < 300 ppm, d'après le seuil de contamination, sont considérés non-pollués par contre la couche polluées est considérés peu-pollués, concernant les valeurs d'intervention, cette dernière appartient à la classe BGW I, par contre les deux autres couches appartiennent à la classe intermédiaire

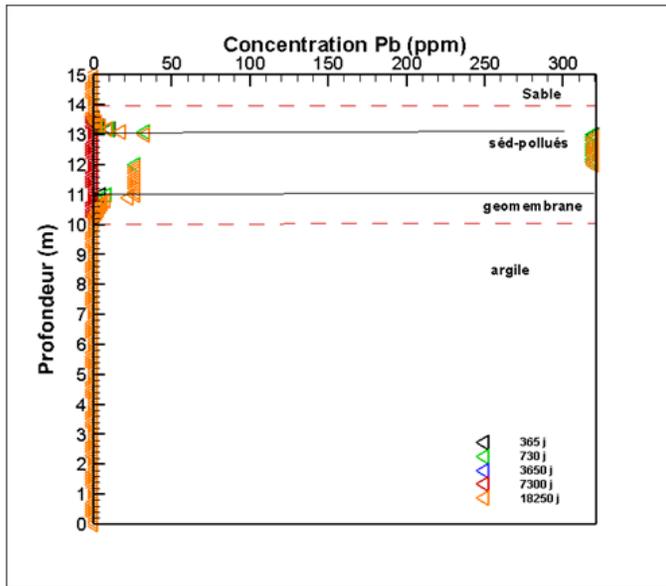


Figure 4 : Concentration en ppm du Pb en fonction du temps et de profondeur

CONCLUSION

Les résultats ont montré que lors du suivi de migration des polluants étudiés dans une période étalant jusqu'à 50 ans, leur propagation suit le sens du gradient de la concentration, ce qui donne un mouvement vers la surface et le deuxième vers les profondeurs, le flux de transfert est contenu tous le long de la colonne mais à très faible valeurs de concentration inférieur à 0.00005 ppm, en comparant ces valeurs avec le seuil de pollution, on trouve que l'existence de ces polluants au niveau de la surface ou au niveau de la couche d'argile ne forme pas un danger pour un usage jardinier ou résidentiel, les taux correspondent au taux normal existant à la nature d'où l'efficacité du projet de restauration et d'assainissement du lac sud de Tunis.

Références

- [1] *André, M. (2008). Cours hydrogéochimie, ENIT.
- [2] *Ben Abelghani, F. (2009). Analyse numérique des écoulements et du transport de contaminants dans les rejets miniers entposés dans les massifs rocheux fracturés. Thèse GCGM. Montréal: École Polytechnique De Montréal, 546 p.
- [3] *Ben Charrada, Jouini, Z. (2002). Projet d'aménagement et de restauration du lac sud de Tunis et de ses berges. Société d'Etudes et de Promotion de Tunis Sud (SEPTS), p4.
- [4] *Ben Charrada, Jouini, Z. (2002). Projet d'aménagement et de restauration du lac sud de Tunis et de ses berges. Société d'Etudes et de Promotion de Tunis Sud (SEPTS), pp
- [5] 10-11.
- [6] *Ben Charrada, Ben Moussa, M. (1997). Modélisation hydrodynamique et écologique des eaux côtières du golfe de Tunis. ENIT, Labo. Hydraulique, Tunis, 13 pages, LA HOUILLE BLANCHE/N° 6 - 1997.

- [7] *Ben Sabeur, M. et Mejri, K. Modélisation et suivi des sédiments contaminés du lac sud de Tunis : rapport de stage. DESS Ingénierie documentaire : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 07 Juin 2008, 87 p.
- [8] *Bouden-Romdhane, N., Mechler, P. (1998). Etude du bruit de fond sismique en vue d'un microzonage sismique de la ville de Tunis. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, pp 43-57.
- [9] *Therrien, R., et Sudicky, A.E. (1996). Three-dimensional analysis of variably saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media. Journal of contaminant Hydrology, 23, 1 -44.
- [10] *Therrien, R.,, Sudicky, E.A. et McLaren, R.G., (2001). FRAC3DVS : An Efficient Simulator for Three-dimensional Saturated-Unsaturated Groundwater Flow and Density-dependant, Chain-Decay Solute Transport in Porous, Discretely-Fractured Porous or Dual-porosity Formations. [logiciel]. INPUT/OUTPUT USER'S GUIDE. R.
- [11] *Therrien, E.A. Sudicky R.G. McLaren Groungwater Simulations Group. THERRIEN, R., PANDAY, S., MCLAREN, G.R, SUDICKY, A.E., DEMARCO, D., MATANGA, G. et HUYAKORN, P. (2005). HydroGeosphere, a three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and overland flow and solute transport. [logiciel]. Draft.
- [12] *Therrien, R., et Graf, T. (2005). Variable-density groundwater flow and solute Transport in porous media containing nonuniform discrete fractures. Advances in wateResources, 28, 1351-1367.
- [13] *EgisBceom International / IAU-IDF / BRGM. (2011). Adaptation au changement
- [14] climatique et aux désastres naturels des villes côtières d'Afrique du Nord Phase I : Évaluation
- [15] des risques en situation actuelle et à l'horizon 2030 pour la ville de Tunis, 341 pages,
- [16] *I.N.M.- Institut National de la Météorologie, Rapport des données climatiques de la période 2012-2016
- [17] *Jouini, Z. (2003). Le fonctionnement hydrodynamique et Ecologique du lac sud de tunisapres les aménagements rapport de stage. DESS Ingénierie documentaire : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 15 novembre, 191 p.
- [18] *Khalfallah, S. Etude du système de drainage des terre-pleins du lac sud, PFE ENIT, Juin 2003.
- [19] *Mechergui, W. et Mohsen, W. Etude de stabilité de l'ouvrage de passage lac-sud de Tunis-port de Tunis: rapport de stage. DESS Ingénierie documentaire : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 08 Juin 2007, 69 p
- [20] *SEPTS (2008) : étude de la zone de confinement terrestre 5A lac sud de Tunis.
- [21] *SEPTS (1998) : étude de la zone de confinement terrestre 5A lac sud de Tunis.

Application des méthodes statistiques à l'étude hydrochimique des eaux de la Haute et Moyenne Soummam (Algérie)

Hanane LAMARI ¹, Mohamed MESBAH², Célia KEBIR ³, Mohamed El Hocine CHERCHALI ⁴

¹ Doctorante. Laboratoire d'Hydrogéologie. Faculté des Sciences de la Terre et de l'Aménagement du Territoire. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger.

E-mail: lamarihanane23@live.fr

² Professeur. Laboratoire d'Hydrogéologie. Faculté des Sciences de la Terre et de l'Aménagement du Territoire. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger.

E-mail: mohamed_mesbah@hotmail.com

³ Doctorante. Laboratoire d'Hydrogéologie. Faculté des Sciences de la Terre et de l'Aménagement du Territoire. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger.

E-mail: celiakebir14@gmail.com

⁴ Chercheur en Hydrologie Isotopique. Centre de Recherche Nucléaire d'Alger. 02, Bd F.FANON, BP.399, Alger-RP, 16000, Alger.

E-mail: mehcherchali@gmail.com

Résumé :

Afin d'évaluer la qualité physicochimique de la ressource en eau de la Haute et Basse Soummam et d'expliquer les phénomènes contribuant à la minéralisation des ces eaux, des analyses physicochimiques ont été effectuées sur 36 échantillons d'eau (répartissant entre forages, puits, sources naturelles, barrage et cours d'eau) pour la période de mai-juin 2014. Cette évaluation a été établie par l'utilisation couplée de L'Analyse en Composantes Principales (ACP) L'analyse en Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) et qui ont permis la mise en évidence des mécanismes (tels que la dissolution) permettant l'acquisition de la minéralisation des eaux échantillonnées sur la Haute et Moyenne Soummam.

Mots-clés: Bassin de la Haute et Moyenne Soummam, Ressources en eau, qualité physicochimique, Analyse en Composantes Principales (ACP), Classification Hiérarchique Ascendante (CHA).

Use of statistical methods for physicochemical study of the upper and the middle soummam watershed water ressources (Algeria)

Abstract :

In order to evaluate physicochemical quality of the water resources of the Upper and Lower Soummam and to explain the processus which contribute to the mineralization of these waters, physicochemical analyzes were carried out on 36 water samples (sampled from boreholes, wells, natural springs, dams and watercourses) for May-June 2014 period. This assessment was established by the coupled use of Principal Component Analysis (PCA) and Hierarchical Ascending Classification Analysis (AMP), which allowed the identification of mechanisms (such as dissolution) responsible of the mineralization acquisition of the sampled waters in Upper and Middle Soummam watershed.

Key Words: Upper and Middle Soummam watershed, Water Resources, Physicochemical Quality, Principal Component Analysis (PCA), Ascending Hierarchical Classification (AMP).

INTRODUCTION

La Haute et Moyenne Soummam, qui englobe la vallée de l'oued Sahel et la partie aval de l'oued Boussem fait partie du grand bassin versant de la Soummam, connaît un développement socioéconomique et une importante croissance démographique. Cette situation se traduit par l'augmentation des besoins en ressources en eau, assurées majoritairement par les eaux souterraines, qu'actuellement, leur exploitation est arrivée à son extrême, particulièrement en période de

sécheresse, engendrant dessituations de déficits importants en eau. Cependant les ressources en eaux sont exposées à différentes formes d'altération telle que la dégradation de la qualité chimique et la pollution qui est essentiellement d'origine anthropique.

Pour pouvoir expliquer cette différence de qualité chimique, nous avons tenté de faire une classification ou régionalisation des eaux de la Haute Soummam.

Le processus de régionalisation vise à assembler les différents points d'échantillonnage en des groupes ayant les mêmes comportements. D'un point de vue statistique, ce regroupement peut s'effectuer par l'étude de la variance entre les points et un certain nombre de variables. L'examen des coefficients de contribution de ces points obtenus par l'analyse multivariée permet ensuite de les regrouper par région.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

b. Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant de la Soummam, objet de cette étude, est situé dans la partie Nord-est de l'Algérie du Nord, entre les méridiens 3° 38' et 5° 38' et les parallèles de 35° 45' et 36° 45'. Il s'étend sur une superficie de 9125 km². Il est limité par les chaînes montagneuses de Djurdjura et ses contreforts qui s'étendent jusqu'à la mer au Nord, les contreforts du mont du Hodna au Sud, les chaînes des Babors et le plateau de Sétif à l'Est et le plateau de Bouira à l'Ouest. La région d'étude présente les particularités d'un climat méditerranéen qui est caractérisé par une période estivale sèche et chaude, s'étendant de juillet à août et une période humide froide de novembre à février.

La pluviométrie est plus importante sur les versants Nord que les versants sud et elle croît également en se rapprochant de la mer. Elle varie entre 400 mm à 1000 mm. Les formations qui sont rencontrées au droit de la zone d'étude peuvent être regroupées en trois grandes unités stratigraphiques : les formations alluvionnaires du Quaternaire, les formations tertiaires du Miocène et les formations du secondaire regroupant le Crétacé, le Jurassique et le Trias et constituant le substratum. Le principal système de drainage du bassin comprend de l'ouest vers l'est, les oueds Sahel et Boussellam et leurs affluents. Ces deux oueds se réunissent près d'Akbou pour former l'oued Soummam. A sa confluence avec l'oued Boussellem, l'oued Sahel draine un bassin de 3750 km². Il est formé par la réunion des deux oueds Eddous et Ziane dont les superficies de drainage sont respectivement de 940 km² et 970 km².

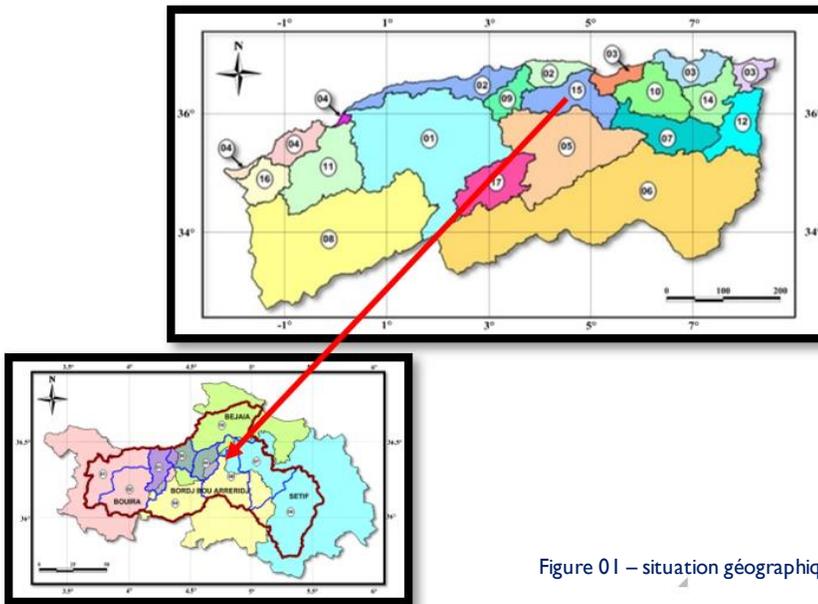


Figure 01 – situation géographique de la zone d'étude.

c. Méthodologie de l'étude

L'échantillonnage a été réalisé dans des flacons en polyéthylène de 100 ml pour les échantillons destinés aux analyses physico-chimiques. Le nombre de flacons utilisés pour chaque échantillon était de deux : un flacon pour les anions et un autre pour les cations, ces échantillons ont été filtrés à l'aide d'un filtre de 45 micron, le flacon des cations a été acidifié avec l'acide nitrique jusqu'à un pH 2. Au total, vingt-six échantillons d'eau de forages et de puits, cinq échantillons d'eau de sources et six échantillons d'eau superficielle (cours d'eau et barrage) ont été collectés et destinés aux analyses en laboratoire. Les paramètres physiques tels que la température, le pH, la conductivité électrique et le TDS (Total Dissolve Salt) ont été mesurés in situ, à l'aide d'un appareil de terrain multi paramètres de marque HANNA. Les analyses chimiques (éléments majeurs) ont été réalisées au niveau du laboratoire du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger, en utilisant un chromatographe ionique Dionex I 20 à double colonnes rapides.

Pour classer des individus (points d'échantillonnage) ayant un comportement similaire sur un ensemble de variables (éléments physico-chimique) on utilise deux approches :

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) : les résultats de l'ACP permettent de regrouper ces variables physiques en un ensemble réduit de nouvelles variables parfaitement indépendantes. Une méthode graphique permet ensuite de regrouper les stations en régions, sur la base de la valeur des composantes principales pour chacune d'entre elles ;

La Classification Hiérarchique Ascendante (HCA) : Cette analyse est employée pour déterminer si les échantillons peuvent être groupés dans des groupes hydrochimiques statistiquement distincts qui peuvent être significatifs dans le contexte géologique régnant.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

I. L'Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'un des buts de l'Analyse en Composantes Principales est de tirer l'information significative d'une matrice de données et, souvent, de fournir une représentation graphique des données afin de faciliter leur analyse. L'analyse en composante principale a été appliquée sur 11 variables (T°, CE, TDS, pH, Cl-, SO4²⁻, HCO3⁻, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺,) et 37 individus (les points d'eau échantillonnés). Les éléments statistiques utilisés pour faciliter l'interprétation des résultats sont la matrice de corrélation (tableau 01) et Les valeurs propres des facteurs (tableau 02).

Tableau 01 : La matrice de corrélation

Variables	pH	T °C	Cond	TDS	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻⁻	HCO3 ⁻
pH	1										
T °C	-0,019	1									
Cond	-0,488	0,776	1								
TDS	-0,497	0,751	0,997	1							
Ca ⁺⁺	-0,431	0,666	0,898	0,910	1						
Mg ⁺⁺	-0,195	0,132	0,381	0,435	0,686	1					
Na ⁺	-0,481	0,788	0,987	0,975	0,821	0,228	1				
K ⁺	-0,450	0,790	0,977	0,963	0,808	0,201	0,994	1			
Cl ⁻	-0,481	0,779	0,989	0,979	0,840	0,253	0,998	0,992	1		
SO4 ⁻⁻	-0,207	0,370	0,571	0,616	0,798	0,949	0,438	0,409	0,449	1	
HCO3 ⁻	-0,791	0,306	0,612	0,615	0,619	0,356	0,580	0,569	0,580	0,388	1

D'après cette matrice de corrélation, on constate que les variables CE et TDS sont fortement corrélées avec le Ca²⁺, Na⁺, K⁺ et Cl⁻. Ce sont ces éléments qui dominent l'essentiel de la minéralisation de l'eau. En outre la même matrice nous montre également que Ca²⁺ et Mg²⁺ sont corrélés avec un coefficient de 0.69 et que ces mêmes éléments sont peu (Ca²⁺ et Mg²⁺) ou pas du tout corrélés avec HCO₃⁻.

On constate aussi que Mg²⁺ est fortement corrélé à SO₄²⁻ alors que Ca²⁺ en moindre part, Na⁺, K⁺ et Cl⁻ sont eux fortement corrélés (r > 0.95) exprimant ainsi une dissolution de sels.

Ainsi et comme on peut l'observer sur le tableau 02, les facteurs F1, F2 et F3 sont ceux qui expriment ou renferment le maximum d'informations quant à la minéralisation, ils seront donc utilisés pour l'analyse en ACP ; La variance exprimée par ces trois facteurs est respectivement de 68.6, 15.3 et 11.9 %, soit un total de 95.8% de l'information (tableau 02).

Tableau 02 :les valeurs propres des facteurs.

	F1	F2	F3
Valeur propre	7,5	1,7	1,3
Variabilité (%)	68,6	15,3	11,9
% cumulé	68,6	83,9	95,8

On constate que pour le facteur F1, correspondent les variables suivantes : T°, CE, TDS, Ca²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻ et HCO₃⁻; F2 est représenté par Mg²⁺ et SO₄²⁻ alors que F3 est marqué par le pH. Ainsi et comme on peut l'observer sur la figure 02, on constate que sur le plan factoriel F1 - F2, deux points, H04 et H27 se détachent des autres et sont grandement influencés par Mg²⁺ et SO₄²⁻ alors que le reste des points est sous l'influence des paramètres déterminant l'essentiel de la minéralisation.

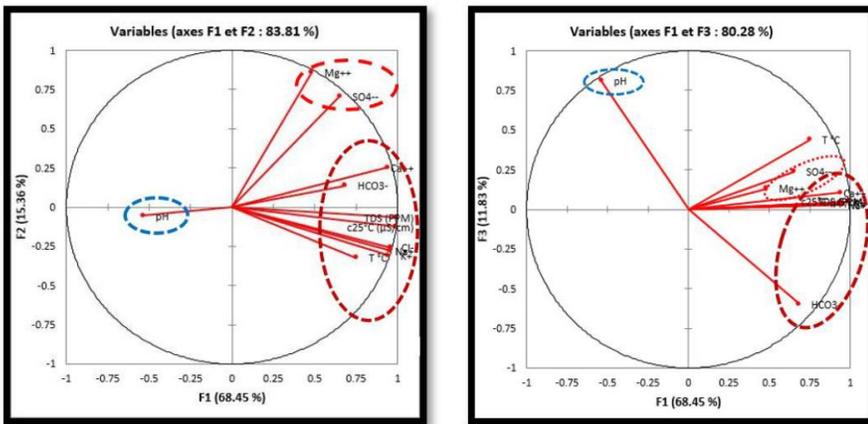


Figure 01 :Projection des variables sur le plan (F1 x F2) et (F1 x F3)

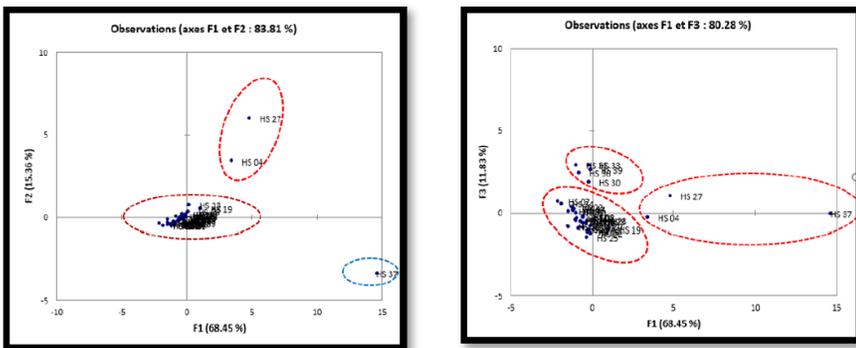


Figure 02 :Projection des observations sur le plan factoriel (F1 x F2) et (F1 x F3).

2. La Classification Hiérarchique Ascendante (HCA)

L'Analyse Hiérarchique Ascendante (méthode de Ward, distance Euclidienne) a été appliquée selon les variables (propriétés physiques et composition chimique). Les données hydrochimiques ont été classées dans l'espace à 11 dimensions (T° , CE, TDS, pH, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺,) et le résultat est présenté sous la forme d'un dendrogramme (Fig.03).

Comme pour l'ACP, on constate que la CHA a permis de discriminer différents points (fig.7.43) et que ces derniers sont classés en 4 classes les plus représentatives. Le paramètre essentiel qui a permis de différencier ces classes est la Conductivité électrique, auxquels se sont ajoutés d'autres paramètres tels que Mg²⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, Na⁺ que l'on assimilera aux paramètres liés aux évaporites, et qui déterminent la classe 2 et 4. Les classes 3 et 1 correspondent aux points ayant une conductivité inférieure à 800µS/cm. La C3 regroupe toutes les sources et puits dont la C.E est inférieure à 800µS/cm

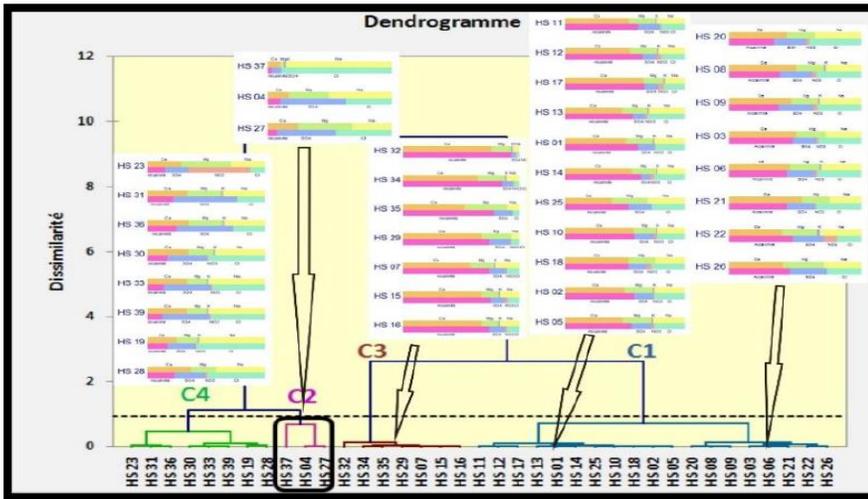


Figure 03 :Dendrogramme.

CONCLUSION

L'utilisation combinée des méthodes hydrochimiques et les méthodes statistiques pour la caractérisation qualitative des eaux échantillonnées dans le bassin versant de l'oued Sahel et de l'oued Boussellem a permis de déterminer que l'acquisition de la charge minérale des eaux dépend essentiellement de la nature lithologique des formations géologiques traversées. Cette acquisition minéralogique est prédominée par la dissolution des roches carbonatées et des roches d'origine évaporitique.

Références

- [1] C.CLINCKX, Etude hydrogéologique de la vallée de l'oued Sahel-Soummam. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Alger | 1973 ;
- [2] LAMARI H. Etude quantitative et qualitative de la ressource en eau dans le bassin versant de l'oued Sahel amont et aval et de l'oued Boussellem aval (Wilaya de Bejaia et Bouira). Thèse de Magistère en Géologie, Option Hydrogéologie. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger 2015 ;
- [3] F.MEKHLOUF, Contribution à l'étude Pédologique et -hydrologique du sous bassin versant du cours inferieur de l'oued Boussellem). Mémoire d'Ingéniorat en Agronomie, option Pédologie. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou | 1998;
- [4] S. TECHNOEXPORTSTROY, Etude hydrogéologique de la vallée de l'oued Sahel (El Adjiba -Tazmalt). Rapport définitif. Ministère des Ressources en Eau | 1971 ;

Caractérisation de la sécheresse: cas du bassin versant Seybouse

Dounia MRAD¹, Sabri DAIRI ¹, Sofiane BOUKHARI¹ et Yassine DJEBBAR¹

¹: Université Mohamed Chrif Mesaadia. Laboratoire INFRARES, Souk-Ahras, Algérie

Email: mrad_dounia@yahoo.fr

Résumé

Dans la perspective d'un réchauffement global du climat, la gestion des impacts du changement climatique passe d'abord par une représentation des caractéristiques du changement à l'échelle locale et régionale. Durant les derniers décennies, l'Algérie a connue plusieurs manifestations climatique a eu une influence négative sur les ressources en eau de surface et par conséquent, les volumes stockés subissent une diminution très nette. Il devient parfois difficile de satisfaire la demande en eau, en particulier celle destinée à l'agriculture. La connaissance des facteurs climatiques et la caractérisation de la sécheresse par l'estimation des indicateurs sont indispensables. Cette étude vise à identifier et caractériser les sécheresses dans la région de Seybouse.

Mots clés :Seybouse, Pluie, SPI, Sécheresse et Nord-est algerien

Characterization of drought: case of the Seybouse watershed

Abstract

In the context of global warming, managing the impacts of climate change begins with a representation of the characteristics of change at the local and regional levels. During the last decades, Algeria experienced several climatic events had a negative influence on the surface water resources and consequently, the volumes stored undergo a very clear reduction. It sometimes becomes difficult to meet the demand for water, especially for agriculture. Knowledge of climatic factors and characterization of drought by estimating indicators are essential. This study aims to identify and characterize droughts in the Seybouse region.

Key Words: Seybouse, Rainfall, SPI, Drought, Northeastern of Algeria

1. INTRODUCTION

Les pays du Maghreb, ont connu durant la période 1975-2000, une succession de périodes de sécheresses intenses et persistantes. En Algérie cette sécheresse a été caractérisée par un déficit pluviométrique important, et a touché l'ensemble du territoire. Vis-à-vis du climat semi-aride, avec une répartition spatio-temporelle très irrégulière des précipitations et des demandes en eau de plus en plus accentuées, les ressources deviennent limitées et difficiles à exploiter. Le développement économique et social, la croissance des villes, des industries ainsi que la modernisation de l'agriculture et le développement des loisirs entraînent un accroissement considérable de la demande en eau. Cette sécheresse a eu un impact négatif sur :

- Les régimes d'écoulement des rivières.
- Le niveau de remplissage des réservoirs de barrages entraînant des conséquences grave sur l'ensemble des activités socio-économiques du pays, et sur l'environnement (pollution, incendies de forêt, dépérissement du milieu naturel, désertification...)

Pour caractériser ce phénomène, la connaissance de la variabilité climatique et la caractérisation de la sécheresse par des méthodes statistiques sont indispensables.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

La zone d'étude est localisée au Nord Est de l'Algérie. Elle est comprise entre 5 et 8° de latitude nord et 35 et 37° de longitude ouest. Le bassin couvre 68 communes dans sept wilayas Annaba, Tarf, Skikda, Constantine, Oum El Bouaghi, Guelma et Souk-Ahras. Trente (30) communes sont entièrement incluses dans le bassin et trente-huit (38) partiellement. La seule agglomération d'Annaba représente dix-huit pour cent (18%) de la population totale du bassin. La figure 1 montre le découpage du bassin Seybousse en sous bassin selon cahier de l'agence de bassin hydrographique Constantinois-Seybouse-Mellegue Numéro 1.



Fig. 1 - Carte de découpage des sous bassins [1]

3. Collecte et mise en forme des données

Le volume d'informations pluviométriques recueillies dans cette région est constitué d'une douzaine de stations réparties de façon plus ou moins uniforme. Nous avons retenu que (12) postes parce qu'il fonctionné sans arrêt depuis 1970. Les stations ont été retenues pour la période 1970 à 2007 soit 37 ans sauf la station Bouchegouf couvre une longue série pluviométrique allant 1910 jusqu'à 2007. Deux critères nous ont alors permis de sélectionner les stations choisies. Nous avons retenu seulement les stations possédant une série de données la plus complète possible. Nous avons conservé une répartition géographique de ces stations de manière à couvrir la plus grande superficie du bassin versant. Les données sont obtenues à partir de l'Agence National des Ressources Hydriques et de l'Institut de Météorologie.

Les caractéristiques des stations sont indiquées dans le Tableau 1 et Figure 1.

4. Méthodes de caractérisation de la sécheresse

4.1. Indice standardisé de précipitation

L'indice standardisé de précipitation « SPI » (Standardized Precipitation Index) a été développé en 1993 en vue de caractériser les déficits de précipitation pour une période donnée. Il reflète l'impact de sécheresse sur la disponibilité des différentes ressources en eau. Cet indice est calculé surtout lorsque la précipitation n'est pas normalement distribuée, notamment pour des périodes inférieures à 12 mois. Il est exprimé mathématiquement comme suit :

$$SPI = (P_i - P_m) / \sigma \quad (1)$$

Avec Pm: Pluie moyenne annuelle (mm); σ : écart-type de la pluie annuelle (mm).

On effectue une classification de la sécheresse suivant les valeurs des SPI. Le SPI est établi pour quantifier le déficit des précipitations pour des échelles de temps multiples qui vont refléter l'impact de la sécheresse sur la disponibilité des différents types de ressources en eau.

Table 1- Caractéristiques des stations pluviométriques

C : Code; Lat: Latitude; Long: Longitude; Alt :Altitude; D.O: Durée d'observation; Moy: Moyenne annuelle mm/ans; CV:

Désignation	C	Lat	Long	Alt,m	D. O	Moy	CV%
Berriche	140103	921.8	300.5	800	1970-2007	272	34
Ksar Sbahi	140104	910.5	319.05	850	1970-2007	366.1	38
Ajouan Settara	140105	922.4	318.35	741	1970-2007	322.0	34
Ain Babouche	140109	905.0	303.10	860	1970-2007	262.1	38
Bordj Sabath	140302	889.1	355.10	525	1970-2007	538.7	28
Heliopolis	140403	925.1	366.85	280	1970-2007	594.0	28
Guelma ONM	140407	923.8	362.2	270	1970-2007	524.3	26
Mechroha	140502	961.1	351.85	748	1970-2007	1041.8	43
Boucheouf	140505	949.2	362.45	800	1910-2007	570.0	30
Ain Berda	140606	937.6	387.75	100	1970-2007	616.72	25
El-Kerma	140609	943.6	394.66	14	1970-2007	575.6	25
Pont Bouchet	140631	949.9	402.82	3	1970-2007	595.4	24

Coefficient de variation%.

Table 2 - Pourcentage standardisé des précipitations

SPI	Indice standardisé de précipitation
SPI > 2	Humidité extrême
1 < SPI < 2	Humidité Forte
0 < SPI < 1	Humidité Modérée
0 < SPI < -1	Sécheresse Modérée
- 2 < SPI < -1	Sécheresse Forte
SPI < -2	Sécheresse Extrême

Dans notre cas, nous cherchons la persistance de la durée des périodes sèches.

5. RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'application de la méthode de l'indice standardisé de précipitation permet de mieux voir de distinguer l'alternance des épisodes climatiques. La méthode des SPI montre qu'environ 55% des années d'observation ont une tendance à la sécheresse pour la station de Boucheouf. Ainsi, on n'observe que la fin des années 1985 à la fin des années 1990, une tendance à l'assèchement nette et durable. Elle correspond à un déficit pluviométrique particulièrement net durant la période 1980-1990. Si cette sécheresse peut être considérée comme la plus importante du dernier siècle, en déficit, en étendue et en durée, elle n'est tout de même pas exceptionnelle à l'échelle historique, car des études visant à reconstituer quantitativement les écoulements depuis le début du dernier millénaire semblent bien montrer certaines périodes de sécheresse aussi remarquable ([2]; [3]; [4] et [5]). La répartition selon le nombre d'année des épisodes climatiques de Boucheouf enregistre l'appartenance de la zone étudiée à l'étage climatique semi aride avec une vingtaine d'années sèches (modérée et forte), quatre d'années humides (fortes et extrêmes) séparées par une treize années humide modérée sur une période d'étude de 38 ans d'observation. La répartition climatique de la totalité des stations situées des plus hautes à la plus basse altitude qui conduisent aux résultats suivants montré dans le tableau 3. La répartition des différents épisodes climatiques en fonction des altitudes montre que les stations pluviométriques de Berriche, Ksar Sbahi, Ain Babouche sont les plus exposées aux risques de sécheresse alors que les autres stations présentent un degré minimal à tendance sèche, qui se situent à des altitudes comprises à 800m. Les autres stations sont situées soit à des altitudes très importantes soit très faibles. On peut donc conclure que l'altitude n'est pas le seul facteur qui influe sur la répartition des épisodes climatiques. On peut donc inclure l'effet de proximité de la mer qui avec l'effet de l'altitude intervient dans la répartition spatiale du degré d'exposition à la sécheresse. En effet le gradient du degré d'exposition à la sécheresse augmente du Nord-est vers le centre du bassin versant: le Nord-Est est caractérisé comme à proximité de la mer avec un degré minimal d'exposition à la sécheresse et le centre comme une zone lointaine de la mer à une

tendance nette à la sécheresse. Du centre vers le Sud-Ouest du bassin versant le même gradient diminue c'est-à-dire qu'en allant du centre vers le Sud-Ouest l'effet de l'altitude dans la répartition des épisodes climatiques apparaît.

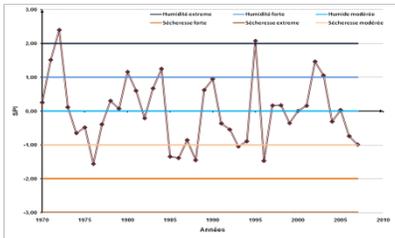


Fig. 2- Variation de l'indice standardisé des précipitations en fonction du temps dans la station pluviométrique de Boucheouf

Table 3 -Répartition des différents épisodes climatique

Désignation	Altitude, m	Année humide	Année sèche
Berriche	800	18	20
Ksar Sbahi	850	17	21
Aioun Settara	741	15	23
Ain Babouche	860	17	21
Bordj Sabath	525	38	00
Heliopolis	280	37	01
Guelma ONM	270	01	37
Mechroha	748	38	00
Boucheouf	800	47	50
Ain Berda	100	38	00
El-Kerma	14	38	00
Pont Bouchet	3	38	00

CONCLUSION

Les résultats obtenus par l'indice standardisé des précipitations indiquent qu'il y a une réduction de la pluviométrie entre 1980-1990. Les zones les plus exposées à l'effet de la sécheresse sont celles qui sont situées à des altitudes moyennes et éloignées de la mer. Ces constats permettent aux gestionnaires des ressources en eau de tracer une bonne stratégie pour l'utilisation rationnelle et les probabilités et les mettre en regard des durées de vie crédibles d'ouvrages hydrauliques.

Références

1. Cahier de l'agence du bassin hydrographique Constantinois Seybousse Mellegue 2000.
2. Sircoulon J., Olivry J.C. (1986), Caractérisation de la sécheresse actuelle en Afrique de l'ouest et centrale (considération sur les stations pluviométriques de longue durée et les débits des rivières) In: Compte rendu du colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse, CIEH, Ouagadougou, 20 au 24 mai.
3. L. Gaston, Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les transports de matières en suspension de quelques bassins versants représentatifs au Cameroun, Thèse en doctorat en Sciences de l'eau, Université De Yaoundé I, (2007), 486.
4. A. Merabti, D.S. Martins, M. Meddi, L.S. Pereira, Spatial and Time Variability of Drought Based on SPI and RDI with Various Time Scales. Water Resource Management, 32 1087, (2018). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1856-6>
5. D.Mrad, Y. Djebbar, Y.Hammar, Analysis of trend rainfall case of Northeastern Algeria. Journal of water and land development, 36(I-III),(2018), 105-115.

Approches multicritères pour l'étude de l'intrusion marine : Cas de la nappe de Collo, Nord Est Algérie

Djabri L¹, Bouhsina S², Hani A¹, Chaffai H¹, F.Z. Trabelsi³

1-Laboratoire Ressource en Eau & Développement Durable. Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie. djabri_larbi@yayoo.fr

2- Unité de Chimie Environnementale et Interactions sur le Vivant (UCEIV) EA 4492, Maison de la Recherche en Environnement Industriel, Université du Littoral Côte d'Opale, Dunkerque, France. saad.bouhsina@univ-littoral.fr

3- Higher School of Engineering of Medjez El Bab_ESIER. University of Jendouba. trabelsifatma@gmail.com

Résumé :

La plaine de Collo, est à vocation agricole, d'où la nécessité d'irriguer pour faire face aux aléas des changements climatiques. Cette plaine est limitée au nord par la mer Méditerranée, ce qui l'expose à une éventuelle intrusion marine. Le but de notre travail est d'utiliser les résultats issus de la combinaison de plusieurs méthodes pour mettre en évidence une éventuelle relation entre la mer-nappe dans cette région. La plaine de Collo a une forme quadrilatérale allongée, d'une longueur de 8 Km et d'une largeur de 5 Km le long de la mer, avec une superficie d'environ 18 Km². Elle est parcourue par les Oueds Guebli et Cherka, qui se versent dans la mer. À partir de mesures réalisées sur le terrain (piézométrie et paramètres physiques) et des analyses faites au laboratoire, nous avons réalisé notre travail.

La carte piézométrique se rapportant au mois de mai 2016, montre des écoulements multidirectionnels :

-un premier écoulement, de direction nord-sud, de la mer vers le continent dans la zone nord,

-le second, localisé au centre de la plaine et mettant en évidence un pompage au niveau des puits situées non loin des Oueds. La présence de ces écoulements, nous amène à rechercher la mise en évidence d'une probable intrusion marine. Pour répondre à cette question, nous avons utilisé le calcul du delta ionique, les rapports caractéristiques et la méthode GALDIT. Les résultats obtenus indiquent une absence de l'intrusion marine. Cependant le calcul du delta ionique montre une présence des bicarbonates, leur présence est liée aux animaux marins à coquille calcaire comme les coquillages. La carte de vulnérabilité issue de la méthode GALDIT, montre que la zone nord est sujette à une probable intrusion marine.

Mots-clés : Collo, intrusion marine, Vulnérabilité, Delta ionique.

Multi-criteria approaches for the study of marine intrusion: Case of the Collo aquifer, North-East Algeria.

Abstract:

The plain of Collo, is a region with agricultural vocation, from where the necessity to irrigate to face the hazards of the climatic changes. This plain is limited to the north by the Mediterranean Sea, which exposes it to a possible marine intrusion. The purpose of our work is to use the results from the combination of several methods to highlight a possible relationship between the sea-groundwater levels in this region. The plain of Collo has an elongated quadrilateral shape, with a length of 8 Km and a width of 5 Km along the sea, with an area of about 18 Km². It is crossed by Wadis Guebli and Cherka, which pour into the sea. From measurements made in the field (piezometric level and physical parameters) and analyzes made in the laboratory, we realized our work. The piezometric map (of March 2016) shows multidirectional flows:

-the first flow, north-south, from the sea to the mainland in the northern zone,

-the second, located in the center of the plain and highlighting a pumping at the wells not far from the wadis.

The presence of these flows, leads us to seek the highlighting of a probable marine intrusion.

To answer this question, we used the calculation of ionic delta, characteristic ratios, and the GALDIT method. The results obtained indicate an absence of marine intrusion. However, the calculation of the ionic delta shows a presence of bicarbonates; their presence is linked to marine animals with a calcareous shell like shellfish. The vulnerability map from the GALDIT method shows that the northern zone is subject to a probable marine intrusion.

Key Words: Collo, marine intrusion, Vulnerability, Ionic Delta.

Introduction :

En Algérie, la zone littorale occupe 4 % de la superficie totale du pays mais plus de 85 % de la population vit sur cette frange. Cette zone, est sous pression, car la demande en eau est en perpétuelle augmentation aussi les terres destinées à l'agriculture s'amenuisent constamment car elles sont remplacées par la construction d'habitations souvent réalisées à la va vite et de manière anarchique. Dans cette zone l'industrie est constituée en grande partie par les huileries, destinées à la production de l'huile d'olives. La présence de ces facteurs, génère des polluants pouvant causer une dégradation de la ressource en eau et de l'environnement. A Collo, on dénote la présence de deux formes de pollution, la première dite naturelle et la seconde anthropique. Notons que les dégradations naturelles (inondations, sécheresse,...), sont imprévisibles et les dégâts causés ne sont connus qu'après bilan. Au contraire l'homme par la recherche de son bien être, s'autodétruit d'où la présence des différentes sources de pollution (industrie, agriculture et urbanisation massive). Le présent travail, traite de la fragilité des zones côtières, qui à force de sollicitation sont de plus en plus vulnérables à la pollution. Le présent travail, traite de l'état de vulnérabilité des eaux à la pollution de la plaine de Collo, vis-à-vis des néo-occupations du sol. Les résultats obtenus sont issus de la compilation de plusieurs méthodes (GALDIT, Rapports, delta ionique,...), ce qui nous permet de classer les zones en fonction de leur degré de pollution.

I. Cadre de la zone d'étude :

I.1. Situation géographique

La plaine de Collo fait partie du sous-bassin versant constantinois. Elle est drainée par deux grands Oueds qui sont l'Oued Guebli (situé au Sud-est de la plaine) et l'Oued Cherka qui se localise dans le secteur Nord-ouest de la plaine. Les deux Oueds se déversent en mer. La plaine de Collo s'étale sur huit (8) kilomètres de long et cinq (5) kilomètres de large soit 40 Km² de superficie (fig.1).

Administrativement, la région étudiée est limitée: au Nord par la mer Méditerranée, au Sud par la commune d'Ain Kachra, à l'Est par les communes de Kerkera et à l'Ouest par la commune de Cheraia.

I.2. Géologie de la zone d'étude :

I.3.

L'étude géologique réalisée a montré que la vallée de Collo est constituée par des formations d'âge quaternaire issues d'un remplissage alluvial et présentent les caractéristiques suivantes :

-Au Sud de Koudiat Télézza, de 191 m d'épaisseur, constitué par des Alluvions peu épaisses limoneuses et peu perméables.
-Au Nord de Koudiat Télézza, le remplissage varie de 15 à 25 m, formé de sables et graviers. Ces formations reposent sur un massif de roches métamorphiques (micaschistes et gneiss du socle kabyle) au pied duquel est bâtie la ville de Collo. Sur ce socle, des sédiments marins presque entièrement argileux se sont déposés (fig.3), il s'agit d'une alternance de marnes et des grès d'âge Miocène. C'est l'époque de la mise en place des granites intrusifs de la bordure Est de la plaine de Collo.

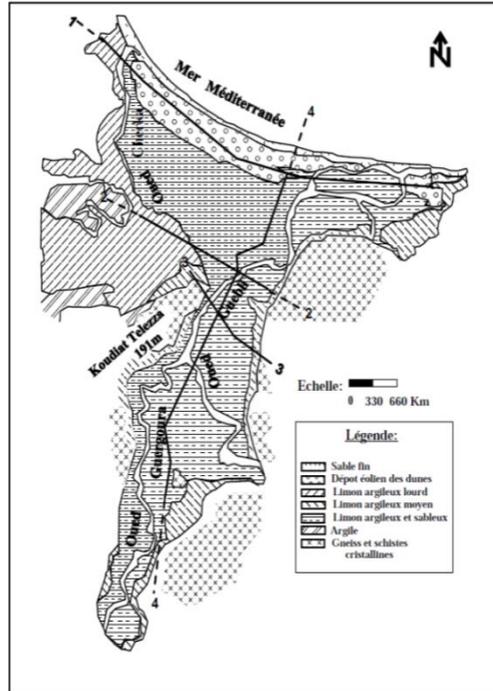


Fig.1 : Cadre géologique et géographique de la plaine de Collo

2. Piézométrie : La carte piézométrique issue des mesures réalisées au mois de Mars 2016 qui a porté sur plus de trente (30) puits, montre (fig.3), deux sens d'écoulement, le premier dirigé du Sud vers le Nord et le second inverse dirigé du Nord vers le Sud au niveau de la zone littorale. Ce qui indique qu'au niveau de la zone littorale, il y a un risque d'intrusion marine.

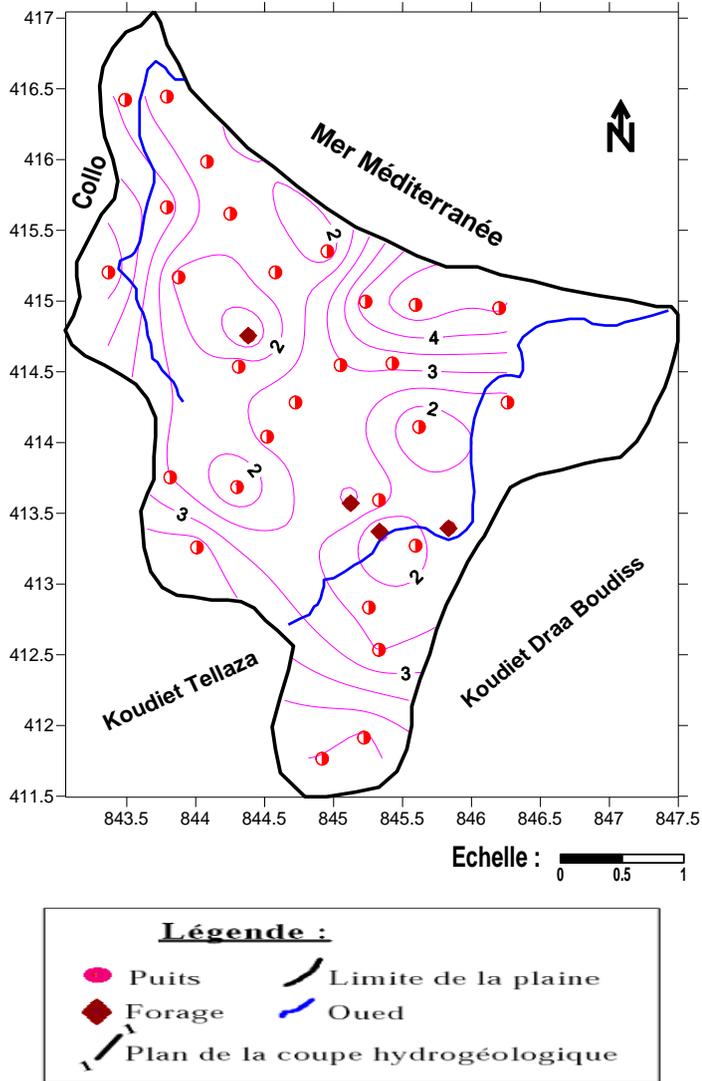


Fig.3 : Carte piézométrique mois de Mars 2016

3. Matériels et méthodes :

2tudier la vulnérabilité des eaux à la pollution, passe par la réalisation d'un certain nombre d'analyses chimiques. Dans cet objectif, nous avons réalisé une campagne de prélèvement (15 échantillons), se rapportant au mois de mars 2016. Les résultats obtenus, nous permettrons dans une première étape d'avoir un aperçu sur les échanges nappe-mer, donc la mise en évidence d'une intrusion marine. La seconde étape sera consacrée à l'étude de la vulnérabilité des eaux à la pollution en appliquant la méthode GALDIT.

4. Résultats et discussions :

Pour la mise en évidence d'une probable intrusion marine, nous avons utilisé les résultats issus des analyses d'eau réalisées. Dans une première étape, nous avons calculé le rapport CI-/CE, dont la valeur seuil est de 0.307, appliqué aux eaux de la

région, nous remarquons, que la valeur du rapport Cl/CE, oscille entre 0.004 et 0.001, on déduit que le rapport Cl/CE, n'indique pas une intrusion marine dans cette région.

4.1 : Application de la méthode du delta ionique :

La seconde méthode testée se base sur le calcul du delta ionique, donné par la formule suivante :

$$\Delta C = [C] \text{ Réelle} - [C] \text{ Théorique}$$

Cette formule découle de:

$$[C] \text{ Théorique} = A \times [Cl^-] \text{ Réelle} + B$$

$$A = ([C]_{em} - [C]_{ed}) / ([Cl^-]_{em} - [Cl^-]_{ed}) \text{ et } B = [C]_{em} - A [Cl^-]_{em}$$

Avec : em = eau d'origine marine et ed = eau douce continentale.

Les résultats obtenus, ont conduit au digramme (fig.4). L'observation du suivant diagramme montre que les bicarbonates, indiquent des valeurs du delta ionique positives, pouvant indiquer une intrusion marine, cette dernière s'explique par la présence des récifs marins riches en calcaire.

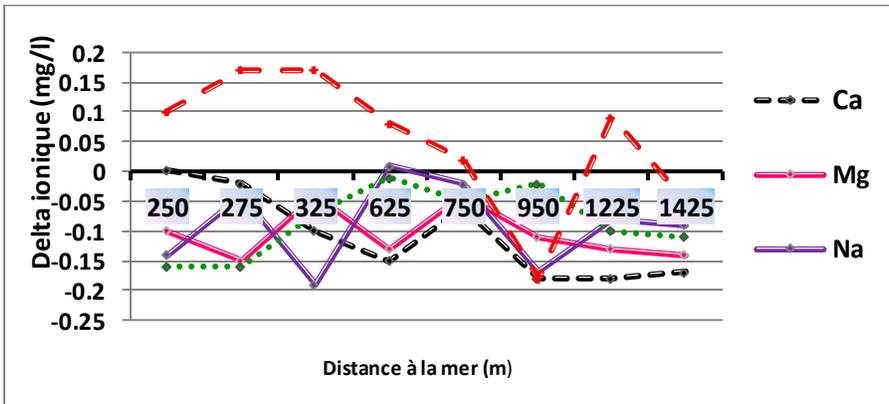


Fig.4 : Variation de la valeur du Delta ionique par rapport à la distance à la mer (plaine de Collo).

5. Vulnérabilité des eaux à la pollution : apports de la méthode GALDIT :

Les paramètres de la méthode GALDIT :

Type de l'aquifère [G] : (Groundwater occurrence)

Conductivité hydraulique [A] : (Aquifer hydraulic conductivity)

Profondeur du plan d'eau [L] : (Depth of groundwater Level above sea),

Distance par rapport à la cote ou la mer [D] : (Distance from the coastline)

Impact de l'état d'intrusion marine existante [I] : (Impact of existing status of seawater intrusion)

L'épaisseur de l'aquifère [T] : (Thickness of the aquifer).

La quantification des paramètres conduit au calcul de l'indice GALDIT, qui est égal la somme des indices obtenus pour chacun des paramètres et pondéré par les poids respectifs de ces derniers. Il est calculé par la formule suivante :

$$GALDIT = (1 \times G) + (3 \times A) + (4 \times L) + (2 \times D) + (1 \times I) + (2 \times T)$$

L'indice de vulnérabilité GALDIT varie entre 13 et 130 et définit les classes de vulnérabilité avec :

-Si I < 30 ==> Non vulnérable (absente).

-Si I = 50 à 70 ==>Vulnérabilité faible.

-Si I = 70 à 90 ==>Vulnérabilité moyenne.

-Si I > 90 ==>Vulnérabilité élevée.

Les indices calculés ont conduit à l'élaboration de la carte de vulnérabilité par la méthode GALDIT. (Fig. 5). L'observation de cette carte, montre que la nappe de Collo est globalement de moyenne vulnérabilité, cette dernière est située au centre de la plaine. La zone de vulnérabilité forte, caractérise les secteurs Nord-Est de la plaine (probable intrusion marine) et le centre de l'Oued Charka. Notons que la vulnérabilité faible se localise au Sud de la plaine.

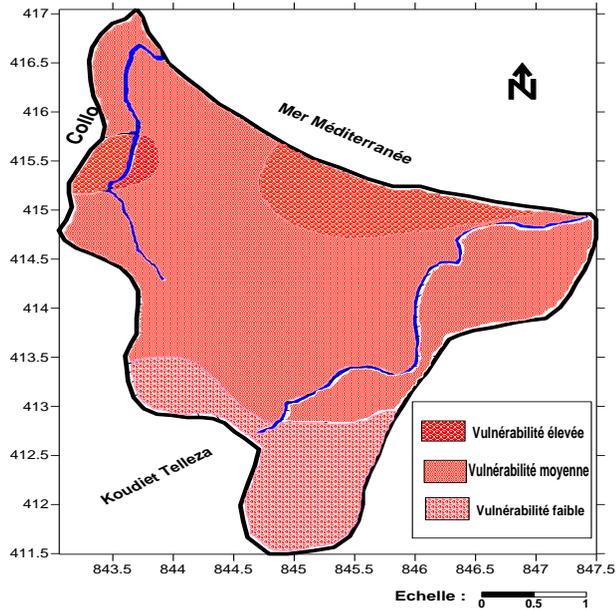


Fig. 5: Carte de vulnérabilité de la nappe de Collo selon la méthode GALDIT.

6. Risque de pollution des eaux au niveau de la plaine de Collo :

- La carte de risque de pollution des eaux de la nappe (fig.6), montre la juxtaposition de trois classes de risque différent:
- le risque Fort : se localise sur les berges des oueds surtout oued Guebli, ce dernier par le biais des échanges avec la nappe, permettra le transfert de polluants. Au niveau de cette zone, la présence des sables perméables accélèrent le risque de pollution.
 - le Risque moyen: caractérise, le centre de la plaine, cette partie de la plaine se caractérise, par :
 - un niveau de la nappe est profond,
 - l'inexistence des facteurs de pollution (industrie, ...). Dans cette zone le retour des eaux d'irrigation par percolation reste la source de pollution.
 - le Risque faible : c'est le cas la zone Sud et Sud-ouest, le toit de la nappe est semi perméable de ce fait le sol devient auto épurateur ce qui empêche la propagation du polluant.

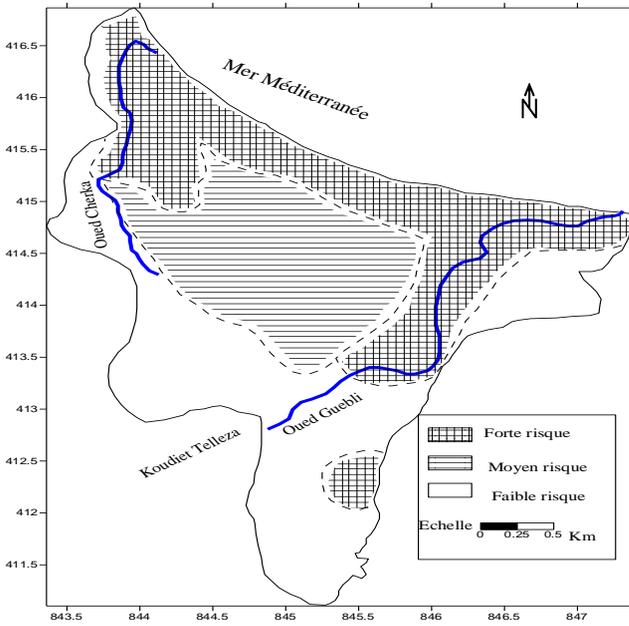


Fig. N° (): Carte de risque de la plaine de Collo

Fig. 6: Carte du risque de pollution de la nappe de Collo.

Conclusion :

Les résultats obtenus par l'utilisation des différentes méthodes (GALDIT, Rapports,), ne peuvent être extrapolés dans le temps mais ils indiquent la situation uniquement au mois de Mars 2016. Dans le détail, on remarque que la méthode des rapports utilisées, indique une absence d'une intrusion marine, cette situation serait tributaire, au fait que durant cette période les pompages sont rares d'où un certain équilibre entre la nappe et la mer.

Les résultats du calcul du delta ionique, donnent des valeurs, montrant une absence de l'intrusion marine, confirmant ainsi le résultat donné par les rapports caractéristiques.

La méthode GALDIT, applicable et appliquée dans les zones littorales, montre dans le cas de la plaine de Collo, révèle que cette plaine se caractérise par une vulnérabilité moyenne, sauf dans la partie Nord-est et au voisinage de l'Oued Charka la vulnérabilité est forte. Nous remarquons que la faible vulnérabilité caractérise le Sud de la plaine.

La carte de risque à la pollution, montre que la partie Nord de la zone d'étude est la zone montrant un risque élevé vis-à-vis de la pollution. En effet dans cette partie la nappe constituée par les formations de cordon sableuse, qui représentent des zones très perméables.

Bibliographie :

- I. Abdeslam, Ch. Fehdi, L. Djabri (2017): Application of drastic method for determining the vulnerability of an alluvial aquifer: Morsott - El Aouinet north east of Algeria: using ARCGIS environment. Energy Procedia 119: Pp308-317. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.114
- Ch.Belkartous, S. Kezzar (2016) : Evaluation de la vulnérabilité des eaux à la pollution par une approche multi-critères : cas de la plaine de Collo (Est Algérien). Master d'hydrogéologie de l'université Badji Mokhtar Annaba.70p.
- M.S Belksir, M Chelghoum (2007): Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de Collo. Mémoire d'ingénieur d'état. Université Annaba. 70p
- N.Bougherira (2015) : Mécanismes de transfert des polluants métalliques dans la vallée de la Meboudja (W. d'Annaba).Thèse Doctorat .Université Annaba. 158p
- M. Boulabeiz (2006) : Evolution des éléments chimiques et évaluation de risque des eaux souterraines à la pollution : Cas de la nappe de Collo, Nord-Est Algérien.Mémoire magister. Université Annaba. 111p.
- M. Amharref, A.s Bernoussi (2007) : Risque de pollution des eaux souterraines : Cas de la plaine du Ghar (Maroc). 7ième édition du congrès international pluridisciplinaire Qualita 2007 – Tanger (Maroc), 20, 21 & 22 Mars (2012). pp. 153-161..
- N. Sedrati, L. Djabri, H. Chaffai (2016): Evaluating groundwater pollution and assessing the vulnerability: case of massive dune of Bouteldja, Algeria. Journal of biodiversity and environmental Sciences (JBES), pp 129-136
- L. Djabri, S Habes, A. Laraba, C Bertrand, A. Hani, H.Zerrouki (2015): LA VULNERABILITE DES NAPPES A LA POLLUTION UN OUTIL D'AIDE A LA PROTECTION DE LA RESSOURCE EN EAU : Cas de la région d'Annaba. Symposium International: Vulnérabilité des littoraux méditerranéens face aux changements environnementaux contemporains. Archipel de Kerkennah du 20 au 24 Octobre 2015. Pp 245-249

Accuracy evaluation of direct runoff estimate using HEC-HMS model within a semi-arid watershed: a case study of Bouregreg River, Morocco

Siham ELARYF¹, Hassan RAHALI¹

I Institut of Scientifique, Mohamed V University, Rabat, +212 537 7745, +212 537 7748, siham.elaryf@gmail.com

Abstract

Hydrological modeling is the commonly used tool to estimate the basin's hydrological response to precipitation and it is an essential and decisive tool in water resources management. In this study, HEC-HMS (Hydrologic Engineering Centre – Hydrologic Modeling System) model is used to estimate the accuracy of the direct runoff in the Bouregreg basin; which is a semi-arid poorly gauged watershed, located in the north of Morocco, using the Soil Conservation Service- Curve Number (SCS- CN) loss method. For model calibration, the Coefficient of determination (R^2), the Nash efficiency (NSE) and the Root mean square error (RMSE) between the observed and simulated data were performed. As results, the calibrated model gives 0.07 and 0.68 for RMSE and NSE respectively, and 0.75 for the (R^2). However, with the initial abstraction and Curve Number parameters' optimization, the performance of the model has proven to be better (RMSE =0.05, NSE =0.91, and R^2 =0.95).It can be concluded that simulation using HEC-HMS can successfully be used to evaluate the future extreme events in the study area.

Key Words: rainfall-runoff accuracy estimation, HEC-HMS, calibration, validation, Bouregreg

Précision de l'estimation du ruissellement direct utilisant le modèle HEC-HMS dans un bassin versant semi-aride: étude de cas du fleuve Bouregreg, Maroc

Résumé

La modélisation hydrologique est l'outil couramment utilisé pour estimer la réponse hydrologique du bassin aux précipitations et constitue un outil essentiel et décisif dans la gestion des ressources en eau. Dans cette étude, le modèle HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Système de modélisation hydrologique) est utilisé pour estimer la précision de l'écoulement direct dans le bassin du Bouregreg; qui est un bassin versant semi-aride faiblement contrôlé, situé dans le nord du Maroc, en utilisant la méthode d'infiltration Soil Conservation Service- Curve Number (SCS- CN). Pour évaluer La performance du modèle, trois test statistiques ; le coefficient de détermination (R^2), l'efficacité de Nash (NSE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre les données observées et simulées ont été calculés.

Les résultats après calibration du modèle indiquent respectivement des valeurs de 0,07 et 0,68 pour l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient d'efficacité Nash-Sutcliffe (NSE) et 0,75 pour le coefficient de détermination (R^2). Cependant, avec l'optimisation des paramètres d'abstraction initiale et de Curve Number, la validation du modèle a été jugée plus que satisfaisante (RMSE = 0,05, NSE = 0,91 et R^2 = 0,95). On peut conclure que la simulation utilisant HEC-HMS peut effectivement être utilisée avec succès pour évaluer les futurs événements extrêmes dans la zone d'étude.

Mots clés : simulation pluie-débit, HEC-HMS, calibration, validation, Bouregreg.

1. INTRODUCTION

In Morocco, floods have been considered as one of the most frequent and critical natural catastrophes. Bouregreg is one of the Moroccan rivers that had been experiencing several floods during the past 100 years. Hydrological modeling allows to predict the hydrologic response to different watershed management practices and to have a better evaluation of the effects of these practices [1]. One evident area of difficulty is runoff estimation. The rainfall-runoff process has a significant role in many aspects of watershed management and especially in the design of flood protection processes [2]. Rainfall and basin parameters are the two main factors that affect the rainfall-runoff process.

The purpose of this study is to estimate rainfall-runoff in the Bouregreg watershed and to verify the applicability of HEC-HMS within the event based modeling framework. The Hydrological modeling is based on appreciative runoff

characteristics and catchment properties using Soil Conservation Service Curve Number loss method; after calibration and validation of the model using historical observed flow during two rainfall events.

HEC-HMS is a lumped quasi or semi-distributed hydrological model, designed to simulate the rainfall–runoff processes for dendritic catchment systems. Its design allows its applicability for solving diverse problems such as flood forecasting and early warnings in diverse regions of the world under different soil and climatic conditions [3,4,5,6,7, 8, 9, 10, 11, 12, 13,14,15 and 16]. It was found spatially and temporally accurate for estimating watershed response in event based simulation as well as simulating different situations in flood prediction and early warnings [17].

2. STUDY AREA

Bouregreg Watershed is located at the north-central part of Morocco (Figure 1). The outlet of the study area is the Aguibat Ezziar station. It extends over an area of 3587.5 km² with an elevation ranging from 99 m to 1612 m. The most important river is Bouregreg (125 km). The climate of the region is semiarid with average yearly precipitations of 400 mm and annual air temperature varying between 11°C for minimum temperatures and 22°C for maximum temperatures [18].

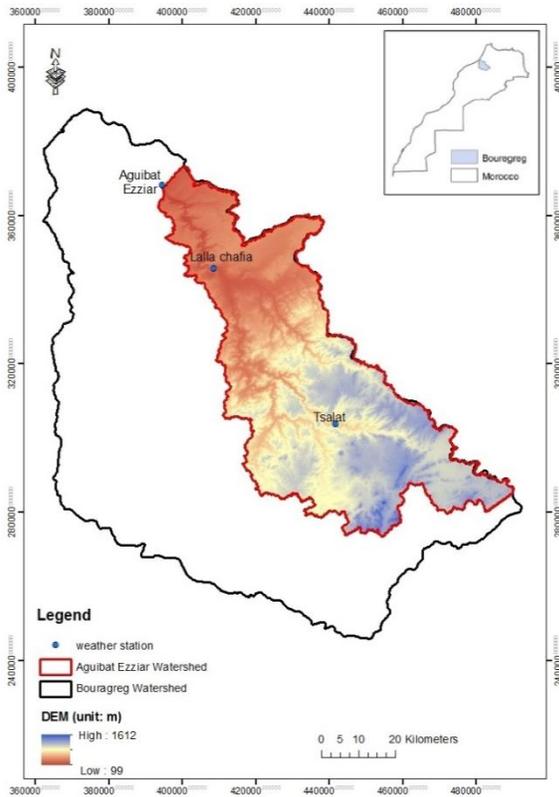


Figure 1- Study area location and topography

3. METHODOLOGY

3.1. Hydrological model

The HEC-HMS is a semi-distributed hydrological model, designed to simulate the rainfall–runoff processes for catchment systems [19 and 20]. Its design allows its applicability in a wide range of geographic areas for solving diverse problems, including large river basin water supply and flood hydrology and small urban or natural catchment runoff [21]. The following computation methods, as shown in the flow diagram (figure 2), were applied to the Bouregreg watershed.

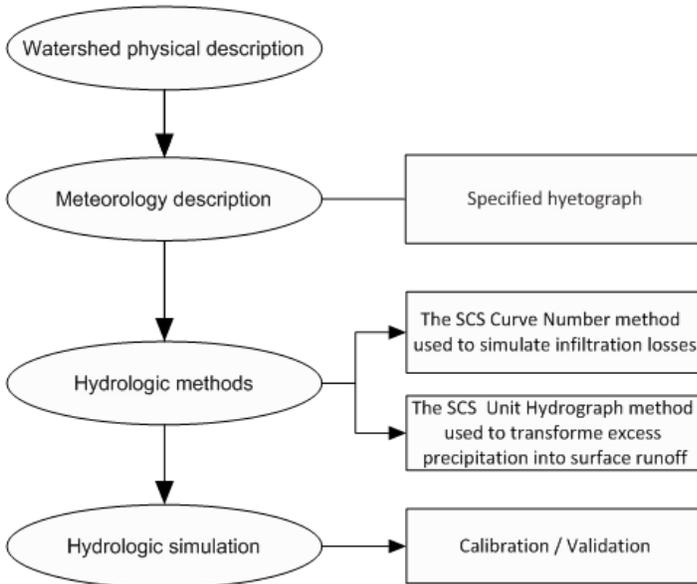


Figure 2- The procedure of Hydrologic simulation

3.2. Basin Model

Sub-basin delineation was conducted using a 30m digital elevation model (DEM). The flow directions were obtained using the HEC-GeoHMS. Seven sub-basins were created based on the location of tributaries in the study area (figure 3). Basin model in HEC-HMS is set up for sub-basin of Bouregreg, which is the object of our study using two hydrologic elements: sub-basin and junction. The sub-basin element handles the infiltration loss and rainfall runoff transformation process. The junction element handles the observed flow data and is mainly used for the comparison of the observed and the simulated flow hydrographs. Surface run-off simulation has been done with different methods: (SCS CN) method was selected to simulate infiltration losses and SCS unit hydrograph method was selected to convert excess rainfall to runoff.

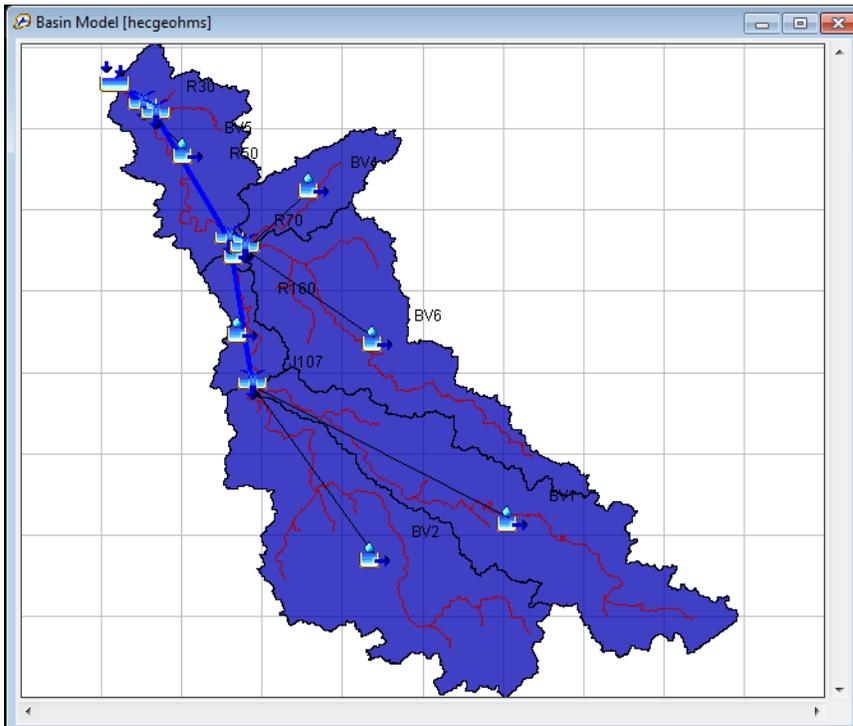


Figure 3- HEC HMS model basin map.

3.3. Meteorological model

The meteorological model was generated after having generated the basin model. The meteorological model in HEC-HMS includes rainfall and actual evaporation methods to be used in the simulations [23]. In this study, the rainfall data used to simulate catchment processes was stored in the meteorological model. Specified Hyetograph method was applied in the model's simulation for rainfall computation.

3.4. Modelapplication

To execute the basin model simulation, the meteorological model and the control specifications, which determine the time pattern for the simulation, were combined. Parameters of each method in HEC-HMS are inputted to the model to obtain the simulated runoff hydrographs. Some of these parameters may be evaluated by field observation and measurement of the basin's characteristics, but for some of them for which observation are impractical, the model is calibrated to derive the best approximation.

The SCS Curve Number method, which is used to handle the infiltration loss in each sub-basin, has three parameters including curve number, initial abstraction and percent impervious area. Percent impervious area is taken as "0 %", since almost no urban settlements are present inside the study area. Therefore, the remaining two parameters (curve number, initial abstraction) of the SCS curve number method were calibrated. The initial values of Curve Number were adopted from Technical Release 55 [24] using an integration of land-use and soil data of each sub-basin, the result is shown in figure 4.

The SCS unit hydrograph method, which is used to model the transformation of precipitation excess into direct surface runoff, has lag time parameter, which is computed using Equation 1 :

$$\text{Lag time} = 0.6 T_c \text{ (in minutes)} \quad (1)$$

Where T_c : Time of Concentration(2)

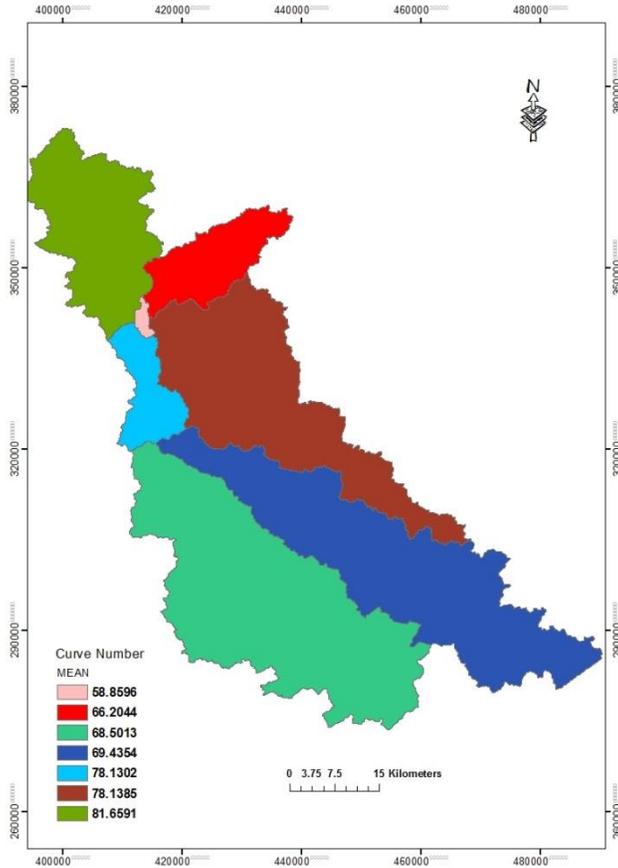


Figure 4- Curve Number values of each sub basin

3.5. Model performance Evaluation

Model prediction performance was evaluated using the Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE) [25 and 26] and the coefficient of determination (R^2). NSE ranges between $-\infty$ and 1.0, with $NSE = 1$ being the optimal value. Values between 0 and 1.0 are generally viewed as acceptable levels of performance, whereas values < 0 indicate that the mean observed value is a better predictor than the simulated value, which points out an unacceptable performance.

NSE was chosen for two major reasons: (1) it is recommended for use by ASCE (1993)[27] and Legates and McCabe (1999)[28], since it quantifies how well a model simulation can predict the outcome variable, the model may be calibrated, but the predicted values of the outcome variable are not inferred from the observed values. And (2) it is very commonly used, which provides extensive information on reported values. Sevati and Dezetter (1991) [29] also found NSE to be the best objective function for reflecting the overall fit of a hydrograph.

The coefficient of determination (R^2) describes the proportion of the variance in measured data explained by the model. R^2 ranges from 0 to 1, with higher values indicating less error variance, and typically values greater than 0.5 are considered acceptable [30 and 31]. In addition, the model performance was evaluated using the Root Mean Square Error (RMSE); RMSE is one of the commonly used error index statistics [32 and 33]. It is commonly accepted that the lower the RMSE the better the model performance.

4. RESULTS & DISCUSSION

4.1. Calibration of the model

To calibrate the model, the rainfall runoff data of November 2005, recorded at the Aguibat Ezziar stations, was selected and the initials parameters were optimized using the optimization tools available in HEC-HMS. Using optimized parameters, the runoff hydrograph was simulated and then compared to the observed runoff hydrographs once before optimization and after optimization (Figure 5). It is shown that the hydrograph obtained with optimized parameters gave close values to the observed hydrograph.

The statistical test of error functions gave values of RMSE between the observed and simulated data of 0.07. Similarly values obtained for the NSE and the R^2 are 0.68 and 0.75 respectively. However after optimization, the RMSE value got reduced to 0.05, and the NSE and the R^2 values raised to 0.81 and 0.82 respectively. This confirms that even with the quasi-lumped model, we can get a pretty good approximation of the observed streamflows.

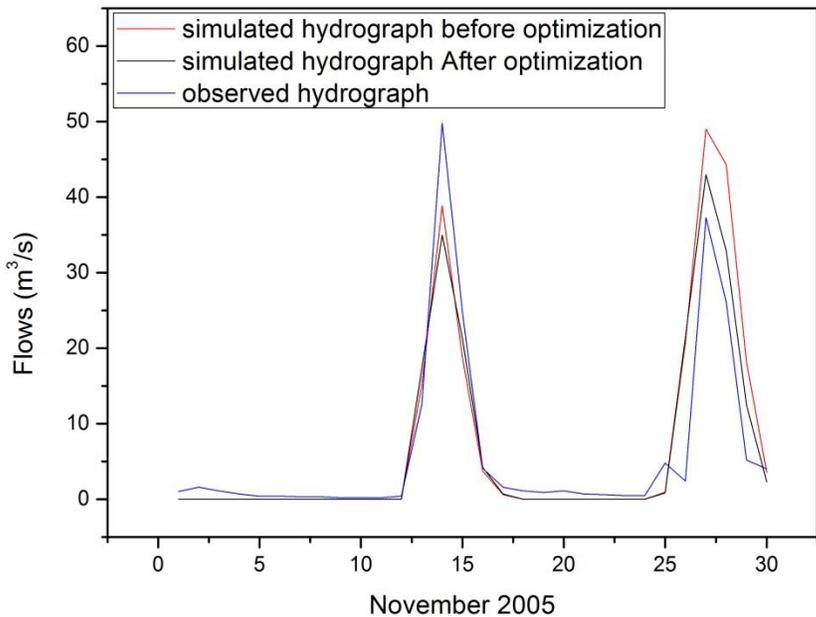


Figure 5- Comparison of runoff hydrograph for calibration event

4.2. Validation of the model

Model validation consists in running a model using input parameters measured or determined during the calibration process. According to Refsgaard (1997) [34], model validation is the practice of proving that a given site-specific model is capable of creating "sufficiently accurate" simulations,

For validating the model, the rainfall runoff data of November 1980 and October 2010, recorded at the Aguibat Ezziar stations, were selected. The runoff hydrographs were simulated by the calibrated model using optimized parameters are presented in Figure 6. This figure reveals that the simulated runoff hydrograph is close to the observed one. Value of RMSE, NSE and R^2 are estimated to be 0.05, 0.91 and 0.95, respectively. Thus, statistical tests of error functions justify the validation of the model for simulating the runoff hydrograph in this study.

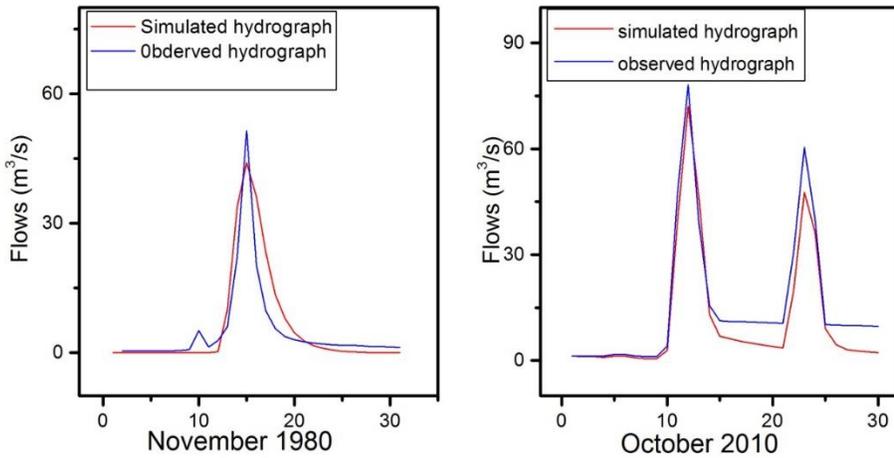


Figure 6- Comparison of runoff hydrograph for the validation events

Table I- Error function computed for calibration and validation

	RMSE		R ²		NSE	
	Before optimization	After optimization	Before optimization	After optimization	Before optimization	After optimization
Calibration	0.07	0.05	0.75	0.82	0.68	0.81
Validation		0.05		0.95		0.91

Model validation results emphasize a perfect match between the modeled and observed time series. Thus, good agreement between simulations and field data has been achieved in the event hydrologic modeling validation. This highlights the ability of the event model in HEC-HMS to capture sub-basin-specific features. Therefore, the performance of the model under current scenario was very successful and the calibrated parameters can be recommended as input values for other Sub-basin having same catchment proprieties and may be also used for predictability studies in other part of the Bouregreg River basin.

5. CONCLUSION

In this study, surface run-off simulation was conducted with Soil Conservation Service Curve Number (SCS CN) loss method using HEC-HMS hydrological model. This model was run, calibrated and validated during two events and their output flood hydrographs were examined and compared with observed data. The coefficient of determination (R²), The Nash efficiency (NSE) and the Root Mean Square Error (RMSE) were used as the overall measure of accuracy, where a low RMSE indicated a good accuracy and a high NSE and R² indicated a great accuracy.

This study gives satisfactory results for simulating the rainfall-runoff process; it shows that HEC-HMS can predict the storm hydrograph in Bouregreg basin with a higher precision determined by a NSE of 0.91, R² of 0.95 and RMSE as 0.05. It can be concluded that the estimation of direct runoff using HEC-HMS can be successfully performed and could be useful to evaluate the future extreme events and predict the risk of flooding.

References:

1. Kadam, A. S. Event based rainfall-runoff simulation using HEC-HMS model, Unpublished P. G. thesis submitted to Deptt. of Soil and water Conservation Engg., CAET, Dr. PDKV, Akola (2011),
2. H. Wheater, A.J. Jakeman, and K. Beven. Progress and direction in rainfall-runoff modeling. In: modeling change in Environment System. Chichester; Wiley.(1993).
3. N. A., Abed, F. Abdulla, and A. A. Khyarah, GIS-hydrological models for managing water resources in the Zarqa River basin, *Environmental Geology*, 47 (2005) 405–411.
4. M. L., Anderson, Z. Q. Chen, L. Kavvas, and A. Feldman. Coupling HEC-HMS with Atmospheric Models for Prediction of Watershed Runoff, *Journal of Hydrologic Engineering*, 7 (2002) 312-318.
5. H. E., Clay, C. Welty, and R. G. Traver, Watershed-Scale Evaluation of a System of Storm Water Detention Basins, *Journal of Hydrologic Engineering*, 10, (2005), 237-242.
6. H. H.Hu, L. R., Kreyborg, B. J. Doeing, , K. S. Baron, and S.A. Jutila, Gridded Snowmelt and Rainfall-Runoff CWMS Hydrologic Modeling of the Red River of the North Basin, *Journal of Hydrologic Engineering*, 1, (2006) 91-100.
7. M. R. Knebl, Z. L., Yang, K. Hutchison, and D. R. Maidment, Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event, *Journal of Environmental Management*, 75, 4 (2005) 325–336.
8. C. McColl and G. Aggett. Land-use forecasting and hydrologic model integration for improved land-use decision support, *Journal of Environmental Management*, 84(4), (2006), 494–512.
9. Z. Yusop, , C.H. Chan,, and A. Katimon, Runoff characteristics and application of HEC-HMS for modelling stormflow hydrograph in an oil palm catchment, *Water Science and Technology*, 56(8) (2007) 41–48.
10. M. K. Yener, A. U. Sorman, A. A. Sorman, A. Sensoy, and T. Gezgin, Modeling Studies with HEC-HMS And Runoff Scenarios in Yuvacik Basin, Turkiye, *International Congress on River Basin Management*, (2012) 621-634.
11. S. Arekhi, Runoff modeling by HEC-HMS Model (Case Study: Kan watershed, Iran), *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 4(23) (2012) 1807-1811.
12. A. Majidi, and K. Shahedi, Simulation of Rainfall-Runoff Process Using Green-Ampt Method and HEC-HMS Model (Case Study: Abnama Watershed, Iran), *International Journal of Hydraulic Engineering*, 1(1) (2012) 5-9.
13. D. Halwatura, and M. M. M. Najjim, Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment, *Environmental Modeling and Software*, 46 (2013) 155-162.
14. A. Majidi, and H. Vagharfard, Surface Run-off Simulation with Two Methods Using HEC-HMS Model (Case Study: Abnama Watershed, Iran), *Current Advances in Environmental Science*, 1(1) (2013) 7-11.
15. M. Ali, S. J. Khan, I. Aslam, and Z. Khan, "Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan," *Landsc. Urban Plan.*, vol. 102, no. 4 (Sep. 2011) 271–279,
16. K. Dzubakova, Rainfall- runoff modeling: Its development, classification and possible applications. *ACTA Geographical Univerciti Comeniana*, 54, (2010) NO. 2, pp 173-181.
17. C.M, Choudharia, B.E. Narkhede and S.K Mahajan, Methoding and Simulation of LM 6 Sand Casting for Defect Minimization with its Experimental Validation, *Procedia Engineering*, Volume 97 (2014) 1145-1154,
18. A. Fadil, H. Rhinane, A. Kaoukaya, Y. Kharchaf and O.B. Alami, Hydrologic Modeling of the Bouregreg Watershed (Morocco) Using GIS and SWAT Model, *Journal of Geographic Information System*, 3, (2011), 279-289.
19. USACE: Technical Workshop on Watershed Modeling with HECHMS, US Army Corps of Engineers, California Water and Environmental Modeling Forum, Sacramento, California, 2008.
20. W. Scharffenberg, and M, Fleming, Hydrologic modeling system HEC-HMS v3.2 user's manual, USACE-HEC, Davis, USA. 2010.
21. V. Merwade, Hydrologic Modeling using HEC-HMS, School of Civil Engineering, Purdue University, Purdue, USA. 2007
22. D. K., Yawson, V. M., Kongo, and R. K Kachroo, Application of linear and nonlinear techniques in river flow forecasting in the Kilombero River basin, Tanzania, *Hydrolog. Sci. J.*, 50 (2005). 783–796,

23. K. V.Arbind, K. J. Madan and, K. M. Rajesh. Evaluation of HECHMS and WEPP for simulating watershed runoff using remote sensing and geographical information system, *Paddy Water Environ.*, 8 (2010) 131–144,
24. USDA-NRCS, *Urban Hydrology for Small Watersheds*. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, Washington, DC., USA. 1986.
25. JE, Nash and JV.Sutcliffe. River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: (1970) 282–290.
26. J. Miao, D. Guo, J. Zhang, Q. Huang, G. Qin, X. Zhang, et al. Targeted mutagenesis in rice using CRISPR-Cas system *Cell Res*, 23 (2013), pp. 1233–1236.
27. ASCE, Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irrigation Drainage Eng.* 119(3) (1993) 429-442.
28. D.R. Legates, G.J. McCabe, Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.* 1999, 35, 233–241.
29. E., Sevat and A. Dezetter. Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modeling in a Sudanese savannah area. *Hydrological Sci. J.*36 (4) (1991) 307-330.
30. C. Santhi, J.G Arnold, J.R Williams, W.A. Dugas, R. Srinivasan, L.M. Hauck, Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 37 (2001) 1169–1188.
31. M. W. Van Liew, J. G. Arnold, and J. D. Garbrecht. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Trans. ASAE* 46(6) (2003) 1539-1551.
32. T. W. Chu, and A. Shirmohammadi. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. *Trans. ASAE* 47(4) (2004) 1057-1073.
33. G. G. Vazquez-Amabile, and B. A. Engel. Use of SWAT to compute groundwater table depth and streamflow in the Muscatatuck River watershed. *Trans. ASAE* 48(3) (2005) 991-1003.
34. J. C. Refsgaard. Parameterisation calibration, and validation of distributed hydrological models. *J. Hydrology* 198(1) (1997) 69-97.

Quelques aspects de la propagation des crues de références dans le bassin de Derna : cas de la crue d'hiver de 1987 (Bassin d'Oum Er-Rbia, Maroc)

Lahlou Nadia¹, El Ghachi Mohamed², El Khalki Yahya³

1-Doctorante, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Béni Mellal-Maroc nadialahlou889@yahoo.fr

2-Professeur habilité, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Béni Mellal-Maroc

3-Professeur de l'enseignement supérieur, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Béni Mellal

Résumé :

Difficile d'empêcher les inondations de se produire, mais il est possible de s'y préparer. La connaissance des phénomènes des crues, leurs genèses et leurs propagations sont le point de départ dans la gestion du risque d'inondation. Il faut reconnaître que, la propagation des ondes de crues, a fait l'objet de très nombreuses études, est un problème assez complexe et fastidieux, du fait des nombreuses données hydrologiques et hydrauliques.

Au Maroc, caractérisé par son climat semi-aride, les crues se caractérisent par des montées d'eau qui ne cessent de provoquer de plus en plus des dégâts. Plusieurs zones ont été profondément affectées, par ce type d'aléa, engendrant des dégâts particulièrement importants.

Il est situé dans le grand bassin d'Oum Er-Rbia (deuxième grand bassin à l'échelle du Maroc). Le bassin de Derna, s'étend sur une superficie de 520 km². Il est équipé par deux stations hydrométriques, Taghzirt en amont et la station de Moulay Bouzekri en aval. Ce bassin couvre deux unités topographiques distinctes, à savoir, une partie de la plaine de Tadla, le Moyen Atlas Méridional, et une partie du Haut Atlas Central, dont les altitudes, sont comprises entre, 2184 m et 417 m.

Dans ce travail, on a cherché à avoir une vision globale du phénomène des crues dans le bassin de Derna, par la connaissance approchée du rôle de quelques paramètres des cours d'eau et des crues de références dans les deux stations hydrométriques 1970-2015. L'utilisation de ces paramètres en plus des données des débits instantanées dans des équations simplifiées de propagation a été l'objectif de cette étude. Nous proposons également une gamme de méthodes hydrologiques pour l'identification, l'extraction et l'analyse des crues de références.

Mots-clés : Propagation – Ondes de crues - crues de références – Débits instantanés -Analyse statistique – Bassin de DERNA, Oued Oum Er Rbia, Maroc.

Some aspects of the spread of reference floods in the Derna catchment: case of the winter flood of 1987 (Catchment of Oum Er-Rbia, Morocco)

Abstract :

Difficult to prevent floods from happening, but it is possible to prepare for it. The knowledge of flood phenomena, their genesis and their propagation are the starting point in risk management. It must be recognized that, the propagation of flood waves, has been the subject of many studies, is a problem quite complex and tedious, because of the numerous hydrological and hydraulic data. In Morocco, the floods are characterized by the rising of water, which constantly causes more and more damage. Many areas have been deeply affected by this type of hazard, causing particularly significant damage. It is located in the Great catchment of Oum Er-Rbia (second largest catchment on the scale of Morocco). The Derna catchment covers an area of 520 km². It is equipped with two hydrometric stations, Taghzirt upstream and the Moulay Bouzekri downstream station. This catchment covers two distinct topographic units, namely, part of the Tadla Plain, the southern Middle Atlas, and part of the High Central Atlas, with altitudes between, 2184 m and 417 m. In this work, we sought to have a global view of the flood phenomenon in the Derna catchment, by the approximate knowledge of the role of some river parameters and reference floods in the two hydrometric stations 1970-2015. The use of these parameters in addition to the data of the instantaneous flows in simplified equations of propagation was the objective of this study. We also propose a range of hydrological methods for the identification, extraction and analysis of reference floods.

Key Words: Propagation – Flood waves-reference floods – instantaneous flows-statistical analysis – DERNA catchment, Oued Oum Er Rbia, Morocco.

I. INTRODUCTION:

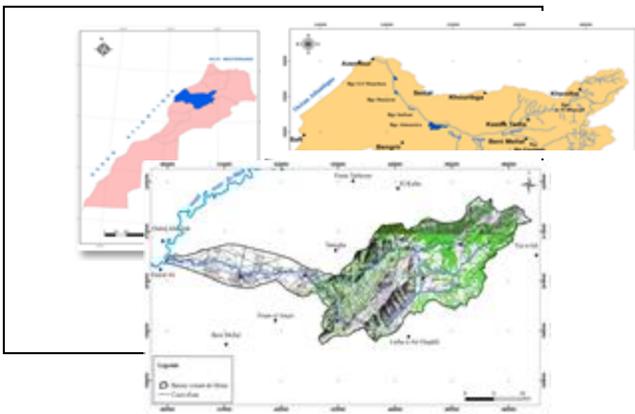
Les extrêmes hydrologiques, posent un grand problème aux citoyens. Si le manque d'eau conduit à l'apparition des étiages ainsi qu'à la dégradation de la qualité des eaux, l'intensité pluviométrique provoque des inondations parfois avec un caractère catastrophique. Souvent dans les montagnes, les crues constituent le grand défi de cette population, leur

occurrence pose souvent des problèmes aux gestionnaires surtout dans les bassins non aménagés. Pour mieux cerner ce phénomène, nous nous penchons sur l'étude de la propagation des crues dans un bassin très influencé par les actions anthropiques.

À travers ce papier nous voulons montrer l'importance de ces phénomènes des crues, surtout les crues de références enregistrées dans deux stations hydrométriques. L'objectif principal est de comprendre leur propagation, déterminer leurs mécanismes et leurs impacts sur les milieux. La problématique s'articule ainsi autour du fonctionnement hydrologique, d'un bassin versant où les influences anthropiques sont variées dans les différentes parties du bassin versant, amont, médiane et aval. L'étude a été basée sur l'analyse des débits instantanés, pour une longue série d'observations (1970-2015), des deux stations hydrométriques, Taghzirt en amont et la station de Moulay Bouzekri en aval. Nous proposons également une gamme de méthodes hydrologiques pour l'identification, l'extraction et l'analyse des crues de références.

I-Présentation du domaine d'étude :

Le bassin de Derna, s'étend sur une superficie de 520 km². Ce bassin couvre deux unités topographiques distinctes, à savoir, une partie de la plaine de Tadla, le Moyen Atlas Méridional, et une partie du Haut Atlas Central, dont les altitudes, sont comprises entre, 2184 m et 417 m.



Le bassin versant de Oued Derna, alimenté par plusieurs affluents, comme Assif Naour, Assif N'oughbar, Assif N'oughzif, Aqqa N'oumhars et Assif N'ouhancal. Il est caractérisé par un climat semi-aride et continental [1]. Dominé par des zones semi-perméables, situées surtout dans les parties de DIR et l'amont du bassin, tandis que la zone perméable est située dans la plaine de Tadla. Il est considéré comme un modèle de rivières méditerranéennes influencé relativement par le karst, ce rôle relatif revient d'un côté sur le régime hydrologique du bassin, et la régression des régimes climatiques de l'Atlas de Béni Mellal sur l'autre côté.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

La présente méthode est un élément essentiel pour les études hydrologiques extrêmes (crues), car elle permet une bonne connaissance de ce phénomène et mène à une appréciation scientifique globale de l'état des cours d'eau pendant ces phases hydrologiques. Complétées par les bases hydrologiques qui ont été élaborées en parallèle, nous souhaitons qu'elle soit largement appliquée pour comprendre le comportement des cours d'eau lors de situations critiques. Afin de comprendre le phénomène de propagation des crues, l'analyse statistique des données hydrométriques, constitue les outils principaux de ce travail sur les données des débits instantanés fournies par les deux stations, Taghzirt en amont et Moulay Bouzekri en aval (1970-2015).

I-Extraction des crues de références :

L'extraction des crues de références est une approche hydrologique qui s'intéresse à l'identification des crues de références dans un bassin. C'est une approche qui vise donc, à donner une vue d'ensemble des atteintes importantes pour le régime d'écoulement dans bassin lors d'une phase des montées des eaux, à en quantifier les effets et à apprécier puis représenter les crues hydrologiques qui en résultent.

En termes d'application, plusieurs critères ont été retenus pour l'extraction de la crue de références de chaque année.

- Le débit de pointe la plus importante enregistré dans l'année
- L'homogénéité de débit de pointe entre les deux stations (amont/aval)
- Type de la crue (rapide/lente)

- Forme de la crue (simple/complexe)
- Durée de la crue (longue/court)

Classification des crues de références est une méthode qui donne comme résultat une indication de l'état hydrologique du réseau hydrographique d'un bassin versant en se référant aux différentes apparitions des crues. La présente méthode est une aide à l'identification du comportement hydrologique d'une rivière lors des phases des hautes eaux. Dans le cadre de notre application sur le bassin de Derna, nous avons déterminé les crues de référence par saison climatique et hydrologique : crues des basses eaux (été), crues de fin de basses eaux (automne), crues de hautes eaux (hiver) et crues de fin de hautes eaux (printemps).[2]

2-Propagation des crues:

Le phénomène de propagation d'une crue, peut-être assimilée à la translation d'une onde qui se déforme au cours de cette translation, en fonction du frottement et du stockage dans le cours d'eau. En effet, on observe que cette onde, tout en conservant son volume, présente une certaine réduction du débit de pointe, et met un certain temps pour parcourir le bief. L'évolution des débits de crue dans le cours d'eaux en fonction du temps forme ce qu'on appelle une onde de crue, cette onde se propageant d'amont vers l'aval.

Ainsi, la propagation est un phénomène physique général, mais qui se présente, à l'état pur, dans un nombre assez limité de situations hydrologiques. En effet, le poids relatif du phénomène de propagation, face l'ensemble des autres processus physiques concernés. [3]

Dans cette contribution nous mettons l'accent plus sur la crue de l'hiver de 1987 pour déterminer les processus de la crue et surtout calculer le temps de sa propagation de l'amont vers l'aval pour comprendre à la fin sa genèse, déterminer son mécanisme et enfin son impact sur le milieu.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

I-Extraction des crues de références du bassin versant de l'Oued Derna (1970-2015):

En termes des résultats, on dénombre 46 crues de référence pour chaque station pour la période (1970-2015) pour deux stations Taghzirt et Moulay Bouzekri. On note que, le maximum débit de pointe à Taghzirt peut atteindre 6712 m³/s enregistrés en mars 2010, quant au minimum absolu de ces maximums, il peut descendre jusqu'à 1,3 m³/s en 1983. Par contre la station de Moulay Bouzekri, a enregistré le maximum de ces débits de pointe en 1987 avec un débit instantané de 416 m³/s

Table I : Les cures de références de la station de Taghzirt et Moulay Bouzekri (1970-2015)

Années	Stations	Périodes	Q de pointe			
1970	Taghzirt	30/12/70 8:00	13,3	001	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	31/12/70 21:30		011	0012 001515	automne B ykh
1971	Taghzirt	30/12/70 8:00	86,7	041	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	2/2/71 1:00	172,7	101	0012 001515	automne B ykh
1972	Taghzirt	16/12/72 8:00	59,1	130	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	24/12/72 16:00	120	130	0012 001515	hiverage T
1973	Taghzirt	28/7/73 20:00	33	131	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	23/12/73 8:00	51,5	130	0012 001515	hiverage T
1974	Taghzirt	26/5/74 14:00	17,2	131	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	17/10/74 8:00	51,5	131	0012 001515	hiverage T
1975	Taghzirt	26/5/75 14:00	22,7	131	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	6/6/75 11:00	51,8	131	0012 001515	hiverage T
1977	Taghzirt	22/7/77 8:00	71,9	052	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	29/7/77 17:30	80	130	0012 001515	hiverage T
1978	Taghzirt	21/7/78 20:00	82,6	020	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	11/07/78 11:30	95,6	131	0012 001515	hiverage T
1979	Taghzirt	13/2/79 8:00	139	131	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	16/2/79 14:00	139	131	0012 001515	hiverage T
1980	Taghzirt	27/1/80 8:00	40,6	021	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	20/1/80 16:00	146	081	0012 001515	automne B ykh
1986	Taghzirt	27/2/86 22:00	56	09	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	28/2/86 8:00	17,7	130	0012 001515	hiverage T
1987	Taghzirt	20/2/87 20:00	258	130	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	3/2/87 8:00	416	130	0012 001515	hiverage T
1989	Taghzirt	2/3/89 8:00	165	130	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	2/4/89 20:00	191	130	0012 001515	hiverage T
1990	Taghzirt	1/4/90 14:00	129	130	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	8/2/90 16:00	104	130	0012 001515	hiverage T
1991	Taghzirt	1/10/91 8:00	79	091	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	2/9/91 8:00	100	081	0012 001515	automne B ykh
1992	Taghzirt	17/6/92 19:00	176,9	130	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	24/6/92 12:00	139	130	0012 001515	hiverage T
1993	Taghzirt	17/12/93 20:00	74,4	130	0012 001515	hiverage T
	My Bouzekria	10/1/94 20:00	115	130	0012 001515	hiverage T

Parmi les questions qui nous occupent, comment se déroulent ses crues (complexes ou simples) ? Quelles sont leur vitesse et leurs propagations. Enfin, quels sont leurs effets sur le cours d'eau ? Donc nous proposons pour répondre à ces questions l'analyse de quelques événements qui se sont produits dans le bassin de Derna.

2- Analyse la crue de l'hiver de 1987 :

2-1- Présentation des crues étudiées :

L'analyse se rapporte à la crue de référence de 1987, enregistré par les deux stations de Taghzirt en amont et Mouly Bouzekri en aval :

Table 2 : La crue d'octobre 1987 dans les deux stations du bassin de Derna en m3/s

Année	Station	Périodes	Q de pointe
1987	Taghzirt	10/02/1987 08:00	258
		08/03/1987 00:00	
	Moulay Bouzekri	10/02/1987 16:00	416
		10/03/1987 20:00	

Elles appartiennent à deux types de crues, survenues en période des hautes eaux (hivernales), elles surviennent lorsque le ruissellement est maximum.

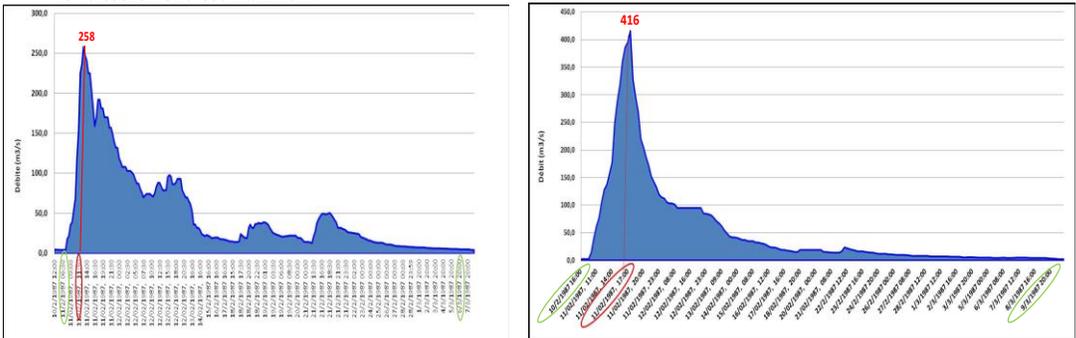


Fig. 4 : Hydrogramme de la crue d'hiver de 1987 au niveau de la station de Taghzirt et Moulay bouzekri

Dans la station de Taghzirt, la figure 4, représente la crue de référence de l'année 1987 produite au niveau de la station Taghzirt, qui a enregistré un grand débit en hiver et exactement en mois de février. La crue de février /mars 1987, se déroule durant la période des hautes eaux entre 10/02/1987 et 08/03/1987. Dans la station de Moulay Bouzekri, la figure 4, représente la crue de février /mars 1987, elle se déroule durant la période des hautes eaux entre 10/02/1987 et 08/03/1987.

2-2- Les caractéristiques de la crue de références étudiées :

Table 3 : les caractéristiques de la crue de référence de 1987

Année	Station	Q de pointe	Date de la montée	Durée (l/h)	Temps de montée (h)	Temps de descente (h)	Saison		Forme	Type
							Climatique	Hydrologique		
1987	Taghzirt	258	11/02/1987 11:30	25 jours 12 h	24 h	588 h	hiver	hautes eaux	complexe	longue et lente
	Moulay Bouzekri	416	11/02/1987 17:30	28 jours 04 h	26 h	650 h	hiver	hautes eaux	simple	longue et lente

Les caractéristiques de la crue hivernale de 1987 sont présentées dans le tableau 2. On retient que, dans la station de Taghzirt, la crue a une forme complexe, composite avec 9 pics. Caractérisée par sa longue durée, 25 jours et 12 heures en total, 24 heures en montée et 588 heures en descente, donc la décrue a été lente, car la durée de descente est supérieure à 9 jours.

À l'aval du bassin de Derna, la station de Moulay Bouzekri, enregistrée la crue la plus forte à un débit de pointe qui atteint 416 m³/s à 17h30 minutes, de 11/02/87 avec un intervalle de 6h par rapport au débit de pointe de station de Taghzirt en amont. Elle est une forme simple, caractérisée aussi par sa longue durée, 26 jours et 04 heures en total 26 heures en montée et 650 heures en descente.

3- Propagation de l'onde de la crue d'hiver de 1987:

Le calcul des temps de propagation de la crue se fait aussi à partir des débits instantanés. Le tableau n°3 et la figure 5, comportent les résultats de la propagation de la crue :

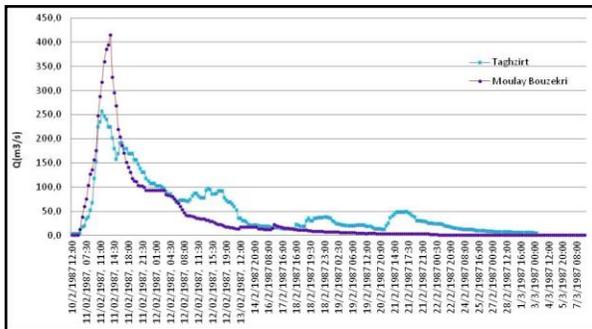


Fig. 5 : Hydrogramme de la crue 1987 à Taghzirt et Moulay Bouzekri

Table. 3 : Propagation de la crue étudiée

Année	Station	Q de pointe	Date de la pointe de crue temps en (heure/minute)	Nombre d'heure de propagation	Temps de propagation	Ecart de débit amont/aval (m ³ /s)
1987	Taghzirt	258	11/02/1987 11:30	6 h	00 jours 06 heures et 00 mn	158
	Moulay Bouzekri	416	11/02/1987 17:30			

On note que, la propagation est relativement rapide. Le déplacement de l'onde de crue est très visible, il faut effectuer 6 heures, entre amont et aval du bassin. Les débits de pointe, passent de 258 m³/s de l'amont du bassin à 416 m³/s à l'aval du bassin, avec une fréquence de 158 m³/s. les calculs effectués au niveau du temps de propagation des ondes de crue montrent que leur déplacement est très variable et dépend essentiellement des caractéristiques de l'épisode de crue [2]

CONCLUSION :

La plupart des crues de référence dans le bassin de l'Oued Derna, apparaissent en hiver et en printemps, elles ont une forme complexe, caractérisée par plusieurs pics et durent longtemps. Les crues simples sont courtes et rapides. Donc il est important de comprendre que l'analyse de la crue de 1987, considéré comme la crue de référence la plus représentatif dans un bassin très influencé par les actions anthropiques, pour déterminer les processus de la crue et calculer le temps de sa propagation de l'amont vers l'aval, pour comprendre leur genèse, déterminer leur mécanisme et leur impact sur le milieu.

Référence :

- [1] L. Emberger, la position phytogéographique du Maroc dans l'ensemble Méditerranéen. (C.N.R.S) 12, pp 1-15, (1964)
- [2] M. El Ghachi, la seille : un système fluvial anthropisé (Lorraine, France) Tome 1, Thèse nationale, Université Paul Verlaine de METZ, France, 344p (2007).
- [3] M. Baptista, contribution à l'étude de la propagation de crues en hydrologie, Thèse de doctorat, techniques de l'environnement. Centre National du machinisme agricole, du génie Rural, Des eaux et des forêts, Division, Hydrologique. 306p (1990).
- [4] M. Roche, hydrologie de surface, Gauthier-Villars ORSTOM, Paris (431 p).
- [5] D. Lorraine, étude hydrologique des crues du bassin français de la Moselle sur la période 1970-1991 - AREA et CEGUM, 35p (1996).
- [6] J.-P. Bravard, le temps et l'espace dans les systèmes fluviaux, deux dimensions spécifiques de l'approche géomorphologique. U. F. R de Géographie, Université de Paris-Sorbonne, n° 599, 1998, pp. 3-15, (1998).
- [7] J.-P. Laborde, Éléments d'hydrologie de surface. Tome 2 : critique et analyse statistique des données hydrologiques. École .Nat .Sup .de Géol .Appli/Nat .polytech de Lorraine, 95p, (2000).

Gestion irrationnelle des ressources en eau dans le Sud algérien (Cas de la vallée de M'Zab)

Rachid ZEGAIT¹, Boualem REMINI ²,Chikh OULED BELKHIR ³

¹ Laboratoire de Génie de l'Eau et Environnement,
ENSH, R.N 29 Guerrouaou B.P 31 Blida, (09000), Algérie,

E-mail : zegait.rachid@gmail.com

² Université Saad Dahleb –Blida- Algérie

³Université de Ghardaïa- Algérie

Résumé

La nappe alluviale de la région de M'Zab a reçu dans les dernières décennies de plus en plus d'eaux d'infiltration provenant des rejets d'eaux usées et de l'irrigation (fosses septiques, lessivage des sols). Par ailleurs, sous l'effet combiné de la baisse des prélèvements d'eau et de l'augmentation de la recharge, cette nappe avait tendance à remonter fortement dans certaines zones basses telles que les palmeraies, au point que les cultures dépérissaient (asphyxie des palmiers)

En effet, l'objectif de ce travail est l'étude de l'impact des excédents hydrique des rejets eaux usées et de l'irrigation sur l'environnement de la vallée de la région et l'étude de mécanisme de recharge de la nappe superficielle à travers la quantification de la part des eaux usées et d'irrigation afin d'identifier leur source et le degré de pollution qui peut être transmettre à la nappe.

Mots clés : Eau usée, Rejets, Irrigation, Pollution, Recharge de la nappe, Environnement

Irrational management of water resources in southern Algeria (Case of M'Zab Valley)

Abstract

The alluvial aquifer of the M'Zab region has received in recent decades more and more seepage water from wastewater discharges and irrigation (septic tanks, soil leaching). under the combined effect of lower water withdrawals and increased recharge, this water table tended to rise sharply in some lowland areas such as palm groves, to the point where crops were wasting away (asphyxiation of palms)

Indeed, the objective of this work is the study of the impact of water surpluses of wastewater discharges and irrigation on the environment of the valley of the region and the study of mechanism of recharge of the aquifer. superficial through the quantification of waste water and irrigation to identify their source and the degree of pollution that can be transmitted to the groundwater

Key Words: Wastewater, Discharges, Irrigation, Pollution, Groundwater recharge, Environment.

Introduction

La vallée du M'Zab, située dans le Sud algérien est soumise à un climat saharien aride. La nappe superficielle d'infero-flux (phréatique) ainsi que la nappe profonde du continental intercalaire (CI) constituent les principales ressources en eau de la région.

L'accroissement démographique et le développement agro-industriel ont engendré une très forte demande en eau, nécessitant une grande mobilisation de cette ressource. À cet effet, les eaux souterraines dans les zones arides représentent les principales ressources en eau exploitables. En raison de leur rareté ainsi que la multiplication des sources de pollution (eaux usées et industrielles, décharges brutes, engrais chimique), ces ressources nécessitent un certain degré de protection et préservation.

L'utilisation irrationnelle des ressources en eau souterraine notamment dans les régions bien pourvues en eau peut engendrer des conséquences négatives sur le milieu. En effet, l'accroissement rapide de l'utilisation de ces ressources sans une politique de planification et de gestion peut créer une situation grave pouvant avoir des conséquences néfastes et irréversibles.

Le respect de cette politique est le seul moyen de préserver cette précieuse ressource. L'accroissement important des débits utilisés pour l'irrigation, associés, surtout, à un usage souvent mal raisonné des ressources hydriques, a conduit à un gaspillage important, faisant apparaître des quantités non négligeables d'eaux excédentaires qui ont fortement perturbé les équilibres naturels dans les milieux oasiens, milieux déjà très fragiles.

Actuellement les palmeraies connaissent d'énormes problèmes liés directement aux conditions naturelles de la région telles que la morphologie du terrain, la forte évaporation, la salinité des eaux et des sols ainsi qu'une mauvaise exploitation hydro-agricole (travaux cultureux et entretien, mode d'irrigation). Ces contraintes conjuguées à une utilisation abusive des eaux profondes pour l'irrigation par Submersion se sont traduites par la remontée de la nappe phréatique. Ces milieux sont devenus aujourd'hui malades de trop d'eau [1], la manifestation la plus apparente est celle des néoformations blanchâtres des sels même parfois de croûtes à la surface du sol [2],

1. Localisation de la zone d'étude

La région de M'Zab, située à 600 km au sud de la capitale est considérée comme l'une des grandes oasis de Sahara algérien, administrativement, elle fait partie de la wilaya de Ghardaïa, regroupant trois chefs lieux de commune ; Ghardaïa, chef-lieu de la wilaya occupant l'amont et le centre de la vallée, Bounoura et El Atteuf occupant la partie aval de la vallée.

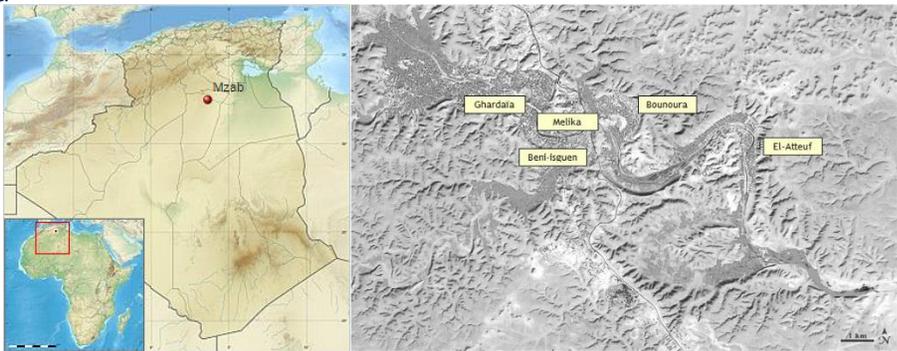


Figure 1 : Situation de la zone d'étude

2. Morphologie de Terrain

Une morphologie accidentée de terrain dont les altitudes varient de 530m à Daya jusque l'amont de la vallée de M'Zab jusqu'à la cote 450m à l'aval dans la région d'El-Atteuf

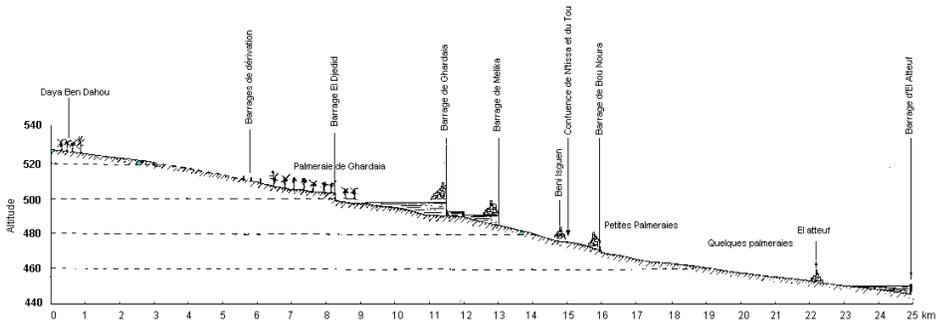


Figure 2 : Coupe géomorphologique schématique de la vallée de M'Zab

3. Aspect climatique

Le climat dans la zone d'étude est de type saharien qui se caractérise par de faibles pluies qui varient entre 70 mm au Nord et 30 mm au Sud suivis parfois par des crues de types torrentiels, qui sont dues à de fortes averses de pluie ou des orages violents sûrs de petits bassins versants représentant des reliefs accidentés, ces crues contribuent dans le lessivage de la nappe superficielle situé dans les alluvions [3], les températures élevées peuvent dépasser les 45°C, en période d'été, l'hiver est généralement doux avec des températures moyennes variant de 8 à 12 °C. L'humidité relative de l'air est très faible et les vents sont relativement fréquents. Ils jouent un rôle important dans la formation des Ergs et des Regs [4], leur vitesse est importante de avril à juillet, ce qui provoque pendant cette période le sirocco et/ou des vents de sable, responsables de la formation et des déplacements des dunes. L'évaporation varie entre 2,5 m dans les régions nord et plus de 3,5 m au sud de la zone d'étude. [5].

4. Plan d'occupation de Sol

Notons que l'établissement d'une planimétrie de plan d'occupation de sol de la région d'El-Atteuf nous permet de ressortir que pour une superficie totale de zone d'étude de 5560 ha plus de 74% sont des sables et sols nus tant que la part de la zone des palmeraies représente que 4% seulement soit 186 ha

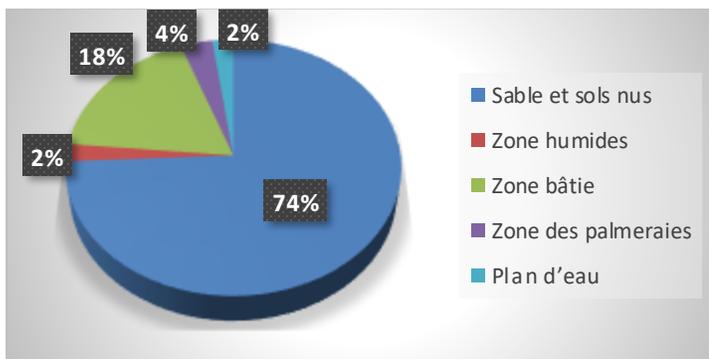


Figure 3 : plan d'occupation de Sol

5. Étude des paramètres de Bilan hydrique

L'expression du bilan correspond à la différence entre les entrées dans la nappe phréatique et les sorties ($\Delta Q =$ les entrées – les sorties)

6.1.Eau conventionnel d'irrigation

D'après les services d'agence national des ressources hydrique (ANRH), la commune d'El Attouf comporte plus de 21 forages, la production journalière peut arriver jusqu'à plus 42000 m³/j dont 18500 m³/j destiné à l'irrigation soit 44% de la totalité des forages.

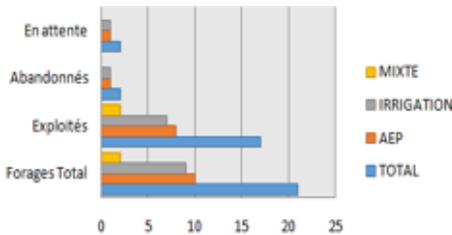


Figure 4 : Forages de la commune d'El-Atteuf

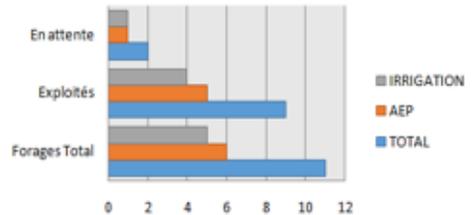


Figure 5 : Forages de la zone d'étude

Pour notre zone d'étude de 5560 ha (Aval de M'Zab) nous avons recensé 11 forages d'eau destinée à des usages urbain et agricole dont la production totale est de 25200 m³/j ou 9080 m³/j pour l'irrigation soit 3,314 Hm³/an

6.2.Puits d'irrigation

D'après nos enquêtes sur terrain et les données des services agricoles (DSA) de Ghardaïa plus de 280 puits traditionnels sont implantés dans la zone d'étude dont la quantité totale soutirée à partir de ces puits a été estimée par 20550 m³/j, soit 7,5Hm³/an avec une utilisation arbitraire et non contrôlée



Figure 6 : Puits traditionnel d'irrigation

6.3.Fuites d'AEP

D'après les données des services de l'AEP (DRE- Ghardaïa) les fuites d'AEP sont estimées par 20% de la quantité délivré réellement .D'après notre enquête sur terrain Cinq (5) forage destiné à l'AEP dans la zone d'étude qui débite un débit autour de 127 l/s pour un temps de fonctionnement de 16 h .le volume journalier produit par ces forges estimé par 7315,2 m³/j, 20% de cette quantité est considéré comme des fuites soit 1463 m³/j soit 0,534 Hm³/an

6.4. Rejets d'Assainissement

Selon notre enquête sur terrain nous avons constaté l'existence d'un seul point de rejet des eaux usé dans la zone d'El-Atteuf dont le débit à été estimé par le service d'office national d'assainissement de Ghardaïa par 2222 m³/j , il est utile de signaler que la zone d'El Attouf situé à l'aval de la vallée de M'Zab et toutes les eaux rejetées de la vallée restituée dans notre zone d'étude 24000 m³/j soit 8,76 Hm³/an rejoint la nappe [6].



Figure 7 : Rejet d'Assainissement

a. Précipitations

Pour une pluviométrie moyenne annuelle de 110 mm, le coefficient d'infiltration est de 5 à 10 % donc, pour une pluviométrie de 110 mm/an (station de Ghardaïa, 2005-2014) et une surface de 5560 ha la lame d'eau rejoignant effectivement la nappe phréatique est de l'ordre de

$$QP-Inf=61160 \text{ m}^3/\text{an}$$

Les sorties : Il s'agit de :

L'évaporation et l'évapotranspiration en zones arides, sont les mécanismes majeurs de pertes en eau. Dans des bassins arides fermés, ils sont les seuls modes de perte en eau.

6.6. Évaporation à partir des plans d'eau libres

L'estimation de l'évaporation à partir des plans d'eau libres a été faite à partir des données relevées sur bac. Nous disposons d'une série de mesures allant de 2005 à 2014.

Pour une surface totale des plans d'eau libres de 123,3 ha, le volume d'eau évaporé est estimé à :

$$QE-PI= 3,2 \text{ Hm}^3/\text{an}$$

dont la valeur moyenne annuelle est de l'ordre de 2,6 m/an

6.7. Évaporation à partir des zones humides

Nous avons utilisé le logiciel CROPWAT pour l'évaluation de l'évaporation annuelle, la valeur estimée est de 2142 mm/an, pour une superficie totale de 121 ha correspondant aux zones humides, le volume évaporé est de l'ordre de :
 $QE-Zh = 2,59 \text{ Hm}^3/\text{an}$

6. Bilan hydrique

L'établissement d'un bilan d'une nappe phréatique exige la connaissance précise de son alimentation et de ses pertes. Or celles-ci sont multiples, directes ou indirectes, superficielles ou profondes. Le bilan hydrologique global a pour but d'étudier la balance entre les apports et les pertes et ainsi d'étudier la variation des réserves en eau.

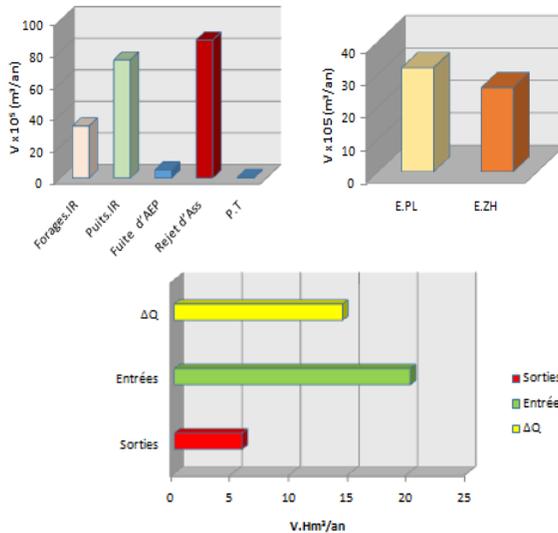


Figure 8 : paramètres du bilan hydrique

Les graphiques présentés au-dessus montre clairement que le bilan de la nappe entre les entrées et les sorties (ΔQ) est positif de l'ordre de 14,37 Hm³/an, ce dernier reste la facture principale de la remontée de la nappe dans les zones de dépression d'El-Atteuf

L'élévation du niveau d'eau (surtout en hiver) dans ces zones basses peut être due :

- aux quantités excédentaires des eaux d'irrigation (cas des palmeraies) ;
- aux fuites du réseau d'AEP et assainissement autonome (cas des agglomérations de Daya Ben Dahoia).
- Aux rejets totaux (Cas de EI-Atteuf).
- La nappe phréatique ne peut pas jouer de rôle tampon important.
- Le terme évaporation totale constitue l'élément fondamental de déficit à travers les Chotts.

De Ce fait on peut retenir de ce bilan, c'est que les différents chiffres avancés sont parfois à prendre avec précautions de plus les surfaces prises en compte ne sont pas les mêmes ni les zones (endroit).de ce fait le bilan établi n'est que grossier, il peut juste d'apprécier la grandeur des volumes excédentaires, l'estimation de la remonté capillaire a été négligé.

Une étude plus précise, analysant chaque composante du bilan devrait être établies de ce fait dans le cadre de notre travail, nous nous sommes intéressés plus précisément au paramètre irrigation. Et aux pertes engendrées par cette activité.

7. Influence des eaux d'irrigation

8.1. Besoin en eaux des cultures

Nous avons quantifié les besoins en eau des cultures sur la base des informations définies auparavant, telles les doses et dates d'arrosage qu'il faut appliquer aux cultures au cours de toute leur période

De végétation et ce dans le but de compenser le déficit hydrique dans la couche active du sol.

La culture la plus fréquente dans la région d'EI - Atteuf, sont les palmeraies dattier elles supportent les contraintes climatiques et les contraintes liées au sol tel que la forte salinité dont superficie dans dépasse 130 ha.

Le style des palmeraies est traditionnel, les pieds sont implantés d'une manière anarchique avec une densité de 400 à 600 pieds/ ha dépassant de loin la densité moyenne (100 à 150 pieds/ha), cette situation a créé un style oasis.

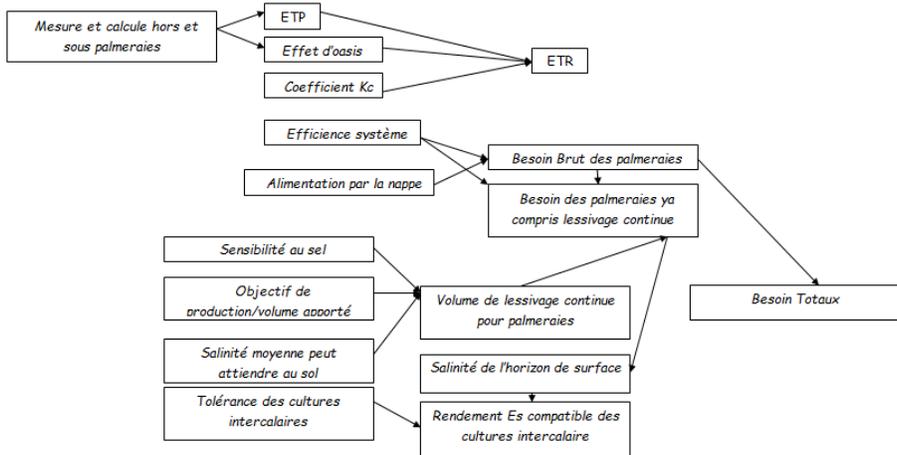


Figure 9 : Organigramme des besoins en eaux d'irrigation

Le calcul de l'évapotranspiration de référence est réalisé à l'aide d'un logiciel CROPWAT 8, fondé sur la méthode de Mr Penman & Montheit, modifiée et recommandée par la consultation Des experts de la FAO tenue à Rome en Mai 1990. Notons que pour notre zone d'étude l'évaporation de référence ET0 a été évaluée moyennement par 5,87 mm/j, considérons les pluies efficaces 80% de la pluie totale (88,6 mm)

8.2. Délimitation des palmeraies

Selon les données que nous avons collecté à partir DSA de Ghardaïa la commune d'EI-Atteuf comporte une zone agricole proche de 700 ha. Après une enquête sur terrain et une délimitation nous avons constaté que notre zone effectivement étudier comporte seulement 186 ha pour 26 blocs d'irrigation.



Figure 10 : Délimitation de la zone des palmeraies

Constatons les résultats de CROPWAT les besoins en eaux brutes de notre zone agricole sont estimés par 16250 m³/ha pour un débit spécifique de maximal 1,27 l/s/ha dont l'efficience de système d'irrigation 70%. Ces valeurs nous permettent d'évaluer les besoins en eau pour toute la zone agricole (187 ha) soit 3,04 Hm³/an

8.3. Lessivage des sols

En culture irriguée, l'objectif de lessivage du sol est d'éliminer les sels qui se sont accumulés sous l'effet de l'évapotranspiration dans la partie du sol exploitée par les racines (sels préexistants ou apportés par les eaux d'irrigation).

En 1972 Mr Rhodes a présenté une formule, qui permet l'appréciation de la fraction de lessivage d'entretien (LR) d'une manière raisonnable en fonction de conductivité électrique des eaux d'irrigation (EC_w) et Conductivité électrique du sol qui provoque une chute de rendement de 10% (d'après la table de FAO)

$$LR = \frac{EC_w}{5EC_e - EC_w} = 0.138 \approx 14\%$$

Cette fraction a été calculée sous la base des résultats d'analyse des sols de la région d'étude élaborée par la DSA de Ghardaïa, sol halomorphe à structure non dégradée à granulométrie sableuse limoneuse dont la conductivité électrique de la couche superficielle est de l'ordre de 8500 µs/cm, et des eaux d'irrigation (EC_w = 4270 µs/cm) Les besoins nets des palmeraies d'El-Atteuf ont été évalués par 3,022 Hm³ pour toute l'année. Les sols nécessitent un apport de 0,423 H m³/an pour rabattre la salinité de 8500 µs/cm, pratiquement il est impossible de délivrer ce volume en entier il faudra donc gérer judicieusement ces apports.

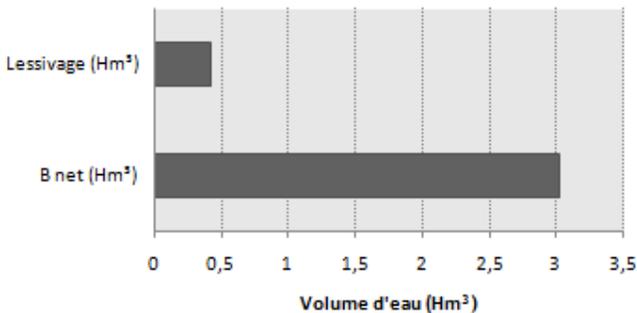
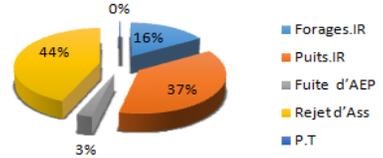


Figure 10 : Besoin en eau des palmeraies

8. Résultats et Discussion

La recharge naturelle de la nappe alluviale de la partie aval de M'Zab subit cinq factures (Forages conventionnels d'irrigation, puits traditionnel d'irrigation, les fuites d'AEP, les rejets urbains, les précipitations)

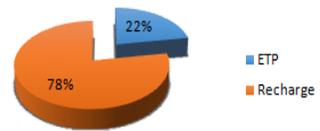
Nous pouvons signaler que la plus grande part dans cette recharge a été évaluée pour les rejets urbains par 44 % suite par puits traditionnels d'irrigation qui sont réalisés arbitrairement par 37% suite par les forages conventionnels d'irrigation par 16% Les fuites des réseaux d'AEP et les précipitations n'ont pas une grande influence sur la recharge.



9.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évaporation et L'évapotranspiration potentielle représentent la quantité d'eau excédentaire dégagée par les cultures et les plans d'eau. Les résultats obtenus montrent que le volume annuel de l'évapotranspiration potentielle dans notre zone d'étude minimise la recharge par 22%

Ces résultats de pourcentage varient selon la superficie occupée par les palmiers de chaque zone.

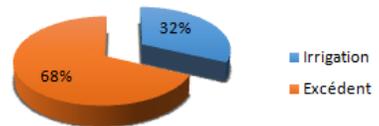


9.2. Évaluation des volumes d'irrigation excédentaire

Après l'évaluation des besoins théoriques par CROPWAT (B net = 3,02 Hm³/an) plus une évaluation spéciale pour la dose de lessivage qui a été estimée par (14%) pour volume annuel (0,423 Hm³/an), le volume total théorique tenant compte de la lessivage des sols sera 3,4 H m³/an pour notre zone d'étude.

Comparant ce volume avec la quantité délivrée réellement par les forages et les puits traditionnels soit (6,27 Hm³/an).

Le volume d'eau excédentaire sera 7,37 Hm³/an qui représentent 68 % de la quantité délivrée réellement.



Conclusion et recommandation

Le travail fait dans cet article faire l'objet d'évaluation quantitative des sources des eaux de la région d'EL-Atteuf l'aval de M'Zab, a pour but d'identifier la part des différents usages de l'eau et précisément de l'irrigation dans la recharge de la nappe phréatique inutilisable actuellement à cause de sa pollution.

Le calcul de bilan hydrique (ΔQ) de la partie aval de M' Zab a montré qu'un excès important des eaux de l'ordre de (14,37 Hm³/an) dont le débit entrant (20,17 Hm³/an) dans le système est extrêmement élevé comparativement avec des débits sortants (5,6 Hm³/an). Ce qui contribue à l'apparition des graves problèmes relatifs à cet excès d'eau.

Le travail montre clairement que les eaux d'irrigation influent à cette problématique par 53% suite par les rejets urbains par 44% dus aux gestions irrationnelles des eaux

Notons que cette nappe phréatique est alimentée par les précipitations et les écoulements temporaires, les eaux de drainage des palmeraies et les eaux usées.

Cette remontée de la nappe provoque des stagnations des eaux en de véritables nids à moustiques et autres insectes nuisibles et a créé une situation grave pouvant avoir des conséquences néfastes et irréversibles, qui ont fortement perturbé les équilibres naturels dans les milieux oasiens, milieux déjà très fragiles qui provoquent l'engorgement et le dépérissement de ces palmeraies

Signalons des autres facteurs de la gestion irrationnelle des eaux

- les systèmes de drainage mis en place ne s'avèrent efficaces ou presque négligeable que de façon transitoire, et nécessitent des mesures permanentes d'entretien et d'augmentation des débits évacués, faisant appel de plus en plus au pompage.
- Sur le long des berges d'oued, nous pouvons constater des dégâts provoqués par l'érosion. Cette érosion risque de mettre en drainage la stabilité des berges et quelques ouvrages qui existent tels que les passerelles.
- La réalisation et l'entretien de réseau de drainage pour les Oasis permettront de collecter des débits appréciables d'eau pouvant être réutilisés, notamment pour l'irrigation des palmeraies (après le traitement de ces eaux),
- l'irrigation par seguia entraîne un gaspillage important des eaux et par conséquent apparaître des phénomènes consécutifs d'hydromorphes et de salinisation des sols.
- En plus, l'excès d'eau entraîne la formation des marécages qui sont les lieux favorables pour les développements des insectes tels que les moustiques qui portent les maladies comme le paludisme qui a déjà apparu dans la zone d'El-Atteuf.

Pour résoudre les problèmes il faut qu'on adapte une méthode moderne de gestion de l'eau afin que présence notre ressource hydrique (en partie non renouvelable).

On propose plusieurs solutions :

- Arrêter quelques forages pour protéger les ressources des eaux souterraines et éviter le gaspillage. Ces forages restent comme des réserves ont exploité.
- La distribution des eaux (Irrigation, AEP) doit être bien organisée.
- Diagnostic des forages détruire
- Arrêter les pertes en eau avec le bouchage des forages détruire
- L'entretien des ouvrages hydrauliques et de forage
- L'entretien périodique des canaux de drainage afin d'éviter le colmatage
- La réalisation d'un réseau d'assainissement avec une station d'épuration efficace
- La modernisation des systèmes d'irrigation à travers l'intégration du système d'irrigation localisé (goutte à goutte) qui peut économiser l'eau jusqu'à 70%
- Un programme d'intervention qui comporte la réalisation d'un système de drainage efficace pour évacuer les eaux excédentaires salées hors de la zone des palmeraies.
- Devant les contraintes de valorisation des ressources en eau au Sahara et pour un développement durable, il est impératif de préserver cette ressource à travers l'utilisation des eaux non conventionnelles et donc la réutilisation de ces eaux de Drainage dont la salinité pourrait être diminuée par un mélange avec les eaux provenant de l'albien.

Références

1. COTE M. (1998) ; Des oasis malades de trop d'eau? Sécheresse; 9: 123-30
2. KHADRAOUI, A. (2009) ; Eau et impact environnemental dans le Sahara algérien.
3. Dubief, J., 1953, "Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara". Édition : service des études scientifiques, Alger. pp. 26-103.
4. Dubost D., 2002. Écologie, Aménagement et Développement des Oasis algériennes. Biskra, CRSTRA, 423p.
5. ONM, 2014. Listing des paramètres climatologiques de la région de Ghardaïa.
6. ONA, 2014. Rapport technique 25p
7. BEN AISSA, I et AL. (2004) ; Gestion de l'eau et des sels au sein d'une oasis du Sud Tunisien ; Séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée Rabat, du 19 au 23 avril 200
8. BRL, BNEDER. (1998) ; Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes Les ressources en sols, Ministère d'agriculture-Algérie
9. DUBOST G, DUBOST D. (1983) ; Méthode pratique pour le calcul de l'évapotranspiration au Sahara algérien. BullAgrSahar, 5: 111-42.
10. HATIRA, A et AL. (2005) ; Impact des eaux d'irrigation sur l'origine des accumulations gypseuses dans les sols de l'oasis de Metouïa (Tunisie) ; Volume 12, 1, 2005 - pages 43 à 54
11. IDDER, T et al (2011) ; Conséquence écologique d'une gestion non raisonné des eaux agricole dans le Sahara algérien ; Colloque international Marseille, 20-21 Janvier 2011

Les palmeraies périurbaines de Biskra face à la problématique de l'eau agricole

Pr Ammar FOUFOU Université 20 Août 1955-Skikda, BP 26, 21 000 Skikda (Algérie),

Résumé :

Parmi les ressources naturelles dont l'enjeu est de taille dans les régions sahariennes et particulièrement celles qui sont de grand potentiel agricole, il y a l'eau dans toutes ses formes (souterraines, de surface). L'eau de surface dans la région des Ziban se présente sous deux formes principales ; il s'agit des eaux de barrages et des eaux d'oueds. Deux barrages sont présents dans le Nord de Biskra, l'un a été construit durant la période coloniale d'une capacité de 47Mm³ et l'autre est récent datant des années 2000 d'une capacité de 55,5Mm³. A cela, s'ajoute un ensemble d'oueds s'alimentant directement des eaux de ruissellement des montagnes des Aurès. De ce fait, les Ziban ne manquent pas d'eau, mais ils manquent de méthodes adéquates et adaptables à la structure spatiale et parcellaire des palmeraies et les exigences des cultures en place, particulièrement le palmier dattier comme principale culture et unique support des autres strates herbacées. Le réseau d'irrigation dans les Ziban est dense à l'image de la densité des vieilles palmeraies, il est ancien dans sa majorité. Sa création date parfois de l'époque coloniale, sa modernisation est lente en dépit les réformes et les politiques successives que l'agriculture saharienne a connues depuis l'indépendance.

Les réseaux d'irrigation issus des eaux de surface sont collectifs avec des modes de partage unique et propre à la région des Ziban. Ces réseaux sont à la charge des producteurs qui s'organisent dans des comités villageois d'oasiens exploitant le même réseau d'irrigation pour s'occuper de l'entretien et de la rénovation, ainsi que de la gestion et de partage de l'eau de la source l'oued à la palmeraie (parcelle). La gestion de l'eau de surface, plus particulièrement d'oueds, dans les palmeraies des Ziban reste toujours dominée par les méthodes traditionnelles basées sur l'équité et l'entraide paysanne. Selon l'origine de la source d'eau exploitée, les modes de partage instaurés s'adaptent à des réalités hydrauliques et sociales, voir financières. Les méthodes ingénieuses d'acheminement de l'eau vers la parcelle permettent à chacun d'avoir une quantité d'eau proportionnelle à la taille de l'exploitation et les cultures qui y sont présentes. Pour éviter les conflits, remédier certains litiges et venir en aide aux petits producteurs qui sont dans l'incapacité financière de payer le part d'eau d'irrigation, les paysans ont inventé des formes de solidarité fascinantes à l'image du « Nefkh » et la vente de l'eau agricole à un autre producteur de la même oasis dont les besoins de l'exploitation sont importants ou en évolution dans le temps et dans l'espace. Globalement, la diversité hydraulique au Ziban explique, en grande partie, la diversité culturale et la forte occupation de l'espace parcellaire dans les palmeraies qui, selon cette étude, se distinguent par un développement spectaculaire des cultures herbacées dont les besoins en eau sont très importants durant tout le cycle végétatif.

Mots-clés : Palmeraie périurbaines, Ziban, ressources en eau, Oueds, systèmes de cultures, diversité hydraulique.

The periurban palm groves of Biskra face the problem of agricultural water

Abstract :

Among the natural resources whose stakes are high in the Saharan regions and particularly those with great agricultural potential, there is water in all its forms (underground, surface). Surface water in the Ziban region comes in two main forms; it is the waters of dams and wadis waters. Two dams are present in the north of Biskra, one was built during the colonial period with a capacity of 47Mm³ and the other is recent from the 2000s with a capacity of 55.5Mm³. To this is added a set of wadis feeding directly on runoff from the Aurès mountains. As a result, the Ziban do not lack water, but they lack adequate and adaptable methods to the spatial and compartmental structure of the palm groves and the requirements of existing crops, particularly the date palm as the main crop and sole support for other strata. herbaceous. The irrigation network in the Ziban is dense like the density of old palm groves, it is old in its majority. Its creation dates sometimes from the colonial period, its modernization is slow despite the reforms and successive policies that Saharan agriculture has known since independence. Irrigation systems derived from surface waters are collective with sharing modes unique and unique to the Ziban region. These networks are the responsibility of the producers who organize themselves in villagers' committees of oasiens exploiting the same network of irrigation to take care of the maintenance and the renovation, as well as the management and sharing of the water from the source wadi to the palm grove (plot). The management of surface water, especially wadis, in the Ziban palm groves is still dominated by traditional methods based on equity and mutual aid. Depending on the origin of the source of water exploited, the modes of sharing established adapt to hydraulic and social realities, see financial. The ingenious methods of transporting water to the plot allow everyone to have a quantity of water proportional to the size of the farm and the crops that are present. To avoid conflicts, to remedy certain disputes and to help small producers who are financially unable to pay the share of irrigation water, the peasants have invented fascinating forms of solidarity in the image of the "Nefkh" and the sale of agricultural water to another producer in the same oasis whose needs for exploitation are significant or evolving over time and space.

Overall, the hydraulic diversity in Ziban explains, to a large extent, the cultural diversity and the high occupation of the parcel space in the palm groves which, according to this study, are distinguished by a spectacular development of herbaceous crops whose water needs are very high. important throughout the vegetative cycle.

Key Words: Peri-urban palm groves, Ziban, water resources, wadis, cropping systems, hydraulic diversity.

I. Introduction et problématique

À la différence des autres territoires sahariens, le Sahara algérien, notamment le Bas-Sahara, est marqué par la présence d'eau de surface dont la principale source sont les oueds ; les oueds de Biskra qui sont nombreux, oued Mya et oued N'ssa qui traversent la cuvette de Ouargla, Oued Rhir dans la zone de Touggourt, Djemâa et El-Mghaïer, Oued Souf dans le Souf à l'Est, oued M'zab au centre et oued Bechar à l'Ouest. Certains d'entre eux sont à écoulement permanent, d'autres coulent régulièrement pendant l'hiver comme ceux de Biskra et Bechar, la dernière catégorie est celle des oueds fossiles qui ne coulent que rarement en cas de crues comme ceux de Mzab et Ouargla.

Les massifs de l'Atlas saharien sont considérés comme une source naturelle de toutes les eaux superficielles qui coulent dans le Nord du Sahara.

Les barrages dans les oasis sahariennes sont d'une importance stratégique, car ils constituent des réserves d'eau dont la maîtrise de la gestion constitue un enjeu capital pour assurer une distribution régulière et planifiée de la ressource en eau. Le Sahara algérien se distingue par l'implantation de 5 principaux réservoirs (barrages) : Biskra (Foum El-Gheurza à 47 hm³, Fontaines des Gazelles à 55 hm³), Béchar (Djorf Torba à 350 hm³) et Brézina à 122 hm³.

1.1. Les Ziban et les ressources en eau superficielles

Grâce à l'abondance des ressources en eau sous deux formes, souterraines et superficielles, le pays de Biskra est largement concerné par une politique de développement agricole diversifiée. L'eau superficielle, sous forme d'oueds, en provenance des massifs montagneux des Aurès contribuent massivement au développement des activités agricoles et à l'alimentation des nappes aquifères et des deux barrages de Foum El-Gheurza (issus de la période coloniale) et Fontaine des Gazelles (nouvellement construit).

La mobilisation des ressources en eau superficielles (barrages et oueds) à Biskra est nettement supérieure à celle d'autres régions voisines du bas-Sahara, bien que d'autres ressources en eau (nappes souterraines) soient présentes et auraient contribué à la baisse de la pression exercées sur les eaux de barrage et oueds.

La présence des oueds a favorisé le développement de l'agriculture dans les vallées, grâce à l'eau de ruissellement des massifs de l'Atlas saharien et des montagnes des Aurès. Ceci a permis l'exploitation de toutes les terres à proximité de ces oueds, car le sol est alluvionnaire, fertile et riche en matière organique, en instaurant ainsi une agriculture vivrière de subsistance depuis des siècles.

1.2. Les eaux superficielles (barrages et oueds) dans les Ziban : état du lieu

Ces eaux superficielles non négligeables viennent s'ajouter les réserves souterraines (33.6%) qui sont disponibles pour l'exploitation urbaine, industrielle et agricole. Il s'agit des deux barrages précités qui doivent leur existence aux nombreux oueds et eaux de ruissellement des massifs des Aurès. Cette réalité permet à Biskra de se positionner dans les premiers rangs des régions sahariennes dont la richesse en eau est incontestable. Le barrage Foum El-Gheurza, avec une capacité de 47 millions de M³, régularisait un débit de 1 million de M³ en 2002, destiné à l'irrigation de la plaine et des oasis de Sidi Okba (1200 ha). Par contre, celui de la Fontaine des Gazelles, avec une capacité de 55,5 millions de M³, régulariserait un débit de 13 millions de m³, est destiné essentiellement à l'irrigation de plus de 1000 ha dans la plaine de Loutaya (ex-fermes Dufourg), mais aussi à l'usage urbain et industriel. Pour mieux cerner les ressources en eau de surface de la région des Ziban, il est indispensable de citer les célèbres oueds et les montagnes à partir desquelles l'eau jaillit vers les vallées et les oasis du sud des massifs des Aurès. Parallèlement à l'Oued El-Kantara, il existe des vallées moins importantes de l'Oued Fedala et de l'Oued Melah. Ce dernier se dégage des montagnes près du village de Beni Fernah. Vient ensuite la grande vallée de l'Oued Abdi (Oued Daoud). Il a ses têtes au Kef Mahmel, près du col d'Aïn Kafar. L'Oued Abdi se réunit à l'Oued El-Kantara au pied du Djebel Boughezal. Il en est séparé par les arêtes du Djebel Mahmel qui prolongent au Sud-Ouest celles du Djebel Nouacer, du Djebel Essor et du Djebel Kteuf. Entre l'Oued Melah et l'Oued Abdi s'allonge le Djebel El-Bous (1.750 m). L'Oued El-Abiod à son tour reçoit ses premières eaux des plateaux du Chelia (Aurès). L'abondance des ressources en eau dans la région des Ziban a favorisé le développement de l'agriculture sous ses deux formes actuelles à savoir : une traditionnelle familiale vivrière et l'autre nouvelle productiviste très exigeante en capital en terres agricoles et en eau. En outre, cette richesse en ressources en eau superficielles qui s'ajoute à celles des nappes aquifères, a permis l'extension des palmeraies qui existent déjà, comme elle a contribué à la création des nouvelles exploitations maraîchères et arboricoles en dehors du palmier dattier.

Fig 1 : Les eaux de ruissellement dans le Nord du Sahara Source : Dubost et Moguedet, 2002

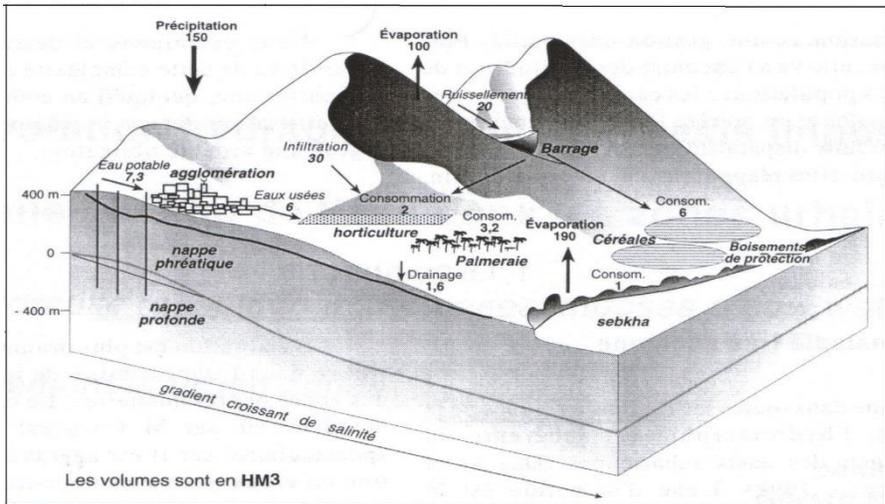


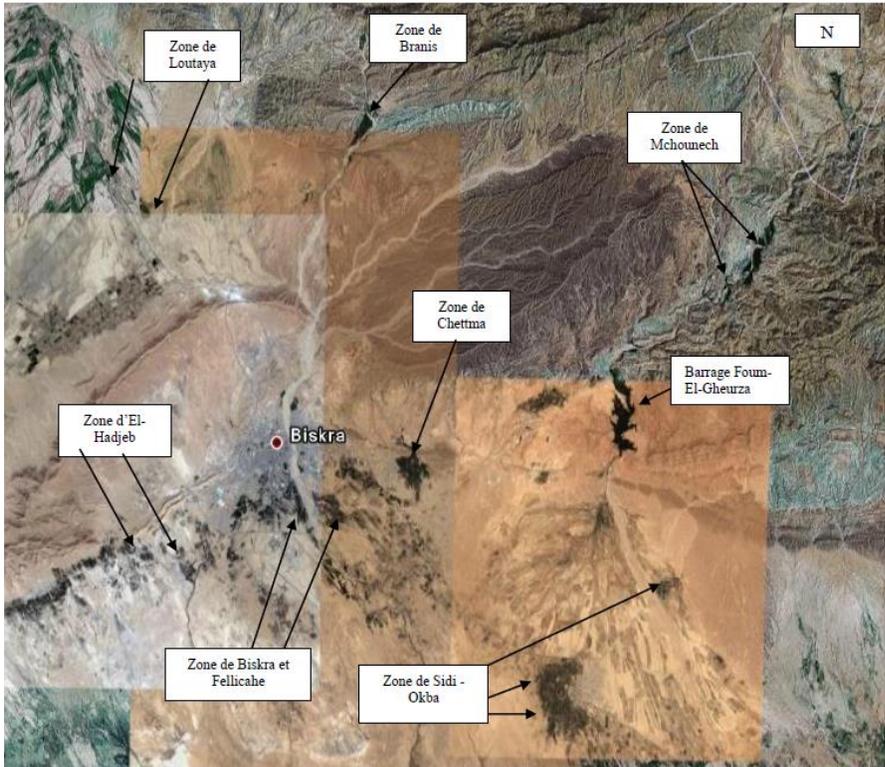
Fig 2: Les hauts plateaux Nord de Biskra



Source : Eden Algérie, 2015

« Les hauts plateaux à partir desquels les eaux de ruissellement jaillissent dans la vallée de Jemmoura au Nord de Biskra, en permettant ainsi la naissance des villages et la création des palmeraies autour des Oueds »

Figure 3 : La répartition des palmeraies à Biskra Source : maps.google.fr, 2008 (image modifiée par Fougou, 2008)



2. Les palmeraies périurbaines arrosées par les eaux d'oueds

2.1. La zone de Mchounech

Elle se situe aux pieds des monts des Aurès à 20 km (Nord-Est) du chef-lieu de Biskra. Sa SAU en sec est de 729,97 ha et 383,38 ha en irrigué, soit un total de 1113,35 ha. Elle totalise 419 exploitations dont 224 sont inférieures à un hectare, soit 54 % du total. Elle ressemble à celle de Branis dans toutes ses composantes (sociales, hydrauliques et agricoles). Elle a été créée au bord de l'oued qui la coupe en deux palmeraies homogènes.

Les exploitations traditionnelles sont polyvariétales (verger, palmier et maraîchage). Elles sont au nombre de 354 avec une superficie de 641,55 ha, soit 1,8 ha/exploitation. Alors que les exploitations APFA sont au nombre de 47, avec une superficie de 466,80 ha, soit 10 ha/exploitation.

En revanche, il n'y a qu'une seule exploitation EAC ou ex-coloniale d'une superficie de 4 ha.

L'eau est abondante grâce aux ruissellements issus des massifs des Aurès. Elle est acheminée dans des conduites cimentées et à ciel ouvert sur les deux rives de l'Oued El-Abiod.

2.2. La zone de Branis

Elle se situe à 15 km (Nord) du chef-lieu de Biskra. C'est aussi une commune attachée administrativement à la Daira de Djemoura. La palmeraie de Branis illustre une belle figure des oasis traditionnelles de Biskra. Sa SAU totale est de 3135,40 ha dont 2737,56 ha en sec et 397,84 en irrigué. Le nombre total d'exploitations est de l'ordre de 1104 (toutes tailles confondues) et 507 d'entre elles sont inférieures à 0,5 ha, soit 46 % du total.

Les palmeraies traditionnelles familiales représentent 1090 exploitations et occupent une superficie de 3046 ha, soit 98 % du nombre total et une taille moyenne de 2,7 ha/exploitation. Les exploitations APFA sont de l'ordre de 14 avec une superficie totale de 89,37 hectares et 6,3 ha par exploitation, soit 1,2 % du nombre total.

L'occupation de l'espace présente une belle image de diversification avec des systèmes de cultures étagées et associées à l'élevage familial (caprin et ovin). L'irrigation est gravitaire. L'eau provient de l'Oued Abdi qui coupe la palmeraie de Branis en deux, ce qui a permis la construction de deux conduites symétriques sur les deux rives.

3. La diversité des ressources en eau est incontestable à Biskra

La diversité des ressources en eau à Biskra est, en partie, le résultat de sa position géographique particulière (aux pieds des montagnes de l'Atlas saharien).

L'eau qui coule de l'Atlas saharien suivant la topographie contribue à l'alimentation des nappes aquifères, même avec des quantités limitées, et le remplissage des barrages. L'écoulement des oueds sur une bonne partie de l'année permet aux exploitations et aux périmètres se situant à proximité d'en bénéficier à moindre coût.

3.1. La gestion des eaux des oueds est régie par des méthodes traditionnelles ingénieuses : cas des oasis de Branis et Mchounech

Branis et Mchounech sont deux localités périurbaines entourées d'oasis traditionnelles qui doivent leur survie à la présence de l'eau des oueds. Les palmeraies des deux localités se situent sur les bordures et les vallées des oueds. La gestion de l'eau agricole issue d'oued est soumise à des pratiques et des méthodes traditionnelles fondées sur l'équité et la solidarité paysanne irréprochable.

L'acheminement des eaux vers les palmeraies consiste à dévier l'eau des oueds grâce à des diguettes en sable et en béton, afin de permettre à l'eau de suivre les seguias cimentées qui se situent sur les deux rives. L'eau est abondante sur une bonne partie de l'année, puisqu'elle est issue des eaux de ruissellement des montagnes des Aurès qui sont régulières sauf en période sèches (été), s'étalant entre les mois de mai et septembre. Ceci impose aux producteurs des restrictions du tour d'eau dont les conséquences seront néfastes et visibles sur les jardins. Toutes les exploitations se trouvent à une altitude plus basse que la conduite, pour que l'eau déviée en amont de l'oued soit acheminée selon la pente et la gravité. C'est ainsi que toutes les palmeraies de Mchounech et de Branis sont arrosées durant toute l'année. Ce genre de réseau d'irrigation est entravé par des pertes par évaporation importantes dans les deux localités car les conduites sont à ciel ouvert.

La gestion de l'eau est confiée à un paysan du village (Mennaâ) à l'image de toutes les palmeraies traditionnelles de Biskra qui puisent leur eau des oueds et des sources artésiennes. Le Mennaâ bénéficie d'un salaire mensuel négocié d'avance par l'ensemble des producteurs

Le tour d'eau et sa gestion dans ces deux localités présentent des similitudes au niveau de l'équité, du mode d'acheminement, de la rigueur et de la solidarité. Dans les deux cas et contrairement à d'autre réseau d'irrigation, le paiement de l'eau agricole est inexistant, sauf le salaire du Mennaâ et les frais l'entretien occasionnel des seguias.

Pour mieux cerner la réalité de ces deux cas uniques (Mchounech et Branis), des photos ont été prise illustrant les modes d'acheminement, de partage et de gestion de l'eau d'irrigation en amont et en aval (figures 1 à 10).

Ces figures montrent les méthodes de gestion et d'acheminement de l'eau d'irrigation issue des oueds dans l'espace agricole de Branis et de Mchounech, bien que les conditions climatiques contraignantes affectent leur débit durant les périodes sèches, réduisant, d'un seul coup, la quantité d'eau acheminée à la parcelle. Ainsi, la prolongation du tour d'eau pourrait être une solution envisageable, grâce à une technique ancestrale adoptée par les premiers paysans des localités qui consiste à créer des parts d'eau supplémentaires pour venir en aide aux petits producteurs, d'une part, et prolonger le temps d'irrigation de quelques heures, en permettant ainsi aux producteur d'arroser leur plantation même durant les périodes sèches d'autre part. Cette méthode présente des avantages, mais aussi elle est entravée par des inconvénients touchant essentiellement le débit et la fréquence du tour d'eau.

Figure 04: Les eaux de ruissellement de l'Oued Labiod (Mchounech)



Source : Foufou, 2015

« De l'eau qui jaillit des rochers en amont de l'oued de Mchounech »

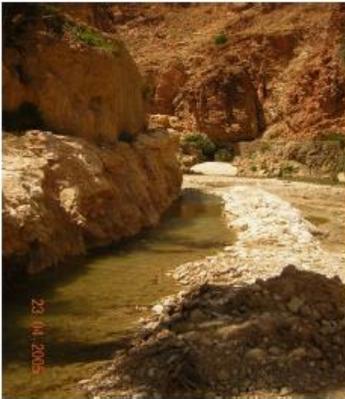
Figure 06: La déviation de l'eau d'oued avec des diguettes à bas de sacs de sable à Mchounech



Source : Foufou, 2015

« Les diguettes sont parfois en sacs de sable afin de résister aux torrents. L'eau n'est pas déviée dans sa totalité, pour que les seguias se situant plus bas puissent avoir un débit suffisant »

Figure 05: La déviation de l'eau d'oued



Source : Foufou, 2015

« Un autre type de diguettes pour la déviation de l'eau de l'oued labiod à Mchounech, pour qu'elle suive la conduite vers les plantations, sa destination finale »

Figure 07 : L'eau déviée de l'oued prend son chemin dans les seguias conçues en béton à ciel ouvert (Mchounech)



Source : Foufou, 2015

« La seguia prend son chemin en parallèle de l'oued mais avec une pente faible afin de faire profiter les exploitations qui se trouvent à ce niveau »

Figure 08: Les conduites en béton sur les deux rives de l'oued Labiod (Mchounech)



Source : Foufou, 2015

*« Dans les endroits difficiles, l'ingéniosité humaine remplace les lois de la gravité »
(palmeraie de Mchounech)*

Figure 09: La vallée de l'oued Labiod (Mchounech)



Source : Foufou, 2015

« Toutes les palmeraies de Mchounech qui se trouvent en amont à bord de l'oued sont arrosées suivant le mode d'acheminement et de mobilisation de l'eau agricole, précédemment évoqués »

Figure 10: La déviation de l'eau de l'oued Abdi (Branis)



Source : Foufou, 2015

« Les diguettes en béton à partir desquelles les deux seguías naissent sur les deux rives ».

Figure 11 : L'état de l'Oued Abdi (Branis) en avril



Source : Foufou, 2015

« L'eau dans l'Oued Abdi (Branis) est abondante, mais dès le mois de juin, le débit baisse d'une manière significative »

Figure 12: La conduite principale dans la palmeraie de Branis



Source : Foufou, 2015

« L'eau prend son chemin vers la palmeraie de Branis dans des conduites en béton à ciel ouvert, ce qui augmente les pertes par évaporation ».

Figure 13: Une palmeraie à Branis (pomme de terre associée au palmier dattier)



Source : Foufou, 2015

« Les palmeraies traditionnelles sont souvent polycultures. Leurs besoins en eau sont importants comme le montre cette exploitation à Branis »

4. Le manque d'eau à la parcelle sous l'influence des conditions climatiques contraignantes affecte la physiologie de l'espace agricole

Les conditions climatiques contraignantes engendrent un manque d'eau à la parcelle, ce qui signifie moins de présence de cultures herbacées. C'est un manque à gagner pour le producteur et sa famille. Le rythme habituel de la vente des produits herbacés et arboricoles devient difficile à atteindre dans la mesure où les cultures intercalaires sont dépourvues de leur part d'irrigation pour les raisons précitées. C'est une des conséquences qui font que certains producteurs ont été amenés, sous la contrainte, à vendre leur jardin à cause de la baisse de leurs revenus annuels, en partie, issus de la commercialisation de la luzerne et de quelques légumes de saisons. De ce fait, l'espace agricole devient de plus en plus monocultures, faisant du palmier dattier la seule et l'unique culture.

En effet, la présence des cultures herbacées sous-palmier est étroitement conditionnée par l'abondance de l'eau agricole aux moments voulus. Autrement-dit, les cultures herbacées exigent une irrigation régulière et fréquente. Grâce à la solidarité entre les producteurs et en dépit du manque d'eau à la parcelle, 35 % des producteurs interrogés dans les deux localités peuvent avoir de l'eau d'irrigation aux moments voulus. Parallèlement, 65 % des producteurs ont du mal à avoir un tour d'eau en cas de nécessité. Ils seront contraints d'attendre leur part qui, parfois, s'étale sur une semaine. Durant ce temps, les cultures en place pourraient être endommagées par la sécheresse. Il n'en demeure pas moins que 65 % des producteurs se déclarent satisfaits de l'organisation de leur tour d'eau « Nouba », mais cela ne signifie pas que l'eau est suffisamment abondante à la parcelle.

A cet égard, nous notons à la fois la rigueur et la solidarité paysanne instaurée, qui fait la règle et l'organisation de tout un système qui, malgré les initiatives quant à sa modernisation, reste séculaire dans ses fondements et dans son fonctionnement.

Les besoins en eau varient d'une exploitation à l'autre, d'un système d'irrigation à l'autre. Ils sont directement impactés par les pertes enregistrées dans chaque réseau hydraulique en place. Nous avons évoqué auparavant plusieurs méthodes de partage et d'acheminement en fonction de l'origine de l'eau exploitée. Outre les eaux d'oueds, trois types de mobilisation des ressources en eaux sont aussi d'actualité dans la région du Ziban, mais à moindre fréquence. Il s'agit :

- De l'eau souterraine sous forme de forages profonds à pompe électrique, dont certains sont raccordés à de conduites enterrées ce qui réduit, d'une manière significative, les pertes par évaporation et par infiltration, alors que d'autres sont à ciel ouvert,
- De l'eau souterraine qui jaillit d'une manière artésienne, avec, à la fois, des conduites à ciel ouvert et enterrées jusqu'à l'enceinte de la palmeraie,
- En dernier, l'eau des barrages, avec des conduites en bétons enterrés, la canalisation devient à ciel ouvert à proximité des palmeraies comme les palmeraies de Sidi-Okba et sa vallée.

De ce fait, les facteurs qui peuvent influencer le tour d'eau et sa disponibilité à la parcelle se résument aux points suivants : le réseau d'irrigation et son entretien, la saison ou le climat, le stade végétatif de la culture en place (palmier et cultures intercalaires), la présence ou l'absence des cultures intercalaires et enfin, la nature du sol.

5. Conclusion

Pour une large majorité (68%) des producteurs des deux localités (Branis et Mchounech), les besoins en eau sont essentiellement déterminés par les facteurs climatiques (saisons). Ces besoins en eau agricole augmentent significativement durant la saison sèche s'étalant entre les mois de mai et septembre. Durant cette période, les pertes par évaporation sont maximales, aggravées par un mode d'acheminement inadéquat, car les seguias sont toutes à ciel ouvert, favorisant ainsi les pertes par évaporation et par infiltration. À cela s'ajoutent les systèmes d'irrigation adoptés à la parcelle par les producteurs, comme l'irrigation par submersion qui provoque des pertes relativement importantes par évaporation.

En dépit de ces contraintes d'ordre technique et climatique, et comparativement à l'espace agricole extensif, ces pertes sont relativement faibles dans la mesure où les plantations traditionnelles sont denses, ce qui réduit la distance parcourue par l'eau entre deux palmiers. Entre deux palmiers, des cultures arboricoles et herbacées sont souvent pratiquées par les producteurs, de ce fait, l'irrigation de la culture principale (palmier dattier) en mobilisant un seul tour d'eau pourrait arroser toutes les cultures intercalaires.

Le microclimat oasien, créé grâce à l'occupation intensive de l'espace disponible, réduit significativement les évapotranspirations potentielles (ETP) des cultures. Par conséquent, le taux d'humidité est toujours régulé par la flore oasienne (palmier, strates herbacées et arboricoles). Cette image, longtemps critiquée, justifie, en partie, pourquoi les palmeraies traditionnelles sont intensives et fortement occupées par les cultures intercalaires, en association avec le palmier dattier.

Les eaux d'oueds baissent en débit pendant les périodes sèches, ce qui conduit parfois à l'assèchement total de certains d'entre eux. Cette contrainte, essentiellement, d'ordre climatique, provoque de véritables problèmes hydrauliques, économiques et agricoles pour toutes les palmeraies qui y puisent leur eau. Par rapport au palmier dattier, comme culture principale, ses besoins en eau baissent à partir du mois d'août, période avec laquelle coïncide la maturité des dattes, ce qui minimise l'impact dû au manque d'eau durant cette même période.

Les producteurs qui pensent que les besoins en eau sont déterminés par le stade végétatif des différentes cultures, particulièrement les cultures intercalaires (elles nécessitent une irrigation régulière et abondante à l'image des cultures sarclées comme la pomme de terre et certaines légumes), quant à eux, ils représentent 16 % de notre échantillon d'enquête.

Si l'irrigation était sollicitée durant une bonne partie de l'année, c'est parce que les cultures intercalaires sont très demandeuses et exigeantes en eau, d'autant plus que 12 % des producteurs interrogés jugent que les besoins en eau sont déterminés par les types de cultures présentes dans l'exploitation.

Vraisemblablement, les besoins hydriques sont déterminés par plusieurs facteurs, en plus de ceux déjà évoqués. Le système d'irrigation pratiqué à la parcelle est aussi déterminant, puisqu'il s'agit d'une forme de production traditionnelle où la majorité des producteurs pratique l'irrigation par submersion. Ceci n'est pas choisi, mais est plutôt imposé par un système de production séculaire dans ses fondements et ses méthodes de gestion de l'eau, en parallèle à la terre et aux cultures herbacées. En revanche, une minorité de 20 % des fellahs de Biskra pratiquent une irrigation localisée avec des conduites alimentées par des forages de haut débit. Il s'agit, en partie, des plantations de création nouvelle et des palmeraies traditionnelles en cours de rénovation avec des formes d'occupation d'espace différentes. Nous soulignons à ce titre que l'irrigation localisée à Ouargla n'occupe que 4 % des palmeraies visitées.

Nos enquêtes dans les deux zones montrent que 72 % des pertes enregistrées dans les différents appareils d'irrigation sont causées, à la fois, par l'évaporation sous l'effet de la chaleur et l'infiltration dans le sol à niveau de la conduite, vu les longues distances parcourues par l'eau avant l'arrivée à la parcelle, surtout durant les périodes sèches, alors que l'état de la conduite est responsable des pertes en eau dans 9 % des cas seulement.

Ceci nous conduit à évoquer les systèmes d'irrigation préférés par les producteurs dans les palmeraies des deux zones d'étude, l'impact de chacun sur les cultures pratiquées et l'exploitation d'une manière générale. Selon 68 % des exploitants de Biskra et 96 % de ceux de Ouargla, le système d'irrigation le plus adaptable et le plus sollicité dans les palmeraies en leur état actuel est l'irrigation par submersion. Celui-ci consiste à submerger la culture par l'eau, submerger le palmier dattier sur un rayon bien défini pendant un temps connu pour subvenir aux besoins de toute l'exploitation.

Certes, la manière dont l'espace est occupé dans les oasis traditionnelles impose ce système d'irrigation, qui semble être rationnel et économique au niveau de la parcelle. D'autant plus que le palmier dattier comme culture principale dispose d'un système racinaire particulier (à la fois pivotant et fasciculé). Il exige des quantités importantes en eau sur toute la parcelle qu'il entoure afin de satisfaire ses besoins en eau.

Quant aux producteurs préférant l'irrigation localisée, ils représentent 32 % à Biskra et 4 % uniquement à Ouargla. En réalité cette technique est économisatrice d'eau et du travail agricole, mais ceux qui l'ont essayé dans certaines exploitations de création nouvelle l'ont vite contesté et abandonné, sous prétexte qu'elle ne répond pas aux exigences et aux besoins du palmier dattier dont les besoins sont disproportionnés aux quantités apportées par les goutteurs. L'adoption de cette technique d'irrigation risque de priver les cultures intercalaires d'une irrigation convenable. Par conséquent, l'espace agricole devient monoculturel, ce qui est en aucun cas acceptable par les fellahs.

Actuellement, la majorité des nouveaux périmètres agricoles doivent être équipés d'un appareil d'irrigation localisée avec le respect des normes de plantation (l'écartement par exemple). Il est évident que les politiques nationales visent en priorité à économiser l'eau agricole, notamment souterraine qui est peu renouvelable. Par contre, l'irrigation localisée n'est pas adaptable pour toutes les cultures, particulièrement le palmier dattier dont les exigences hydriques sont conséquentes.

En définitif, il s'avère que les pertes dans la parcelle, dans le cas des palmeraies pratiquant l'irrigation par submersion, sont infimes par rapport à celles qui sont enregistrées en amont au niveau des conduites et dans lesquelles il faut agir en priorité.

Références

- [1] ABABSA S 1999 : « Développement régional et recherche agronomique : Questionnement », Les deuxièmes journées scientifiques de l'INRA sur l'agriculture saharienne, Éd INRA, Touggourt (Ouargla), pp 79-83.
- [2] AGLI N 1988 : Biskra, analyse et extension du centre ville, DEA, Université de Paris, 201 p.

- [3] AIDAOUIS 1994 : Ressource en eau et aménagement hydro-agricole dans la région de Biskra "Ziban" (Algérie) (s/dir BONNEFONT J-C et DARYAM), thèse de doctorat en géographie, Université de Nancy II, 353 p.
- [4] ALKAMA D 1995 : Analyse typologique de l'habitat, cas de Biskra, Magistère, Université de Biskra (sous direction de M Zerouala), 260 p.
- [5] ANRH 2015 : Schéma Directeur des Ressources en Eau dans la Wilaya de Biskra, Éd ANAT, Alger, 56 p.
- [6] ANRH 2015 : Situation et besoin de développement en matière d'irrigation et de drainage en Algérie, Éd ANRH, Alger 201 p.
- [7] BALLAIS J-L 1994 : Désertification et barrage vert en Algérie : Le cas des Ziban, Revue de géomorphologie dynamique, Paris, Tome XLIII, n°1, pp 1-18.
- [8] BALLAIS J-L, CÔTE M et BENSAADA 2001 : L'influence de la géomorphologie sur le comportement de la nappe phréatique du Souf, Multigr, Édi IRMAM, Aix-en-Provence, 15 p.
- [9] BALLAIS J-L 2015 : Les villes sahariennes et les ressources en eau, (la ville et le désert, s/dir CÔTE M), Éd IREMAM-Karthala, Aix-en-Provence-Paris, pp 73-93.
- [10] BISSON J 1957 : Le Gourrara, étude de géographie humaine, Institut de recherche saharienne, Alger, 222 p.
- [11] BISSON J 1991 : « Le Sahara dans le développement des États maghrébins », Monde arabe, Maghreb-Machrek, 134, pp 3-27 et n° 135, 1992, pp 79-106, Paris, La documentation française.
- [12] BISSON J 1993 : Paysannerie du Sahara maghrébin, dynamique locale et politiques de développement, cours spécialisés de développement des zones arides et désertiques, Éd URBAMA, Tours, 23 p.
- [13] BISSON J 1993 : « Les oasis entre modèles et chorèmes, Variation sur le Gourrara (Sahara algérien) », Les Cahiers d'URBAMA, n° 8, Tours, pp 131-140.
- [14] BISSON J 1995 : « Les marges sahariennes : Lieux d'affrontement des spatialités », Cahier du CERES, série Géographie, n° 12 (« Les oasis au Maghreb. Mise en valeur et développement »), Tunis, pp 13-28.
- [15] BISSON J 1997 : Pays de Ouargla et Mzab, emploi, urbanisation régionalisation au Sahara algérien, in fascicule 5, Urbanisation et nouvelle organisation des campagnes au Maghreb, ERA n° 706, Tours p 77.
- [16] BISSON J et V 2002 : « Rôle et évolution de capitales de région dans le fonctionnement de l'espace au Sahara », Méditerranée n° 3, 4-2002, Aix-en-Provence, pp56-70.
- [17] BISSON J 2003 : Mythes et réalités d'un désert convoité, « Le Sahara », Éd l'Harmattan, Paris, 479 p.
- [18] FOUFOU A 2009 : La gestion paysanne des ressources naturelles dans le Bas-Sahara algérien, Cas de Ouargla et Biskra. Thèse de Doctorat (s/dir J-P BORD) Université Paul Valéry Montpellier 3, 534 p.
- [19] KHADRAOUI A 2015 : Gestion des ressources en eau et en sols dans les oasis algériennes, Conférence Euro-Africaine, Unesco, Paris 2015.
- [20] PERIN M 1933 : « Le palmier dattier » la propriété dans les oasis et la question de l'eau, Librairie COURVILLE G, Paris 1933. 109 p.
- [21] ROUABHIA et al 2009 : Impact des activités anthropiques sur la salinité des eaux souterraines d'un aquifère en zone semi-aride : Cas de la plaine de la Merdja, Nord-Est de l'Algérie. Revue sécheresse, Vol 20, n°3, juillet-août-septembre 2009, pp 279-85
- [22] ROUSSEAU D 1987 : « Mutations spatiales et fonctionnelles à Biskra », un cas de croissance urbaine au Sahara algérien, rapport de recherche, Géographie du Monde arabe, Université de Poitiers, 48 p.

Apport combiné de la télédétection et de la géophysique à l'identification des réserves en eau souterraine de la localité de Belle ville (Centre-ouest Côte d'Ivoire)

Kouassi Eric-Germain Kouakou I, N'Dri Antoine Kouadio 2, Waidhet Arthur Brice Konan 3

¹Département de Géosciences, UFR des Sciences biologiques, Université Péléforo Gon Coulibaly de Korhogo, BP 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire, +22549397339, ericgermainkouassi@gmail.com

² Département de télédétection, UFR en Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, Côte d'Ivoire, BP 150 Daloa, +22547098453, akouadio85@gmail.com

³ Département de télédétection, UFR en Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, Côte d'Ivoire, BP 150 Daloa, +22547938728, konanwab@yahoo.fr

Résumé

Du fait de la démographie galopante, la localité de belle ville est soumise à un manque criard de ressource en eau potable. Et cela du fait de la faible productivité des aquifères de socle identifiées par les études antérieures. Pour ce faire une étude prospective combinant télédétection, géomorphologie et géophysique de la proche surface a été utilisée pour la localisation et la caractérisation des aquifères de fissures pour la réalisation de forages à gros débits (>10 m³/h). Une carte des linéaments de la localité de Belle ville a été établie pour servir de guide pour l'étude sur le terrain. Celle-ci a mis en évidence deux directions principales N140-150 et N40-50. Les travaux géophysique ont permis de renforcer la connaissance de la structure géologique du sous-sol par l'identification de fractures orientée N22°, N118° et N175° et par la caractérisation des zones de fracturations favorables à la présence d'aquifères de fissures. Les forages réalisés au niveau des discontinuités géologiques identifiées N118° et N22° ont donné successivement un débit air-lift de 2,2 et 11 m³/h, avec des fractures productives respectivement à 21,3, 37, 49, et 55 m de profondeur. Ce qui a permis de résoudre le problème d'approvisionnement en eau de Belle ville.

Mots clés :Fracture, Aquifères de fissures, Forage, Linéaments, Géophysique, Belle ville

Combined contribution of remote sensing and geophysics to the identification of underground water reserves in Belle ville (center southern Côte d'Ivoire)

Abstract

The city of Belle ville is subject to a screaming lack of drinking water resources. This is due to the low productivity of basement aquifers identified by previous studies. To do this, a prospective study combining remote sensing, geomorphology and near-surface geophysics was used for the localization and characterization of crack aquifers for the drilling of high flows (> 10 m³ / h). A map of the lineaments of Belle ville locality has been established to serve as guide for the study on the ground. This highlighted two main directions N140-150 and N40-50. The geophysical work has made it possible to reinforce the knowledge of the geological structure of the subsoil by the identification of fractures oriented N22°, N118° and N175° and by the characterization of fracture zones favorable to the presence of fissure aquifers. Drilling carried out at the level of the geological discontinuities identified N118° and N22° gave successively an air-lift flow of 2.2 and 11 m³ / h, with productive fractures respectively at 21.3, 37, 49, and 55 m of depth. This made it possible to solve the problem of water supply in Belle ville.

Key Words: Fracture, Crack aquifer, Drilling, Lineaments, Geophysics, Belle ville

1. INTRODUCTION

Les réseaux de fractures constituant les principaux axes d'écoulements souterrains, il est fondamental pour la recherche des eaux souterraines de les connaître [1, 2, 3, 4]. La localité de Belle Ville soumise à cette étude, du fait de sa démographie galopante subit un manque criard de cette denrée. Pour y remédier, plusieurs études ont été menées, cependant force est de constater que le problème persiste. Et cela du fait de la faible productivité des aquifères de socle identifiées par ces études. La prospection de l'eau souterraine nécessitant un enchaînement de procédure adapté à une meilleure identification des structures susceptibles de loger des nappes d'eau importantes, une étude plus approfondie via des approches combinées télédétection et géophysique de la proche sub-surface a été développée. L'objectif de cette étude est de maximiser le taux de réussite dans la réalisation des points d'eau en identifiant les zones favorables au forage à gros débit.

La localité de Belle Ville se situe dans la sous-préfecture de Zoukougbeu à environ 20 km de celui-ci (Figure 1). Il est drainé par le Sassandra et la Lobo.

Du point de vue géologique, Belle Ville se trouve sur substratum granitique à biotite hétérogène. Cette formation géologique est affectée par des activités tectoniques majeures ayant entraîné une forte fracturation de la zone qui joue un rôle essentiel dans l'hydraulicité du système aquifère. Le modèle d'aquifères rencontré est de type bicouche constitué d'un niveau altéré et d'un niveau fissuré. La principale direction des fractures observées est NNO [5]. Les forages antérieurs (07 ouvrages) de la localité de Belle Ville réalisés sur substratum granitique présentent un débit maximum de 3 m³/h avec des arrivées d'eau à des profondeurs comprises entre 43 et 76 m. La profondeur du socle sain varie entre 20 et 35m.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.2. Cartographie linéamentaire et géomorphologie

Dans le socle cristallin, un forage doit être implanté sur une fracture choisie essentiellement pour son action drainante [1]. L'utilisation de la télédétection dans un tel contexte n'est plus à démontrer [6]. Il est un moyen rapide pour le levé et le choix des fractures. La cartographie linéamentaire a consisté à l'application de techniques de rehaussement dont l'ACP et le filtrage spatial de type directionnel (Sobel 7x7) sur la scène (198 ; 055) d'une image satellitaire Landsat 7 ETM+. Le relevé des linéaments structuraux s'est fait manuellement.

Sur les sites présélectionnés, la géomorphologie a consisté à l'analyse de l'état de surface des sites prédéfinis pour la recherche d'indices favorables à l'existence des nappes d'eaux souterraines. C'est sur les sites ainsi définis que les implantations géophysiques sont réalisées.

2.4. Etude de la variabilité latérale des matériaux par traîné électrique

Le traîné électrique permet à travers les variations latérales des résistivités à une profondeur constante de détecter les discontinuités dans le socle. Deux configurations ont été employées, d'abord le dispositif Schlumberger (AB= 200m, MN=20m, profondeur d'investigation variant entre 38 à 50m [7, 8]) pour identifier les zones anormales sur lesquelles, le dispositif gradient rectangle (AB = 400m ; 700m ; MN = 10) est déployé pour une plus grande profondeur d'investigation (76 – 130 m) et la réalisation de profils parallèles, cela dans l'optique de caractériser les fractures.

2.5. Etude de la variabilité verticale des matériaux par sondage électrique

Les sondages électriques servent à déterminer la succession des différentes couches sur la base des résistivités et des épaisseurs. Pour notre étude, trois sondages électriques suivant le dispositif Schlumberger ont été réalisés, sur les zones anormales, en faisant varier l'écartement des électrodes (a) de 1 m à 200 m. La modélisation des couples de valeurs résistivité apparente (ra)-écartement entre électrodes (a) par $lp2win/IX1D$ permet de déterminer la résistivité et l'épaisseur des différentes couches.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Analyse des linéaments et de l'état de surface

Le traitement des images satellitaires a permis d'avoir une cartelinéamentaire de la zone d'étude qui montre que les familles directionnelles N140-150 (23%) et N40-50 (21,6%) sont majoritaires. Les directions secondaires sont orientées N130-140 (10,7%), N30-40 (10,7%) et N50-60 (10,7%) (Figure 1).

Sur cette carte, la reconnaissance de terrains a permis de définir deux zones potentiellement favorables, le site 1 et le site 3. Le site 1, en plus d'être le lieu d'un nœud des linéaments N98° et N53°, contient une source pérenne (737900 ; 760818) et est à proximité d'une zone humide. Le site 3 quand à lui est à proximité d'une zone de

rencontre du réseau de drainage, est le lieu d'un nœud des linéaments N50°, N30° et contient un puits intarissable (737346; 761547).

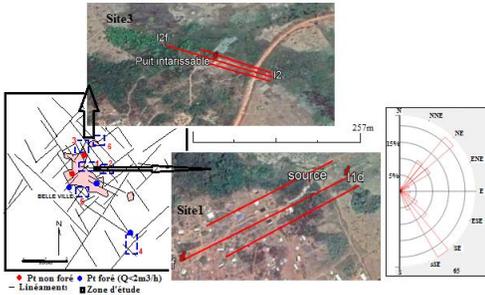


Fig. 1- Localisation des sites retenus pour géophysiques à Belle ville

3.2. Identification et caractérisation des zones de discontinuité

Les profils parallèles réalisés suivant le dispositif gradient rectangle sur les zones conductrices identifiées par traîné suivant le dispositif schlumbergeront mis en évidence sept fractures orientées N118° (04), N22° (02) et N175°. Les cartes de résistivités apparentes confirment ces structures et font apparaître des zones anomaliques conductrices aux extrémités du site 1 et plus dans la zone centrale au niveau du site 2, avec l'existence d'une structure particulière au niveau du site 1 qui pourrait être une faille de direction N55° (Figure 2).

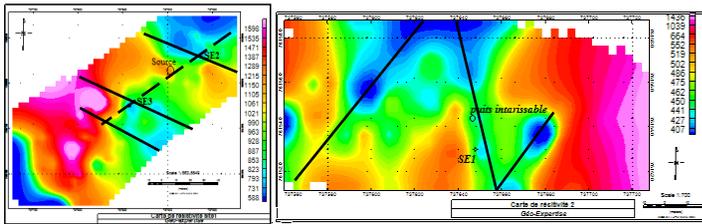


Fig. 2- Carte de résistivité apparente des site 1 et 2

3.3. Interprétation des résultats des sondages électriques

L'interprétation des résultats des trois sondages électriques présente une stratification globale à 3 terrains qui sont la latérite, les altérites et le complexe arène-substratum sain relativement fissuré. La latérite présente généralement deux niveaux bien individualisés sur les différents sondages avec une épaisseur maximum estimée de 10 m. les altérites généralement de faible résistivités peuvent présenter localement une intercalation gravelleuse (SE2; 581 Ohm.m; 3 m). Le complexe arène-substratum sain relativement fissuré est estimé à 20m de profondeur au minimum et est bien mis en évidence sur le sondage 1 (Figure 3)

Les sondages SE2 et SE1, du fait de leur positionnement respectifs à proximité d'une source et puits intarissable, sur des fractures N118° et N175° ont été sélectionnés comme des points à forer en priorité.

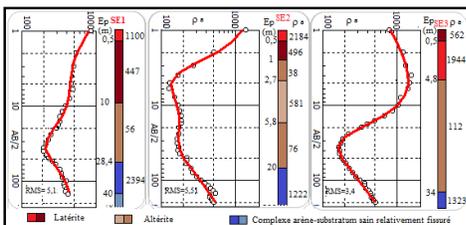


Fig.3-Interprétation des sondages SE1, SE2 et SE3 de Belle ville

En plus du critère d'orientation des fractures, les sondages électriques présentent des indices de présences de fracturation horizontale [9, 10] : escalier sur la branche montante (SE1), accroissement brutal du complexe

conducteur ou fond de bateau très évasé (SE2). La conjugaison de ce paramètre avec le potentiel géomorphologique (les dépressions, source pérenne, puits intarissables et les bas-fonds, les alignements de végétation, les zones d'écoulements) est déterminant car les forages réalisés sur ses sondages ont donné respectivement des débits de 11 m³/h et 2,2 m³/h avec des fractures productives respectivement à 21,3, 37, 49, et 55 m de profondeur.

3.4. Modélisation géophysique et recalage stratigraphique

Les forages implantés sur les sites au point des sondages SE2 et SE1 ont permis d'avoir un modèle hydrogéologique à cinq niveaux ; l'argile latéritique d'un mètre d'épaisseur maximum surmontant un niveau argileux de 4,5 m d'épaisseur minimum en contact avec un horizon argilo-sableux de forte épaisseur (14 à 23m). Un horizon de socle granitique altéré et/ou fracturé dont le toit se situe au minimum à 21,2 m de profondeur surmonte le socle sain dont le toit se situe au minimum à 40 m de profondeur (Figure 4).

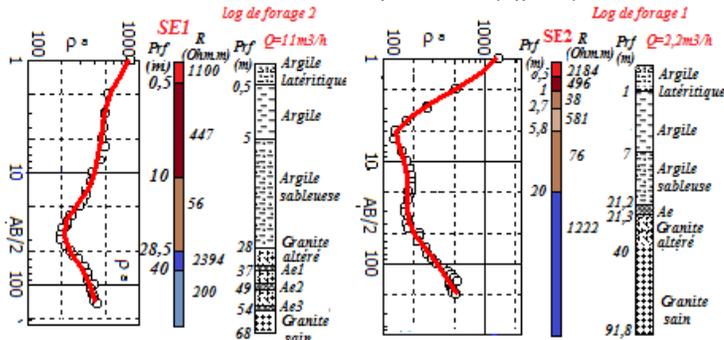


Fig. 4-Modèle obtenu des sondages SE1, SE2 et coupes lithologiques

CONCLUSION

L'usage combinée de la télédétection et de la méthode de résistivité électrique dans la prospection des eaux souterraines dans la localité de Belle ville a permis de déterminer avec une bonne précision la position exacte des anomalies conductrices et plusieurs fractures orientées autour des directions N175°, N118° et N22°. En outre elle a permis une estimation de l'épaisseur des saprolites et la localisation des niveaux altérés et fissurés dans le substratum faisant suite à une implantation de forages de débit horaire 2,2 et 11 m³.

Références

- [18] CIEH, Méthodes d'études et de recherches de l'eausouterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest, Travaux complémentaires sur les milieux fissurés vol.2, 1979, 204p
- [19] K. T. Yao, F. Grogbla, M. S. Oga and T. Assoma, Extraction de linéaments structuraux à partir d'images satellitaires et estimation des biais induits, en milieu de socle précambrien métamorphisé, Télédétection, 10(4) (2012) 161-178.
- [20] M. Youan Ta, T. Lasm, J. P. Jourda, K. F. Kouamé and M. Razack, Cartographie structurale par imagerie satellitaire ETM+ de Landsat-7 et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire), Télédétection, 8(2) (2008) 119-135.
- [21] T. Lasm, Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: Analyse statistique de la fracturation et des propriétés hydrodynamiques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen), Thèse de doctorat, Université de Poitiers 2000
- [22] GEOMINES, Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Carte de Daloa, cahier n°28, (1982) 19 p
- [23] J. P. Jourda, M. B. Saley, E. V. Djagoua, K. Kouamé, J. Biémi and M. Razack, Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation", Télédétection, 5 (4) (2006) 339-357.
- [24] Edwards L. S., A modified pseudosection for resistivity and IP, Geophysics, 1977, Vol. 42, n°5.
- [25] D. SAME, Hydrogéologie en milieu de socle cristallin et cristallophyllien du Sénégal oriental: Application de la méthode électrique 1D et 2D à la localisation et à la caractérisation des aquifères du batholite de Saraya et ses environs", Thèse de Doctorat 3ème Cycle, Université Cheikh Anta Diop (Dakar) 1999

- [26] Y. Koussoube, S. Nakolendousse, P. Bazie, A. N. Savadogo, Typologie des courbes de sondages électriques verticaux pour la reconnaissance des formations superficielles et leur indice en hydrogéologie du socle cristallin du Burkina Faso, Sud sciences et technologie n°10, (2003) 26-34
- [27] Kouakou E. G. K, Sombo A. P., BIE G.R., Aka E., Kouame LN., Etude comparative de resultats de sondages électriques et des coupes lithostratigraphiques de forages en region de socle (Nord de la Côte d'Ivoire). Larhyss Journal, n°25, (2016) 101-119

Effets anthropiques et contamination du littoral de la région de Gabès : approche géochimique et effet de l'hydrodynamisme

Bassma Mansouri, Adel Kharroubi¹, Maher Gzam, Abdelkader Chahlaoui¹¹

¹Unité de Recherche Hydrosociences Appliquées, ISSTEG, Campus Universitaire Zrig
Gabès, 53 321 058, bassma.mns@isstegb.rnu.tn

Résumé

Le présent travail est relatif à la contamination de la zone littorale du grand Gabès. Un intérêt particulier est accordé aux effets des activités anthropiques et de la dynamique littorale sur les aspects relatifs aux apports et à la distribution des polluants le long de la côte. Dans un premier temps, une campagne d'échantillonnage a été menée pour recueillir 16 échantillons; 8 au niveau de la plage et 8 dans la zone intertidale. Par la suite des analyses géochimiques et granulométriques ont été réalisées. Les métaux lourds (Zn, Cu, Pb et Cd) ainsi que les sulfates, le phosphore, le chlore, le sodium, le calcium, le brome et le pourcentage de la fraction fine ont été quantifiés pour l'ensemble des échantillons. Deux approches ont été adoptées pour l'interprétation des résultats; une approche descriptive qui a montré que le littoral est soumis à une pression anthropique assez conséquente. Il a été démontré que la zone littorale est très polluée par divers éléments et essentiellement les métaux lourds. La deuxième approche, quantitative, a permis d'identifier, par analyse des composantes principales, les origines potentielles des polluants. L'impact des rejets en provenance des activités chimiques est le plus marqué. Ce travail préliminaire a montré, des études plus approfondies sont indispensables pour mieux comprendre les mécanismes de transfert et d'échanges ioniques entre les polluants et les divers milieux tels que les sédiments, l'eau et l'air. Sans aucune doute, que la zone d'étude est largement polluée par les activités anthropiques.

Mots clés : Contamination, littoral, activités anthropiques, métaux lourds.

Abstract

The present work deals with contamination of the littoral zone of Gabès town. Special interest is given to the effects of anthropogenic activities and coastal dynamics on the aspects of pollutant inputs and distribution along the coast. As a first step, a sampling campaign was set up to collect 16 samples; 8 at the beach and 8 in the intertidal zone. Subsequently, geochemical and granulometric analyzes were carried out. Heavy metals (Zn, Cu, Pb and Cd) as well as sulphates, phosphorus, chlorine, sodium, calcium, bromine and the percentage of the fine fraction were quantified for all samples. Two approaches have been adopted for the interpretation of the results; a descriptive approach that has shown that the coastline is subject to fairly significant human pressure. It has been shown that the littoral zone is very polluted by various elements and essentially heavy metals. It seems that coastal dynamics has a major contribution in the transport and deposition of various contaminants. The second quantitative approach permitted, by principal component analysis, to the potential origins of pollutants. The impact of releases from chemical activities is greatest. This preliminary work has undoubtedly shown that the study area is largely polluted by anthropogenic activities. This study demonstrates that the study area is largely polluted by human activities. More studies are needed to better understand the mechanisms of ion transfer and exchange between pollutants and the various media such as sediments, water and air.

Key words: Contamination, littoral, anthropic activities, heavy metals

1. INTRODUCTION

Le littoral Tunisien représente un capital inestimable par la valeur de ses écosystèmes, de son patrimoine culturel, par l'importance de sa fonction sociale et de son identité maritime. Le golfe de Gabès a été soumis, depuis plusieurs décennies, à des pressions anthropiques importantes. Les activités industrielles installées sur la région ont contribué de manière flagrante à la dégradation du littoral et de l'espace marin.

Ainsi, l'objectif de cette étude consiste à la recherche scientifique dans le domaine de l'environnement et particulièrement les aspects liés aux effets anthropiques et la contamination des environnements hydriques. La conciliation des objectifs de la recherche scientifique et les besoins pratiques permet de développer les réponses nécessaires à une gestion durable et optimale des environnements littoraux dans un contexte de plus en plus défavorable. Un intérêt particulier est accordé à la problématique de la contamination des eaux marines par les divers rejets industriels. Le présent travail est relatif à la caractérisation de la contamination du littoral de la ville de Gabès. Un intérêt particulier est attribué à l'effet des rejets industriels sur la dégradation de la côte allant de Gabès Sud jusqu'à Gabès Nord. Diverses approches sont adoptées pour accomplir cette étude. Le rôle des courants marins est pris en compte pour comprendre la répartition spatiale des divers polluants au niveau de la frange littorale de la ville de Gabès.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le présent travail repose, en grande partie, sur l'aspect pratique. Pour se faire, une campagne d'échantillonnage a été menée. Par la suite les échantillons prélevés sur le terrain ont servi pour analyser les divers paramètres nécessaires à cette étude. Des échantillons de sables ont été récoltés le long de la côte de la ville de Gabès (de Limaoua jusqu'à Ghannouch). A chaque point, un échantillon de la plage et un autre de l'intertidal sont prélevés.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'objectif majeur de cette étude est de comprendre le mécanisme de la contamination des environnements littoraux de la ville de Gabès soumise à des pressions anthropiques importantes. Un intérêt particulier est accordé à la distribution spatiale des polluants ainsi qu'au rôle de la dynamique littorale et l'orientation des courants marins dans le transport et l'accumulation des polluants. Les métaux lourds, en provenance des boues industrielles rejetées dans le milieu marin, font l'objet d'une importance capitale. Pour mener à bien cette étude, une analyse descriptive, basée sur la variabilité spatiale des divers polluants, sera accomplie. Elle sera appuyée par une étude statistique qui mettra en relation divers éléments et aboutira à l'identification des sources potentielles de contamination.

3.1. Evolution au niveau des sables de la plage

a) Les Métaux lourds

Les métaux lourds quantifiés au niveau des sables de la plage sont : Le zinc, le plomb, le cuivre et le cadmium. La variabilité spatiale de leurs teneurs est représentée par la figure suivante :

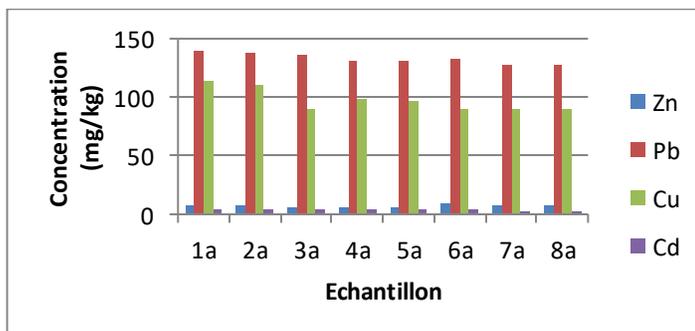


Figure I. Evolution des teneurs en Zn, Pb, Cu, et Cd au niveau de la plage

L'étude de la répartition spatiale des métaux lourds le long de la plage permet de constater des concentrations anormalement élevées de ces éléments. Cela indique une contamination des sédiments de la plage par les divers métaux lourds diagnostiqués. La comparaison de la concentration moyenne

des métaux lourds dans les sables de la plage par rapport à celle mesurée dans les rejets (tableau 5) montrent que les sables sont largement plus riches en métaux lourds que les rejets. Cette constatation démontre qu'un processus d'accumulation des métaux lourds s'est mis en place. Il est responsable de l'enrichissement des sédiments de la plage en divers contaminants.

Tableau 5 : Teneurs en métaux lourds dans les sables de la plage et dans les rejets

Élément	Zn	Pb	Cu	Cd
Concentration moyenne (plage) (mg/kg)	7.15	133	97.5	3.8
Concentration rejets (mg/kg)	0.034	0.43	0.46	0.012

I.2. Evolution au niveau des sables de l'intertidale

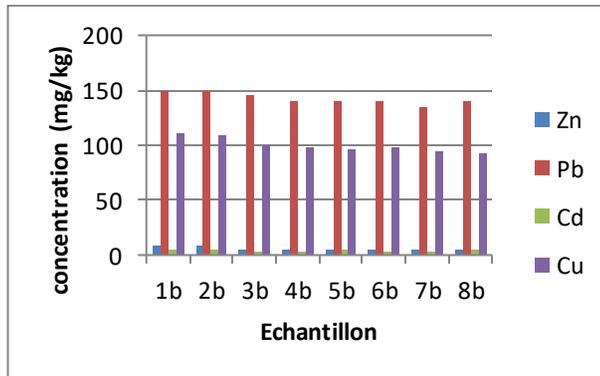


Figure 2. Teneurs en métaux lourds au niveau de l'intertidale.

Les teneurs en métaux lourds (Zn, Pb, Cd et Cu) restent assez élevées au niveau des sables de l'intertidale (figure 21). Comme dans le cas au niveau des sables de la plage, des processus d'accumulation sont mis en place et sont responsables d'un enrichissement inquiétant en métaux lourds, toxiques pour la faune, la flore et pour la santé humaine.

CONCLUSION

Cette étude relative à la répartition et à l'origine des polluants au niveau du littoral de la ville de Gabès a montré la complexité de la problématique abordée. Toutefois, les diverses analyses effectuées montrent une contamination assez importante de la cote allant de Limaoua jusqu'à Gabes Nord. L'identification de la répartition spatiale des contaminants met en évidence le rôle majeur des rejets de phosphogypses dans les apports en polluants. La zone d'étude semble être affectée par les activités anthropiques à travers des teneurs anormalement élevées en polluants. La concentration des divers éléments analysés montre des anomalies largement positives. Les métaux lourds constituent l'anomalie la plus vulnérable. Leurs concentrations, très élevées, représentent une menace réelle de point de vue environnemental. Cette menace est accentuée par des processus d'accumulation dont les empreintes sont bien marquées au niveau du littoral de la ville de Gabes.

Références:

1. Abdennadher, J., Boukthir, M., Numerical simulation of the barotropic tides in the Tunisian shelf and the strait of Sicily, *Journal of Marine Systems*, 63, (2006) 162-182.

2. Ammar, E., Sassadate, K., Bouzid, J., Charif, M., Ben Jemaa, M &Medhioub, K., "Impact des rejets industriels du complexe chimique de Ghannouch sur la qualité des eaux marines du golfe de Gabès", rapport réalisé à la demande de l'agence nationale de la protection de l'environnement (1991).
3. Anonyme, rapport interne Etude sur les impacts des polluants de la société « SIAPE » sur Sfax, Rapport interne, (1996) 23 P.

L'ANALYSE DES CARACTERISTIQUES DE LA SECHERESSE UTILISANT LES COPULES ARCHIMEDIENNES

Soumia Mellak¹, Doudja Souag¹, Yazid Tikhamarine¹, Abderrahmane Ballah²

¹Laboratoire LEGHYD. Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene (USTHB), Bab Ezzouar, Alger, Algérie, mellak.soumia@yahoo.com ;
Tel : +213672231990

²Centre universitaire Amine Alakkal Elhadj Moussa Eg Akhamouk-Tamanghasset
B.P 10034 route de l'aéroport-Tamanghasset-11000, Algérie

Résumé

La sécheresse est l'une des catastrophes naturelles qui ont marqué profondément la vie des populations à travers les âges. L'indice des précipitations standardisé de 3 mois (SPI3) a été utilisé pour identifier les caractéristiques de la sécheresse telle que : la durée et la sévérité, dans cette étude nous avons utilisé les copules archimédiennes pour modéliser la dépendance entre la sévérité et la durée de la sécheresse à différentes périodes de retour, les résultats obtenus sont résumés sous forme de courbes sévérité-durée-fréquence (SDF). deux stations pluviométriques ont été choisies ; la première est celle de TIFFELFEL à l'Est et l'autre c'est la station de MECHERIA située à l'Ouest du pays, la comparaison entre les caractéristiques calculées dans ces stations a bien montré la forte sensibilité de la station MECHERIA au phénomène de la sécheresse.

Mots clés : sécheresse, SPI, copule, SDF, Algérie.

ANALYSIS OF DROUGHT CHARACTERISTICS USING ARCHIMEDEAN COPULAS IN ALGERIA

Abstract

Drought is one of the natural disasters that have profoundly affected the lives of people throughout the. A 3-month standardized precipitation index (SPI3) was used to identify the drought characteristics such as: duration and severity, in this study we used Archimedean copulas to model the dependence between drought severity and duration at different return periods, the obtained results are summarized in the form of severity-duration-frequency (SDF) curves. Two rainfall gauge stations were chosen for this study; the first is that of TIFFELFEL in the East and the other of MECHERIA is located in the West of the country, the comparison between the characteristics calculated in these stations has shown the high sensitivity of the MECHERIA station to the phenomenon of drought.

Key Words: drought, SPI, copula, SDF, Algeria.

3. INTRODUCTION

Une sécheresse peut généralement être définie comme un phénomène naturel complexe difficile à quantifier et à gérer. Elle commence par une absence prolongée des précipitations et peut affecter le débit, l'humidité du sol et l'eau souterraine. Ceci est considéré comme un événement normal récurrent qui se produit dans toutes les régions climatiques. Comme il s'agit d'un phénomène rampant, il est souvent difficile de détecter son début, [Wilhite et Glantz, 1985].

Il existe plusieurs types de sécheresse : i) *Sécheresse météorologique* : correspondant à un déficit prolongé de précipitations ; ii) *Sécheresse agricole* : qui se caractérise par un déficit en eau dans les sols, elle a un impact sur le développement de la végétation. Ce type de sécheresse va dépendre des précipitations reçues sur la zone, ainsi que de l'évapotranspiration des plantes ;lii) *Sécheresse hydrologique* : se manifeste lorsque les cours d'eaux montrent un niveau anormalement bas. Les précipitations vont être un facteur clé, mais aussi du type de sol contenant les cours d'eau (perméabilité du sol).

Les sécheresses sont caractérisées par de multiples attributs, telles que la sévérité, la durée et la période de retour [shiau et Modarres, 2009]. Les copules sont utilisées pour lier différentes distributions marginales pour construire la fonction de distribution multivariée conjointe. Les copules sont largement utilisées pour étudier la distribution multivariée en hydrologie.

4. MÉTHODOLOGIE :

a. L'indice des précipitations standardisé (SPI) :

L'indice des précipitations standardisé (SPI) créé par [Meckee 1993], Le calcul de l'indice SPI est basé sur un historique de précipitations sur une longue durée (au moins 30 ans). Cette série de précipitations est adaptée à une distribution de probabilité (gamma), qui est alors transformée en une distribution normale de sorte que la moyenne de SPI est nulle et l'écart type est égal à l'unité. Le SPI peut être calculé à différentes échelles du temps (1 ; 3 ; 6 ; 9 ; 12 ; 24 mois. etc). Les valeurs positives de SPI indiquent les mois humides et les valeurs négatives indiquent les mois secs.

b. Les caractéristiques de la sécheresse :

Les sécheresses sont caractérisées en quatre dimensions: la sévérité, la durée, la distribution spatiale et la fréquence (ou période de retour),

- **La durée** :est définie comme le nombre de mois où le SPI reste négatif.
- **La sévérité** :est le degré de déficit en précipitations, elle est définie comme la somme des valeurs SPI successivement négatives.
- **La distribution spatiale** :est la surface (ou le pourcentage de surface) affectée par la sécheresse.
- **La fréquence (période de retour)** : La fréquence ou la période de retour d'une sécheresse est définie comme le temps moyen entre les épisodes de sécheresse.

c. Les copules archimédiennes :

En statistique, une copule est un objet mathématique venant de la théorie des probabilités. Les copules permettent d'étudier la dépendance entre plusieurs variables aléatoires, avec l'idée que cette dépendance ne doit pas contenir d'information provenant des lois marginales des variables elles-mêmes.

La notion de copule archimédienne avec un seul paramètre est la plus utilisée dans les applications d'ingénierie des ressources en eau, définie par [Sklar 1959], il regroupe un certain nombre de copules (Clayton, Gumbel, Franck).

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour estimer le paramètre de copule, dans cette étude nous avons choisi le tau de Kendall en relation avec le paramètre de copule, [Genest et macKay 1986] ont défini le tau de Kendall comme un des coefficients de concordance pour mesurer l'association

Le test d'adéquation des copules GOF (Goodness Of Fit) est donné par le critère d'information Akaike (AIC). Le but est de trouver le modèle ayant la plus petite valeur d'AIC, cette valeur correspondant au meilleur type de copule.

Dans cette étude nous avons utilisé les copules pour modéliser la relation entre les caractéristiques de la sécheresse telles que la durée d et la sévérité S à différentes périodes de retour T . pour cela nous avons choisi deux stations pluviométriques la première à l'est et l'autre à l'ouest algérien.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Analyse des caractéristiques de la sécheresse

Une analyse statistique préalable des séries pluviométriques des stations de TIFELFEL et MECHERIA de la période (1970-2006) a été menée pour le comblement des lacunes, le calcul de SPI et l'estimation des couples (durée, sévérité) de chaque station. Les résultats de cette analyse sont résumés dans le tableau I :

Tableau I :Résultats de l'analyse préalable des données pluviométriques.

Caractéristiques		TIFELFEL (Est)	MECHERIA (Ouest)
Code ANRH		06.15.11	08.14.01
Coordonnées : x Y Z (m)		35° 6' 36" N 6° 13' 48" E 740	33° 32' 60" N 0° 16' 12" O 1158
Nombre d'épisode de sécheresse		56	54
Durée (mois)	Le maximum (Dmax)	14	17
	Le minimum (Dmin)	1	1
Sévérité	Le maximum (Smax)	15.28	24.32
	Le minimum (Smin)	0.04	0.05

3.2. Les courbes sévérité-Durée-fréquence (SDF) :

Les couples sévérité-durée (S,D) sont analysés. Nous avons trouvé que la sévérité (S) est bien ajustée par la loi Gamma et la durée (D) par la loi exponentielle. D'après le test GOF, nous avons trouvé que la copule de Clayton est la plus adéquate pour les deux stations et la valeur de son paramètre est de **4.84** et **4.64** pour les stations TIFELFEL et MECHERIA respectivement.

Pour chaque durée, nous avons trouvé que la variation de la sévérité en fonction de période de retour peut être exprimée comme une relation logarithmique telle que $S = a \ln(T) + b$ avec un coefficient de détermination R^2 variant entre **0.9** et **1**.

Les courbes Sévérité-Durée-Fréquence (SDF) représentent la variation fréquentielle de la sévérité à différente durée, dans cette étude nous avons analysé cette variation pour les périodes de retour de 1, 2, 5, 10 et 20 ans, puis nous avons comparé les résultats trouvés dans les deux stations pour chaque fréquence. La figure 1 (a, b, c, d, e) représente la comparaison entre les courbes sévérité-durée des deux stations pour les périodes de retour 1, 2, 5, 10 et 20 ans respectivement. Le résultat montre la sensibilité de la station de l'ouest à la sécheresse par rapport à celle de l'est,

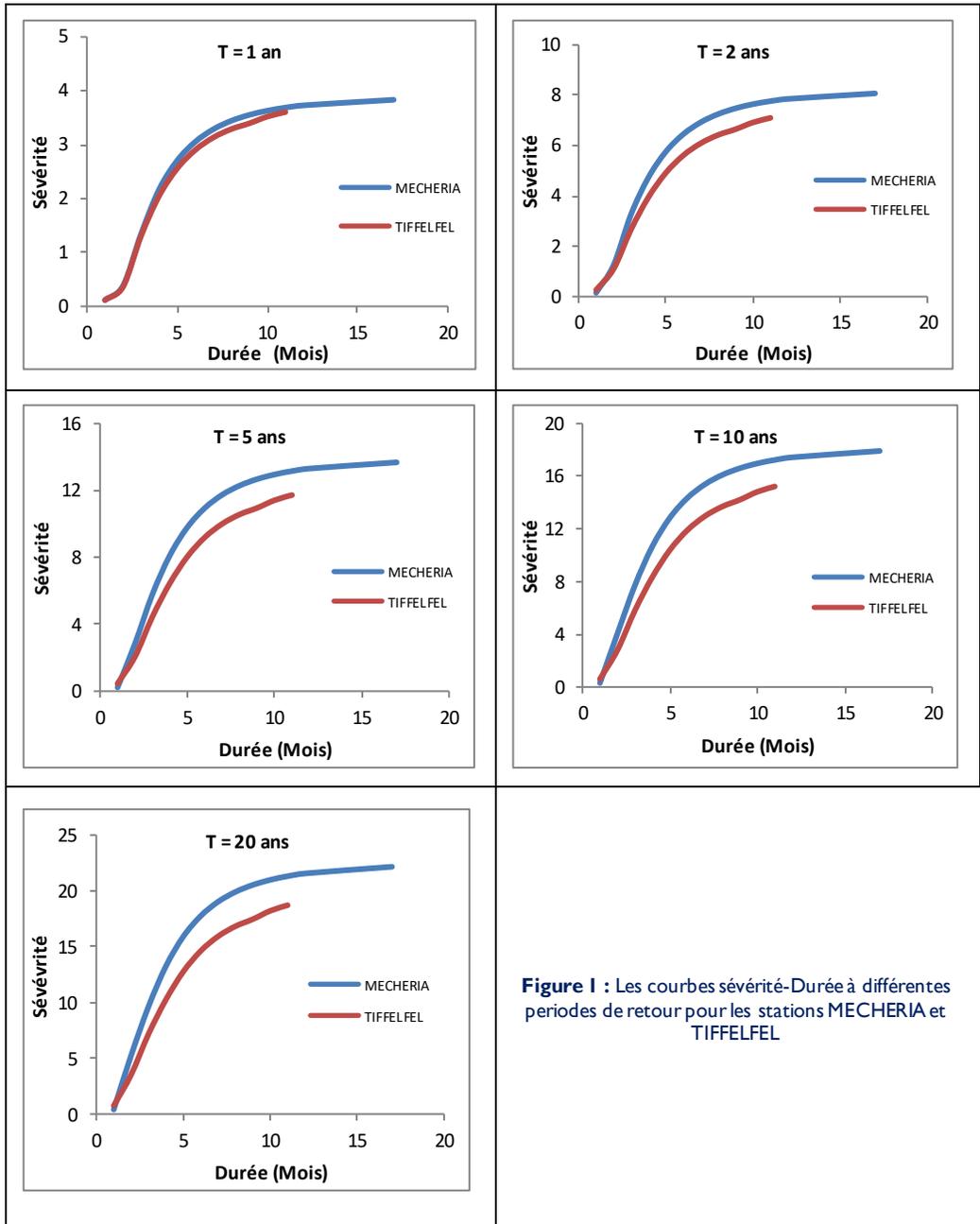


Figure 1 : Les courbes sévérité-Durée à différentes périodes de retour pour les stations MECHERIA et TIFFELFEL

La comparaison entre les deux stations montre que la station de MECHERIA est la plus touchée par une sécheresse de forte sévérité et longue durée, plus la période de retour augmente plus la sensibilité de cette station devient grande et l'écart de la sévérité entre les deux stations est important.

CONCLUSION

La sécheresse est un phénomène naturel catastrophique qui affecte la gestion et la planification des ressources en eau, l'analyse des caractéristiques de la sécheresse spatio-temporelle joue un rôle très important dans le soulagement effectif du degré de sensibilité de ce phénomène. Dans cette étude, l'indice de précipitation standardisée (SPI) est utilisé pour quantifier la sécheresse dans deux stations pluviométriques MECHERIA et TIFFELFEL situées respectivement à l'ouest et à l'est algérien. La sécheresse est identifiée lorsque les valeurs SPI sont inférieures à zéro et trois caractéristiques de sécheresse sont déterminées: la sévérité, la durée et la fréquence (ou période de retour). Les copules archimédiennes sont appliquées aux analyses temporelles de la variation de sévérité de la sécheresse. Les résultats obtenus dans cette analyse sont illustrés sous forme de courbes sévérité-durée-fréquence (SDF). La comparaison entre les courbes SDF des deux stations montre la forte sensibilité à la sécheresse de la station située à l'ouest (MECHERIA).

Références

- [28] D.A. Wilhite and M.H. Glantz 1985. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water Int*, 10, 111–120.
- [29] McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kliest, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 179–184.
- [30] K. Sklar 1959. Fonctions de répartition à n Dimensions et Leurs Marges. *Publ. Inst. Stat.Univ. Paris*, 8, 229-231.
- [31] C. Genest and J. MacKAY. 1986. The Joy of copulas: Bivariate distributions with uniform Marginals. *J. Am. Stat.* 40(4), 280-283.

L'importance d'utilisation des jardins filtrants avec des plantes ornementales dans les pays en développements

Mohammed Ali Boukebous, Mahmoud Debabeche

¹ Doctorant, Département de Génie Civil et d'Hydraulique, Laboratoire de Recherche en Génie Civil, Hydraulique Développement durable et Environnement (LARGHYDE), Université de Biskra, boukebousa@gmail.com

² Professeur, Département de Génie Civil et d'Hydraulique, Laboratoire de Recherche en Génie Civil, Hydraulique Développement durable et Environnement (LARGHYDE), Université de Biskra, m.debabeche@univ-biskra.dz

Résumé :

Les jardins filtrants ou communément appelé la phytoépuration consiste à l'épuration des eaux usées par des plantes cette méthode qui a fait une révolution dans le domaine d'épuration des eaux usées avec leur aspect de traitement écologique, leur efficacité et leur faible cout d'installation. L'utilisation de cette technique dans les pays développés tel que l'Europe et l'Amérique du Nord a montré des très bon résultats et elle a connu une grande utilisation récemment, dans ce travaux on va parler des différents types des jardins filtrants et l'importance de ces jardins filtrants avec les plantes ornementales ainsi que l'efficacité de ces plantes dans l'élimination des polluants et le côté esthétique de ces plantes et beaucoup plus l'importance d'utilisation de ces stations d'épurations Naturel dans les pays en développement surtout dans les régions géographiques éloignées qui manquent souvent d'un réseau d'égouts ou d'un système centralisé de collecte des eaux usées, et où les ressources financières sont faibles

Mots-clés : Phytoepuration, jardins filtrants, plantes ornementales, eaux usée, épuration.

The importance of using constructed wetlands with ornamental plants in developing countries

Abstract :

The constructed wetlands or commonly called phytoepuration consists of the purification of wastewater by plants this method that has made a revolution in the field of wastewater treatment with their aspect of ecological treatment, their effectiveness and their low cost of installation. The use of this technique in developed countries such as Europe and North America has shown very good results and it has been widely used recently, in this work we will talk about the different types of constructed wetlands and the importance of these systems planted with ornamental plants as well as the effectiveness of these plants in the removal of pollutants and the aesthetic aspect of these plants and much more the importance of use of these natural treatment plants in the countries mostly developing in remote geographic areas that often lack a sewer system or centralized wastewater collection system, and where financial resources are low.

Key Words: phytoepuration, constructed wetlands, ornamental plants, wastewater, purification

Introduction

Dans la plupart des pays en développement, il y en a très peu d'installations de traitement des eaux usées. Ceci est principalement dû aux coûts élevés des processus de traitement et le manque de des lois efficaces de contrôle de la pollution de l'environnement [1], dans ce cas y'avait des techniques naturelles qui ont l'avantage d'être écologiques, ne nécessitant pas de lourds investissements, faciles dans leurs mises en œuvre et qui peuvent être adaptées aux conditions climatiques de chaque région, c'est le cas de l'épuration par les plantes ou phytoépuration [2]. Ils sont conçus pour profiter de beaucoup des mêmes processus que se produisent dans les marais naturelles, mais le font dans un environnement plus contrôlé [3]. La technologie des jardins filtrants a



évolué vers des nouvelles configurations du système, une gamme beaucoup plus large de traitement et d'applications, et une présence considérablement élargie à l'échelle mondiale [4]. Cependant, parmi les macrophyte utilisée dans cette technique il y'a les plantes ornementales qui apparaissent une alternative prometteuse, en raison de leur valeur esthétique et commerciale, et bien-sur leurs capacité d'élimination des polluants qui a été démontrée dans plusieurs études. Dans ce travaux en va présenter ces études et les différences expériences utilisé et les résultats obtenu de ces dernier.

1. Les jardins filtrants

Les jardins filtrants sont des systèmes artificiels qui ont été conçu pour souligner les écosystèmes des marais naturel pour améliorer la capacité de traitement. Les jardins filtrants peuvent être construites selon divers modes hydrologiques.

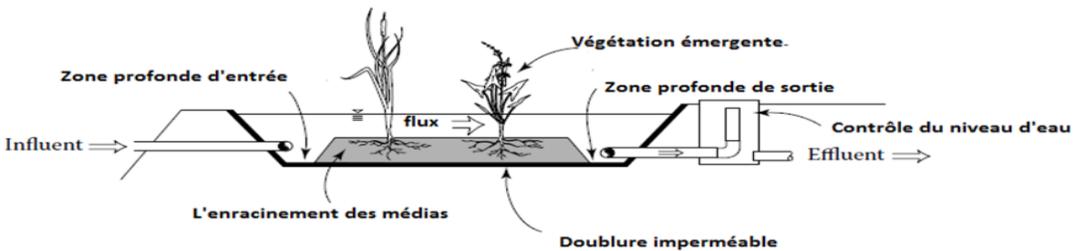
Les marais construits pour le traitement d'eau sont des systèmes complexes intégrant de l'eau, des plantes, des animaux, des microorganismes et le milieu qui les entoure [5].

D'apparence simple, le fonctionnement des lits filtrants plantés de macrophytes fait intervenir des réactions épuratoires pouvant être complexes. Mais le principe de base reste l'infiltration d'un effluent brut à travers des lits composés d'un mélange sable-gravier ou de sol en place, plantés de macrophytes (le plus souvent, des roseaux communs). Le matériau du lit et la partie racinaire des plantes servent de support à une biomasse épuratrice. On peut ainsi considérer ces stations comme des marais artificiels [6].

2. Les types des marais artificiels (constructed wetlands)

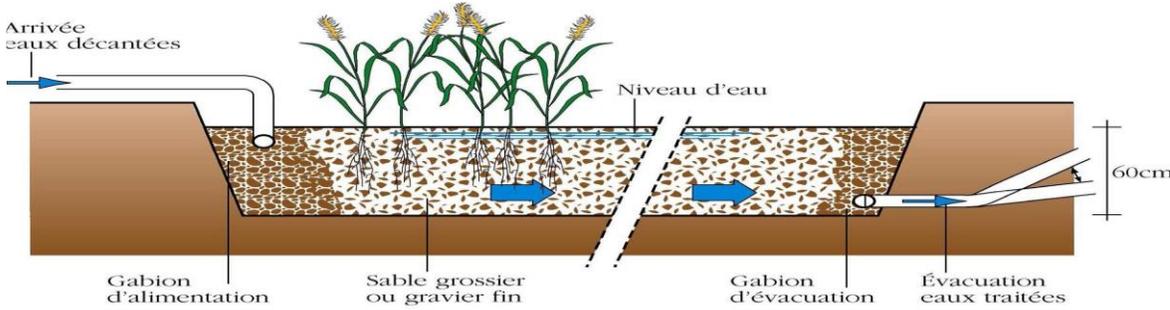
Il y'a trois types des jardins filtrants largement utiliser :

- Des jardins filtrants avec écoulement a surface libre (FWS) ont une surface d'eau ciel ouvert et sont



semblables en apparence à des marais naturels.

Figure 1. Éléments de base d'un jardin filtrant avec écoulement a surface libre [4].



- Des jardins filtrants avec écoulement souterrain horizontal (HSSF), qui utilisent généralement un lit de gravier planté. L'eau gardée sous la surface du lit s'écoule horizontalement de l'entrée à la sortie.
- Figure 2. coupe transversale schématique d'un filtre a ecoulement horizontale [7] .
- Des jardins filtrants à écoulement vertical (VF) distribuent l'eau à travers la surface d'un lit de sable ou de gravier planté dont l'eau gardée sous la surface du lit s'écoule verticalement .

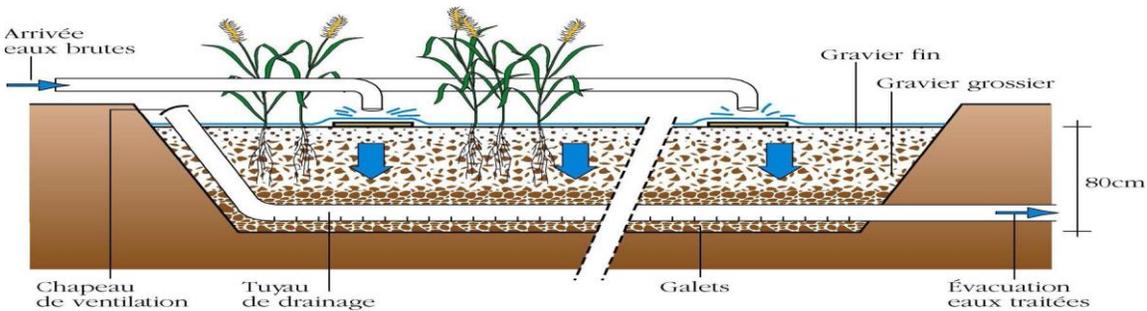


Figure 3 .coupe transversale schématique d'un filtre a ecoulement vertical [7] .

3.Le prétraitement

Les jardins filtrants ne sont pas capables d'éliminer tous les niveaux de tous les polluants, parce qu'ils sont des systèmes biologiques qui peuvent seulement exister dans une certaine enveloppe de concentrations potentielles de certains les contaminants [4].

Par conséquent, le concepteur doit adhérer à l'exigences de l'écologie sélectionnée, ces exigences ce sont le prétraitement pour permettre à un écosystème fonctionnel d'exister.

Le prétraitement constitue une partie importante du procédé de traitement des eaux usées puisqu'il permet aux principaux étages de traitement situer en aval de fonctionner correctement. Le prétraitement vise l'élimination des particules grossières en flottation et en suspension, des étages, des excédents de graisses et d'huile [7].

3.1.Dégrillage

Le dégrillage constitue la première étape du traitement, il a pour objet de retenir les éléments les plus grossiers susceptibles d'être véhiculés par le réseau, afin de protéger :

- les divers équipements tels que le système d'alimentation séquentielle par bûchées du premier étage, les rampes d'alimentation, les éventuelles pompes de relevage ou électrovannes ;
- la file boues en éliminant les déchets grossiers non biodégradables [8].



Figure 4 : Dégrillage manuel par grille oblique en acier inoxydable [8] .

3.2.Dessablage

Le dessablage, qui a pour objet de retenir les éléments minéraux susceptibles d'être véhiculés par le réseau (gravier, sable), constitue une étape optionnelle de prétraitement.

Un dessableur s'avère particulièrement adapté, dans le cas des réseaux collectant des eaux pluviales. Son rôle est de protéger les pompes de relevage et certains dispositifs d'alimentation par bâchées [8].

Figure 5: dessableur statique [8].

4.Les macrophytes

Les plantes macrophytes fournissent une grande partie de la structure visible des systèmes de traitement des jardins filtrants. Il n'y a aucun doute qu'ils sont essentiels pour la performance de traitement de l'eau de haute qualité de la plupart des systèmes de traitement des jardins filtrants. Les nombreuses études de traitement et de mesure avec et sans plantes ont conclu presque invariablement que la performance est plus élevée lorsque les plantes sont présentes. Cette découverte a conduit certains chercheurs à conclure que les plantes des jardins filtrants étaient la principale source de traitement de leur absorption directe et leur séquestration des polluants [4].

En général, plus de tentatives d'utiliser des plantes des jardins filtrants ont été faites dans les pays développés où les concepteurs sont à la recherche d'autres avantages en plus du traitement des eaux usées. En prenant l'exemple des plantes ornementales qui ont déjà montré leur capacité d'élimination des polluants dans plusieurs études, parmi ces plantes on distingue, la « *Zantedeschia aethiopica* » (calla lily) Cette plante est utilisée dans l'étude de (Belmonte and Metcalfe, 2003) et (Zurita et al, 2009) [9] [10]. La « *Strelitzia reginae* », « *L'Anturium andreaeanum* » et « *L'Agapanthus africanus* », sont utilisés dans l'étude de (Zurita et al, 2009) [10]. La « *Iris pseudacorus* » et la « *Acorus gramineus* » sont utilisés dans l'étude de (Zhang et al, 2007) [11].

La « *Heliconia psittacorum* avec *H. Spathocircinata* (Aristeguieta) » et la « *Canna* avec *generalis* L. Bailey ». Ces plantes sont utilisées dans l'étude de (Konnerup et al, 2009) [12]. « *Canna flaccida* », « *Zantedeschia aethiopica* », « *Canna indica* », « *Agapanthus africanus* » et « *Watsonia borbonica* », sont utilisés dans l'étude de (Calheiros et al, 2015) [13]. La « *Iris pseudacorus* », « *Eichornia crassipes* », « *Tulbaghia violacea* », et « *Cyperus papyrus* » sont utilisés dans l'étude de (Burgos et al, 2017) [14].



Figure 7. jardin filtrants avec des plantes ornementales [15].

5. La capacité des plantes ornementales dans l'élimination des polluants

5.1. La demande chimique d'oxygène (DCO)

Dans l'expérience de (Belmote and Metcalfe, 2003) ils sont utilisés la calla lily qui a montrer une diminution de la DCO dans les deux différent temps de séjours $T_1 = 1$ jour et $T_2 = 2$ jours De $35.1 \pm 3.9\%$ et $18.4 \pm 4.2\%$ respectivement [9]. Dans l'étude de (Zurita et al, 2009) ils sont utilisés quatre jardins filtrants deux avec écoulement horizontale (HSSF) le premier est planté de « *Zantedeschia aethiopia* » et le deuxième planté avec trois plantes « *Strelitzia reginae* », « *Anturium andreanum* » et « *Agapanthus africanus* » ce qu'on appelle la polyculture, et deux à écoulement vertical (VF) avec le même principe de plantation précédent, les résultats de cette étude montre une grand élimination de la DCO surtout dans le (VF) avec un pourcentage d'élimination de 77.2 ± 2.5 et de 83.3 ± 2.5 dans le cas de la seul plante et le cas de la polyculture respectivement et un pourcentage d'élimination de 75.5 ± 2.5 et de 77.1 ± 2.5 pour le (HSSF) dans les deux cas de plantation respectivement [10].

Dans le travail de (Calheiros et al, 2015) consiste à un système de polyculture qui contient Cinque plantes est qui a montré une bonne élimination de la DCO avec une diminution de 481 (mg/l) à l'entrée jusqu'à 30 (mg/l) à la sortie du système [13].

Une variation entre 41% et 80% du pourcentage de l'élimination de la DCO et visé dans l'étude de (Konneup et al, 2009) cette variation est dû aux différents débits entrants sélectionnés [12].

5.2. La demande biochimique d'oxygène (DBO)

Les valeurs suivantes $76.0 \pm 2.8\%$, $79.7 \pm 2.8\%$, $80.4 \pm 2.8\%$, $83.3 \pm 2.8\%$ ce sont des pourcentages de diminution de la DBO dans l'étude de (Zurita et al, 2009) qui représente les quatre jardins filtrants mentionné ci-dessus respectivement [10].

L'étude de (Calheiros et al, 2015) a montré une élimination important de la DBO de 182 (mg/l) à l'en tré jusqu'à 11 (mg/l) à la sortie [13].

Dans l'étude de (Tejeda et al, 2016) ils sont utilisés trois systèmes le premier système contient un jardins filtrant à écoulement horizontal suivi par un étangs de stabilisation le deuxième système le flux s'écoule à travers deux jardins filtrants le premier à écoulement horizontal et le deuxième à écoulement vertical par contre le troisième système contient deux jardins filtrants le premier à écoulement vertical et le deuxième à écoulement horizontal, cette travail a donné les valeurs suivant de la DBO à la sortie de chaque système, 79.7 ± 26.2 (mg/l), 6.1 ± 3.7 (mg/l), 3.7 ± 2.0 (mg/l) dans le 1er, le 2eme, et le 3eme système respectivement [16].

5.3. L'Azote

5.3.1. L'ammonium NH_4^+

Le travail de (Belmote and Metcalfe, 2003) a montré une diminution de NH_4^+ pour un temps de séjour = 2 jours de 19.8 ± 7.8 à l'entré jusqu'à 9.0 ± 3.8 à la sortie et pour un temps de séjour = 1 jour une diminution de 7.0 ± 1.3 , 15.8 ± 2.0 de l'entré jus 'qua la sortie respectivement [9]. La valeur suivante montre le pourcentage de l'élimination de NH_4^+ Dans les quatre systèmes mentionné ci-dessus de l'étude de (Zurita et al, 2009), $(486 \pm 1.6)\%$, $(45.8 \pm 1.6)\%$, $(72.2 \pm 1.6)\%$ et $(72.2 \pm 1.6)\%$ [10].

L'étude de (Calheiros et al, 2015) a donné ces valeurs de 21.6 mg/l et 12.2 mg/l à l'entré et à la sortie des systèmes respectivement [13].

L'étude de (Tejeda et al, 2016) a donné à la sortie de chaque systèmes que nous avons déjà mentionné les valeurs suivants de NH_4^+ 33.1 ± 21.8 (mg/l), 9.3 ± 7.9 (mg/l) et 15.9 ± 17.2 (mg/l) sachant que la valeur de NH_4^+ à l'entrer et de 68.6 ± 47.9 (mg/l) dans les trois systèmes [16].

5.3.2. Le Nitrate NO_3^- :

L'étude de (Belmonte and Metcalfe, 2003) a montré une augmentation de NO_3^- avec des valeurs à l'enter de (3.8 ± 1.3) mg/l et (7.0 ± 1.3) mg/l et à la sortie de (15.8 ± 2.0) mg/l et (4.7 ± 1.1) mg/l pour un temps de séjour d' un jour et de deux jours respectivement [9]. Le travail de (Zurita et al, 2009) a donné les pourcentages d'éliminations de NO_3^- suivants : (49.3 ± 6.7) , (46.0 ± 6.7) , (-10.5 ± 6.7) et (-1.6 ± 6.7) Dans les quatre systèmes mentionné ci-dessus [10]. Le travail de (Calheiros et al, 2015) a monté les valeurs de 16.6 (mg/l) et 2 (mg/l) à l'enter et à la sortie du système respectivement [13]. (Tejeda et al, 2016) a donné des valeurs de NO_3^- suivants : a l'enter (4.2 ± 1.4) mg/l et à la sortie (21.6 ± 11.3) mg/l, (65.6 ± 38.2) mg/l et $(50.6 \pm 25.2.2)$ mg/l des trois systèmes mentionné ci-dessus [16].

5.3.4. Le Nitrite NO_2^- :

L'étude de (Belmonte and Metcalfe, 2003) montre les valeurs suivants à l'enter et à la sortie pour un temps de séjour de deux jours respectivement, (0.15 ± 0.06) mg/l, (0.18 ± 0.04) mg/l [9]. le travail de (Calheiros et al, 2015) donne les valeurs suivants à l'enter et à la sortie 1.5 $(0.1-7.4)$ mg/l, 0.1 $(0.1-0.3)$ mg/l [15].

5.4. Les matières en suspensions (MES) :

(Zurita et al, 2009), ont montré diminution en (MES) (79.2 ± 6.6) %, (84.7 ± 6.2) %, (53.2 ± 6.2) % et (69.8 ± 6.2) %, dans les quatre systèmes utilisé mentionné ci-dessus [10].

L'étude de (Calheiros et al, 2015) montre ces valeurs de MES de 283 $(10-1500)$ mg/l, 14 $(3-39)$ mg/l à l'enter et à la sortie des systèmes respectivement [15].

Le travail de (Tejeda et al, 2016) donne à l'enter de chaque systèmes la valeur (30.4 ± 18.4) mg/l et à la sortie des trois systèmes mentionné ci-dessus ces valeurs (60.5 ± 53.6) mg/l, (12.8 ± 9.7) mg/l et (10.7 ± 6.0) mg/ [16]

Conclusion :

Ce travail a clairement documenté que les jardins filtrants avec des plantes ornementales est une attrayante solution pour le traitement des eaux usées. Comme prévu, le taux d'élimination des polluants dans les jardins filtrants dépend du type de flux quel que soit, (FWS), (HSSF) ou (VF). L'implantation de plusieurs plants dans le même jardin filtrant peut améliorer aussi le taux d'éliminations des polluants, ainsi que l'intégration de deux jardins filtrants de différents types de flux dans la même station peut améliorer le taux d'éliminations de quelque polluants.

De plus, les jardins filtrants peuvent être établis pour avoir des fonctions en plus de la fonction de traitement de l'eau, y compris l'amélioration de l'esthétique et de la biodiversité en plantant le système avec un mélange des fleurs ornementales.

L'utilisation de ces systèmes dans les pays en développements tell que l'Afrique du Nord ne nécessite pas beaucoup d'effort à cause de leurs facile adaptations dans le paysage local, la disponibilité des matériaux de réalisation ainsi que leurs faibles cout d'installation par rapport aux autres système d'épuration qui exige des grandes fortunes est surtout les plantes ornementales qui fournissent une grande valeur du logements écologique .

References :

1. Kivaisi A.M. (2001) The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: A review. *Ecological Engineering* 16(4): 545-560.
2. Hammadi B., Bebbia A. A., Hafouda L, Jardins de filtres plantés de macrophytes, performances épuratoires dans un climat aride. Cas de la station pilote de Témacine, Ouargla (Algérie) , *ElWahat pour les Recherches et les Etudes* Vol.8 n°2 (2015) : 45 – 56
3. Jan Vymazal, Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review , *Hydrobiologia* (2011) 674:133-156.
4. Robert H. Kadlec and Scott Wallace, *Treatment wetlands* 2nd ed. by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business (2009)
5. DuPoldt, C. a. (2000). *A Handbook of Constructed Wetlands - Volume 1: General Considerations*. Washington, EPA.
6. POULET, J. B., TERFOUS, A., DAP, S. et GHENAIM, A. (2004) : station d'épuration à lit filtrants plantes de macrophytes. *Courier du savoir* n° 05 juin 2004. Université Mohamed Khider Biskra.
7. Groupe macrophytes et traitement des eaux ,épuration des eaux usées par filtres plantés de macrophytes juin 2005,pp (6-8).

8. Office national de l'eau et des milieux aquatiques ouvrages de traitement par filtres plantés, guide d'exploitation, janvier (2015), pp (11-13).
9. Marco A. Belmont, Chris D. Metcalfe, Feasibility of using ornamental plants (*Zantedeschia aethiopica*) in subsurface flow treatment wetlands to remove nitrogen, chemical oxygen demand and nonylphenol ethoxylate surfactants—a laboratory-scale study *Ecological Engineering* 21 (2003) 233–247.
10. F. Zurita, J. De Andab, M.A. Belmont, Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands, *Ecological Engineering* 35 (2009) 861–869.
11. ZHANG Xiao-bin, LIU Peng, YANG Yue-suo, CHEN Wen-ren, Phytoremediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes, *Journal of Environmental Sciences* 19(2007) 902–909.
12. Dennis Konnerup, Thammarat Kootatep, Hans Brix, Treatment of domestic wastewater in tropical subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna* and *Heliconia*, *ecological engineering* 35 (2009) 248–257
13. Cristina S.C. Calheiros, Vânia S. Bessa, Raquel B.R. Mesquita, Hans Brix, António O.S.S. Rangel, Paula M.L. Castro, Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility, *Ecological Engineering* 79 (2015) 1–7.
14. V. Burgos, F. Araya, C. Reyes-Contreras, I. Vera, G. Vidal, Performance of ornamental plants in mesocosm subsurface constructed wetlands under different organic sewage loading, *Ecological Engineering* 99 (2017) 246–255.
15. Constructed wetland integrated by shri prakash mishra, IPS, DG, CRPF.
16. Allan Tejeda, Ángeles X. Torres-Bojorges, Florentina Zurita, Carbamazepine removal in three pilot-scale hybrid wetlands planted with ornamental species, *Ecological Engineering* (2016).

Evolution quantitative et qualitative de la nappe phréatique de la ville de M'bahiakro (Centre-Est, Côte d'Ivoire)

KOUAME Kouassi Innocent¹, KOUASSI Kouakou Lazare², KONAN Kouakou Séraphin², BAÏ Ruth¹, N'CHO Achié Hervé¹

¹Laboratoire de Géosciences et Environnement, UFR SGE, Université Nangui Abrogoua, 02 BP 801 Abidjan 02

²Laboratoire du Génie de l'Eau et de l'Environnement, UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa

Résumé :

L'utilisation des eaux de puits par les populations défavorisées dans la plupart des villes africaines présente souvent des risques pour la santé. La nappe phréatique de la ville de M'bahiakro est la source d'approvisionnement en eau d'une bonne partie de la population. Cette étude vise à caractériser le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère et à suivre l'évolution quantitative ainsi que le niveau de pollution de la nappe phréatique de la ville de M'bahiakro sur la période de 2012, 2013 et 2015. L'analyse des cartes piézométriques des années 2012, 2013 et 2015, montre une baisse progressive du niveau piézométrique de la nappe. Cependant, la recharge de la nappe est très importante dans les quartiers de N'gattakro et de Koko où la structure géologique essentiellement sableuse, présente une forte perméabilité. Notons que la dynamique de la nappe semble influencer la qualité des eaux de puits puisque les concentrations en nitrate sont élevées (>50 mg.L⁻¹) dans les zones d'accumulation des eaux. Aussi, l'Analyse en Composantes Principales Normées (ACPNC) réalisée met-elle en évidence deux phénomènes majeurs dans l'acquisition de la minéralisation des eaux : l'hydrolyse acide des minéraux des roches et la contamination des eaux de puits par les eaux usées des fosses septiques. Les fortes teneurs en nitrates montrent que cette eau est non appropriée à la consommation humaine et nécessite dans la majorité des puits un traitement préalable.

Mots-clés : Puits, Nappe phréatique, Piézométrie, pollution, M'bahiakro, Côte d'Ivoire

Quantitative and qualitative evolution of the groundwater of the city of M'bahiakro (Central East, Côte d'Ivoire)

Abstract:

The use of well water by poor people in most African cities often presents health risks. The groundwater of M'bahiakro city is the source of water supply for a large part of the population. This study aims to characterize hydrodynamic functioning of the aquifer and to monitor the quantitative evolution as well as the level of pollution the M'bahiakro city's groundwater over the period of 2012, 2013 and 2015. The analysis of the water table maps of the years 2012, 2013 and 2015, shows a progressive decrease of the water table. However, groundwater recharge is very important (>4m) in the districts of N'gattakro and Koko where the essentially sandy geological structure has a high permeability. It should be noted that groundwater dynamics appear to influence well water quality since nitrate concentrations are high (> 50 mg.L⁻¹) in the water accumulation zones. Also, the Analysis of Principal Normed Components (APNC) carried out highlights two major phenomena in the acquisition of mineralization of water: the

acid hydrolysis of rock minerals and the contamination of well water by wastewater from septic tanks. The high concentrations of nitrates show that this water is not suitable for human consumption and requires in the majority of wells a prior treatment.

Key Words: Well, Groundwater, Water table, pollution, M'bahiakro, Côte d'Ivoire

I. Introduction

Les eaux de puits captant les nappes phréatiques sont de véritables sources d'approvisionnement en eau dans la plupart des villes africaines. Par conséquent, de nombreuses communautés urbaines à faible revenu dépendent de ces eaux souterraines pour la consommation d'eau potable et pour d'autres fins domestiques [1]. Cependant, ces puits qui se trouvent dans des environnements souvent non assainis, sont sujets à des risques de contamination des eaux [2]. Parmi les préoccupations les plus courantes concernant la qualité de l'eau de puits en relation avec la santé humaine en milieu urbain, il est souvent fait mention de la contamination par les micro-organismes pathogènes, les nitrates et les composés organiques toxiques [3-8]. Le constat est le même dans les villes de la Côte d'Ivoire et en particulier dans la ville de M'bahiakro située au Centre-Est du pays. En effet, la ville de M'bahiakro avec une population de plus de 50 000 habitants [9] bénéficie depuis les années 2010 du Projet National Riz (PNR) piloté par l'Office National pour le Développement de la Riziculture (ONDR). Ce projet a pour objectifs d'atteindre l'autosuffisance alimentaire par l'augmentation de la production du riz, d'assurer la sécurité alimentaire et de générer des revenus pour les populations défavorisées de la ville de M'bahiakro et des villages riverains. Ce projet qui est jusqu'à présent dans sa phase de construction et d'expérimentation se présente comme une bouffée d'oxygène pour la population de M'bahiakro eut égard aux nombreux avantages qu'il va engendrer. Selon une étude récente, plus de 90% des familles de la ville possèdent un puits utilisé pour les besoins domestiques [10] bien qu'il existe un réseau d'adduction en eau potable dans la ville. Cela constitue un avantage pour les riziculteurs issus de milieu défavorisé qui s'installeront dans la ville. Cependant, au niveau de la ville de M'bahiakro, le système d'assainissement est précaire et constitué dans la majorité, d'ouvrages d'assainissement autonomes (fosses septiques, puits perdus, latrines) dont le fonctionnement n'est pas toujours maîtrisé. Le problème est que ces ouvrages sont positionnés à des distances souvent inférieures à 10 m des puits traditionnels dont les profondeurs n'excèdent pas 7m [11]. Or dans sa phase active, le projet pourra mobiliser environ 1000 personnes dans la ville sur la période de culture et de récolte. Ce qui pourrait entraîner une forte pression sur la nappe phréatique et augmenter les risques de maladies hydriques au niveau de la population défavorisée. Cette étude vise donc à suivre l'évolution quantitative et qualitative de la nappe phréatique de la ville de M'bahiakro sur la période de 2012, 2013 et 2015. Ce qui permet de donner un diagnostic sur la capacité de celle-ci à être utilisée pour les besoins domestiques.

I. Matériel et Méthodes

I.1. Présentation de la zone d'étude

La ville de M'bahiakro est située dans le centre-est de la Côte d'Ivoire. Elle est comprise entre les latitudes 7°26'30" N et 7°28'12" N et les longitudes 4°19'35" W et 4°20'53" W. Elle comprend 4 quartiers, à savoir Koko, Baoulékro, Dougouba et N'gattakro (Fig.1). Cette zone est sous l'influence du climat de transition équatorial atténué avec quatre saisons distinctes [12] : une longue saison sèche (novembre à mars), une longue saison des pluies (avril à juillet), une petite saison sèche (août à septembre) et une petite saison des pluies (octobre à novembre). Les précipitations annuelles moyennes sont de 1000 mm. La zone d'étude est située sur des formations volcano-sédimentaires constituées essentiellement de grès, de schiste et de grès schisteux [13] reposant sur un socle granitique et métamorphique [10]. Il couvre environ 5,538 km² et est caractérisé par une plaine alluviale avec des élévations allant de 120 à 135 m. Le réseau hydrographique est dominé par la rivière N'Zi près de la ville et les grandes plaines environnantes qui permettent la production de riz.

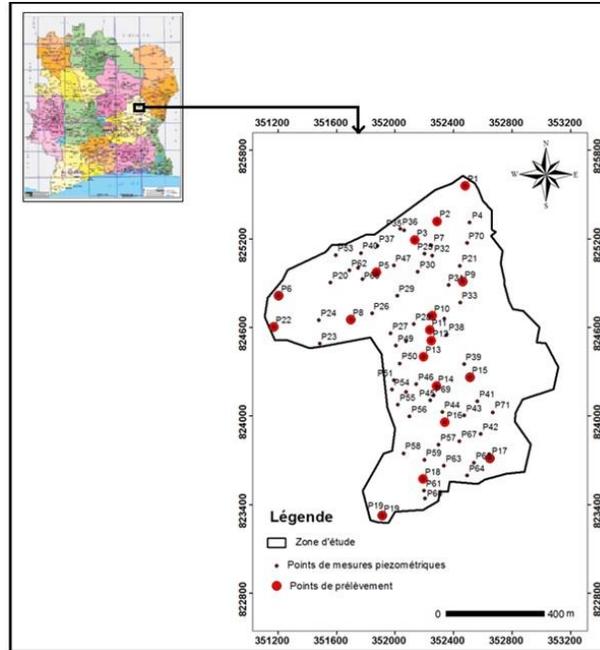


Figure 11: Présentation de la ville de M'bahikro

1.2. Méthodologie de l'étude

Une campagne piézométrique associée à une mesure de paramètres physico-chimiques (pH, température, conductivité électrique, potentiel rédox (Eh), Solide dissous total (TDS) et salinité) a été réalisée sur 71 puits (Figure 1) de la ville de M'bahikro en février et octobre 2012, en Août et Novembre 2013 et en Février 2015. Parmi ces 71 puits, 18 ont fait l'objet d'un prélèvement d'échantillons pour des analyses chimiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NO_2^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^-) en octobre 2012, Août 2013 et Février 2015. Les niveaux d'eau souterraine et les paramètres physico-chimiques ont été mesurés pour évaluer l'évolution spatio-temporelle et la qualité de la nappe phréatique. Une sonde piézométrique de marque HERON Dipper-T (100 m) et un multiparamètre de marque HANNA 9828 avec une sonde munie d'un câble de 20 m ont été utilisés pour mesurer respectivement le niveau piézométrique et les paramètres physico-chimiques in situ.

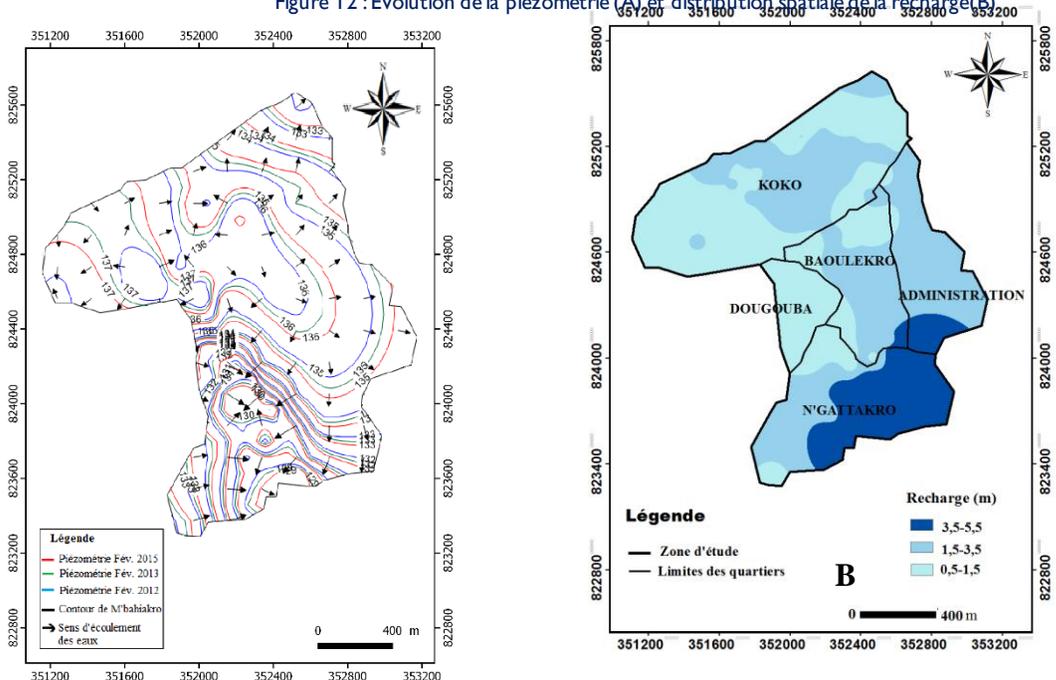
Le dosage de certains paramètres chimiques (NO_2^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^-) a été effectué par spectrométrie d'absorption moléculaire alors que les autres paramètres tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique. Pour les différentes analyses, une erreur d'analyse de 10% a été acceptée. Le traitement des données a été réalisé avec les logiciels SURFER 92, ARCGIS 10.2 et STATISTICA 7.1.

2. Résultats et discussion

2.1. Evolution de la piézométrie et distribution de la recharge

La carte piézométrique (Fig.2) montre la situation piézométrique de M'bahiakro sur la période de 2012, 2013 et 2015 au cours de la grande saison sèche où le niveau de la nappe est relativement stable. Globalement, la piézométrie varie sur cette période entre 129m et 137m et présente deux directions principales d'écoulement : W-E et N-S. Ce résultat est en accord avec ceux de [2] qui ont mis en évidence ces mêmes directions d'écoulement avec la présence de zones d'accumulation notamment dans le quartier de N'gattakro. L'analyse de la variation spatio-temporelle de la piézométrie montre que le niveau de la nappe a diminué de 2012 à 2013 et de 2013 à 2015. En effet, pour les mêmes valeurs de piézométrie, l'année 2012 enregistre une quantité d'eau plus importante que celles des années 2013 et 2015 respectivement. Cette diminution du niveau de la nappe phréatique au cours des années pourrait s'expliquer par l'impact de la variabilité climatique dans la région du IFFOU mis en évidence par certains travaux [14]. En effet, selon ces auteurs, la baisse de la pluviométrie consécutive aux effets de la sécheresse a entraîné une diminution progressive des volumes d'eau mobilisés par les aquifères à partir 1968. Aussi, la fig.3 met-elle en évidence, la distribution spatiale de la recharge de la nappe phréatique. Il ressort que la recharge est importante (3- 6 m) dans le quartier de N'gattakro situé au sud puis modérée au nord dans le quartier Koko (1-3 m). En revanche, elle est faible dans les quartiers de Dougouba et Baoulékro situés au centre, avec des valeurs comprises entre 0,57 et 1 m. Cette distribution spatiale de la recharge pourrait s'expliquer par l'existence des zones de dépression dans la partie sud (N'gattakro) qui accumulent plus d'eau par rapport aux quartiers situés dans la partie nord de la ville.

Figure 12 : Evolution de la piézométrie (A) et distribution spatiale de la recharge (B)



2.2. Mécanismes d'acquisition de la minéralisation par la nappe

L'analyse du plan factoriel F1-F2 représentant 75% des informations, permet de dégager trois principaux regroupements de paramètres physico-chimiques : G1 (Ca²⁺, Mg²⁺, pH, Na⁺, K⁺), G2 (NO₃⁻, TDS, salinité et conductivité électrique), et G3 (NO₂⁻, NH₄⁺, PO₄²⁻, SO₄²⁻) (Fig.3, A).

Les regroupements G1 et G2 de part et d'autre de l'axe du facteur F1 (45,86%) montre que les mécanismes qui gouvernent la présence de ces deux groupes de paramètres dans la nappe sont opposés. En effet, les minéraux du groupe G1 apparaissent pendant la petite saison pluvieuse et la grande saison sèche (Figure 3B (b,d)). Ainsi, le mécanisme qui est à l'origine cette minéralisation est le phénomène de dissolution des minéraux (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺) des roches présentes dans l'aquifère de M'bahiakro en milieu acide. Ce résultat est en accord avec ceux obtenus par [15] sur la nappe d'Abidjan. Les minéraux du groupe G2 quant à eux apparaissent pendant la grande saison des pluies et la petite saison sèche (Figure 3B (a,c)), pendant lesquelles la nappe de M'bahiakro s'enrichit fortement par les ions NO₃⁻ et c'est la présence du nitrate qui serait à l'origine de la forte conductivité, salinité et TDS des eaux. Cet enrichissement important des eaux en nitrate pourrait avoir pour origine, soit l'infiltration des eaux superficielles riches en polluants (NO₂⁻, NH₄⁺, PO₄²⁻, SO₄²⁻), soit la contamination des eaux par les fosses septiques à proximité des puits par un mécanisme de diffusion et d'advection des eaux. L'axe du facteur F1 est donc l'axe de la minéralisation des eaux. Contrairement aux regroupements G1 et G2, G3 s'observe sur le côté positif de l'axe F2 du plan factoriel F1-F2. En effet, pendant la grande saison des pluies et petite saison sèche (Figure 3B (a,c)), les polluants parviennent à la nappe soit par infiltration des eaux superficielles, soit par contamination de la nappe par une circulation des eaux latérales. L'axe du facteur F2 est certainement l'axe de contamination de la nappe par les eaux d'infiltration. Ainsi, l'infiltration des eaux riches en polluants (NO₂⁻, NH₄⁺, PO₄²⁻, SO₄²⁻) seraient à l'origine de la contamination de la nappe en nitrate identifiée au niveau du groupe G2 sur l'axe du facteur F1. Ces eaux d'infiltration pourraient être d'origine superficielle ou provenir des fosses septiques de proximité.

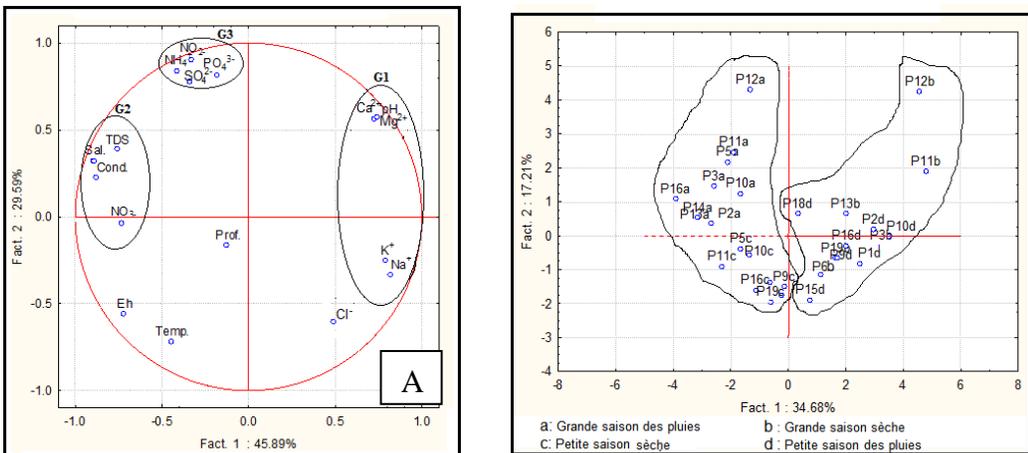


Figure 13 : Cercle de communauté (A) et unités statistiques (B) du plan factoriel F1-F2.

2.3. Distribution spatiale de la concentration de nitrate dans la nappe

La distribution spatiale de nitrate (figure 4) permet de noter que la concentration de nitrate au niveau de la nappe phréatique de M'bahiakro, varie en fonction des saisons. En effet, plus de 80% des eaux de puits analysées ont une concentration supérieure au seuil de potabilité (>50 mg/L) des eaux de boisson

sur les périodes d'octobre 2012 (petite saison des pluies), Août 2013 (petite saison sèche) et Février 2015 (grande saison sèche). Les résultats obtenus confirment ceux obtenus par l'Analyse en Composantes Principales Normées car pendant la petite saison des pluies (Octobre 2012) et la grande saison sèche (Février 2015) où la nappe reçoit peu d'eau, les concentrations des nitrates sont comprises entre 0 et 130 mg/L. Cependant, pendant la petite saison sèche (Août 2013), où la nappe a été rechargée par les eaux d'infiltration de la grande des pluies, les concentrations de nitrates sont plus importantes et comprise entre 0 et 900 mg/L. D'autre part, on peut relever sur chacune des cartes que les plus fortes concentrations en nitrates sont enregistrées sur les directions principales Ouest-Est et Nord-Sud d'écoulement des eaux mises en évidence par la piézométrie de la nappe.

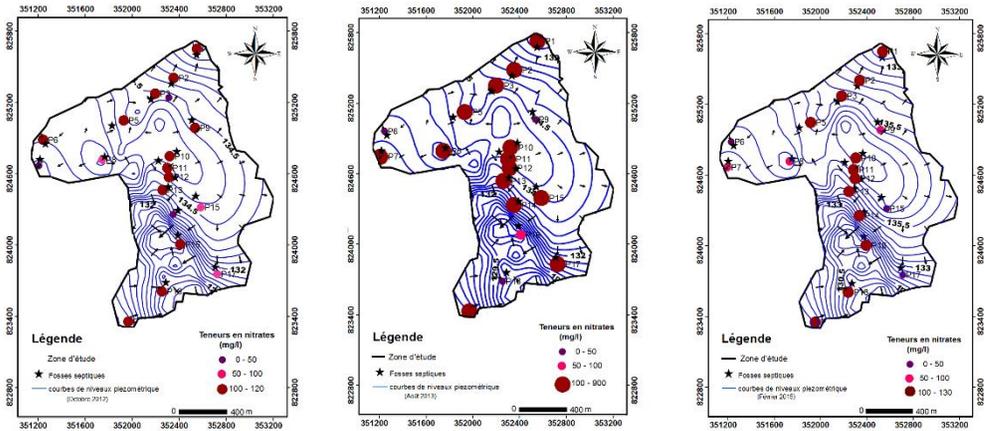


Figure 14 : Distribution spatiale de la concentration de nitrate en fonction des saisons

Conclusion

La nappe phréatique de la ville de M'bahiakro est une réserve importante pour les populations défavorisées qui pourraient voir leur nombre augmenté pendant la mise en œuvre du projet de la riziculture irriguée. Toutefois cette étude révèle des contraintes liées à son utilisation domestique par les populations. En effet, sur le plan quantitatif, la nappe connaît une diminution progressive du volume d'eau au cours des années à cause de la variabilité climatique. En plus, des risques importants de pollution ont été mis en évidence dans plus de 80% des eaux des puits analysées. Ainsi, ces eaux sont inappropriées à la consommation humaine et nécessitent dans la majorité des puits un traitement préalable.

Références

- E. Tanawa, T.H.B. Djeuda, E. Ngnikam, E. Temgoua, E. Siakeu, Habitat and protection of water resources in suburban areas in African cities. *Build Environ.* 37 (2002) 269-275.
- C. Agatemor, U. M. Agatemor, Physico-chemical characteristics of well waters in four urban centers in Southern Nigeria, *Environmentalist* 30 (2010) 333-339.
- V. O. Adetunji, I. A. Odetokun, Groundwater contamination in Agbowo community, Ibadan Nigeria: Impact of septic tanks distances to wells. *MJM*, 7(3) (2011) 159-166.
- M. Ben Abbou, M. El Haji, M. Zemzami, F. Fadil, Détermination de la qualité des eaux souterraines des nappes de la province de Taza (Maroc), *Larhyss Journal*, 16(2013) 77-90.
- E. Djuikom, E. Temgoua, B. L. Jugnia, M. Nola, M. Baane, Pollution bactériologique des puits d'eau utilisés par les populations dans la Communauté Urbaine de Douala – Cameroun. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 3(5)(2009) 967-978.

- P. S. Hounsinou, D. Mama, M. A. D. Tchibozo, M. Boukari, D. Sohounhloue, Microbiological Pollution Indication as Tracer for the Pollution of Well Water: The Example of the District of Abomey-Cabvi (Benin), JEP 6(2015) 290-298.
- D. A. Ondigo, A. M. Kavoo, J. Kebwaro, Water Resources and Management under Increasing Urban Demography: A Kenyan Perspective—A Review, JWRP 10(2018) 919-938.
- I. A. Allamin, M. B. Borkoma, R. Joshua, I. B. Machina, Physicochemical and Bacteriological Analysis of Well Water in Kaduna Metropolis, Kaduna State, OALibJ 2 (2015) e1597.
- Récensement Général de la Population et de l'Habitat, 2014, Côte d'Ivoire.
- I. K. Kouamé, S. K. Konan, L. K. Kouassi, B. Dibi, S. Moussa, I. Savané, G. Dago, Assessment of wells water quality and their suitability for drinking in M'bahiakro city (Côte d'Ivoire), Inter. Journ. Conserv. Sci. 3(2012) 289-300.
- B. Dibi, L. K. Kouassi, I. K. Kouamé, S. K. Konan, M. Soumahoro, D. Koné, D. Gnakri, Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères des formations altérites à partir des méthodes drastic et syntacs cas de la ville de M'bahiakro, centre de la Côte d'Ivoire, Inter. Journ. Innov. App. Stu. 2 (2013) 464-476.
- B. T. A. Goula, B. Konan, Y. T. Brou, I. Savané, V. Fadika, B. Srohourou, Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale : Cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois lognormale et de Gumbel, Hydrol. Sci. Journ., 52 (1)(2007) 49-67.
- D. B. Yao, Notice Explicative de la Carte Géologique à 1/200 000, Feuille M'bahiakro, mémoire n°2, 1ère Edition, Géo-textes, Sherbrooke, Quebec, Canada, 1990, 31p.
- K. F. Otchoumou, S. M. Bachir, G. E. Aké, I. Savané, and Djé Kouakou Bernard (2012). Variabilité climatique et productions de café et cacao en zone tropicale humide : cas de la région de Daoukro (Centre-est de la Côte d'Ivoire). Inter. Journ. Innov. App. Stu. 1 (2) 194-215.
- I. K. Kouamé. Pollution physico-chimique des eaux dans la zone de la décharge d'Akouédo et analyse du risque de contamination de la nappe d'Abidjan par un modèle de simulation des écoulements et du transport des polluants. Thèse de Doctorat Unique, Université d'Abobo-Adjamé, 2007.

Identification des processus d'intrusion marine dans les aquifères côtiers par l'usage des rapports Br/Cl et Br/Na

Adel Kharroubi¹, Hajer Mejri¹, Faten Tlahguil¹, Bassma Mansouri¹

¹Unité de Recherche Hydrosociences Appliquées, ISSTEG, Campus Universitaire Zrig Gabès, 75 395
150, adel.kharroubi@isstegb.rnu.tn

Résumé

Les aquifères côtiers sont caractérisés par des ressources limitées et par une vulnérabilité importante vis-à-vis de la contamination par les eaux salées. Dans plusieurs pays et notamment dans le bassin méditerranéen, le niveau de stress hydrique a été atteint car l'eau disponible ne dépasse pas 350 m³ / habitant / an. La mobilisation des ressources conventionnelles a atteint son maximum. Ainsi, l'objectif de cette étude est de comprendre et de mettre en équation la problématique de la contamination des aquifères côtiers par les eaux salées et de vérifier la validité des approches géochimiques et essentiellement les corrélations entre Br, Cl et Na pour diagnostiquer les processus d'intrusion marine. Plusieurs données en provenance de divers aquifères sont utilisées pour établir les différentes corrélations. Les résultats de ce travail représentent un outil de décision compte tenu de la fragilité des milieux hydriques dans un contexte d'aridité croissante. L'utilisation d'un assez grand nombre de données provenant de plusieurs pays du monde a permis de comprendre le problème. Il est clair que les corrélations entre les différents éléments conservateurs (Cl, Na et Br) permettent d'identifier clairement les processus de mélange entre les aquifères d'eau douce et les eaux marines. Ainsi, ces éléments peuvent être considérés comme des traceurs d'intrusion marine. En outre, cette étude a montré l'importance des processus de dissolution / précipitation qui se produisent lorsque l'eau de mer s'infiltré dans les aquifères. Il est clair que l'équilibre ionique est fortement affecté par l'augmentation de la salinité induite par le mélange des eaux de la mer et de l'aquifère.

Mots-clés : Aquifère, Intrusion marine, traceurs, Géochimie.

Using of Br/Cl and Br/Na ratios to identify seawater intrusion in coastal aquifers

Abstract

Coastal areas in semi-arid and arid environments are characterized by limited water resources. In several countries and particularly in the Mediterranean basin, the level of water stress has been reached because the available water does not exceed 350 m³ / inhabitant/ year. The mobilization of conventional resources has reached its maximum. Thus, the objective of this study is to understand and to put in equation the problematic of contamination of the coastal aquifers. The main objective was to see the validity of geochemical approaches and essentially the correlations between Br, Cl and Na to identify marine intrusion processes. Several data from several layers are used to establish the various correlations. The results of this work are a decision-making tool given the fragility of water environments in a context of increasing aridity. The use of a fairly large number of data from several countries of the world made it possible to understand the problem. It is clear that the correlations between the various preservative elements (Cl, Na and Br) make it possible to clearly identify the mixing processes between freshwater aquifers and marine waters. Thus, these elements can be considered as marine intrusion tracers. In addition, this study has shown the importance of the dissolution / precipitation processes that take place when seawater seeps into the aquifers. It is clear that ionic equilibrium is strongly affected by the increase in salinity caused by the mixing of sea and aquifer waters.

Key Words: Aquifer, Seawater intrusion, Tracers, geochemical approaches

I. INTRODUCTION

Les zones côtières dans les milieux semi-arides et arides sont caractérisées par des ressources limitées en eau. Dans plusieurs pays et particulièrement au niveau du bassin méditerranéen, le niveau de stress hydrique a été atteint du fait que les eaux disponibles ne dépassent pas les 350 m³/habitant/an. La mobilisation des ressources conventionnelles a atteint son maximum. La mobilisation excessive des réserves a considérablement affecté les eaux souterraines en termes de qualité et de quantité. La situation est particulièrement alarmante dans les pays du Sud où l'exploitation anarchique a conduit à une subsidence généralisée de la piézométrie provoquant ainsi un déclin du gradient hydraulique de la nappe et l'accélération des processus de contamination par les eaux salées en provenance de la mer. Les travaux de recherche entrepris partout dans le monde et particulièrement dans les zones arides et semi-arides [1, 2, 3, 4] ont permis de mettre en équation les processus de contamination des eaux à différentes échelles et de développer de nouvelles techniques de diagnostic et de quantification du niveau de dégradation des milieux récepteurs. En revanche, les effets et les conséquences à moyen et long termes sont quasi inconnus et n'apparaissent que graduellement dans le temps et dans l'espace.

Ainsi, l'objectif de cette étude consiste à comprendre et à mettre en équation la problématique de contamination des nappes côtières. Il s'agissait principalement de voir la validité des approches géochimiques et essentiellement les corrélations entre le Br, le Cl et le Na pour diagnostiquer les processus d'intrusion marine. Plusieurs données en provenance de plusieurs nappes sont utilisées pour établir les diverses corrélations. Les résultats du présent travail constituent un outil d'aide à la décision compte tenu de la fragilité des environnements hydriques dans un contexte d'aridité de plus en plus marquant.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dans l'objectif de vérifier la validité de certaines approches géochimiques utilisées pour identifier les processus d'intrusion marine dans les aquifères côtiers, plusieurs données ont été saisies à partir d'articles publiés dans des revues internationales. Un intérêt particulier a été accordé à des traceurs majeurs tels que le brome, le chlore et le sodium. Les données récoltées proviennent de plusieurs pays ; La Tunisie, le Maroc, l'Égypte, la Chine, l'Espagne et l'Argentine. Ces données seront utilisées par la suite pour établir des corrélations qui permettent de mettre en évidence la présence et l'ampleur des phénomènes de salinisation des aquifères côtiers.

I. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les données récoltées dans les divers articles ont permis de tracer les courbes de corrélation entre les différents traceurs de l'intrusion marine. Plus de 500 données ont permis de tracer ces courbes. L'objectif de cette démarche est de vérifier la validité de certaines approches géochimiques adoptées pour identifier les processus de pénétration des eaux de mer dans les aquifères côtiers. Un intérêt particulier est accordé aux traceurs majeurs tels que le chlore, le sodium et le Bromure. Dans ce qui suit, il s'agit de présenter et de discuter les corrélations entre les divers éléments cités.

3.1. Corrélation entre le Chlore et le sodium

La figure 1 présente la variation du sodium en fonction du chlore. Cette courbe a été établie à partir de plusieurs données en provenance de plusieurs aquifères côtiers. Une bonne corrélation entre le sodium et le chlore est observée. De plus, la majorité des points sont positionnés à proximité de la droite de mélange eau de mer/eau douce. Ainsi, on peut déduire que ces deux éléments, principaux éléments dans l'eau de mer, constituent des bons traceurs d'identification du processus d'intrusion marine.

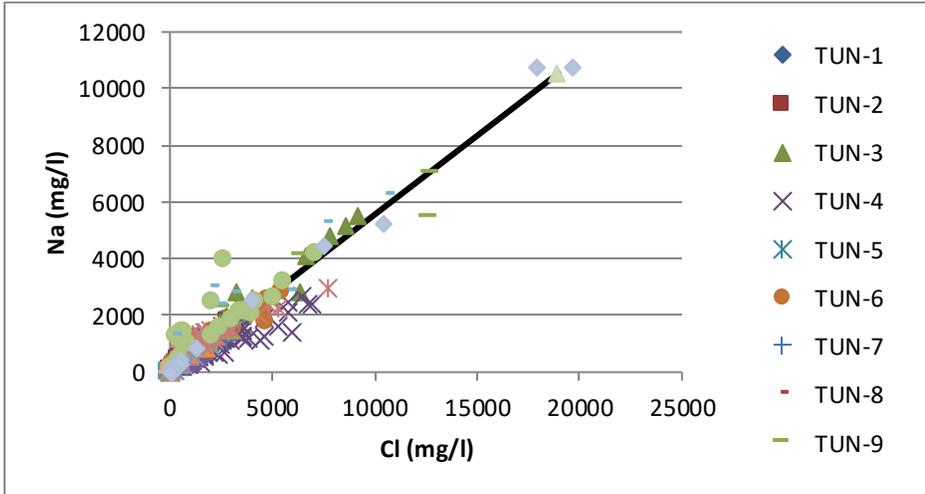


Figure 1. Corrélation entre le sodium et le chlore.

3.2. Le rapport Na/Cl

Il a été démontré par plusieurs auteurs que le rapport Na/Cl est un bon indicateur du phénomène de l'intrusion marine. En effet, plus le mélange entre l'eau de mer et l'eau douce est marqué, plus le rapport Na/Cl se rapproche de celui de l'eau de mer. De plus la courbe Na/Cl en fonction du Cl présente, dans le cas de l'intrusion marine, une allure en 1/X. La courbe établie à partir des données saisies (figure 2) présente une allure conforme à un processus de mélange entre des eaux de salinités différentes. Lorsque le phénomène d'intrusion devient assez marqué, un mécanisme d'échange ionique entre l'eau de la nappe et la roche encaissante se met en place réduisant ainsi la concentration du Na.

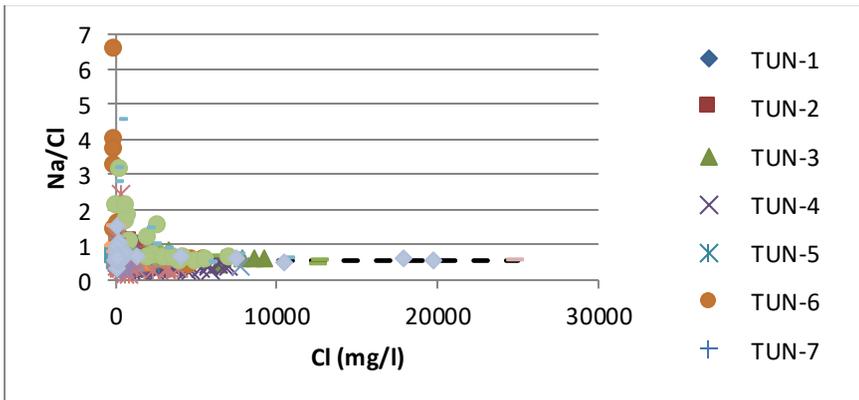


Figure 2. Corrélation entre le rapport Na/Cl et le chlore.

3.3. Corrélation entre le Br et le Cl

Le bromure est considéré comme un excellent indicateur de processus d'intrusion marine dans les aquifères côtiers. Compte tenu que sa teneur dans les roches ne peut dépasser 6 ppm, sa présence dans les eaux des aquifères est très souvent liée à un mélange entre les eaux de la nappe et l'eau de mer. Plus le processus d'intrusion

est marqué, plus la concentration du Br dans l'eau de l'aquifère augmente. La figure 3 relative à la variation du Br en fonction du chlore présente une allure croissante avec une bonne corrélation entre les deux éléments. Les divers points sont proches de la droite de mélange ce qui confirme l'origine marine des eaux salines. Certains points sont nettement au dessus de la droite de mélange. Cela indique une autre source de Br qui vient se superposer à celui en provenance de la mer.

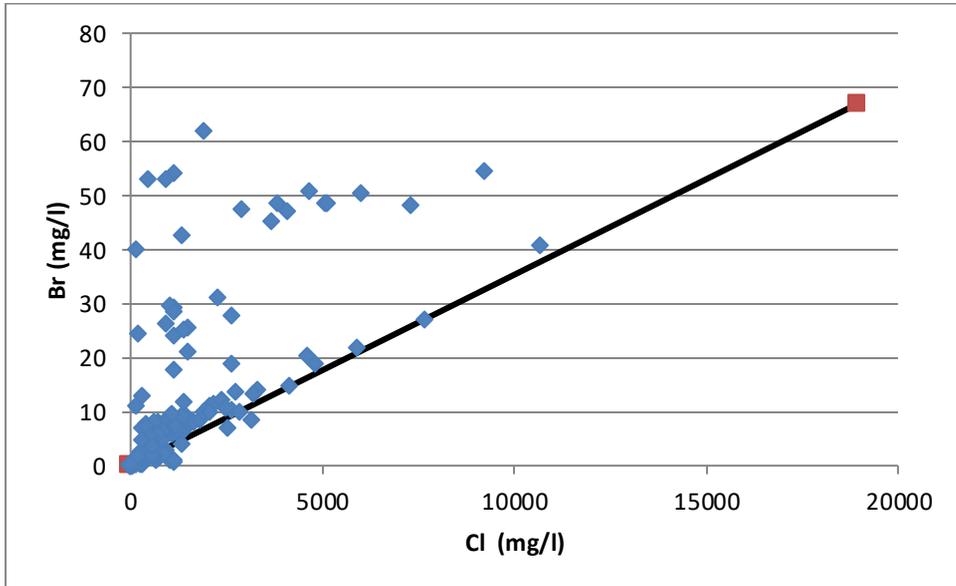


Figure 3. Corrélation entre le Brome et le chlore.

CONCLUSION

Le présent travail est relatif à la validation des approches géochimiques dans les démarches d'identification des processus d'intrusion marine dans les aquifères côtiers. L'usage d'un nombre assez important de données en provenance de plusieurs pays du monde a permis de bien appréhender la problématique. Il apparaît clairement que les corrélations entre les divers éléments conservateurs (Cl, Na et Br) permettent de bien identifier les processus de mélange entre les eaux douces des aquifères et les eaux marines. Ainsi, Ces éléments peuvent être considérés comme des traceurs d'intrusion marine. De plus, cette étude a permis de constater l'importance des processus de dissolution/précipitation qui se mettent en place quand les eaux de mer s'infiltrent dans les aquifères. Il en résulte clairement que l'équilibre ionique est fortement affecté par l'augmentation de la salinité provoquée par le mélange entre les eaux de la mer et de l'aquifère.

Références

1. Benblidia M, Margat J, Vallée D, pénuries d'eau prochaines en Méditerranée?. *Futuribles*, 1988, 233: 5-29.
2. Fetoui M, Ressources naturelles, usages et strategies des acteurs ruraux dans un micro bassin versant de la region de zeuss-Koutine (Jeffara Tunisienne): vers un essai de modélisation multi-agent autour de la gestion des ressources en eau. Mémoire de Master, 2003, IRA-INAT: 152p.
3. Guillaume H, Romagny B, Sociétés, dynamiques territoriales et compétitions sur les ressources naturelles dans la Jeffara tunisienne. Rapport scientifique final de l'équipe du thème 2 du programme "Jeffara", 2003, IRD-IRA: 248p.

4. Romany B, Guillaume H, L'accès à l'eau potable dans la Jeffara tunisienne: contradiction et nouvelles perspectives. *La houille Blanche*, 2004, 1:52-59.

Les enjeux environnementaux et économiques des projets de dessalement de l'eau de mer en Algérie

Abderrahmane Djoher (Maître de conférences) ; Faculté des sciences économiques, des sciences de gestion et des sciences commerciales ; Université Mohamed BENAHMED, Oran 2. Mail : djoher83@yahoo.fr

Résumé :

Aujourd'hui, le dessalement de l'eau de mer est parfois présenté comme la solution miracle aux problèmes de rareté de l'eau potable. Outre le fait qu'elle demeure financièrement inaccessible aux pays pauvres (en revenus ou en pétrole), ces technologies demeurent de grosses consommatrices d'énergie et la question de leur impact environnemental est loin d'être résolue. Trop souvent, la mise en place d'installations de dessalement est un moyen de contourner des problèmes de mauvaise gouvernance de l'eau et d'esquiver les réformes nécessaires.

L'Algérie a vécu plus d'une décennie de sécheresse, et aussi les ressources conventionnelles en eau étaient insuffisantes pour subvenir aux besoins de la population. Ceux qui ont incité les autorités algériennes à chercher d'autres ressources pour garantir l'alimentation en eau potable de cette population. La solution la plus adaptée, qui ne dépend pas des aléas climatiques, était le dessalement d'eau de mer.

L'objectif de notre communication est de montrer pourquoi l'Algérie a opté pour le dessalement comme solution miracle pour le problème de la pénurie d'eau potable et de la sécheresse en Algérie. D'un côté, l'Algérie est touchée par les impacts du changement climatique mondial : hausse de température anormale, sécheresse, de graves tempêtes, un taux de pluviométrie très bas dans les régions de l'Ouest du pays et un taux très élevé dans les régions de l'Est du pays ; d'un autre côté, le processus du dessalement a résolu pour quelques régions dans notre pays le problème d'eau potable ou de l'eau courante à la maison.

Mots clés : Eau, environnement, dessalement, crise, pénurie, sécheresse, gouvernance.

Theme: "Environmental and economic issues of the projects desalination of sea water in Algeria"

Abstract:

Today, the desalination of sea water is sometimes presented as the miracle solution to the problems of scarcity of drinking water. In addition to the fact that it remains financially inaccessible to poor countries (in income or in oil), these technologies are major consumers of energy and the question of their environmental impact is far from being resolved. Too often, the establishment of installation of desalination is a way to circumvent the problems of bad governance of the water and to circumvent the necessary reforms.

Algeria has lived more than a decade of drought and also the conventional resources in water insufficient to meet the needs of the population. Those who have encouraged the Algerian authorities to look to other resources to ensure the drinking water supply in this population. The most suitable solution, which does not depend on the vagaries of weathers, was the desalination of sea water.

The objective of our communication is to show why Algeria has opted for desalination as miracle solution for the problem of shortage of drinking water and the drought in Algeria. On the one hand, Algeria is affected by the impact of global climate change: increase of abnormal temperature, drought, of serious storms, a rate of rainfall very low in the western regions of the country; on the other hand, the process of desalination ha resolved for some regions of our country the problem of drinking water or running water in the home

Key words: Water, Environment, Desalination, Shortage, Crisis, Drought, Governance.

Introduction:

Aujourd'hui, les ressources en eau potable sont rares. D'un côté, cyclones, inondations et autres événements climatiques l'apportent en surabondance. De l'autre côté, les sécheresses et la désertification entraînent des pénuries paralysantes et des conditions de vie misérables pour les populations. Cette opposition entre la pénurie et l'abondance couvre toute la planète, depuis les pays développés jusqu'aux pays en développement.

Le monde actuel fait face à une crise de l'eau majeure que les experts attribuent au réchauffement climatique qui entraîne un accroissement des phénomènes climatiques extrêmes : sécheresses ou inondations à l'augmentation de la consommation d'eau du à la croissance démographique et à l'accroissement des usages.

Le paradoxe est que certaines populations souffrent de pénuries d'eau alors que 71% de la surface du globe en est recouvert. Ce constat a incité divers spécialistes, chercheurs et acteurs du secteur de l'eau à développer différentes techniques de dessalement de l'eau de mer pour satisfaire la demande exponentielle du précieux liquide. Il est vrai que l'on estime à 39% la part de la population mondiale vivant à moins de 100km d'un côte alors que 42 villes de plus d'un million d'habitants ne disposant pas de ressources suffisantes en eau douce se situent sur le littoral.

Dans un contexte de changements climatiques, de sécheresses et de pénuries d'eau, appelées à s'aggraver faute d'amélioration de l'usage de l'eau, le dessalement apparaît comme un marché très prometteur pour les multinationales de l'eau et de l'environnement, de nombreux États procédant à des investissements significatifs dans ce domaine.

1. L'avenir de l'économie de l'eau :

Comme toute ressource, l'eau est inégalement répartie et épuisable. Sur notre continent la qualité des eaux superficielles et des nappes phréatiques sont de plus en plus dégradée et il faut puiser de plus en plus profondément pour obtenir une eau moins polluée. Avec des consommations qui augmentent et sachant que toute l'eau distribuée est de qualité potable il en coûte de plus en plus à la collectivité pour capter, traiter, amener, distribuer l'eau et retraiter les eaux usées sans compter que de nouvelles normes plus protectrices et des pollutions aggravées vont renchérir ces coûts.

Enjeu écologique : la ressource "eau" n'est pas inépuisable en quantité. Après avoir tari les nappes superficielles on puise aujourd'hui dans des nappes très profondes constituées après des millions d'années. La ressource "eau" se dégrade aussi en qualité nécessitant de plus en plus de traitements du fait d'une ressource de plus en plus polluée par l'agriculture, l'élevage et l'industrie et nos propres eaux usées qui assainies vont alimenter la ressource de demain.

Enjeu économique : économiser l'eau permettrait de réduire le budget de l'état et des collectivités locales (vos impôts) par le gel des investissements destinés à renforcer le réseau et l'assainissement, le statu-quo nucléaire et son abandon partiel et progressif en fin de vie des centrales au profit de nouvelles énergies écologiques (solaire, éolien...). Economiser l'eau réduirait les impôts locaux grevés par des impayés de charge en hausse constante. Economiser l'eau permettrait à chaque foyer de disposer d'un pouvoir d'achat supplémentaire.

Enjeu social : l'augmentation des charges locatives amène à une véritable fracture sociale. Avec des charges supérieures aux loyers des milliers de familles ne peuvent plus payer les charges eau et énergie. La dette globale des impayés est transférée par les gestionnaires sociaux aux Conseils Généraux et apurée via vos impôts locaux.

Les réserves du globe en eau douce sont données dans le tableau suivant mis à part les glaces, difficiles à utiliser et qui sont d'ailleurs actuellement en partie consommées dans les zones où elles fondent par effet du réchauffement climatique, les nappes souterraines constituent les principales réserves d'eau douce de la planète, le reste étant négligeable. Certains pays ont déjà commencé à prélever ces réserves d'eau souterraines.

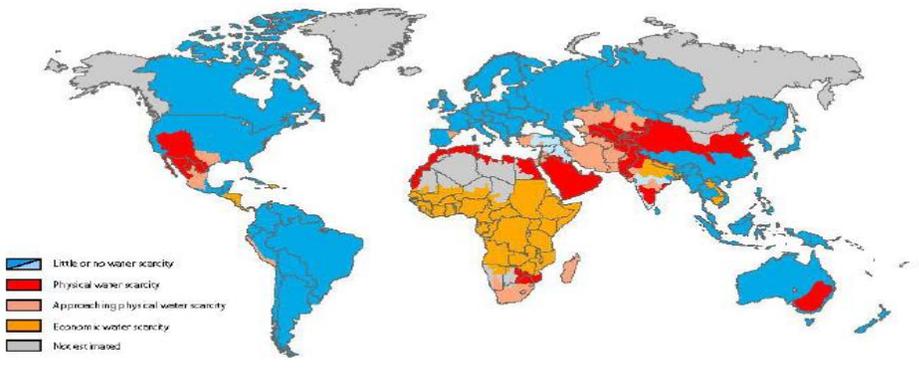
Tableau N° 1 : « Les réserves du globe en douce sur terre »

Milieux	Volumes, km3
neige et glace sur les pôles et les montagnes	30 millions
eaux souterraines à moins de 500 m de profondeur	4 millions
Eaux souterraines à plus de 500 m de profondeur	4 millions
eaux de tous les lacs d'eau douce	100 000
eaux présentes dans les sols	70 000
eaux présente à tout instant dans l'atmosphère	13 000
eaux présentes à tout instant dans toutes les rivières	1 000

C'est le cas, par exemple, de l'Inde qui, puisant dans ses nappes phréatiques superficielles, est en phase d'épuiser, d'ici dix ou vingt ans, tous ses stocks régulateurs d'eau souterraine. Ce pays ne pourra plus, ensuite, qu'utiliser les flux annuels des précipitations rechargeant les eaux souterraines, très variables d'une année à l'autre, qui se seront infiltrés pendant la saison humide précédente.

Les pays sahariens (Algérie, Tunisie, Libye) exploitent, quant à eux, de très grands aquifères dont les ressources sont énormes, et pourraient tenir des siècles au rythme actuel des prélèvements. Mais ces eaux sont chères (coûts de pompage, coûts de transfert vers le nord en Libye, etc.) et ce type de grands aquifères fossiles est relativement rare sur Terre. Les réserves en eau salée sont évidemment énormes. Elles sont estimées à 1,32 milliards de km³ dans les océans et 1 000 km³ dans les lacs salés.

Les changements climatiques vont modifier la disponibilité de l'eau, car il est prévu par les modèles de climat que globalement, les précipitations vont augmenter, mais que les zones climatiques actuelles vont se déplacer vers les pôles. Sur notre longitude, par exemple, il pleuvra ainsi un peu plus Europe du Nord, un peu moins en Europe du Sud et Afrique du Nord, et plus au Sud du Sahara et en zone tropicale. Voir la carte du changement climatique mondial :



Carte 1 : Zones du manque chronique de ressources en eau, du point de vue physique ou économique.

Rouge : Déficit physique ; plus de 75% du débit des rivières est prélevé pour les besoins de l'homme, en tenant compte des recyclages. Des pays arides à faible demande peuvent ainsi ne pas être en déficit.

Rose : Plus de 60% du débit des rivières est prélevé. Ces bassins vont devenir rouges dans un futur proche.

Orange : Déficit économique en eau. Les ressources sont abondantes par rapport aux usages, avec moins de 25% de prélèvements du débit des rivières, mais la sous-alimentation sévit. La capacité financière en moyens d'équipement fait défaut.

Bleu : Ressources en eau abondantes. Prélèvements inférieurs à 25% du débit des rivières.

1- Le dessalement : une solution pour un problème de pénurie d'eau

Le dessalement de l'eau (également appelé dessalage ou désalinisation) est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce, (potable ou, plus rarement en raison du coût, utilisable pour l'irrigation), à partir d'une eau saumâtre ou salée (eau de mer, notamment). En dépit du nom, il s'agit rarement de retirer le sel de l'eau, mais plutôt, à l'inverse, d'extraire de l'eau douce³.

L'eau de mer est salée à peu près à 35g/L en général. Dans des régions comme le Golfe Persique, la salinité atteint 42g/L. Pour séparer le sel, il faut, d'un point de vue purement théorique et sans perte d'énergie (dessalement isentropique), environ 563 Wh par m³.

Le dessalement de l'eau de mer est parfois présenté comme la solution miracle aux problèmes de rareté de l'eau potable. Outre le fait qu'elle demeure financièrement inaccessible aux pays pauvres (en revenus ou en pétrole), ces technologies demeurent de grosses consommatrices d'énergie et la question de leur impact environnemental est loin d'être résolue. Trop souvent, la mise en place d'installations de dessalement est un moyen de contourner des problèmes criants de gâchis ou de mauvaise gouvernance de l'eau et d'esquiver les réformes nécessaires.

Le dessalement de l'eau est souvent conçu comme la solution magique de ces problèmes – sauf bien entendu pour les pays sans accès à la mer (Mali, Niger). Puisque 97 % de l'eau de la Terre est de l'eau salée, le dessalement peut apparaître comme une solution raisonnable à la soif des hommes, particulièrement au moment où les défis liés à la qualité de l'eau, à sa rareté et à la qualité des infrastructures deviennent plus pressants tout autour de la planète.

La construction d'unités de dessalement se multiplie dans les pays pétroliers (Golfe, Algérie) ou dans les zones des pays riches qui souffrent de sécheresses (Israël, Espagne, Australie, Californie, Floride ou Texas aux États-Unis). Leur capacité ne cesse également d'augmenter : chaque nouvelle usine construite ou projetée est caractérisée par un nouveau record en termes de performance ou de production. On estime qu'actuellement, 50 millions de mètres cubes d'eau sont produits annuellement par dessalement, et que ce chiffre devrait au moins doubler pour les années à venir.

De nouveaux pays se lancent dans le dessalement, comme l'Angleterre. La Chine a annoncé de vastes investissements dans ce domaine, avec pour objectif de couvrir 37 % des besoins en eau potable des zones côtières à l'horizon 2020. L'Algérie a annoncé début 2008 la construction de l'une des plus grandes usines de dessalement du monde, pour un coût de 250 millions de dollars. Israël, qui possède déjà à Ashkelon la plus importante unité de dessalement au monde, annonce trois projets de taille comparable. L'ONG y rappelle notamment que les 1200 usines de dessalement du monde consomment beaucoup d'énergie et par conséquent émettent des gaz à effet de serre. Elle s'alarme donc d'un développement anarchique de cette technologie. Toujours selon elle, pour chaque litre d'eau dessalé, c'est un litre de saumure qui est rejetée à la mer. Même s'il est difficile de connaître l'impact réel de ces rejets, les premières études réalisées sur le sujet semblent montrer qu'il est faible (les fleuves rejettent aussi à la mer de nombreux minéraux).

2- Le dessalement et ces techniques:

En fait, arracher de l'eau douce de l'eau saumâtre ou de l'eau de mer est une technique employée depuis longtemps, particulièrement dans les pays et émirats pauvres en eau mais riches en pétrole, où le coût de l'énergie nécessaire au dessalement n'est pas un problème.

Historiquement, le dessalement a fait son apparition dans cette région lorsqu'en 1869, une unité de distillation de l'eau a été construite à Aden pour approvisionner la marine britannique. Cette unité utilisait la même technique, considérablement améliorée mais toujours aussi consommatrice d'énergie, qui continue à fournir aujourd'hui la moitié de l'eau dessalée produite dans le monde.

Les deux grands types de procédés pour dessaler l'eau de mer n'ont pas le même coût énergétique :

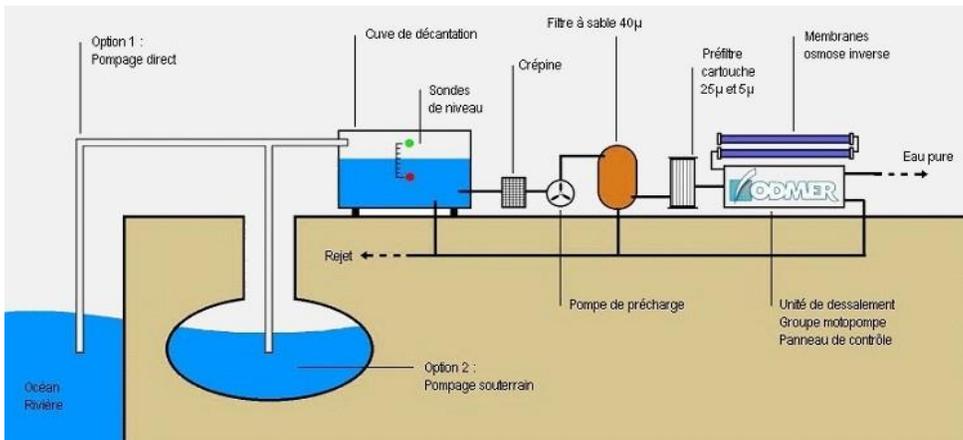
Le premier, thermique, repose sur la distillation. Il consiste à chauffer l'eau de mer pour produire une vapeur d'eau pure que l'on condense ensuite sur des faisceaux de tubes refroidis afin d'obtenir de l'eau douce. Il est mis en oeuvre via deux techniques, le MSF (pour Multi-Stage Flash distillation, distillation flash par détentes successives), qui date des années 1960, ou le MED (pour Multi-Effect Distillation,

3 Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre.

distillation à effets multiples), plus récent. Ce type de procédé n'en demeure pas moins très gourmand en énergie : pour produire 1 mètre cube d'eau, une usine MSF consomme 15,5 kilowattheures (kWh) et une unité MED 7,5 kWh. Plus des trois quarts de cette énergie servant à préchauffer l'eau de mer, on installe les unités à distillation à côté de centrales thermiques afin d'en récupérer la chaleur. Les installations modernes récupèrent l'énergie hydraulique issue du déversement du concentré à haute pression à travers des turbines ou des échangeurs de chaleur, ce qui réduit aujourd'hui la consommation totale d'une usine à 4 à 5,5 kWh par mètre cube d'eau produite. La distillation thermique permet de transformer l'eau salée en vapeur qui est alors condensée pour obtenir de l'eau dessalée. La distillation (ou évaporation) multi-effets a constitué la technologie dominante en matière de dessalement de l'eau de mer depuis les années 1880 jusqu'en 1960. Avec l'introduction de l'évaporation multi-flash en 1960, la distillation multi-effets a semblé disparaître de l'horizon, et l'oubli dans lequel cette technique est tombée s'est encore accentué avec l'avènement de l'osmose inverse. Avec le procédé d'électrodialyse inverse, les sels sont séparés de l'eau sous l'action d'une charge électrique.

Le second procédé, l'osmose inverse, utilise des membranes synthétiques semi-perméables, qui laissent passer l'eau et retiennent le sel. Pour filtrer l'eau de mer à travers la membrane, on applique une pression externe supérieure à la pression osmotique du système⁴. L'osmose inverse prévoit quant à elle l'application d'une pression sur l'eau introduite dans le système, qui est ainsi forcée à travers une membrane semi-perméable retenant la plupart des sels. L'osmose inverse est apparue dans les années 70 suite à la conception de membranes semi-perméables qui pouvaient efficacement séparer les sels de l'eau soumise à pression. Parfois appelée hyperfiltration, l'osmose inverse est tenue pour le plus complexe des processus de séparation membranaire.

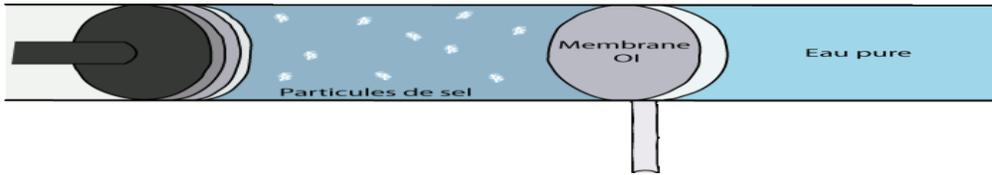
Présentation N° 1 : Fonctionnement D'une Usine A Osmose Inverse⁵



Dans cette usine, l'alimentation en eau peut se faire par prise directe (option 1 : pompage direct) ou par le biais de puits côtiers (option 2 : pompage souterrain). Cette eau subit ensuite des prétraitements ayant pour objectifs de conférer à l'eau de mer les caractéristiques nécessaires au bon fonctionnement des membranes d'osmose inverse (décantation, filtration, acidification, etc.). Par la suite, des pompes appliquent, sur l'eau de mer, une pression supérieure à 65 bar afin de dessaler cette eau : le phénomène d'osmose inverse décrit précédemment peut alors se produire, par le biais de membranes se présentant généralement sous forme de feuilles fines configurées en spirales.

La saumure (eau ultra-salée) est évacuée comme illustré par l'animation ci-dessous :

- 4 La pression osmotique est la pression d'équilibre entre une solution (ici salée) et son solvant pur, séparés par une membrane perméable au seul solvant.
- 5 hmf.enseiht.fr, 2006.



Représentation N°2 : Rejets De Saumure Issus Du Procédé D'osmose Inverse

L'eau dessalée peut ensuite être reminéralisée, ajustée au pH (on augmente ou on diminue son acidité) ou légèrement chlorée selon l'utilisation que l'on veut en faire (consommation, irrigation etc.). Les membranes sont périodiquement nettoyées grâce à des produits chimiques acides (pour les dépôts de carbonates) et basiques (pour les dépôts biologiques). Les eaux usées, très salées et contenant différents résidus chimiques sont déversées dans la mer, parfois après traitement.

Le cœur du procédé de dessalement est basé sur la technologie d'Osмосe Inverse, mais isolé, il ne produit pas de l'eau potable saine et ne garanti pas un système efficace⁶. En réalité, le dispositif de récupération d'énergie est le facteur clé qui détermine les coûts électriques de l'installation. Celui-ci doit être choisi minutieusement en fonction des coûts énergétiques locaux et des politiques environnementales.

De plus, l'élimination de la saumure peut représenter un problème environnemental et économique dans certaines régions où la faune et la flore sont sensibles à une augmentation de la salinité localisée. L'élimination de la saumure doit être étudiée au cas par cas. L'art du dessalement est de déterminer et de combiner des technologies actuelles afin d'optimiser la qualité de l'eau et les coûts de production. Pour adapter nos unités de dessalement à vos besoins, nous offrons des unités mobiles containerisées depuis la prise d'eau jusqu'à sa distribution pour une capacité de production allant jusqu'à 200 m³/h d'eau dessalée⁷.

Différentes qualités d'eau peuvent être obtenues à partir d'une unité de dessalement:

- Eau potable OMS
- Eau d'irrigation
- Eau de process: eau d'alimentation de chaudière, eau de refroidissement
- Eau déminéralisée ou ultra pure
- Tous types de sources naturelles d'eau de mer peuvent être traités:
 - Eau de mer de surface
 - Eau de mer profonde
 - Eau saumâtre de rivière
 - Puits côtier

⁶ <http://www.lenntech.com> ; Lenntech Water Treatment & Purification Holding B. V.2008.

⁷ Idem.

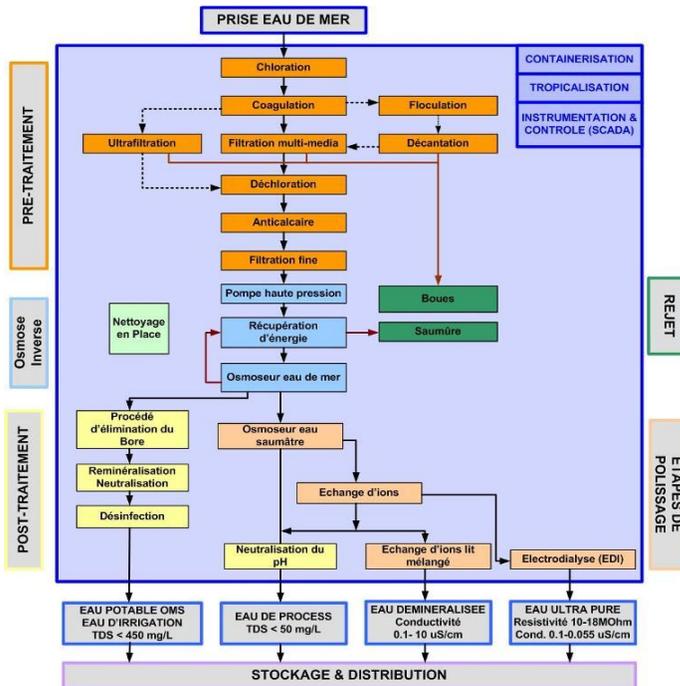


Schéma N°1 : « Principales étapes dans le procédé de dessalement »

Cette technologie est très populaire dans de nombreuses zones du Moyen Orient, dans les Caraïbes, et partout où l'eau de mer dessalée est la principale source d'approvisionnement des villes et des communes. Mais elle est également utilisée aux États-Unis, au Japon et en Europe pour produire de l'eau ultra-pure pour de nombreuses industries, en particulier agroalimentaires et électroniques.

3- Les enjeux du dessalement de l'eau de mer :

➤ Problèmes économiques :

L'un des inconvénients majeurs de la technologie membranaire est son coût. Deux facteurs contribuent à rendre cette technologie coûteuse :

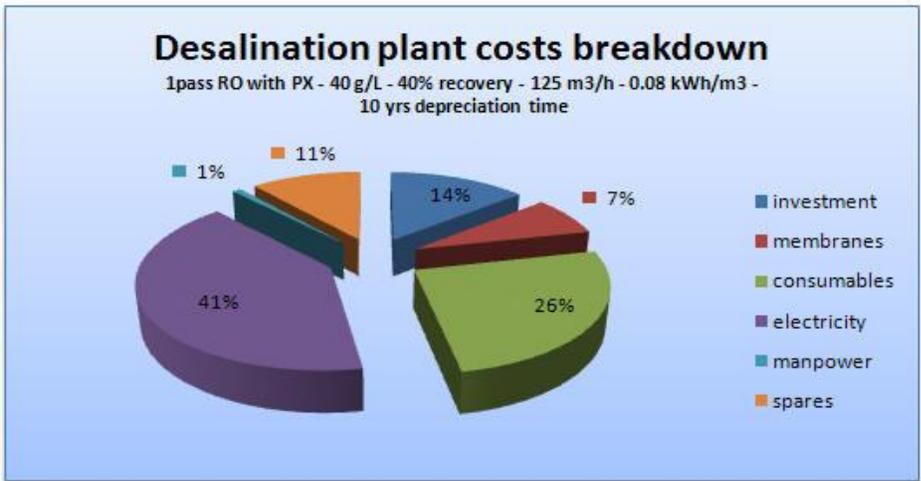
- Le premier est la quantité d'énergie consommée par les systèmes de pompes, en particulier pour l'osmose inverse à haute pression : (Les techniques utilisées pour le dessalement de l'eau sont très consommatrices en énergie)
- Le second est la détérioration des membranes, un phénomène qui a fait l'objet de nombreuses recherches. Les membranes utilisées pour l'osmose inverse sont nettoyées chimiquement après plusieurs mois de service. Sur le long terme, les membranes sont remplacées lorsqu'elles deviennent trop souillées et que leur performance se détériore significativement. Cela arrive généralement tous les 3 à 5 ans.

D'autres processus existent qui reposent sur l'échange d'ions (par électrolyse), ou encore sur une autre technologie membranaire par microfiltrage (ou nanofiltrage, ou ultrafiltrage).

Le dessalement coûte aujourd'hui en moyenne US\$ 0,5 par mètre cube, le prix variant selon l'échelle, les besoins en électricité (ou autre source d'énergie) et la distribution. Il est clair que cela ne répond pas aux besoins des ruraux pauvres de la planète, qui constituent pourtant les principales victimes de la crise de l'eau. En outre, il apparaît clairement que le dessalement n'est pas approprié pour assurer la fourniture de l'eau d'irrigation. Selon le Texas Water Development Board, le coût d'un mètre cube d'eau traité par distillation se situe entre US\$ 0,95 et 1,04, tandis qu'il est de 0,84 pour une eau traitée par osmose inverse.

La technologie de l'osmose inverse, car, il existe dans les faits deux familles de technologies de dessalement : la distillation et la filtration membranaire. La distillation utilise l'évaporation, via chauffage thermique, pour séparer l'eau des impuretés de sels. Son inconvénient majeur est l'énergie que consomme ce procédé. La filtration membranaire utilise, elle, le procédé d'osmose inverse pour retenir les sels contenus dans l'eau. L'eau salée pénètre ainsi à une extrémité de la membrane sous une pression de 80 bars, et après passage membranaire, l'eau ressort débarrassée de 99 % de son sel.

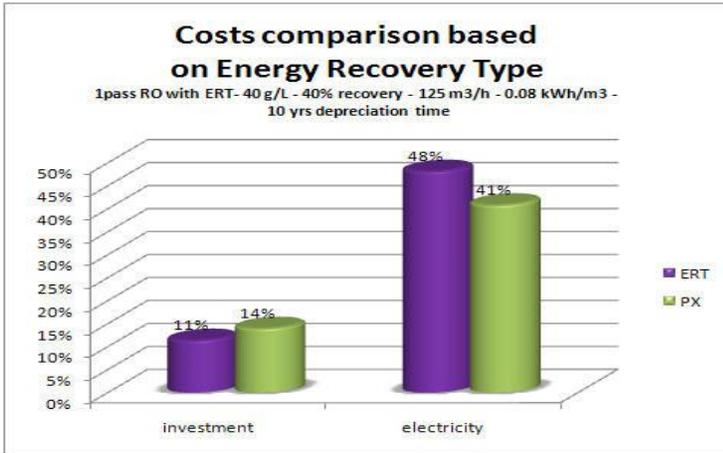
Aujourd'hui, le coût de l'osmose inverse est devenu inférieur à celui de la distillation en 1995, grâce à l'apparition d'une nouvelle génération de membranes. Depuis 10 ans, les coûts de production du dessalement ont été divisés par deux. Selon les zones d'implantation, la nature de l'eau brute et le coût de l'énergie, le mètre cube produit coûte de 0,30 à 0,91 euros pour l'osmose inverse en sortie d'usine⁸. La production d'eau potable à partir d'eau de mer devient une solution abordable lorsqu'aucune autre source d'eau fraîche n'est disponible. Le cout d'investissement est loin d'être la plus importante considération. En effet, les consommations en produits chimiques et électriques sont alors les couts opérationnels moteurs.



Graphe N°1 : « L'analyse financière du processus de dessalement par l'osmose inverse »

Selon les couts énergétiques locaux, le choix d'un système de récupération d'énergie peut être critique. Le cout d'investissement est plus élevé avec un échangeur de pression (PX) mais les couts électriques sont moindres. Dans les pays ou les couts électriques sont élevés, typiquement des îles avec aucune ressource énergétique, les économies financières avec un prix sont d'autant plus significatives.

⁸ La mer à boire, Dossier thématique, Technopole de Cherbourg, Mars 2005, p 11



Graph N° 2 : le coût de l'électricité et de l'investissement de l'osmose inverse

En Arabie Saoudite, le vrai coût du dessalement et du transport de l'eau, certainement considérable, est un secret d'État. Or l'eau potable de ce pays provient à 70 % du dessalement, un ordre de grandeur que l'on retrouve dans les autres pays du Golfe, Bahreïn, Koweït et Émirats Arabes Unis. Dans ces pays producteurs de pétrole, le faible coût de l'énergie autorise un dessalement à grande échelle qui ne serait pas soutenable pour la plupart des pays souffrant de stress hydrique, sans parler de ceux qui n'ont pas d'accès à la mer.

Le dessalement semble, par conséquent, s'imposer comme une solution immédiate et stratégique pour des pays soumis à une raréfaction des ressources en eau ou au stress hydrique⁹. Les ressources en eau de l'Algérie devraient "atteindre leurs limites à l'horizon 2020-2025"¹⁰. La crise du climat va aggraver la dégradation des ressources naturelles dans les hauts plateaux et toutes les régions steppiques qui constituent de véritables potentiels agricoles" devant "assurer la sécurité alimentaire" de l'Algérie le Directeur de l'Agence nationale algérienne pour les changements climatiques. Selon les prévisions du Centre de recherche de dessalement au Moyen-Orient l'Algérie devrait se classer derrière l'Arabie saoudite, les Emirats arabes unis et les USA en termes de capacité de production d'eau potable à partir d'eau de mer¹¹.

Dans le cadre du plan de relance économique initié en avril 2001 par le gouvernement, le secteur de l'eau représente une part importante des dépenses¹². L'objectif est d'améliorer le service de distribution d'eau par l'engagement d'une réforme de la tarification ; la réduction des déperditions sur le réseau, estimées à 40% ; une mobilisation accrue des ressources ; et enfin la participation des opérateurs privés dans la gestion des réseaux d'alimentation en eau potable. Le recours à l'eau de mer devient par conséquent une solution avantageuse dans un pays où les barrages ne parviennent pas à couvrir la totalité des besoins.

Les ressources hydriques de l'Algérie du Nord, où réside l'essentiel de la population, sont limitées. La situation est aggravée par une sécheresse qui perdure depuis une vingtaine d'années. La production d'eau potable destinée à la consommation des populations urbaine est aujourd'hui de 1,2 milliards de m³ soit une disponibilité moyenne par habitant, de seulement 100 l/j. Or à l'horizon 2020 la population va pratiquement doubler. La demande de l'agriculture irriguée est considérable alors que partiellement insatisfaite: de l'ordre de 600 millions de m³ actuellement. A l'horizon 2020, si les plans de développement sont appliqués, la demande d'eau irriguée serait triplée.¹³

⁹ F Galland, Géopolitique de dessalement, Note de la FRS n°18/2008, septembre 2008, p 7

¹⁰ <http://eau.apinc.org/spip.php?article543>

¹¹ Sur les 35 millions d'habitants, plus de 9 vivent dans les 5 principales villes du pays, toutes situées à proximité de la mer

¹² Le secteur de l'eau en Algérie, Mission économique, MINEFI, 2005

¹³ le plan national de l'eau : un plan directeur pour la gestion des ressources hydrauliques de l'Algérie du nord; <http://www.oieau.fr> ;

En Algérie, l'investissement dans le dessalement d'eau de mer représente une proportion importante dans l'investissement étranger direct dans le secteur de l'énergie, dont les hydrocarbures tiennent le haut du pavé. Le programme initié en 2001 prévoit la construction de 43 stations de dessalement d'ici 2019, pour un investissement total de 14 milliards de dollars.

La technique du dessalement est beaucoup plus coûteuse que l'osmose inverse. Elle ne convient que si on construit simultanément une centrale électrique, puisque les usines thermiques consomment énormément d'énergie. Sans cela, le coût d'un m³ d'eau pourrait monter jusqu'à 4 euros. Totalement inabordable pour la plupart des pays. Reste que le procédé qui permet de transformer l'eau de mer en eau douce est très gourmand en énergie, et donc coûteux, même la future usine de Makta présentée comme particulièrement rentable, facturera le mètre cube d'eau 34 dinars, environ 1/2 dollar, cela reste beaucoup plus cher que l'eau douce issue des barrages I 4.

WWF rappelle notamment que les usines de dessalement consomment beaucoup d'énergie et par conséquent émettent des gaz à effet de serre. Elle craint d'ailleurs que les nouvelles usines de dessalement d'eau de mer entraînent le déploiement d'installations de production d'énergie nucléaire ; tel que le Qatar et le projet de Ras Laffan qui sera la plus grande installation de production d'électricité et de dessalement d'eau de mer du pays, avec une production quotidienne de 2.730 MW d'électricité et de 286.000 m³/jour d'eau dessalée.

La Jordanie et la Chine ont été plus loin en signant un accord de coopération nucléaire ouvrant la voie à une prochaine coopération en matière d'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire, spécialement dans les domaines de la production d'électricité et du dessalement d'eau. Un accord de coopération entre l'Algérie et la France pour le dessalement nucléaire a été signé en décembre 2007. Or, les autorités publiques de l'eau et l'industrie du dessalement semblent s'orienter vers la création d'usines toujours plus grandes et reliées entre elles. En ce sens, l'Etat du Western Australia, en faisant construire l'usine de Perth, a émis une règle : l'électricité consommée par une usine de dessalement doit provenir d'énergie renouvelable. Cela signifie que les Etats s'engagent à ajouter à leur réseau de production d'électricité une ferme éolienne ou solaire d'une capacité équivalente à la consommation de leurs usines de dessalement I 5.

➤ **Problèmes environnementaux :**

- Rejet des saumures concentrées au double de la salinité naturelle en mer ou injectées dans le sol ;

- Rejet de polluants atmosphériques, notamment du dioxyde de carbone (CO₂), des oxydes de soufre et d'azote et des particules solides. I 6

- Rejet d'eaux chaudes en mer dans le cas de la distillation ;

- Emploi de produits chimiques pour nettoyer les membranes (chlore et autres) ;

- Traces de cuivre échappés des installations ;

- Aucune législation spécifique concernant la potabilité de l'eau issue de ces traitements ;

- Exploitation du terrain pour la construction des usines.

- Toute unité de dessalement doit généralement être accompagnée d'une unité de production d'énergie. Cette dernière génère évidemment une grande quantité de gaz à effet de serre, lesquels auront un impact – négatif – sur le climat et sur le cycle de l'eau. Or, dans la plupart des cas, le dessalement est précisément rendu nécessaire par les évolutions du climat et du cycle de l'eau. Certains craignent que la multiplication des usines de dessalement n'entraîne une relance à grande échelle de la construction de centrales nucléaires : chaque unité de dessalement serait accompagnée de son unité nucléaire. Il existe des projets d'usines de dessalement couplées à des sources renouvelables (éolien et solaire), comme à Perth en Australie.

- Les scientifiques s'accordent sur le fait que les impacts des effluents (eaux rejetées) issus de ces usines sont principalement dus à la forte concentration en sel et dans une moindre mesure à la présence de produits chimiques (utilisés pour le fonctionnement de l'usine) et à la température potentiellement élevée de ces eaux.

- Les rejets des usines de dessalement sont soumis aux réglementations du protocole « Tellurique » de la convention de Barcelone à laquelle ont adhéré de nombreux pays européens côtiers de la méditerranée : France, Espagne, Israël, Egypte, Liban, Lybie, etc. Cette convention prévoit des

¹⁴ <http://maghreinfo.20minutes-blogs.fr;>

¹⁵ La ruée vers le dessalement de l'eau de mer, Les Echos, 15 décembre 2007

¹⁶ tinyurl.com,2007

valeurs limites de rejets pour de nombreux éléments (sels, chlore, température, etc.) et l'obligation de réaliser une étude d'impact (dossier examinant les conséquences environnementales d'un projet) avant la construction de l'usine.

- Lorsque la saumure est rejetée sans dilution ni traitement, elle induit une augmentation de la concentration en sel autour de la zone de rejet. Des travaux de recherche ont ainsi montré que les rejets de saumure issus des usines de dessalement du golfe persique augmentaient localement la concentration en sel de 5 à 10 mg/L, la concentration moyenne de l'eau de mer dans cette région avoisinant les 45 mg/L.17

- Une unité de dessalement génère une grande quantité de saumure, composée de divers sels, métaux lourds, composés organiques... Si cette saumure est rejetée dans la mer, cela entraîne un grand déséquilibre dans la composition physique et chimique de l'eau de mer, avec des conséquences dramatiques sur la biodiversité. Ces solutions abaissent légèrement le pH de l'eau, qui passe d'environ 8,3 (l'eau de mer est légèrement alcaline) à environ 7, soit un pH neutre. L'acidité résiduelle est très rapidement éliminée par l'eau de mer.

- En Espagne, des études menées en laboratoire et sur le terrain par l'équipe de José Luis Sánchez-Lizaso, de l'université d'Alicante, ont montré que la plante à fleurs aquatique *Posidonia oceanica* 18 est très sensible aux variations du taux de salinité de ses habitats naturels. Des effets notables sur la structure de la plante ont été observés à des taux de salinité d'à peine 39,1 g/l et sur sa vitalité dès 38,4 g/l19. Car, le premier risque vient du sel. En Méditerranée occidentale par exemple, la salinité naturelle de l'eau de mer se situe entre 37 et 38 grammes par litre (g/l), alors que la salinité du concentré osmotique peut atteindre les 70 g/l20.



Photo N°1 et N°2 : Coraux en mer rouge (Egypte) et herbiers de posidonie (méditerranée)

- La forte teneur en sel du concentré rejeté avec l'osmose inverse risque donc de porter préjudice aux bancs de *Posidonia* classés habitat prioritaire par la directive européenne pour la conservation des habitats de la faune et de la flore. Une recommandation préconise d'éviter les rejets dans cet écosystème ou de respecter rigoureusement les seuils de salinité.

- D'autres études ont également révélé que ces hausses de températures et de la salinité pouvaient également provoquer une diminution de la diversité et de l'abondance de la macrofaune benthique (organismes vivant sur le fond) : c'est le cas par exemple dans la zone de rejet de l'usine de dessalement de Dhekelia (Chypre).

17 Elimelech, 2011.

18 Herbier de posidonies de Méditerranée (*Posidonia oceanica*), une plante à fleurs aquatique très sensible aux variations du taux de salinité. Ces herbiers constituent un écosystème de premier plan en Méditerranée et exercent une fonction protectrice des littoraux contre l'érosion marine. Ces herbiers sont le refuge d'un grand nombre d'espèces animales (mollusques, poissons, crustacés etc.).

19 J.L. Sánchez-Lizaso, et al., *Desalination*, 221, 602, 2008.

20 <http://www.larecherche.fr>;



Photo N° 3 : La néréide: un polychète²¹

On a ainsi observé une augmentation du taux de cadmium dans la crevette *Artemia franciscana* dans des zones de rejets de saumures²². A partir de certains seuils de concentrations, ces matières sont toxiques voire mortelles et peuvent déstabiliser certains échelons du réseau trophique (= chaîne alimentaire) et



les équilibres de l'écosystème.

crevette *Artemia franciscana* (Aquaortail, 2014)

La

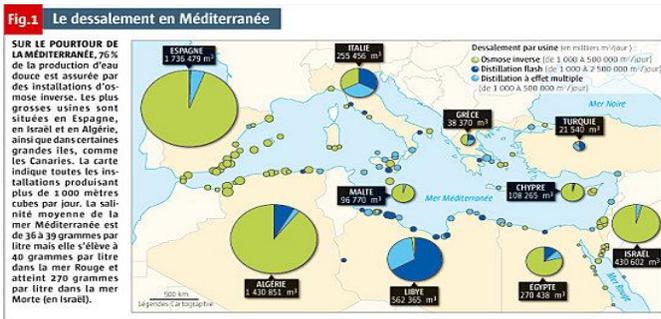


Figure N° 1: Les pays qui procèdent au dessalement dans la Méditerranée

Les rejets chimiques soulèvent d'autres inquiétudes, surtout pour les usines à distillation. Le chlore est utilisé pour limiter la contamination biologique des installations. C'est un biocide très efficace qui, une fois libéré dans le milieu marin, peut toucher des organismes non ciblés. À partir de données toxicologiques portant sur un large éventail d'espèces marines, l'Agence américaine de la protection de l'environnement (EPA) a donc émis une recommandation fixant le plafond des concentrations en chlore de l'eau de mer à 7,5 microgrammes par litre sur le long terme.

²¹ ecosociosistemas.fr, 2011

²² UNEP, 2008

L'usure du matériel est telle qu'elle oblige à remplacer les tuyauteries pendant la durée de vie d'une installation. Mais avant ce remplacement, le cuivre risque de s'accumuler dans les sédiments et le biotope marin²³. L'estimation à 300 kilogrammes par jour l'ensemble des rejets de cuivre de toutes les usines à distillation du Golfe²⁴

En Algérie, le programme de dessalement d'eau de mer comprend la réalisation de 13 stations de capacités variables qui produiront à terme 2,26 millions de m³/j. Quant au taux de raccordement des ménages au réseau AEP, le rapport souligne qu'il est passé de 78 % en 1999 à 92 % en 2007, alors que la dotation quotidienne est, elle, passée de 123 à 165 litres par habitant en 2007. Outre l'AEP25, le même document révèle les grands progrès en matière d'assainissement, notamment la réalisation de 130 stations d'épuration d'eaux usées et une progression de 80 % du linéaire national des réseaux d'assainissement portant ce dernier de 21.000 à 38.000 km.

La mise en service de ces infrastructures a permis de disposer d'une capacité installée d'épuration des eaux usées de 270 millions de m³/an qui devra passer dès 2009 à 600 millions de m³/an, soit une capacité de traitement des rejets de l'ordre de 82 %. S'agissant du volet hydraulique agricole, la superficie irriguée, qui était de 350.000 ha en 1999, est passée à 860.000 ha. Les quantités d'eau emmagasinées dans l'ensemble des barrages d'Algérie ont atteint un taux de remplissage de 52,63 % au 3 avril contre 44,89 % sur la même période de l'année 2007. Les volumes d'eau collectée par les 59 barrages en exploitation se sont élevés à 3,06 milliards de m³ en début avril contre 2,6 milliards de m³ durant la même période de l'année 2007, soit une augmentation de l'ordre de 7 %. Les dernières pluies ont apporté, durant le mois de mars de l'année en cours, des volumes supplémentaires d'eau estimés à 341,39 millions de m³.

Conclusion :

Les ressources naturelles telles que l'eau sont et resteront limitées et finies. Les promesses du dessalement sont trompeuses. L'abondance illimitée, dans quelque domaine que ce soit, n'est qu'une illusion. Le dessalement de l'eau de mer pourrait apparaître comme la technologie miraculeuse permettant de répondre aux besoins de nos sociétés modernes. Pour certains, cette capacité miraculeuse s'étend jusqu'au domaine de la politique, puisque le dessalement constituerait la clé du conflit israélo-palestinien actuel. Le dessalement est aussi une manière de contourner des conflits politiques potentiels relatifs au partage de l'eau, comme en Espagne, où cette solution a finalement été privilégiée par rapport aux projets de transferts d'eau massifs entre différentes régions du pays.

Dans certains cas, la promotion à grande échelle du dessalement est une manière pour les autorités d'éviter de résoudre les problèmes de la gouvernance de l'eau par une fuite en avant : ainsi en Algérie, où les autorités n'ont pas amélioré le réseau depuis l'indépendance du pays en 1962, ou encore en Australie, en Israël et en Californie, où l'on veut éviter, pour des raisons idéologiques ou économiques, de remettre en cause des modes de vie et de production particulièrement gaspilleurs de l'eau.

De ce fait, il faut bien porter l'attention vers les techniques qui visent un usage raisonné de l'eau, à conserver la ressource et à économiser l'eau. Il faut en particulier gérer l'eau de manière à éviter les fuites et les pertes, qui représentent en moyenne près de 20-30 % de la consommation d'eau dans le monde. Selon des études récentes, il semble que des mesures de conservation de ce type permettraient de répondre aux besoins en eau pour un coût qui représenterait seulement de 10 à 25 % de celui du dessalement. L'efficacité de l'utilisation de l'eau doit être améliorée à cet égard. Les fuites et le gaspillage de l'eau doivent être éliminés. Selon le Worldwatch Institute basé à Washington, cela permettrait d'éviter de recourir au dessalement, avec ses effets négatifs sur l'environnement et l'atmosphère.

En outre, il faut louer les efforts faits en matière de recherche et de développement pour diminuer les consommations d'énergie et les rejets aux impacts environnementaux nocifs. Cependant, cette connaissance doit être accessible à tous. En effet, la question de l'accès potable ne doit pas se faire au prix de lourdes pollutions qu'elles soient maritimes ou aériennes.

Le dessalement d'eau de mer, gourmand en énergie et à l'origine de rejets polluants, n'est pas une option de développement durable, même si des études à long terme manquent pour évaluer précisément l'impact de ces usines. Il s'agit d'une alternative d'adaptation au changement climatique qui ne devrait être adoptée que lorsque toutes les autres possibilités « durables » ont déjà été exploitées (en particulier l'utilisation rationnelle de l'eau et le recyclage des eaux usées) et qui devrait se limiter à la production d'eau potable pour la consommation humaine.

23 S. Lattemann et T. Höpner, in *Protecting The Gulf's Marine Ecosystems From Pollution* par A. Abuzinada et al., Birkhäuser Verlag, Suisse, 2008.

24 <http://www.eco-life.fr>

25 www.aep.dz

Enfin, les projets de dessalement devront, autant que possible, intégrer des logiques d'emplois, de développement de filières industrielles, de création d'entreprises. Il est par conséquent important de préparer des actions de formation, de transfert de compétence et de technologies pour former une main d'œuvre qualifiée, source d'intégration et d'acceptation des projets, mais aussi pour la bonne gestion dans la durée²⁶ ; tel que :

Prendre une douche plutôt qu'un bain, c'est diviser au moins par trois sa consommation d'eau. Une douche de 4 à 5 mn consomme 30 à 80 litres d'eau et un bain 150 à 200 L.

Surveiller les fuites d'eau évite d'alourdir sa consommation de 20%. Un robinet qui fuit perd jusqu'à 120 L.

Fermer le robinet quand l'eau coule sans raison doit être un réflexe. Surtout pendant le brossage des dents ou le rasage, responsable de 12 à 18 L d'eau gaspillés chaque minute. Même chose pour la vaisselle : la rincer sous l'eau courante fait perdre jusqu'à 200 L d'eau.

Placer un robinet mitigeur permet d'économiser 10% d'eau par rapport à un robinet mélangeur classique.

SOURCES :

Collection of Chemical & Engineering News, American Chemical Society, Washington, D.C.

Léopold Mayer, Worldwatch Institute annual report « State of the World 2004 », Washington, D.C. (traduit en français par M.L. Bouguerra : La consommation assassine, Comment le mode de vie des uns ruine celui des autres. Pistes pour une consommation responsable, Editions Charles-, Paris, 2005).

F Galland, Géopolitique de dessalement, Note de la FRS n° 18/2008, septembre 2008, p 7

J.L. Sánchez-Lizaso, et al., Desalination, 221, 602, 2008.

M.L. Bouguerra in « Manière de voir. Le Monde Diplomatique » N° 81, Juin-Juillet 2005, p.41-44.

M.L. Bouguerra, Water under threat, Zed Books, London, 2006.

« L'eau. Attention fragile », Dossier in Pour la Science (Scientific American), Paris, Janvier-Mars, 2008.

Christiane Galus, « Dessalement de l'eau de mer : un marché très prometteur », Le Monde, 2008.

Henri Boyé, Eau, énergie, dessalement et changement climatique en Méditerranée, Plan Bleu, Août 2008, p37.

Welker Environmental Consultancy for Water Cooperation, Perth Metropolitan Desalination Proposal Environmental Protection Statement, 2002.

La ruée vers le dessalement de l'eau de mer, Les Echos, 15 décembre 2007.

S. Lattemann et T. Höpner, in Protecting The Gulf's Marine Ecosystems From Pollution par A. Abuzinada et al., Birkhäuser Verlag, Suisse, 2008.

<http://eau.apinc.org/spip.php?article543>

Le secteur de l'eau en Algérie, Mission économique, MINEFI, 2005

<http://www.oieau.fr> ;

<http://maghrebinfo.20minutes-blogs.fr>;

<http://infos-eau.blogspot.com/>

<http://www.larecherche.fr>;

<http://www.actu-environnement.com>

<http://www.eco-life.fr>

<http://www.aep.dz>

²⁶ Henri Boyé, Eau, énergie, dessalement et changement climatique en Méditerranée, Plan Bleu, Août 2008, p37

Erosivité des pluies et érosion spécifique et envasement des barrages en milieu semi-aride Tunisien.

Belaid Hechmi et Habaieb Hammadi.

1 : ESIM (Ex ESIER) Route du Kef Medjez El Bab Tunisie belaidhfr@yahoo.fr
2 : INAT et Ministère de l'Agriculture des Ressources Hydrauliques et de la Pêche Tunisie

L'agressivité et l'irrégularité des pluies qui caractérisent le climat méditerranéen semi-aride font que ces zones sont sujettes à une érosion hydrique forte et parfois grave ainsi qu'à des inondations fréquentes. Les pertes de la couche arable ou du sol de surface par l'érosion peuvent avoir des effets immédiats ou à long terme qui se traduisent par l'envasement des barrages, une réduction de la qualité des sols et chute des rendements des cultures.

L'objectif principal de ce travail de recherche est d'étudier l'érosivité des pluies dans ce milieu et de quantifier l'érosion spécifique qui constitue le principal facteur de l'augmentation des pertes totales en sol et de l'envasement des barrages.

Les méthodes de travail utilisées reposent essentiellement sur l'analyse des données pluviométriques et sur la simulation des pluies. Les résultats montrent que l'érosivité pour toutes les averses et en utilisant 115max, peut dépasser les 1200 MJ.mm/ha avec un écart type élevé. Les pertes en sols varient entre 0,01 kg/m² à 0,49 kg/m². L'érodibilité expérimentale a été calculée pour chaque sol, elle varie de 0,001 à 0,061. Pour évaluer le transport des sédiments, le meilleur modèle qui décrit ce processus est le modèle hydrologique WEPP. La puissance du courant $\omega(g_s-3)$ dans le modèle WEPP est le meilleur paramètre de prévision de la charge solide unitaire $q_s(g_s-1cm-1)$.

L'érosion spécifique mesurée à l'échelle de la parcelle varie entre 0.6 et 31.5 m³/ha/an alors que celle à l'échelle grand bassin varie entre 0.2 et 44 m³/ha/an de sédiments qui se déposent au niveau des barrages.

En faisant une liaison avec ce qui se passe sur terrain, on peut dire que l'envasement de quelques barrages revêt une importance dont il faut la prendre en compte pour réduire ce fléau et faire des aménagements appropriés.

La connaissance des pertes en terres dans un bassin versant revêt une importance cruciale par conséquent, les mesures d'adaptation à ces conditions extrêmes doivent être entreprises à l'échelle de la parcelle ou à celle des cours d'eau.

Mots clés : érosivité, pluie, érosion spécifique, envasement, barrages, adaptation.

Introduction

La mobilisation et l'exploitation des eaux de surface sont des pratiques anciennes en Tunisie. Les aménagements réalisés les dernières années sont exposés à un alluvionnement plus ou moins accéléré. La capacité de stockage des retenues des barrages est sujette à une réduction progressive au cours du temps. Cette perte de capacité, parfois élevée, dépasse les prévisions des études de l'alluvionnement de la retenue. La quantification des sédiments piégés se base soit sur les bilans de matière solide à l'échelle d'une retenue, soit sur des levés bathymétriques ou topographiques (Ben Mammou et Louati, 2007).

En fait le phénomène de l'envasement des barrages est l'aboutissement d'un processus naturel d'érosion des bassins versants et du sapement des berges des cours d'eau (Remini et Ben Safia, 2016). Ce phénomène naturel enregistre les valeurs les plus élevées dans les régions arides et semi arides comme le Maghreb et plus particulièrement la Tunisie et l'Algérie. L'envasement qui représente les dépôts successifs des sédiments, pose des problèmes de quantité et de qualité des eaux des barrages.

Comme le montre la figure 1, le processus de l'envasement d'un barrage débute dans la première phase par l'arrachage des particules fines de leurs positions initiales par le ruissellement. Dans la seconde phase, les sédiments seront drainés par les cours d'eau jusqu'au barrage. Enfin dans la troisième partie, les particules seront piégées pour se décanter et se tasser au fond du lac du barrage (Remini, 1990).

L'agressivité et l'irrégularité des pluies qui caractérisent le climat méditerranéen semi-aride font que ces zones sont sujettes à une érosion hydrique forte et parfois grave ainsi qu'à des inondations fréquentes. Les pertes de la couche arable ou du sol de surface par l'érosion sont en grande partie responsables de l'envasement de ces barrages (Belaid et Habaieb, 2017). En Tunisie, environ trois millions d'hectares sont soumis aux processus d'érosion hydrique (MEAT, 1992, 2009). L'intensité de cette dégradation varie d'une région à l'autre en fonction de la nature du sol, des activités agricoles et des conditions écologiques qui influent sur le degré d'équilibre des écosystèmes.

L'érosivité ou agressivité érosive de la pluie est le paramètre utilisé pour estimer l'aptitude des pluies à produire l'érosion des versants (incluant la formation des petites rigoles) en intégrant sur une période tous les événements susceptibles d'y contribuer. Elle permet d'apprécier le risque climatique de dégradation du sol à plus ou moins long terme (Borges, 1993; Hermando et Romana, 2016).

Les relations liant les paramètres diffèrent cependant quelque peu selon la nature du phénomène météorologique qui est à l'origine de la précipitation (convection ou fronts dépressionnaires) (Soutter et al., 2007; Mannaerts et Mathuijs, 2007). Le diamètre médian des gouttes d'eau augmente globalement avec l'intensité de la précipitation. Cette augmentation marque toutefois un arrêt au-delà de 100 mm/h, probablement en raison de l'instabilité des grosses gouttes avec l'accroissement des turbulences de l'air, mais reprend à partir de 200 mm/h sous l'effet de la coalescence de gouttes de dimensions plus faibles (Soutter et al., 2007).

Wishmeier et Smith (1978) proposent que pour le dépouillement des enregistrements pluviographiques, seules les pluies de plus de 12,7 mm (0.5 inch) sont dépouillées (sauf le cas où on a au moins de 6,3 mm qui tombent en 15 min), et que deux averses soient considérées comme distinctes si la précipitation totale pendant six heures est inférieure à 1,3 mm.

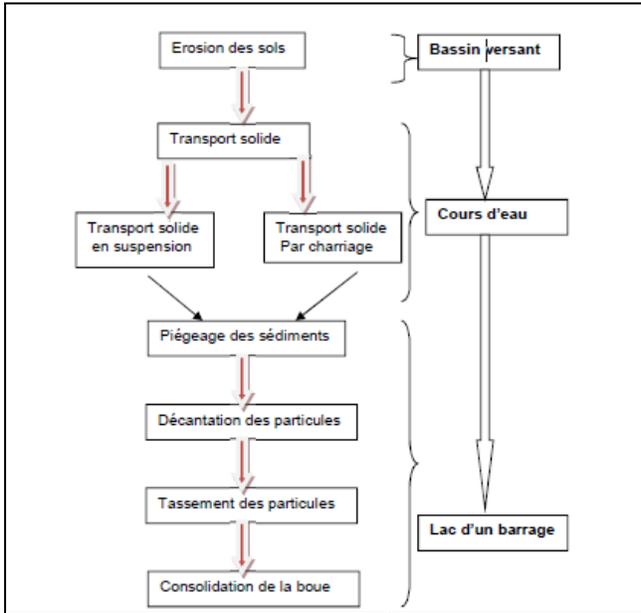


Fig. 1. Processus d'envasement d'un barrage Réservoir (Remini, 1990)

Les travaux récents en matière d'érosivité des pluies s'adressent à la cartographie de l'érosivité à l'échelle des pays ou de continent avec des projections qui touchent même 2050 (Hermando et Romana, 2016 ; Panagos et al., 2016 et Panagos et al., 2017)

En matière d'érosion la pluie du fait de sa composition en petite goutte à une action directe sur le sol, elle influence fortement la dynamique des états de surface du sol. En modifiant la structure et en redistribuant les particules à la surface du sol, l'action mécanique de la pluie a une influence forte sur la couche superficielle du sol. Il en découle une dynamique temporelle importante des processus d'infiltration, de genèse du ruissellement et d'érosion (Kinnel, 2005).

Le transfert des fragments de sol par l'impact des gouttes de pluie (Nord, 2006) ou la mise en mouvement ou encore le détachement des sédiments par l'impact des gouttes de pluie a lieu sur une surface de sol libre ou sur une surface de sol recouverte par une fine lame d'eau. L'entraînement se fait conjointement avec la couronne de splash, ou résulte d'un choc élastique. Les connaissances sur la mécanique de la mise en mouvement des fragments de sol par l'impact des gouttes de pluie sont encore insuffisantes pour pouvoir proposer un modèle de compréhension (Nord, 2006). L'approche expérimentale est couramment utilisée pour étudier ces processus dont l'objectif est de quantifier les flux de mise en mouvement et leur composition granulométrique en fonction des types de sol. Leguédou (2003) a mesuré des flux de mise en mouvement variant entre 2.3 et 5.8 $gm^{-2}mm^{-1}$ en début d'évènement pluvieux, avant l'apparition d'une lame d'eau en surface. Ces flux expriment des masses recueillies par unité de surface de la source et par millimètre de pluie. Les valeurs sont peu dépendantes du type de sol en début d'évènement. Ensuite les flux de mise en mouvement augmentent avec le temps jusqu'à atteindre un palier où les valeurs deviennent fonction du type de sol. Le limon moyen sableux présente des flux élevés, supérieur à 15 $gm^{-2}mm^{-1}$

I. Zone d'étude et données

La zone d'étude correspond globalement au nord et centre de la Tunisie pour les grands barrages mais d'une manière spécifique et comme site d'expérimentation correspond au sous bassin versant de Sbaihia affluent du grand Sbayhia, qui appartient à la délégation de Zaghouan. Cette région couvre une superficie de 6450 ha et se trouve dans la zone de l'Atlas Tellien. Plus de 25 % de la superficie (soit 1645 ha) relève de la zone forestière. La végétation naturelle est composée de peuplement de Thuya, de Pin d'Alep et d'un maquis à dominance de romarin, le tiers seulement des forêts relève du régime forestier étatique, les deux tiers sont des forêts privées (370 ha) ou exploitées d'une manière collective (870 ha) (Belaid, 2015).

Le lac du sous bassin Sbaihia (figure 2) (tableau 1) est un mini-barrage réalisée dans le cadre de la composante mobilisation des eaux de ruissellement de la stratégie nationale de conservation des eaux et des sols en Tunisie et qui porte en particulier sur la construction de 1000 lacs collinaires principalement au nord semi-aride du pays. Ce lac fait partie de 26 lacs surveillés par le réseau de surveillance hydrologique de la direction de conservation des eaux et des sols (D/CES) et l'institut français de recherche et développement (IRD).

Le lac collinaire de Sbaihia est construit sur l'oued Sbaihia amont et collecte les eaux de ruissellement d'un bassin d'une superficie de 324 hectares. L'impluvium amont est constitué essentiellement de forêts de pin d'Alep et de terres de parcours (garrigue et maquis bas) pour environ 80 % de la surface totale. Les terrains agricoles occupant le reste de l'impluvium. Une végétation très dense s'est développée dans le lit de l'oued et facilite le piégeage des sédiments les plus grossiers (galets, petits blocs de roche, etc.). Les travaux de CES, principalement représentés par des banquettes mécaniques sont assez bien développés sur les terres agricoles du haut bassin amont (D/CES et IRD, 1995).

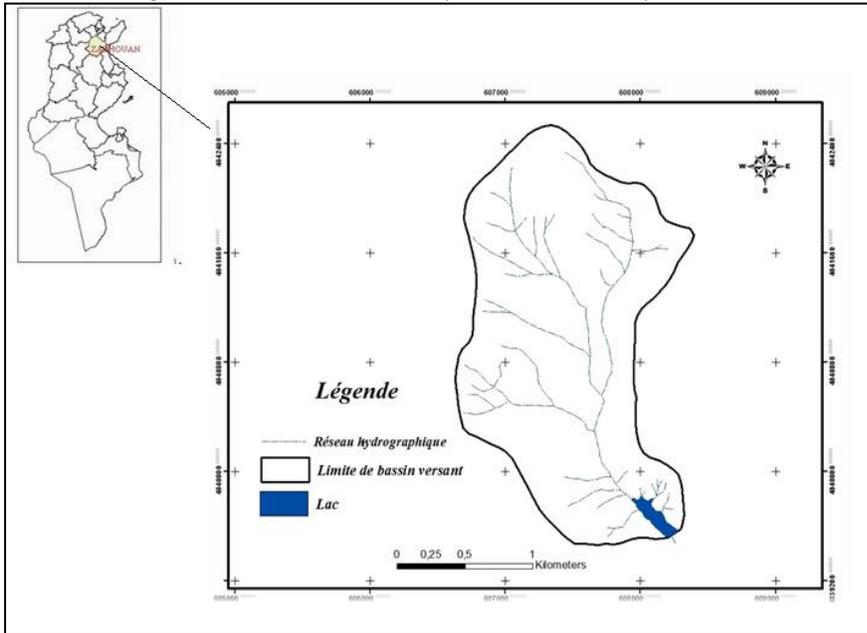


Fig. 2 Le sous bassin versant Sbaihia et son lac collinaire

Tableau I. Caractéristiques du bassin du lac

Caractéristique	Valeur
Surface A (ha)	324
Périmètre P (km)	7,37
Indice de compacité C	1,15
Longueur du rectangle équivalent (km)	2,24
Largeur du rectangle équivalent (km)	1,44
Altitude maximale (m)	473
Altitude minimale (m)	300
Indice de pente I _g (m/km)	77
Dénivelée	173
Classe de relief (Rodier)	5

Le barrage du lac est en terre. La digue présente une largeur à la base de 65 m, à la crête 4 m, une hauteur de 11 m, et une longueur de 102 m. Le lac est muni d'un déversoir latéral de forme trapézoïdale haut de 9,66 m et large de 20 m. Une conduite de 400 mm de diamètre permet la vidange du lac.

La mise en eau a débuté à la fin de l'année 1993. La retenue du lac a un volume au déversement de 135 100 m³. Le volume utile à la date du premier octobre 1996, date de la dernière campagne de mesure d'envasement sur le lac, est de 124 550 m³.

Le lac est conçu pour un but de recharge de la nappe, d'irrigation d'appoint, l'abreuvement et l'usage domestique des douars limitrophes (Boughrara, 1994).

Les mesures hydrologiques concernent essentiellement la pluviométrie, la pluviographie, l'évapotranspiration et le niveau d'eau dans le lac. Les mesures sont télétransmises à un ordinateur. Les observations ont débutés en 15 décembre 1993.

Les zones à moyenne et forte potentialité érosive dans la région représentent environ 75 % de la superficie du bassin versant (D/CES, 1987 ; D/CES et PGCP FAO, 1995). La moyenne pluviométrique est de l'ordre de 400 mm et la température moyenne est de 18 °C, indiquant un bioclimat semi-aride méditerranéen. L'intensité de l'érosion hydrique des terres s'explique par l'agressivité du climat, mais aussi en partie par l'effectif de la population et sa pression sur le milieu naturel, et aussi par leurs activités et pratiques agricoles qui aggravent en général le problème d'érosion.

2.Méthodologie

La méthodologie repose sur le calcul de l'érosivité des pluies en milieu semi-aride tunisien et de déterminer l'érosion spécifique sur la base de calcul théorique et sur la base des mesures.

L'indice d'érosivité le plus communément utilisé a été proposé par Wishmeier et Smith (1978), sur la base d'observations liant d'une part les pertes en terre par rejaillissement, érosion en nappe et en rigoles, et d'autre part le produit de l'énergie cinétique E_{cin} (ton/ha/cm) ou (MJ/ha/mm) selon le système d'unités utilisé et de l'intensité maximale des pluies de 30 minutes I₃₀ (cm/h) ou (mm/h) selon la méthode.

$$R = E \cdot I_{30} \quad (1)$$

Pour chaque averse on délimite des périodes d'intensité uniforme ou pluviophases, et pour chaque pluviophase on détermine la hauteur h_i et la durée t_i respectivement en cm et heures. Ceci nous permet de calculer l'intensité unitaire I_u.

Pour chaque intensité on calcule l'énergie cinétique spécifique de la pluviophase selon l'équation (2) :

$$E_{si} = 210 + 89 \log I_0 I_i \quad (2)$$

Avec, E_{si} = énergie cinétique spécifique de la pluviophase exprimée en tonne métrique x mètre/ha/cm de pluie.

Ensuite l'énergie cinétique de la pluviophase est le produit de l'énergie spécifique par la hauteur correspondante (3).

$$E_{pi} = E_{si} \cdot h_i \quad (3)$$

L'énergie cinétique totale de l'averse est la somme sur les n pluviophases
 $E = \sum E_{pi} \quad (4)$

L'intensité maximale en 30 min, I_{30max} exprimée en cm/h, elle est basée sur la raideur des pluviophases sur un pluviogramme. Dans le cas où la pluviophase avec la plus forte raideur à une durée supérieure à 30 min, I_{max30} est l'intensité de la pluviophase correspondante ($I_{max} = I_i$). Dans le cas où la pluviophase avec plus forte raideur est d'une durée moindre de 30 min, on complète par les pluviophases voisines pour compléter les 30 min.

Récemment dans la nouvelle formulation de L'USLE, ou Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Renard et al. (1996) recommandent pour le calcul de l'énergie spécifique d'utiliser la formule suivante (5) :

$$E_{si} = e_m = 0,29 [1 - 0,72 \exp(-0,05 i_m)] \quad (5)$$

Avec toujours e_m à les unités de MJ/ha/mm de pluie et i_m l'intensité en mm/h.

Bergsma (1978) a trouvé une relation pour les Pays bas entre l'érosivité et certains paramètres de la pluie de la forme (Eq. 6) :

$$R = \alpha \cdot P \cdot P_{1,2} \cdot P_{24,2} + b \quad (6)$$

P étant la pluie moyenne annuelle, $P_{1,2}$ pluie d'une durée 1 heure et de période de retour 2 ans ($t=1h, T=2ans$), et $P_{24,2}$ pluie de 24 heures et une période de retour 2 ans.

De même pour la Belgique, Bolin et al. (1978) ont trouvé plusieurs relations sous différentes formes en utilisant la pluie moyenne annuelle et l'indice de Fournier modifié IFM ou simplement FM.

On trouve (Eq. [s] 7, 8, 9 et 10) :

$$R = \alpha \cdot P + \beta \quad (7)$$

$$R = \alpha \cdot FM + \beta \quad (8)$$

$$R = P^{\alpha} + \beta \quad (9)$$

$$R = FM^{\alpha} + \beta \quad (10)$$

Avec P pluie moyenne annuelle et FM est l'indice de Fournier modifié α et β des coefficients.

3. Résultats et discussions

3.1. Calcul de l'érosivité

Le calcul de « R » pour toutes les averses s'est fait en utilisant la formule 5 pour le calcul de l'énergie et sur la base de temps 15' et 30'. L'érosivité moyenne dans le bassin versant est évaluée à 1270 MJ.mm/ha.h. Le minimum observé est enregistré durant l'année 94/95 avec 358 MJ.mm/ha.h et le maximum durant l'année 2000 avec un record de l'ordre de 4060 MJ.mm/ha.h.. L'écart type est assez élevé avec 1006 MJ.mm/ha.h. Des valeurs qu'on estime nettement supérieur à des valeurs du sud de l'Europe trouvées par Panagos et al. (2017).

La part des averses érosives représente 82 %. Les averses inférieures à 3 mm donnent une érosivité négligeable et les averses comprises entre 3 et 12,7 mm donnent une érosivité faible; les deux sont considérées comme non érosives. Les averses dites érosives ou supérieures à 12,7 mm sont celles qui occupent la part la plus importante, on note pour cette catégorie, 45 % pour les averses dites torrentielles ou supérieures à 30 mm.

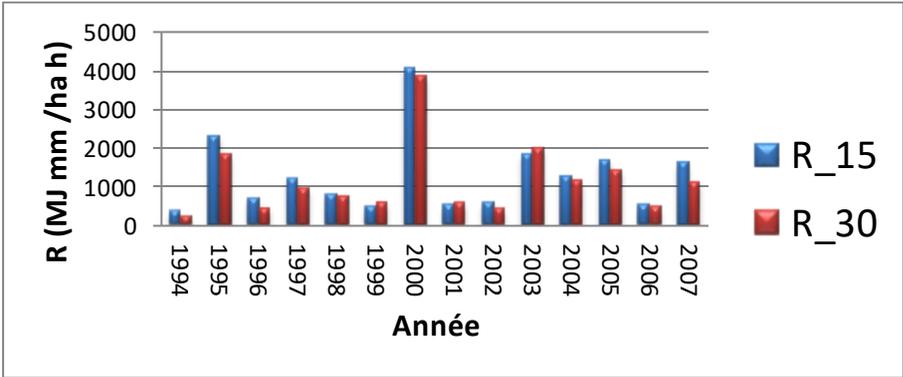


Fig. 3. Variation annuelle de l'érosivité calculée pour l'intensité maximale 15' et 30'.

La moyenne mensuelle de l'érosivité, calculé sur la base de I15max, sur toute la période de tous les mois (168 mois) est de 106 MJ.mm/ha.h, le minimum est 0 généralement pour le mois de juillet pour plusieurs années et le maximum est de 2310 MJ.mm/ha.h enregistré pour le mois d'octobre de l'année 2000. En calculant la moyenne mensuelle interannuelle (une année moyenne) on constate que le mois d'octobre est le plus érosif avec une moyenne d'environ 284 MJ.mm/ha.h et le mois de juillet est le moins érosif avec une moyenne de l'ordre de 10 MJ.mm/ha.h. La figure 4 donne la moyenne mensuelle sur toute la période d'enregistrement. Les mois de septembre et décembre sont aussi considérés comme des mois relativement érosifs, suivi des mois de janvier, Février et Mai. Une des anomalies qu'on rencontre est que le mois de Mai est plus agressif que le mois de novembre. Bien évidemment l'érosivité est faible pendant les mois d'été juin, juillet et aout, bien que l'érosivité s'annonce en fin de ce dernier. La saison la plus érosive est l'automne suivi de l'hiver, les deux ensembles avec environ 82 % du total de l'érosivité annuelle.

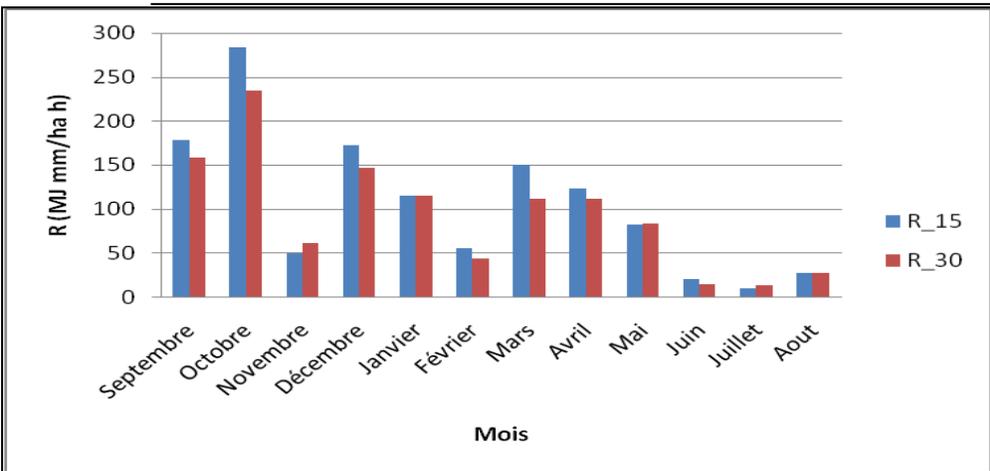


Fig. 4. Variation des moyennes mensuelles de l'indice d'érosivité calculé par R_15 et R_30 sur toute la période d'enregistrement.

3.2. Formules de prévision de l'érosivité

Les données enregistrées nous ont permis aussi d'élaborer une formule régionale d'estimation de l'érosivité à l'échelle annuelle (11) semblable à celle de Ferro et al. (1999) (12) élaborée pour la Sicile, Italie et pas loin de la zone d'étude.

$$R = 1\,042 \text{ FM}^{1,59} \quad (r=0,84) \quad (11)$$

$$R = 0,5249 \text{ FM}^{1,59} \quad (r=0,64) \quad (12)$$

R = érosivité annuelle des pluies en MJ mm/ha h et FM indice de Fournier modifié (Arnoldus, 1978). Cette formule nous permet de calculer l'érosivité sur toutes les stations non équipées du bassin versant Remel et d'établir une carte d'isoérosivité selon la méthode du krigeage (Figure 5).

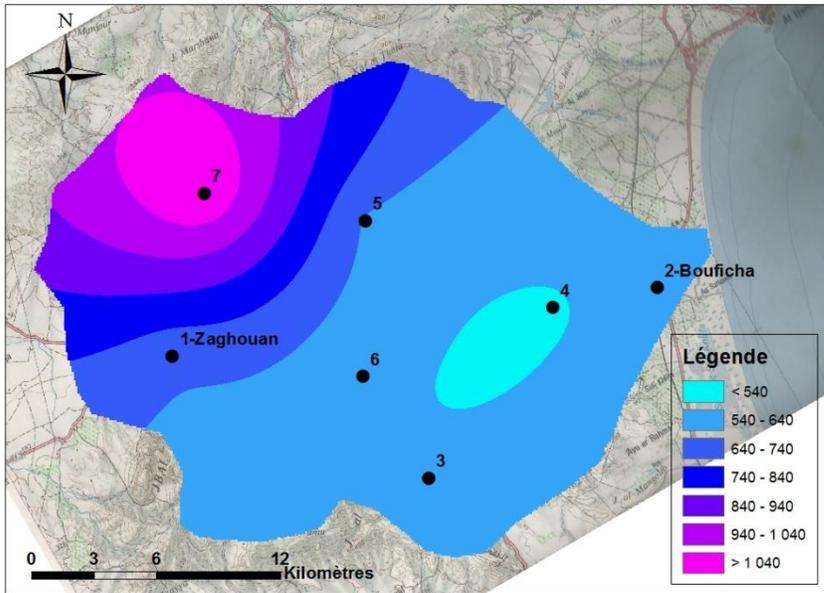


Fig. 5. Carte de l'isoérosivité R (MJ mm/ha h) au niveau du bassin versant Remel.

3.3. L'érosion spécifique calculée

L'érosion spécifique est calculée d'après le modèle RUSLE (Renard et al., 1996), elle permet de quantifier le transport solide sur tout le bassin versant et représente l'érosion totale rapportée à l'unité de surface. Elle atteint pour la région d'étude une moyenne de plus 55 tonnes/ha/an de sédiments, soit cinq fois plus la limite de tolérance des sols tunisiens. Les valeurs instantanées sont probablement plus fortes, en effet Jebari et al. (2010) reportent qu'on peut atteindre 152 tonnes/ha/an au niveau de la dorsale.

3.4. L'érosion spécifique mesurée

3.4.1. Echelle de parcelle

Les essais de simulation au laboratoire à l'échelle de la parcelle et en utilisant une érosivité moyenne sur le grand bassin versant Remel de l'ordre de 600 MJ mm/ha h et une intensité de pluie de 40 mm/h ont montrés que les pertes en sol varient entre 0,01 kg/m² à 0,49 kg/m². Les résultats trouvés sont en concordance avec les valeurs du « splash ». Les résultats de l'érodibilité expérimentale varient entre 0,001 et 0,061 unité « RUSLE ». Pour le

transport des sédiments, le modèle hydrologique WEPP semble le plus adapté (Ascough et al. 1997). La puissance du courant ou « stream power » est d'importance considérable pour expliquer ce phénomène (Figure 5). La puissance du courant ω [gs-3] dans le modèle WEPP est le meilleur paramètre de prévision de la charge solide unitaire q_s [gs-lcm-l]. L'érosion spécifique mesurée à l'échelle de parcelle varie entre 0.6 et environ 31.5 m3/ha/an pour les différents échantillons.

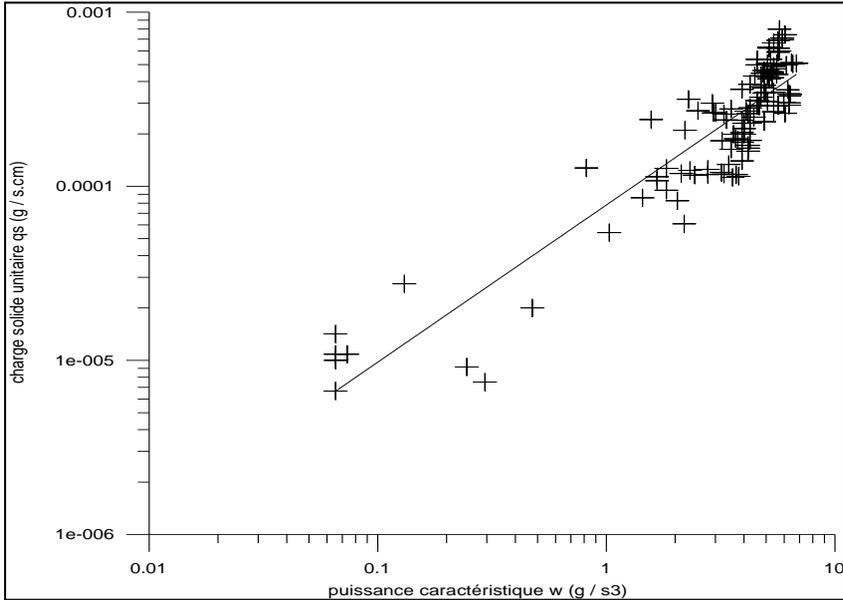


Fig. 5. Charge solide et puissance du courant dans les essais expérimentaux.

3.4.2. Echelle de bassin versant.

Les mesures de l'érosion spécifique à l'échelle des bassins des grands barrages estimées à partir des données brut de la direction générale des barrages en 2018 montrent des valeurs allant qui varient entre 0.2 et 44 m3/ha/an (Figure 6), avec une moyenne d'environ 13 m3/ha/an et un écart type de 13.2 m3/ha/an.

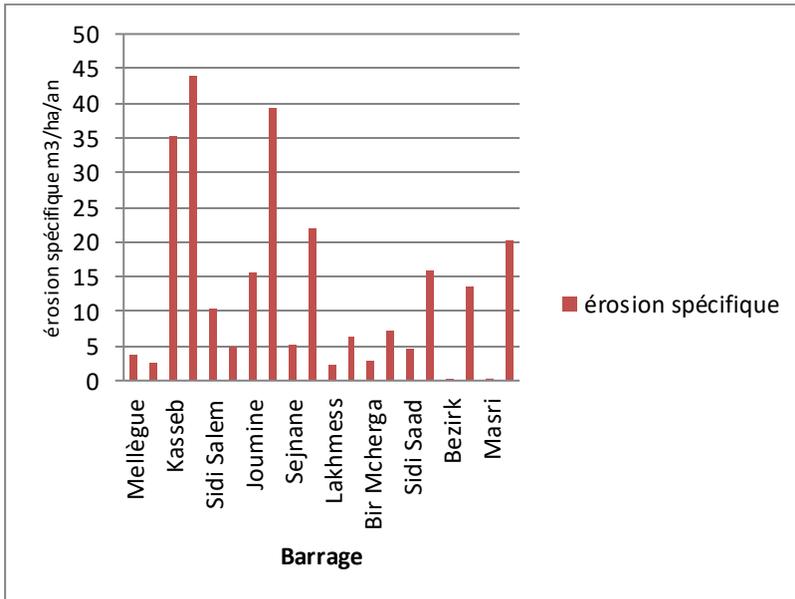


Fig.6. Erosion spécifique à l'échelle des principaux bassins des grands barrages de la Tunisie.

Conclusion

La capacité de stockage des retenues des barrages est sujette à une réduction progressive au cours du temps à cause de la forte érosion hydrique. Cette perte de capacité, parfois élevée, dépasse les études de prévision de l'alluvionnement de la retenue. Les pluies en Tunisie sont très souvent torrentielles et érosives. Les résultats de la campagne de mesure effectuée dans le bassin Sbaihia à Zaghouan montrent que l'énergie érosive est assez élevée et elle est très variable d'une année à une autre. L'érosion spécifique estimée est assez élevée ce qui menace les infrastructures hydrauliques en aval par l'envasement précoce. Les essais de simulation en utilisant une érosivité moyenne dans le bassin versant ont permis aussi de déterminer l'érodibilité expérimentales des sols. L'érosion spécifique mesurée à l'échelle de la parcelle varie entre 0.6 et 31.5 m³/ha/an alors que celle à l'échelle grand bassin varie entre 0.2 et 44 m³/ha/an de sédiments qui se déposent au niveau des barrages. Ce phénomène représente un problème environnemental majeur qui exige des mesures d'adaptation adéquates compte tenu des changements climatiques actuels. Les travaux de conservations des eaux et des sols qui existent déjà au niveau du bassin versant que ce soit au niveau de la parcelle ou au niveau des voies d'eaux doivent être renforcés et multipliés. Dans le même temps, des mesures de vulgarisation et de sensibilisation auprès de la société civile doivent être menées et encouragées.

Bibliographie

Arnoldus, H.M.J., 1978. An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. In De Boot, M. and Gabriels, D. (Eds), Assessment of soil erosion, John Wiley and Sons, Chichester, 127 - 132.

Ascough, J.C., Baffaut, C., Nearing, M.A., Liu, B.Y., 1997. The WEPP watershed model: I. Hydrology and erosion. Transactions of the American Society of Agriculture Engineers 40, 921-933.

- Belaid et Habaieb, 2017. Etude de l'érosivité des pluies et de l'érosion spécifique, répercussions sur les pertes en terres et mesures d'adaptation en milieu semi-aride Tunisien. 7^{ème} séminaire du réseaeau et climat. Comment gérer la ressource en eau dans un contexte de changement climatique global. Université Rouen Normandie France 20 21 décembre 2017.
- Belaid, 2015. Contribution à l'étude des processus de l'érosion hydrique en milieu semi-aride Tunisien. Thèse de doctorat. INAT Tunisie.
- Belaid, H. et Gaaloul, N. 2013. Etude des écarts pluviométrique et leur impact sur les apports du barrage Lebna au nord-est du Cap Bon Tunisie. Projet PHC Maghreb, Séminaire International Gestion des Ressources en Eaux et en Sol Hammamet 19– 20 novembre 2013.
- Ben Mammou A. et Louati M. H. 2007. Évolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages de Tunisie. Revue de Sciences de l'Eau. Volume 20, numéro 2, 2007.
- Benzarti, Z., 1996. La pluie facteur d'érosion. Actes du Séminaire Étude et Recherche sur l'Erosion Hydrique, Kairouan Mai 1995. Sols de Tunisie 28 [17] : 2-11.
- Bergsma, E., 1978. Provisional rainfall erosivity map of the Netherlands. In De Boot, M et Gabriels, D. (Eds), Assessment of Soil Erosion, John Wiley and Sons, Chichester, 121-126.
- Bolline, A., Laurant, A., Rosseau, P., Pauwels, J. M., Gabriels, D. et Aelterman, J., 1978. Provisional rainerosivity map of Belgium. In DeBoodt, M. et Gabriels, D. [Eds]. Assessment of Soil erosion, John Wiley and Sons, Chichester, 111-120.
- Borges, A.L.O., 1993. Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du Sud. Thèse doctorat. Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Boughrara, A. 1994. Lacs collinaires dans le gouvernorat de Zaghouan. Rapport pour le Ministère de l'Agriculture. Tunisie.
- D/CES et IRD, 1995. Note sur L'envasement de lacs collinaires en zone semi-aride tunisienne. Ministère de l'Agriculture, Tunisie.
- D/CES et PGCP FAO., 1995. Projet interrégional pour la conservation et le développement à caractère participatif des hautes terres. Bassin versant ouedSbaihia. Tunisie.
- Ferro, V., Paolo, P. and Yu, B., 1999. A comparative study of rainfall erosivity estimation for southern Italy and southeastern Australia. *Hydrological Sciences—Journal—des Sciences Hydrologiques*, 44 [1]
- Hernando, D. et Romana, M.G. 2016. Estimate of the (R)USLE rainfall erosivity factor from monthly precipitation data in mainland Spain. *Journal of Iberian Geology* 42 (1) 2016: 113-124
- Jebari S., Berndtsson, R., Bahri, A., Boufaroua, M., 2010. Spatial soil loss and reservoir siltation in semi-arid Tunisia. *Hydrological Sc. J.* 55(1): 121-137.
- Kinnell, P. I. A., 2005. Raindrop impact induced erosion processes and prediction : A review, *Hydrological processes*, 19 (14), 2815–2844.
- Mannaerts, C.M. and Maathuis, B.H.P. (2007). Towards estimating rainfall erosivity using weather satellites: Poster presented at the 5th International congress of the European Society for Soil Conservation ESSC, 25 June 2007, Palermo, Italy.
- Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire [ex MEAT]., 1992. Tunisie. Rapport national pour la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement.
- Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire [ex MEAT]., 2009. Tunisie. Rapport national pour la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement.
- Nord, G., 2006. Modélisation à base physique des processus de l'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle. Thèse doctorat. Université Joseph Fourier, Grenoble. France. 324p.

Leguédois, S., 2003, Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés, Phd thesis, Université d'Orléans.

Panagos, P., Ballabio, C., Borelli P. and Meusburger K. 2016. Spatio-temporal analysis of rainfall erosivity and erosivity density in Greece. *Catena* 137 (2016): 161-172.

Panagos, P., Ballabio, C., Meusburger, K., Spinoni J., Alewell, C. and Borelli P. 2017. Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES and WorldClim datasets. *Journal of Hydrology* 548 (2017): 251-262.

Paskoff, R. 1985. Géographie de l'Environnement. Publications de l'université de Tunis. 227p.

Remini, B. et Ben Safia, D. 2016. Envasement des barrages dans les régions arides exemples algériens. *Larhyss Journal*. n°27, Sept 2016, pp. 63-90.

Remini B., 1990. Etude hydrodynamique du mécanisme de l'envasement. Thèse de Magister .E.N.P, juin , 100 pages.

Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, and D.c.Yoder., 1996. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA - ARS Agriculture Handbook

Soutter, M., A. Mermoud, A. Musy, 2007. Ingénierie des eaux et des sols. Presses polytechniques universitaires romandes, EPFL, Lausanne, 294 p.

Wishmeir, W.H. and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537.

Les courbes Débit-Durée-Fréquence - Un outil d'aide à la décision. Application à quelques cours d'eau du Nord-est algérien.

Beloulou L., Labed M., Guetatli K., Djorfi Sd., Guechi S.

Laboratoire Ressources Naturelles et Aménagement, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie

E-mail: laroussi.beloulou@univ-annaba.dz

Résumé

Le résumé statistique (tendance centrale, dispersion, valeurs extrêmes et quantiles) et l'étude classique des apports en eau des rivières au moyen des courbes des débits classés et des débits caractéristiques) ne permettent pas d'apprécier d'une façon précise le régime d'écoulement des cours d'eau. Ce genre de présentation est souvent utilisé pour une caractérisation grossière de ce régime. Il présente l'inconvénient de ne pas préciser si l'écoulement superficiel persisterait sur une période assez longue ou bien il apparaîtrait par intermittence au cours de l'année ou la période d'observations. Ceci requiert le recours à d'autres formes de présentation qui tiennent compte, non seulement, des débits moyens observés pendant un nombre de jours consécutifs, choisi a priori, mais aussi de leur fréquence exprimée le plus souvent en terme de période de récurrence. A l'image des courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) élaborées pour les précipitations, les auteurs tentent dans cette communication d'établir les courbes QdF pour quelques cours d'eau des bassins du Nord-est algérien. Ces courbes synthétisent les relations statistiques existant entre les apports moyens en eau (Q), la durée (d) et la fréquence (F) en hautes et basses eaux. Elles peuvent être utilisées dans de nombreuses applications dans le génie de l'eau, notamment en assainissement et dans les études de faisabilité des barrages et des retenues collinaires.

Mots-clés : écoulement superficiel, analyse fréquentielle, Courbes QdF, Nord-est algérien

Flow-Duration-Frequency Curves - A decision support tool. Application to some North-eastern Algeria streams.

Abstract

The statistical summary (central tendency, dispersion, extreme values and percentiles) and the classical study of river flow using ordered flow rate curves and characteristic discharges do not allow a precise assessment of the flow regime of streams. This kind of presentation is often used for a rough characterization of this regime. It does not specify whether the river flow persists over a long period or it appears intermittently during the year or the period of observations. This requires the use of other forms of presentation that take into account, not only the mean flow rates observed for a number of consecutive days, selected a priori, but also their frequency that is frequently expressed in terms of return period. Like the IDF (Intensity-Duration-Frequency) curves developed for precipitation, the authors attempt in this project to establish Discharge-Duration-Frequency (QdF) curves for some streams in the North-eastern Algeria watersheds. These curves summarize the statistical relationships between the river average water discharge (Q), the duration (d) and the frequency (F) during high and low water periods. They can also be used in many applications in water engineering, including water sanitation and feasibility studies of dams.

Keywords: surface runoff, frequency analysis, QdF curves, North-eastern Algeria

1. Introduction

Le résumé statistique (moyenne annuelle, écart type, valeurs extrêmes et quantiles) et l'analyse classique des débits des cours d'eau (courbe des débits classés et débits caractéristiques) ne donnent pas une idée précise sur le régime d'écoulement superficiel. Toutes ces formes de

présentation, utilisées pour une caractérisation grossière du régime d'écoulement, présentent l'inconvénient de ne pas préciser si l'écoulement superficiel persiste sur une période assez longue ou bien il apparaît par intermittence au cours de la période d'observations. Ceci requiert le recours à d'autres formes de présentation qui tiennent compte, non seulement, des apports moyens en eau pendant un nombre de jours consécutifs, choisis a priori, mais aussi de leur fréquence (ou probabilité d'apparition exprimée le plus souvent en terme de période de récurrence). Cette note a pour objet l'élaboration des courbes *Débit-durée-Fréquence (QdF)* pour quelques cours d'eau du Nord-est algérien en usant des données disponibles sur les débits journaliers et des techniques de l'analyse fréquentielle. Ces courbes peuvent être utilisées pour la prévision des apports en eau des oueds étudiés ainsi que pour l'extrapolation, par le rapport de superficies ou tout autre méthode de transposition de l'information, des résultats obtenus aux bassins avoisinant ou à ceux d'ordres inférieurs en admettant vaguement que la superficie serait, dans ce cas particulier, un facteur déterminant (Ketrouci et Meddi, 2015). La confrontation des prévisions sur les besoins en eau futurs aux apports probables exprimés par de tels diagrammes aide à la prise de la décision quant aux choix des aménagements hydrauliques appropriés.

2. Matériel et méthode

2.1. Zone d'étude

Faisant partie du nord-est de l'Algérie la zone d'étude est grossièrement située entre les latitudes 35° à 37° N et les longitudes 5°30' à 8°30' E (Fig. 1). Elle s'étale de la wilaya de Jijel jusqu'à la frontière tunisienne. Elle est bordée au Nord par la mer Méditerranée, au Sud par le bassin des hauts plateaux constantinois, à l'Est par la frontière algéro-tunisienne et à l'ouest par le bassin versant de la Soummam. Cette région englobe quatre grands bassins hydrographiques: le Kébir-Rhumel (8111 km²), la Seybouse (6471 km²), les Côtiers Constantinois (11509 km²) et la Medjerda-Mellegue (7841 km²).

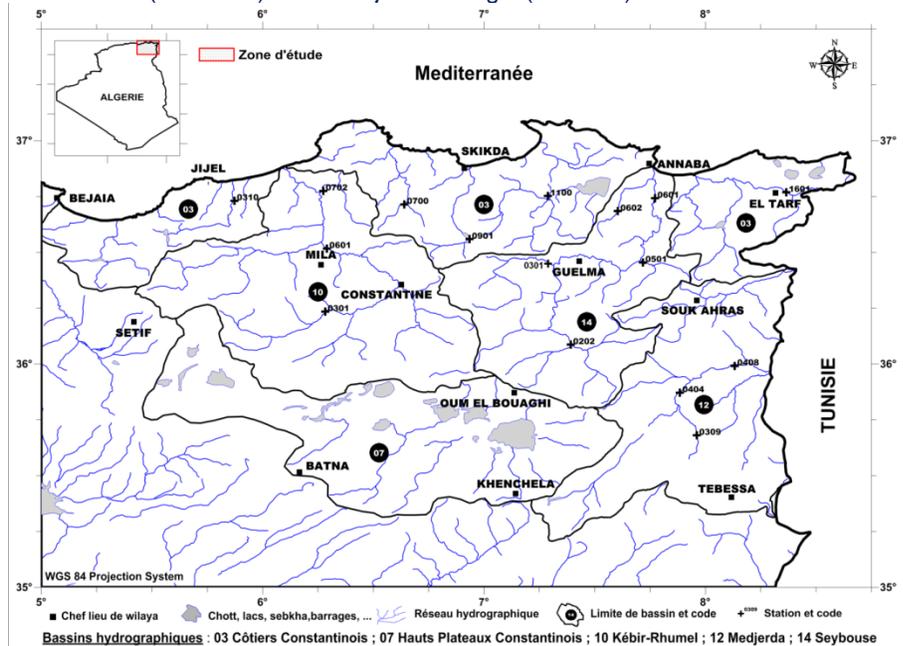


Fig. 1. Situation de la zone d'étude et bassins hydrographiques

Ce vaste domaine est marqué par ses disparités climatiques et géomorphologiques qui font que les cours d'eau, alimentés le plus souvent par les pluies, se démarquent par des apports

très variables dans le temps et dans l'espace. Selon Mebarki (1999), l'apport annuel moyen à l'exutoire des bassins est estimé à 3250 Hm³ (103 m³/s) pour les côtiers constantinois, à 910 Hm³ (29 m³/s) pour Kébir-Rhumel et à 450 Hm³ (14 m³/s) pour la Seybouse. L'oued Medjerda et son affluent Mellegue, dont la source est située en Algérie et dont les lits sont principalement sur le territoire tunisien, se caractérisent par des écoulements permanents sur l'ensemble de leurs cours; les apports moyens annuels sont, à titre indicatif, de l'ordre de 40 Hm³ pour la Medjerda à Souk Ahras (série : 1968-1984) et 90 Hm³ pour le Mellegue à Ouenza (série : 1970-1992).

Les bassins versants du Nord-est de l'Algérie sont dotés d'un réseau hydrométrique assez irrégulier comportant 29 stations équipées de limnigraphes. Les données débitométriques de base requises pour mener à terme les objectifs de cette étude sont collectées auprès du Service Hydrologique de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (antennes d'Annaba, Constantine, Tébessa et Jijel). Pour chaque station, les données sont organisées sous forme de fichiers opérationnels où on trouve les valeurs mesurées des débits moyens journaliers pour chaque mois de l'année et ceci sur de longues périodes d'enregistrement (plusieurs années).

Compte tenu de la disponibilité de l'information recherchée dans ces divers fichiers et des objectifs, l'étude porte sur les données de 4 stations hydrométriques contrôlant 4 différents oueds appartenant chacun à un bassin hydrographique différent et drainant le maximum de superficie (Tableau I).

Tableau I. Coordonnées des stations hydrométriques retenues

Oued	Station	Cod e	Bassin hydrographique	Surfa ce (Km ²)	Latit ude (°N)	Longit ude (°E)	Série
Kébir-Ouest	Ain Charchar	031100	Côtiers Constantinois	1130	36.75205	7.28814	1952/53-1996/97
Rhumel	Grarem	100601	Kébir-Rhumel	5320	36.51694	6.29024	1972/73-2001/02
Mellegue	Ouenza	120408	Medjerda-Mellegue	4575	35.99112	8.13267	1970/71-2003/04
Seybouse	Mirbeck	140601	Seybouse	3055	36.74221	7.77198	1968/69-1991/92

2.2. Choix des variables et construction de la base des données

Pour un poste hydrométrique donné, l'élaboration des courbes Débit-durée-Fréquence (ou courbes *QdF*) est basée sur les enregistrements continus des débits journaliers sur une période assez longue. Pour chaque année hydrologique (Septembre de l'année *i* - Août de l'année *i+1*), la procédure consiste à évaluer l'apport en eau moyen *Q*, exprimé le plus souvent en volume, transitant par la station de contrôle au cours d'une durée de *d* jours consécutifs définie a priori. Il s'agit de présenter les 365 données journalières observées dans une seule colonne dont la première et la dernière valeur correspondent respectivement à celles du 1^{er} Septembre de l'année *i* et du 31 Août de l'année *i+1*. A l'aide d'une moyenne glissante au pas d'un jour, on calcule le débit moyen et, par la suite, le volume d'eau moyen correspondant à une durée de 7, 10, 15, 30, 90 et 365 jours consécutifs. Pour caractériser le régime d'écoulement dans les situations extrêmes, seules les valeurs minimale et maximale sont retenues pour apprécier la disponibilité des quantités d'eau en basses et hautes eaux, respectivement.

La même procédure est répétée pour toutes les années-stations considérées. Ainsi, une matrice de *L* lignes (débit extrême) et *C* colonnes (durée de référence) est obtenue pour chaque station hydrométrique aussi bien pour les hautes que les basses eaux. Toutefois, il est bon de signaler que les données relatives aux basses eaux sont trop incomplètes et

irrégulières pour s'apprêter à une analyse fréquentielle et sont donc omises. Par conséquent, seules les chroniques relatives aux hautes eaux sont prises en considération et constituent les données de base pour la construction des courbes QdF des cours d'eau retenus. Enfin, il faut signaler que la base de données ainsi construite contient des stations qui présentent des lacunes au niveau des observations. Ces dernières ont été reconstituées, selon le cas, par les méthodes de la moyenne arithmétique et de régression linéaire sur les doubles cumuls.

2.3. Analyse fréquentielle

Un des outils de base de l'analyse de l'occurrence d'événements extrêmes est l'analyse fréquentielle (AF). Cette méthode statistique a comme objectif principal d'utiliser des mesures d'événements passés pour estimer les probabilités futures d'occurrence. L'analyse fréquentielle est utilisée, en particulier, pour estimer l'ampleur de l'événement temporel $x(T)$ auquel est associée une période de retour T (appelé également quantile de période de retour T ou de probabilité $P = 1/T$). L'estimation de $x(T)$ de la valeur du quantile s'obtient en ajustant une loi de probabilité $F(x; m)$ à un échantillon de N observations $x = \{x_1, \dots, x_N\}$ où m représente le vecteur de paramètres associé à la distribution de probabilité F. Les étapes principales de l'analyse fréquentielle sont (St-Hilaire, 2005):

- la vérification des hypothèses d'homogénéité (les données proviennent d'un échantillon homogène, donc pas de différence significative dans la moyenne des sous-échantillons), d'indépendance (pas d'auto-corrélation dans les séries) et de représentativité (absence de données atypiques).

- l'ajustement d'une distribution statistique à l'échantillon

- l'estimation des quantiles à l'aide du modèle théorique fourni par la loi statistique ajustée.

Dans la présente étude, ces étapes méthodologiques ont été accomplies à l'aide de logiciels (Statgraphics Centurion et Easyfit softwares) et des applications Excel.

Au vu des résultats de la statistique descriptive, il ressort que les valeurs du coefficient d'asymétrie indiquent que, dans la plupart des cas, la distribution des apports en eaux des différents oueds présentent une dissymétrie positive ($C_s > 0$) aussi bien en hautes qu'en basses eaux (tableau 2).

Tableau 2. Résumé statistique des apports en hautes eaux de (débit en Hm³)

Statistique	Q 1j	Q 7j	Q 10j	Q 15j	Q 30j	Q 90j	Q annuel
Oued Kébir-Ouest à Ain Charchar (031100)							
N	36	36	36	36	36	36	36
\bar{Q}	21.638	59.936	66.524	75.171	103.375	160.594	194.873
Cv	0.683	0.819	0.838	0.839	0.860	0.839	0.859
Cs	0.521	1.248	1.129	1.228	1.318	1.226	1.101
Oued Rhumel à Grarem (100601)							
N	25	26	26	26	26	26	25
\bar{Q}	8.944	25.999	30.801	37.085	48.644	87.062	136.550
Cv	0.730	0.777	0.787	0.777	0.727	0.655	0.463
Cs	1.046	1.218	1.305	1.184	1.032	1.127	1.070
Oued Mellegue à Ouenza (120408)							
N	32	33	33	33	33	33	33
\bar{Q}	14.901	29.989	33.251	37.240	43.968	57.114	88.489

Cv	0.535	0.749	0.758	0.789	0.824	0.733	0.682
Cs	0.989	2.280	2.361	2.472	2.724	2.267	1.846
Oued Seybouse à Mirbeck (140601)							
N	23	23	23	23	23	23	23
\bar{Q}	31.377	81.256	92.841	108.064	141.602	243.004	345.946
Cv	1.001	1.078	1.028	0.988	0.927	0.943	0.814
Cs	1.298	1.903	1.755	1.632	1.396	1.387	0.933

Cette propriété est vérifiée par la forme, plus ou moins étalée vers la droite, des diagrammes exploratoires (histogrammes des fréquences, box-plots et diagrammes en arborescence). De plus, les coefficients de variations (C_v) moyennement à fortement élevés suggèrent le recours aux lois à queues pour l'analyse fréquentielle de ce type d'événements.

Plusieurs modèles probabilistes ont été développés pour décrire la distribution des variables hydrologiques. Cependant, le choix d'un modèle approprié constitue l'un des principaux défis dans l'ingénierie de l'eau car il n'y a pas d'accord universel quant à la distribution qui devrait être utilisée pour l'analyse de fréquence des débits extrêmes. Dans ce travail neuf lois de distribution des probabilités appliquées en hydrologie sont évaluées afin de trouver le meilleur ajustement: log normale à 2 et 3 paramètres, Gumbel max (type 1), Valeurs Extrêmes Généralisées, Log-Pearson 3, Gamma à 2 et 3 paramètres et Fréchet à 2 et 3 paramètres. Les fonctions de densité $f(x)$ et de répartition $F(x_0)$ des différentes lois utilisées peuvent être consultées dans le tutoriel de *Mathwave data analysis and simulation* (2018). Les paramètres des différentes densités des probabilités sont déterminés par la méthode des moments implémentée dans le logiciel *EASYFIT* de la *Compagnie Mathwave technologie*.

3. Résultats-Construction des courbes QdF

Etayée par les résultats des différents tests d'adéquation des modèles probabilistes ajustés (tests d'hypothèse et méthodes par comptage et de classement), la loi des valeurs extrêmes généralisées est la mieux classée pour modéliser la distribution des fréquences des apports en hautes eaux des cours d'eau du Nord-est algérien (somme des scores la plus faible). Ainsi, les résultats du calcul des quantiles $Q_d(T)$ correspondant à des périodes de récurrence de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans pour chaque durée de référence sont les suivants (tableau 3).

Tableau 3. Apports en hautes eaux de différentes durées et fréquences (Hm^3)

T (années)	Q_{1j}	Q_{7j}	Q_{10j}	Q_{15j}	Q_{30j}	Q_{90j}	Q annuel
Oued Kébir Ouest à Ain Charchar (Code: 031101)							
2	13,50	33,01	36,94	43,62	53,13	98,44	118,06
5	23,00	62,12	71,07	83,71	103,25	188,52	231,44
10	28,94	83,02	96,15	113,55	141,59	256,50	317,34
20	34,38	104,39	122,25	144,93	182,76	328,77	408,92
50	41,06	134,10	159,30	189,97	243,31	433,78	542,44
100	45,82	157,98	189,70	227,33	294,73	521,93	654,90

Oued Rhumel à Grarem (Code: 100601)							
2	7,29	20,03	23,58	28,78	38,80	71,67	122,47
5	13,08	36,84	43,68	53,19	69,37	120,90	178,55
10	17,49	50,80	60,47	73,13	93,77	159,74	219,31
20	22,21	66,82	79,79	95,67	120,88	202,50	261,38
50	29,12	92,19	110,53	130,80	162,29	267,12	320,52
100	34,97	115,34	138,71	162,37	198,79	323,51	368,57
Oued Mellegue à Ouenza (Code : 120401)							
2	13,69	23,73	26,57	29,40	34,28	47,39	75,35
5	20,77	40,01	45,36	51,24	60,62	80,88	127,97
10	25,35	54,00	60,98	69,47	82,83	106,56	164,85
20	29,67	70,48	78,89	90,45	108,60	134,20	200,80
50	35,15	97,37	107,27	123,81	149,96	174,91	247,61
100	39,18	122,63	133,17	154,38	188,19	209,56	282,69
Oued Seybouse à Mirbeck (Code: 140601)							
2	22,06	53,46	62,85	74,99	102,54	172,22	272,62
5	48,17	118,61	136,32	159,10	210,90	356,39	523,65
10	69,92	177,15	201,09	232,06	301,51	514,61	716,53
20	94,89	248,56	278,92	318,63	405,94	700,90	924,46
50	134,52	369,89	408,91	461,14	572,25	1004,90	1231,40
100	170,74	488,40	533,81	596,17	724,87	1290,50	1493,10

A titre d'exemple, lesapports en eau décennal et vicennal du Kébir-Ouest à Ain Charchar, prévus pendant 30 jours consécutifs, seraient respectivement de l'ordre de 140 et 180 Hm³ pendant les hautes eaux. Ils seraient de l'ordre de 80 et 110 Hm³ à la station de Ouenza(Oued Mellegue) avec une précision relative de 20 à 30 %.

Enfin, afin de rendre beaucoup plus expressives et plus pratiques les résultats du tableau 3, on a tracé les courbes QdF . Ces dernières sont construites en portant en abscisses les périodes de récurrences (en années) et en ordonnées les apports en eau au cours de chaque durée de références définie a priori. On obtient une sorte d'abaque synthétisant les relations statistiques existant entre les apports moyens en eau (Q), la durée (d) et la fréquence (F) en hautes et basses eaux pour chaque cours d'eau étudié (Fig. 2 à 5).



Fig. 2. Courbes QdF de l'oued Kébir-Ouest à Ain Charchar

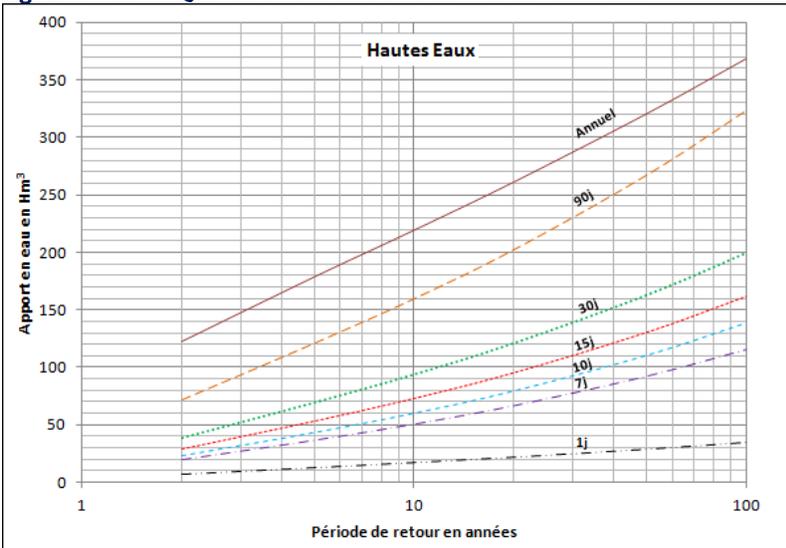


Fig. 3. Courbes QdF de l'oued Rhumel à Grarem

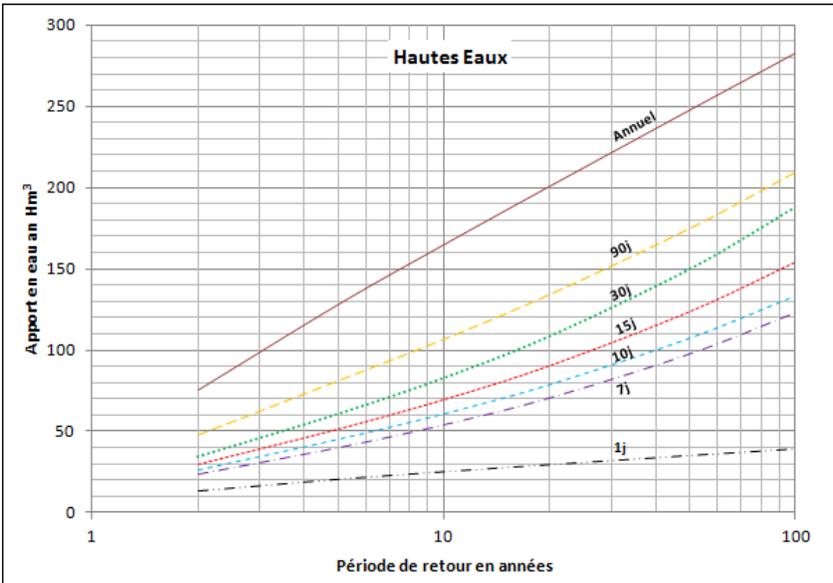


Fig. 4. Courbes QdF de l'oued Mellegue à Ouenza

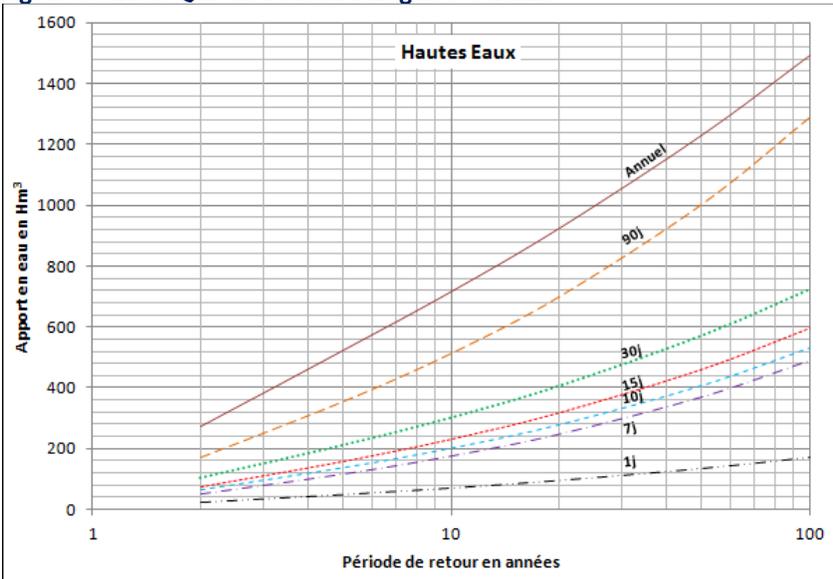


Fig. 5. Courbes QdF de l'oued Seybouse à Mirbeck

4. Conclusion

La gestion durable des ressources en eaux de surface dans les bassins versants de l'extrême Nord-est de l'Algérie, un vaste domaine marqué par ses disparités climatiques et géomorphologiques, repose sur la connaissance des apports en eau probable des oueds et leur variabilité dans l'espace et dans le temps. Les courbes QdF, délicates à réaliser pour les basses eaux, ne sont pas une fin en soi, mais sont construites pour apporter des éléments de réponse aux questions liées à la protection contre les inondations et au stockage des eaux superficielles. Il s'agit d'un outil d'aide à la décision destiné aux pouvoirs publics chargés

des projets hydrotechniques. Ces courbes, synthétisant l'information débimétrique au droit d'une station, peuvent être extrapolées pour estimer, avec une précision satisfaisante, les quantités d'eau probables (**Q**) transitant par la station de contrôle au cours d'une durée quelconque (**d**) et une période de récurrence donnée (**T**). Indispensables dans les domaines de l'assainissement urbain, industriel et agricole (débits minima requis pour la dilution des polluants), du génie civil (conception des ponts et pont-canaux) et de l'hydraulique notamment dans les études de faisabilité des barrages et des retenues collinaires.

5. Liste des références

Hingray B., Picouet C. & Musy A. (2009)-Hydrologie 2: Une science pour l'ingénieur, Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 602 pages

Javelle P., Galea G. et Grésillon J.M. (2000)- L'approche débit-durée-fréquence : historique et avancées. *Revue des sciences de l'eau*, Vol 13, N°3, pp. 305-323.

Ketrouci K., Meddi M. (2015)- Application des modèles Débit-durée-Fréquence QdF pour l'estimation des crues rares en Algérie : Cas du bassin versant de la Tafna. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, 2015, n° 37, 45–54.

Mathwave data analysis and simulation (2018)- Distribution Fitting Tutorials.

http://www.mathwave.com/articles/distribution_fitting.html (consulté le 15.05.2018).

Mebarki A. (1999)- Les bassins exoréiques de l'Est algérien et leurs apports d'étiage à la mer Méditerranée : écoulements, rejets et protection des eaux du littoral. Actes des Journées d'étude: *Protection des eaux du littoral de l'Est algérien*, Constantine, A.B.H.-C.S.M, pp. 24-41.

Oancéa V., Galea G et Oberlin G. (1992)- L'utilisation des modèles QdF dans les synthèses régionales de l'écoulement maximal, VIIIèmes journées hydrologiques – ORSTOM, pp.433-451.

St-Hilaire A. 2005. Analyse fréquentielle des précipitations des stations de Montréal et Shawinigan. Rapport de recherche R832 de l'INRS-ETE, 23 p.

Autres sources de documentation

A.B.H.-C.S.M., 1999-2004. *Les Cahiers de l'Agence*, Agence des Bassins Hydrographiques Constantinois-Seybouse-Mellegue, Constantine.

ANRH., *Annuaire hydrologiques de l'Algérie*, Bir Mourad Rais, Ministère des ressources hydrauliques, Alger.

Dynamique et cartographie des formations à Tamaricacées dans l'Ouest algérien

M. Benabadi Noury et Mme Belkhodja Nessrine

Professeur, Faculté SNV/STU, Université de Tlemcen BP 119 (Tlemcen 13000 Algérie),

E-mail : benabadi.n@gmail.com

Doctorante, Faculté SNV/STU, Université de Tlemcen BP 119, (Tlemcen 1300 Algérie),

E-mail : nesrine.benladj@yahoo.fr

Résumé

Les structures de végétation sur le pourtour méditerranéen représentent à l'heure actuelle, la résultante à la fois des modifications climatiques et des facteurs écologiques locaux actuels. Cette étude est portée sur les groupements à Tamaricacées dans l'Algérie occidentale. Il s'agit d'une étude phytodynamique.

La comparaison des différentes cartes physionomiques nous montre un certains déséquilibre de la végétation qui est due probablement à l'absence de crues. En effet, les éléments strictement méditerranéens représentent une part très importante de la flore de la région de Tlemcen. Les autres éléments sont peu et/ou très peu représentés avec une certaine richesse de la région en thérophytes.

L'étude diachronique réalisée (2004 et 2013) nous a informés sur les facteurs responsables des formations végétales à Tamaricacées.

Mots clés : Végétation à Tamaricacées, Diachronie, Cartographie, Biodiversité, Nord-Ouest algérien.

Dynamic and mapping of Tamaricea Vegetation in North-Western Algeria

Abstract

The structures of the vegetation on the Mediterranean periphery, at the present time, represent the resultant of simultaneous climatic changes and current local ecological factors. The present study concerns the Tamaricea groups in Western Algeria. It is a time-dependent study.

Comparison of the different physiognomy maps reveals some disequilibrium of the vegetation, probably caused by lack of floods.

Indeed, the components strictly Mediterranean represent a very large portion of the flora around the area of Tlemcen. The other components are barely and/or little represented, with some abundance in the therophytes across the area.

The diachronic survey (2004 and 2013) informed us the factors governing Tamaricacées vegetation.

Key words: Tamaricea Vegetation, Time-dependence, Mapping, Biodiversity — North-Western Algeria

I. INTRODUCTION

Les Tamaricacées possèdent un grand intérêt en tant que plantes conservatrices des sols arides et semi-aride contre les différents phénomènes physiques d'érosion Ghezlaoui, 2011 [1]. Le *Tamarix* représente l'espèce à caractère typique des plantes thermo xérophytes. Selon Ozenda 1991 [2] les *Tamarix* sont des arbres ou arbustes pouvant atteindre parfois ou dépasser les 3 mètres. Ils sont fréquents dans les terrains salés. l'étude du genre *Tamarix* est extrêmement difficile. Selon l'auteur cité plus haut, la famille des Tamaricacées est une famille des plantes de l'ordre des Eudicots qui comprennent le genre Tamarix, ce genre est le plus grand et le plus diversifié de la famille des Tamaricacées originaires d'Asie, d'Afrique et d'Europe.

La dynamique de la végétation ne cesse d'attirer l'attention ces dernières années de plusieurs chercheurs : On signale quelques travaux notamment ceux de Bouazza et al. 2004 [3], Benabadji et al. 2009 [4], Regagba et al. 2012 [5].

La réalisation d'une étude diachronique traduit-elle une évolution séquentielle des unités physionomiques perturbées le long des rives de l'oued Tafna? Cette approche permet-elle de cerner une dimension spatio-temporelle très précise sur les peuplements halophytes ? Permet-elle d'observer au cours du temps sur des milieux permanents les modifications de la flore installée ?

Afin d'essayer de répondre à ces différentes questions une étude diachronique semble s'imposer, elle est menée entre deux périodes distinctes (années **2004** et **2013**). Il convient toutefois de signaler que peu ou très peu de travaux ont été effectués sur la dynamique de la végétation des rives des oueds en général et de l'oued Tafna n'a été effectué. Ce travail développe successivement:

- ✓ Méthodologie comprenant le cadre biogéographique et la méthode cartographique,
- ✓ Résultats et interprétations,
- ✓ Conclusion,
- ✓ Références bibliographiques.

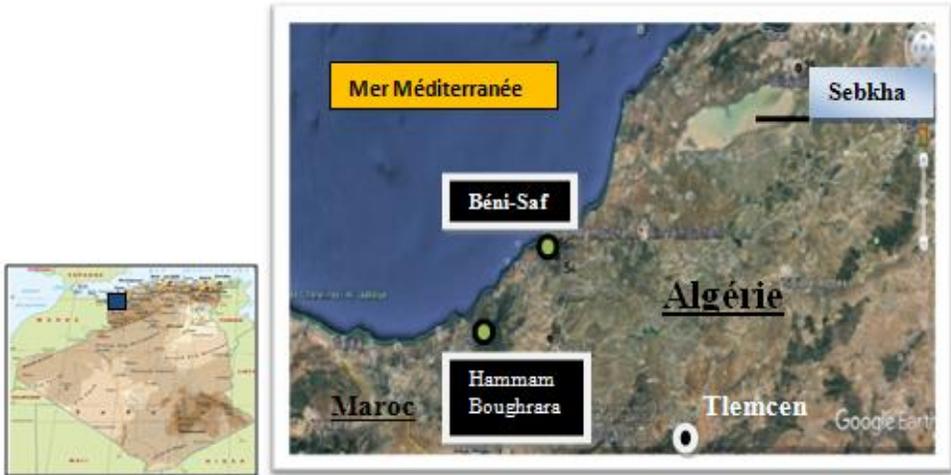
2. METHODOLOGIE

2.1. Cadre biogéographique de la région (carte)

Notre région d'étude (carte) est localisée dans la partie occidentale du Nord-Ouest algérien. Le milieu où s'insère notre zone d'étude s'étend sur une partie de l'Oued Tafna et qui correspond aux stations situées de part et d'autre de l'Oued sur des versants assez pentus (entre 15 et 25%). Celles-ci ont été choisies selon un échantillonnage stratifié puis cartographiées, il s'agit de :

- Hammam Boughrara : d'une surface égale à 168719 Hectares, positionnée sur une longitude ouest : 1°38' et 34°55' de latitude nord,
- Béni-Saf: d'une surface égale à 251677 Hectares, positionnée sur une longitude ouest : 1°26' et 35°16' de latitude nord.

Ces deux stations se trouvent dans des étages bioclimatiques (au sens d'Emberger) semi-arides supérieurs à variantes hivernales tempérée et chaude Belkhadja, 2014 [6].



● Station

Carte : Situation géographique

2.2. Méthode cartographique et de relevés de la végétation

Sur le terrain et après avoir repris ces unités physionomiques sur les cartes, le travail informatique était de taille et a consisté à modifier les anciennes surfaces par les nouvelles observées. Pour cela, le choix des couleurs utilisés par Bemoussat a été respecté et les nouvelles surfaces sont représentées par des trames différents pour une meilleure distinction des modifications.

Chaque peuplement dominant se trouve dans une situation de dégradation ou dans un état physionomique appréciable, cela nous a amené à reprendre une échelle de variabilité allant du chiffre 1 au chiffre 3.

- 1 : bon état.
- 2 : moyennement dégradé
- 3 : très dégradé.

Pour suivre le dynamisme de la végétation dans la zone étudiée, nous avons pris en considération la méthode de Dutoit 1996 [7] directe et expérimentale: il s'agit de l'étude d'un site à un état initial au temps appelé « To ». Sur ce même site on étudie les modifications de la composition floristique qui peuvent survenir. Nous nous sommes rendus sur le terrain et une fois sur le site en question et à l'intérieur de chaque fenêtre ou station, nous avons rapporté les unités physionomiques.

Par comparaison à un temps $T_0 + n$, on étudie les modifications qui se sont produites, celles-ci peuvent être liées par exemple aux conditions climatiques ou aux actions humaines diverses (labours, surpâturage).

3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Tableau : Signification des cofications

Unités physiologiques	Codes
Peuplement à <i>Tamarix gallica</i> dense	Ta1
Peuplement à <i>Tamarix gallica</i> moyennement dense	Ta2
Peuplement à <i>Tamarix gallica</i> dégradé	Ta3
Peuplement à <i>Atriplex halimus</i> dense	At1
Peuplement à <i>Atriplex halimus</i> moyennement dense	At2
Peuplement à <i>Atriplex halimus</i> dégradé	At3
Peuplement à <i>Atriplex halimus</i> dense + <i>Pistacia lentiscus</i>	At1+Pi
Peuplement à <i>Atriplex halimus</i> dense + <i>Asparagus acutifolius</i>	At1+As
Peuplement à <i>Atriplex halimus</i> dense + <i>Frankenia corymbosa</i> + <i>Salsola vermiculata</i>	At1+Fr+Sa
Peuplement à <i>Atriplex halimus</i> dense + <i>Asparagus acutifolius</i> + <i>Pistacia lentiscus</i>	At1+As+Pi
Peuplement à <i>Atriplex halimus</i> moyennement dense + <i>Withania frutescens</i>	At2+Wfi
Peuplement à <i>Atriplex halimus</i> moyennement dense + <i>Pistacia lentiscus</i>	At2+Pi
Peuplement à <i>Atriplex halimus</i> moyennement dense + <i>Asparagus acutifolius</i> + <i>Pistacia lentiscus</i>	At2+As+Pi
Peuplement à <i>Atriplex halimus</i> moyennement dense + <i>Tamarix gallica</i> moyennement dense + <i>Asparagus acutifolius</i>	At2+Ta2+As
Peuplement à <i>Atriplex halimus</i> moyennement dense + <i>Frankenia corymbosa</i> + <i>Salsola vermiculata</i> + <i>Tamarix gallica</i> dense + <i>Phragmite communis</i>	At2+Fr+Sa Ta1+Ph
Peuplement à <i>Atriplex halimus</i> moyennement dense + <i>Atriplex halimus</i> dense	At2+At1
Peuplement à <i>Tamarix gallica</i> moyennement dense + <i>Pistacia lentiscus</i>	Ta2+ Pi
Peuplement à <i>Tamarix gallica</i> moyennement dense + <i>Acacia albida</i>	Ta2+Ac
Peuplement à <i>Tamarix gallica</i> dégradé + <i>Atriplex halimus</i> moyennement dense	Ta3+At2

3.1. Station de Béni-Saf (Fig. 1 et 2)

En analysant et en comparant les résultats obtenus pour la station de Béni-Saf durant la période (2004-2013), on remarque que : les cultures irriguées dominent la surface avec un taux de 42.95% en 2004 et 41.15 en 2013, soit une augmentation de 1.80 %. Le *Tamarix gallica* sous la forme dense est passé de 21.05% et 19.9% c'est-à-dire une baisse de presque 1%. Quant à l'*Atriplex halimus*, il s'est maintenu à un niveau stable sous sa forme moyennement dense à dégradé mais toujours avec des valeurs très faibles alors que la forme dense semble accuser une augmentation passant de 2.8% à 3.84%. Les pelouses accusent une sensible augmentation elles sont passées de 3.5% à 4.53%, alors que les formations en mosaïques montrent soit une élévation relativement faible soit une tendance vers une stabilité, c'est ainsi que l'on constate:

- Une diminution de l'*Atriplex halimus* moyennement dense + *Ziziphus lotus* avec un pourcentage de 11.37% pour l'année 2004 et 9.92% pour 2013.
- La formation mélangé du *Tamarix gallica* moyennement dense et de l'*Atriplex halimus* dense se maintient à des niveaux relativement constants avec des taux de 7.38% (en 2004) et 7.02% (en 2013).

- Pour le reste des formations, le pourcentage de surfaces occupées demeure faible et ne semble montrer aucune modification (de 2.02% à 0.36%) pendant la période allant de 2004 à 2013.

L'étude diachronique permet de constater l'apparition de nouvelles espèces durant l'année 2013 occupant de faibles surfaces telles que *Nerium oleander* (0.71%), *Juncus maritimus* (0.35%), *Phragmites communis* (1.81%) et *Acacia albida* (0.35%).

3.2. Station de Hammam Boughrara (Fig. 3 et 4)

Au niveau de la fenêtre appartenant à Hammam Boughrara et durant la période (2004-2013) on a les résultats suivants :

- Les cultures irriguées occupent la première position, ce sont les plus représentatives avec un pourcentage de 50.48% (2004) et 42.81% (2013), le *Tamarix gallica* reste stable sous ses deux formes denses (2.65% et 2.8%) et moyennement denses (3.39 et 3.33) une situation analogue est remarquée pour l'*Atriplex halimus*. La forme dégradée des Atriplexaies et des Tamaricacées est apparue dans la nouvelle période avec des pourcentages assez faibles.

- Les sols nus sont restés inoccupés avec un taux de 4.27%.

- Le *Phragmites communis* dans cette station passe de 3.82% pour l'année 2004 à 8.3% pour l'année 2013 soit environ 5% de plus. Les surfaces de pelouses augmentent sensiblement de 0.7 à 0.95%.

Au sein des formations en mosaïques, les peuplements présentent des changements au niveau de l'*Atriplex halimus* dense + *Asparagus acutifolius* + *Pistacia lentiscus* qui deviennent *Atriplex halimus* moyennement dense + *Asparagus acutifolius* + *Pistacia lentiscus* avec le même pourcentage recensé (1.12%). L'*Atriplex halimus* dense + *Asparagus acutifolius* devient : *Atriplex halimus* moyennement dense + *Asparagus acutifolius* + *Tamarix gallica* moyennement dense avec un taux (0.89%). Les nouveaux peuplements en mosaïque retrouvés sont :

- *Tamarix gallica* moyennement dégradé + *Atriplex halimus* moyennement dense (0.55%).

- *Atriplex halimus* moyennement dense + *Pistacia lentiscus* (0.7%).

- *Atriplex halimus* moyennement dense + *Frankenia corymbosa* + *Salsola vermiculata* (0.95%).

Le reste des peuplements en mosaïques a gardé une certaine stabilité durant cette décennie.

CONCLUSION

L'analyse diachronique ou le suivi des modifications physionomiques peut-il mettre en lumière les profondes transformations engendrées au cours des temps ? L'analyse paysagère est-elle particulièrement importante dans le domaine de la restauration afin de connaître en détail les facteurs structurant la résilience de la végétation ?

La diversification de la végétation est-elle liée à la variation de nombreux facteurs écologiques d'une part et à leur combinaison d'autre part ?

L'état actuel de la végétation à travers cette étude semble afficher une tendance à la dégradation du milieu par différents facteurs naturels et anthropiques qui interagissent pour aboutir à la structuration physionomique de ces espaces anthropisés.

L'étude diachronique de l'occupation du sol de ces espaces à partir des missions sur le terrain et de documents comme les photos satellites nous a permis d'analyser et d'évaluer quantitativement l'évolution de celui-ci entre 2004 et 2013. A travers ce suivi spatio-temporel relativement court (10 années) de la dynamique des formations végétales, nous

avons pu relever des modifications liées à une action anthropozoogène non négligeable en dix années, notamment :

- L'apparition de nouvelles espèces *Phragmites communis*, *Nerium oleander* et *Juncus maritimus*, dont l'occupation varie entre 0.35 et 5%,
Les unités simples passent d'un niveau supérieur (Ta1) à un niveau inférieur (Ta2),
- D'autres modifications liées à des formations en mosaïques diminuent alors que d'autres par contre voient leur surface augmenter sensiblement (cf. : chapitre 3).
Il est signalé par certains auteurs comme Bouazza et al., 2004 [3] que les travaux de cartographie séquentiels ont pour but de nous renseigner sur les potentialités d'un territoire, son utilisation et ses aptitudes. Demeurant un instrument d'une valeur indéniable, les relevés cartographiques de végétation semblent exprimer le mode d'organisation des différentes communautés végétales par Sari-Ali et al., 2011 [8].



Photos :

Les tamaricacées de part et d'autre de l'Oued Tafna (A gauche : Station Hammam Boughrara et à droite Station de Béni-Saf)

Références

1. B.E. Ghezlaoui, Bio-morphologie et polymorphisme des appareils aériens de quelques espèces halophytes en Oranie, cas de *Atriplex halimus* L. et *Tamarix gallica* L. Thèse Doctorat d'état, Université Tlemcen 2011.
2. P. Ozenda, Flore et végétation du Sahara 3ème édition, Centre National Recherche Scientifique Paris, 512 p. 1991.
3. M. Bouazza, N. Benabadi, R. Loisel G. Metge, Evolution de la végétation steppique dans le Sud-Ouest de l'Oranie (Algérie). Revue Ecologia Méditerranéenne 30, fasc. 2 (2004) 219-233.
4. N. Benabadi, R. Aboura, F.Z. Benchouk, La régression des steppes méditerranéennes : le cas d'un faciès à *Lygeum spartum* L. d'Oranie (Algérie). Revue Ecologia Méditerranéenne. 35 (2009) 75-89.

5. Z. Regagba, N. Benabadi, K. Mederbal, Contribution à la compréhension de la dynamique de la végétation de l'interface région steppique région saharienne de l'Ouest Algérien. *Revue Territoire d'Afrique*, 3 (2012) 1 – 35T.
6. Dutoit, Dynamique et gestion des pelouses calcaires de Haute-Normandie. Publication Université Rouen, (1996) 220 p.
7. A. Sari Ali, N. Benabadi, B.E. Ghezlaoui M. Bouazza, Aspects physiologiques de la végétation halo résistante et halophile du Nord et du Sud de l'Algérie occidentale. *Revue Méditerranéenne Serie De Estudios Biológicos. Época II*, 22 (2011) 250 p.
8. A. Belkhodja, Etude diachronique des formations à Tamaricacées au Nord de Tlemcen, Mémoire Magistère, Université Tlemcen, 183p. 2014.

Modélisation pluie-débit journalier par l'approche des réseaux de neurones artificiels et un modèle conceptuel le GR4jen zone semi-aride

Khadidja Benzineb¹, Mohamed Remaoun², Khayra Berdane³

¹ Université Saad Dahlab, Blida I, Algérie ; kh.benzineb@univ-blida.dz

² Université Hassiba Ben Bouali Chlef, Laboratoire Eau et Energie , Chlef, Algérie

³ Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique, Blida Algérie

Résumé :

Les événements hydrologiques exceptionnels constituent l'un des plus importants risques naturels responsable parfois de la perte de vies humaines et de biens matériels. Au cours des dernières décennies, un grand nombre d'approches automatisées ou informatisées ont été mises en œuvre pour modéliser ce processus. Cependant, la complexité des régimes hydrologiques requiert à recourir à des outils spécifiques des systèmes dynamiques non-linéaires.

Ce travail de recherche permettra de vérifier l'efficacité des réseaux de neurones formels pour la modélisation des débits du bassin de oued Ouahrane à partir de la relation pluie-débit qui est non-linéaire. Deux modèles de réseaux de neurones ont été optimisés avec l'apprentissage supervisé et comparés afin d'atteindre cet objectif, le premier modèle avec la pluie en entrée et le second avec la pluie et l'ETP en entrée. Ces modèles neuronaux ont été comparés avec un autre modèle global, le modèle GR4j.

Les modèles neuronaux ont été optimisés avec l'algorithme de Levenberg Marquardt (LM), tandis que le modèle GR4j a été optimisé avec la méthode pas à pas. Le critère de Nash (%) et le coefficient de corrélation de Pearson (R) ont permis d'apprécier les performances de ces modèles.

Mots-clés : Modélisation, réseau de neurone, apprentissage supervisé, algorithme de Levenberg Marquardt, GR4j.

Daily rainfall-runoff modeling through the approach of neural networks and GR4j modele in semi-arid zone

Abstract :

The exceptional hydrologic events constitute one of the most important natural risks responsible occasionally in the loss of human lives and material goods. During the last decades, a great number of automated or computerized approaches were put into effect to modeling this process. However, the hydrological regimes complexity requires specific tools of non-linear dynamic systems.

This research work will allow checking efficiency of formal neural networks for flows' modelling of wadi Ouahrane's basin from rainfall-runoff relation which is non-linear. Two models of neural networks were optimized through supervised learning and compared in order to achieve this goal, the first model with input rain, and the second one with rain and input ETP. These neuronal models were compared with another overall model, the GR4j model.

The neuronal models were optimized with algorithm of Levenberg Marquardt (LM), while the GR4j model was optimized with pas à pas method. The Nash criterion (%) and the correlation coefficient of Pearson (R) allowed appreciating performances of these models.

Key Words: Modeling; neural network; supervised learning; algorithm of Levenberg Marquardt, GR4j

Introduction

La non-linéarité de la relation pluie-débit complique souvent la tâche des hydrologues dans leur souci de modéliser les débits à l'exutoire d'un cours d'eau. Aussi, l'identification de tous les processus intervenant sur un bassin versant et leur intégration dans un processus de modélisation abouti à des modèles complexes employant un nombre élevé de paramètres. Le recours à des modèles à faibles nombre de variables, capables de traiter la non-linéarité est donc indispensable.

La transformation des pluies incidentes en débits à l'exutoire d'un bassin, représente le processus le plus complexe à modéliser. Deux types de modèles sont couramment utilisés pour conceptualiser cette relation pluie-débit: les modèles conceptuels et les modèles "boîte noire".

Ces dernières années, avec l'apparition des algorithmes d'apprentissage par adaptation des poids et face à la non-linéarité de la relation pluie-débit, les recherches se sont approfondies vers de nouvelles approches non déterministes, comme l'illustrent les réseaux de neurones artificiels. Ils ont ouvert la voix à une catégorie de modèles pluie-débit basée sur l'intelligence artificielle [1, 2].

Les travaux de plusieurs auteurs dans ce domaine montrent que ces modèles, inspirés du fonctionnement des neurones biologiques, sont très performants pour la simulation et la prévision des débits sur les bassins versants. Plusieurs études menées en Amérique [3], en Europe [4, 5], en Afrique [6] et en Algérie [7, 8] confirment les meilleurs résultats de simulation et de prévision avec les réseaux de neurones.

Ce travail de recherche permettra de vérifier l'efficacité des réseaux de neurones formels et le modèle GR4j pour la simulation des débits en zone semi-aride (cas du bassin de oued Ouahrane). En effet cette étude permettra d'optimiser et de comparer des modèles neuronaux et un modèle conceptuel global (GR4j) pour la simulation des débits journaliers du bassin de oued Ohahrane.

I. Présentation des modèles

I.1 Les réseaux de neurones artificiels

Le réseau de neurone est défini comme un assemblage d'éléments de structure identique appelés cellules (ou neurones) interconnectées à l'instar des cellules du système nerveux des vertébrés [9]. Des neurones biologiques, les auteurs comme [10] se sont inspirés pour mettre au point les neurones formels ou artificiels. Des similitudes ont donc été établies entre les éléments des neurones biologiques et les composantes des Neurones Formels ou Artificiels (figure 1)

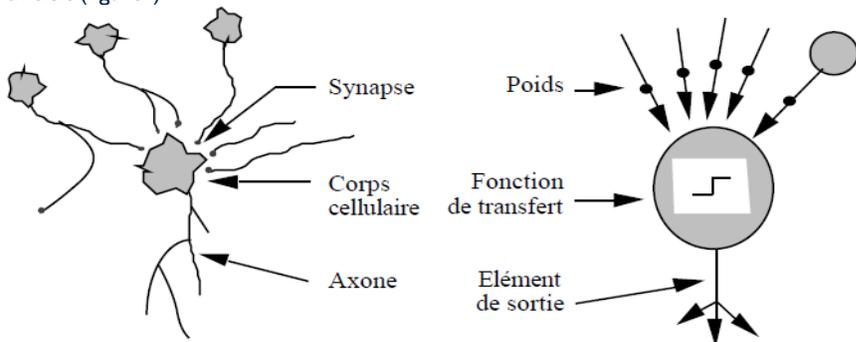


Figure 1. Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel [11].

I.1 Le modèle conceptuel GR4j

Le modèle GR4j (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) a été utilisé comme modèle repère dans cette étude. C'est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres. Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par [12, 13, 14, 15, 16 et 17] qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. C'est la version de [17], représentée sur la figure 5, dont sa structure fait apparaître des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin permettant de donner au modèle une mémoire des conditions antérieures et d'en assurer un fonctionnement en continu. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage, des hydrogrammes unitaires ainsi que d'autres fonctions permettant de simuler le comportement hydrologique du bassin.

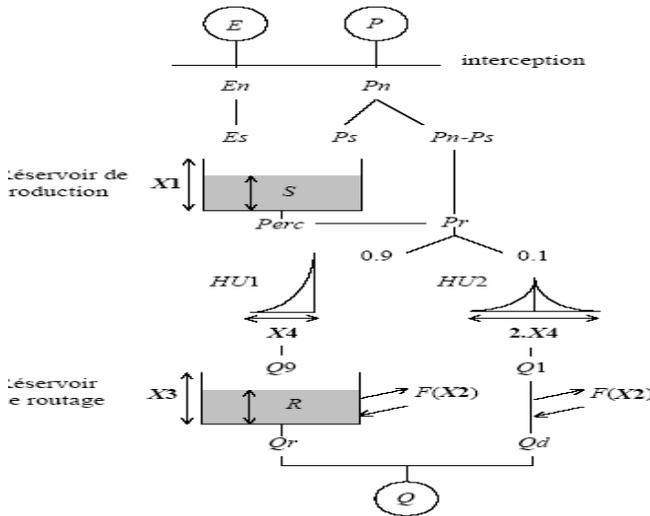


Figure II. Structure générale du modèle GR4j [17]

II. Critères de performance

Les critères de performance utilisés pour cette étude sont : le critère de Nash et le coefficient de corrélation de Pearson. Le critère de Nash Introduit par [18], il est défini par :

$$Nash = (100) \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Ti - Pi)^2}{\sum_{i=1}^n (Ti - \bar{P})^2} \right) \quad (1)$$

avec :

Ti et Pi respectivement les débits mesurés (observés) et calculés pour les $i = 1, \dots, N$, \bar{P} est la moyenne des débits calculés.

En ce qui concerne le coefficient de corrélation de Pearson, il est habituellement utilisé pour évaluer la performance des modèles hydrogéologiques et hydrologiques, il est obtenu en calculant la régression linéaire entre les valeurs (débits) calculées et les valeurs (débits) observées ou mesurées. Sa formulation est donnée par l'équation 2

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N t_i P_i}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N t_i^2\right) \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N P_i^2\right)}} \quad (2)$$

avec :

T_i et P_i respectivement les débits mesurés (observés) et calculés pour les i = 1, ..., N, \bar{T} et \bar{P} sont les moyennes respectives des débits observés et calculés. N, le nombre d'entrées ;
 $t_i = T_i - \bar{T}$, $p_i = P_i - \bar{P}$

III. Résultats et discussions

L'opération de calage a été effectuée sur une période de 02 années (1998-2000). Pour la validation nous avons utilisé de nouvelles bases de données correspondant à la période (2007-2009). Les résultats du calage et de la validation de la station de Larabaà Ouled Fares sont représentés dans le tableau 1. D'après le tableau 1 on remarque que :

les résultats obtenus avec les différents modèles développés (modèles neuronaux (Neur1 et Neur2) et le modèle GR4j) sont généralement très satisfaisants en calage avec des critères de Nash qui sont supérieurs à 74% et les coefficients de corrélation de Pearson varient de fort à très forts entre 0,66 et 0,92 en calage et en validation.

Tableau 1. Performance des modèles neuronaux (Neur1, Neur2) et du modèle GR4j à la station d'étude

Station	Modèle	Calage		Validation	
		Nash (%)	R	Nash (%)	R
Larabaà Ouled Fares	Neur 1	74,66	0,857	53,26	0,66
	Neur 2	84,79	0,920	64,17	0,737
	GR4j	76,54	0,879	58,40	0,773

L'ajout de l'évapotranspiration potentielle améliore la performance des réseaux de neurones, tant en calage qu'en validation pour les deux stations.

Une comparaison faite entre les performances des modèles neuronaux (Neur1 et Neur2) et le modèle GR4j montre que le modèle neuronal (Neur2) est plus performant que le modèle GR4j tant en calage qu'en validation, et le modèle neuronal (Neur1) est moins performant que le modèle GR4j tant en calage qu'en validation.

Références

- [1] French M, Krajewski W, and Cuykendall R. Rainfall forecasting in space and time using neural network. J. Hydrol., 1992, 137, 1-31.
- [2] Minns A, Hall J. Artificial neural network as rainfall-runoff models. Hydrol. Sc. J., 1996, 41(3), 399-417.
- [3] Wenri H, Xu B, and Amy C. Forecasting flows in Apalachicola River using neural networks. Hydrological Processes, Vol. 18., 2004, 2545-2564.
- [4] Johannet A, Ayral P, and Vayssade B. Modelling non measurable processes by neural networks: forecasting underground's flow. International Joint Conferences on Computer, Information and Systems Sciences and Engineering., 2006, 6, 4-14.
- [5] Ayral P. Contribution à la spatialisation du modèle de prévision des crues éclairées ALHTAIR. Approche spatiale et expérimentale, application au bassin versant du Gardon

- d'Anduze. Thèse de Doctorat, Université de provence, Aix-Marseille I, LGEI, Ecole des Mines d'Alès, Alès, France, 2005, pp.311
- [6] Koffi Y, Ayrat P, Kouassi A, Johannet A, et Biemi J. Modélisation des débits des rivières en région tropicale humide : application des réseaux de neurones et du modèle GR2M au Bandama Blanc (CÔTE D'IVOIRE). Rev. Ivoir. Sci. Technol., 2011, 17, 151-171
- [7] Dechemi N, Tarik B, et Issolah A. Modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous. Revue des Sciences de l'Eau. Vol. 16 n°4., 2003, 407-424.
- [8] Tarik B, Dechemi N. Daily rainfall–runoff modelling using conceptual and black box models; testing a neuro-fuzzy model». Journal des Sciences Hydrologiques, Vol. 49., 2004, 919-930.
- [9] Coulibaly P, Anctil F, and Bobee B .Prévision hydrologique par réseaux de neurones artificiels : Etat de l'art. Revue canadienne de génie civil, Vol. 26., 1999, 293-304
- [10] Werbos P. Applications of advances in nonlinear sensitivity analysis. System modeling and optimization. Drenick R. et Kozin F. Springer-Verlag, New York., 1981, 762-770.
- [11] Touzet C. Les réseaux de neurones artificiels. Introduction au connexionnisme. Cours, exercice et travaux pratiques, 1992, pp 58
- [12] EDIJATNO, NASCIMENTO, N.O., YANG, X., MAKHLOUF, Z. et MICHEL, C. (1999), GR3J: a daily watershed model with three free parameters. Hydrological Sciences Journal, 44(2), pp 263-277.
- [13] EDIJATNO et MICHEL C., (1989), Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La Houille Blanche, n° 2, pp. 113-121.
- [14] NASCIMENTO.N.O (1995), Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat, CERGRENE/ENPC, Paris, 550 p.
- [15] EDIJATNO (1991), Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur/ENGEEES, Strasbourg, 242 p.
- [16] PERRIN Charles (2000), Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparatif docteur de institut national polytechnique de Grenoble L' INPG, 527p.
- [17] PERRIN .C, CLAUDE .M, VAZKEN A (2003), Improvement of a parsimonious model for stream flow simulation, journal hydrologique, (279), pp 275-289.
- [18] J. E NASH. et J. V. STUCLIFFE, «River flow forecasting through conceptual models». Part I. A discussion of principles. Journal of Hydrology, Vol. 10, (1970) 282-290.
- [19] X. LEGATES, and J. MCCABE, „Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research, Vol. 35, n°1 (1999) 233-241

Modélisation géostatistique de la salinité en environnement 3D à partir de levés de résistivité électrique et de la géomodélisation (Cas de l'aquifère de Hammam Bouhadjar – Nord-Ouest Algérien)

Dehni Abdellatif

Résumé :

La géomodélisation dans les eaux souterraines est une tâche complexe pour la technologie SIG. Les développements actuels de la modélisation géostatistique permettent d'utiliser des solutions basées sur des levés géophysiques et des bases de données stratigraphiques pour la caractérisation spatiale 3D de la salinité. La capacité de modéliser et d'interroger simultanément des données multi sources comme celles de géophysique, géologique et hydrochimique a des impacts positifs et réduit l'incertitude géologique. Ceux-ci rendent la continuité de la cartographie de la salinité en environnement 3D plus attrayante pour une anisotropie latérale et transversale complète dans les milieux aquifères de Hammam Bouhadjar du nord-ouest de l'Algérie. L'interopérabilité entre Geomodeller, Isatis Geovariances et la technologie standard Modflow ouvre une nouvelle méthodologie d'intégration en utilisant une méthode de champ potentiel relevant par la définition d'un algorithme de classification hiérarchique. Cette application utilise en entrée les forages validés lors de l'importation lors de la validation et les étapes de composition globale à utiliser dans le domaine automatique. Les résultats illustrent une meilleure intégration en utilisant la variomap de salinité en 3D et l'analyse de voisinage de krigeage (KNA) comme une étape facultative dans la définition de voisinage au cours du processus d'estimation. Cette discrétisation spatiale permet d'évaluer rapidement la qualité d'un variogramme orienté modélisation. Cette procédure recrée en fait une tranche représentative du modèle de bloc en utilisant diverses définitions de voisinage selon un critère géostatistique de seuil. Le modèle gaussien ajusté a été réalisé pour la meilleure estimation de la salinité afin de cartographier le voxel modèle 3D par les relevés de résistivité électrique et a donc été appréhendé pour résoudre la cartographie complexe de la salinité en 3D en supposant l'analyse des contacts géologiques.

Mots-clés : Recharge, Nappe phréatique, Piézométrie, Salinité, Cap-Bon, Tunisie

Geostatistical modeling of salinity in 3D environment based on electrical resistivity surveys and geomodeling (Case of Hammam Bouhadjar aquifer – Northern west of Algeria)

Abstract :

Subsurface geomodeling is a complex task for GIS technology. However, the spatial variability nature of geo-objects always drives GIS to be part of the modeling systems. Current developments of geostatistical modeling of salinity in the 3D environment allow the full oriented solutions using capabilities based on geophysical surveys and stratigraphic database. The ability to simultaneously model and interrogate geophysical, geological, and hydrochemical data is positively impacts and reduces geological uncertainty. These make continuity salinity mapping in 3D environment more attractive for comprehensive lateral and transversal anisotropy in the aquifer media of Hammam Bouhadjar from the Northern West of Algeria. Modern geomodeling in 3D system is built on an interoperability challenge between Geomodeller, Isatis Geovariances, and Modflow standard technology. However, the methodology is developed by using a potential field method modeled by automatic domain definition use a hierarchical clustering algorithm. This application is based on validated boreholes imported during validation and global compositing steps to be use in the automatic domaining. The results improve the best integration using the salinity variomap in 3D and the Kriging Neighborhood Analysis (KNA) as an optional step in the neighborhood definition during

the estimation process. It allows to quickly evaluate the quality of a neighborhood in order to select the most adequate one regarding the actual input dataset and variography. This procedure actually kriges a representative slice of the block model using various neighborhood definition and computes some attached geostatistical criterion. The fitting Gaussian model has been performed for best estimation of salinity grade in order to map the 3D voxel model by the electrical resistivity surveys and therefore was apprehend to solve complex salinity mapping in 3D assuming the related geologic contacts analysis.

Key Words : 3D Geostatistical modeling, salinity, electrical resistivity surveys, geomodeling, Geomodeller, Kriging Neighborhood Analysis (KNA), 3D voxel model

Étude de la fracturation dans les forages carottés dans la région d'Oumé (Côte d'Ivoire)

Derving BAKA¹, Théodore Koffi YAO², Marc YOUAN-TA³, Théophile LASM⁴

¹ Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 08 BP 582 Abidjan 08, +225 07 65 05 94, dervingb@gmail.com

² Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 08 BP 582 Abidjan 08, +225 08 87 08 82, yakoft@yahoo.fr

³ Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 08 BP 582 Abidjan 08, +225 07 59 22 82, youanta@gmail.com

⁴ Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 08 BP 582 Abidjan 08, +225 07 60 92 51, theophile_lasm@yahoo.fr

Résumé :

En région de socle cristallin, les écoulements d'eau se font au travers des réseaux de fractures ouvertes. La complexité de ces réseaux et leur organisation spatiale dans le sous-sol font que les aquifères de socle cristallin forme un milieu discontinu et hétérogène. Cette étude vise à la caractérisation des discontinuités structurales observées sur des carottes de forages. Ces carottes ont été examinées et analysées afin de comprendre l'organisation souterraine des réseaux de fractures, lesquels permettent l'écoulement de fluides dans le socle de la région d'Oumé. Les carottes ont été obtenues grâce à une foreuse type DD (Diamond Drill) et les structures mesurées à l'aide d'un kénomètre (mesure de profondeur, direction et pendage). Huit forages de profondeur totale variant de 62 à 435 m ont été utilisés. 238 fractures ont été observées. La majorité de ces fractures se rencontre de la trentaine de mètres à la centaine de mètres. La densité de fracture est en moyenne de l'ordre de 0,36 par mètre de carotte et décroît avec la profondeur. Différentes orientations ont été mesurées. La principale est la N90-100 avec 12% de l'effectif. Par tranche de profondeur, l'on observe une rotation des orientations de fractures, ce qui suggère que les plans de fractures de sont pas continus sur toute la profondeur de forages. C'est différents résultats permettrons de mieux appréhender les essais de modélisation des écoulements en milieux fracturés.

Mots-clés :réseau de fractures, aquifère discontinu, écoulement, Oumé, Côte d'Ivoire

Study of fracturing in core drilling in the Oumé area (Côte d'Ivoire)

Abstract :

In the crystalline basement region, water flows are through open fracture networks. The complexity of these networks and their spatial organization in the basement make crystalline basement aquifers a discontinuous and heterogeneous medium. This study aims at the characterization of the structural discontinuities observed on drill cores. These cores were examined and analyzed to understand the underground organization of fracture networks, which allow the flow of fluids in the basement of the Oumé region. The cores were obtained using a drill type DD (Diamond Drill) and the structures measured using a kenometer (depth measurement, direction and dip). Eight boreholes of total depth ranging from 62 to 435 m were used. 238 fractures were observed. The majority of these fractures occur from about thirty meters to a hundred meters. The fracture density is on the order of 0.36 per meter of core and decreases with depth. Different orientations were measured. The main one is the N90-100 with 12% of the workforce. In depth, we observe a rotation of the fracture orientations, which suggests that the fracture planes are not continuous over the entire drilling depth. It is different results that will make it possible to better understand flow modeling tests in fractured media.

Key Words: fracture network, discontinuous aquifer, flow, Oumé, Côte d'Ivoire

Introduction

En Côte d'Ivoire, Depuis les années soixante-dix, les recherches se sont tournées vers les eaux des réservoirs de fissures. Ces réservoirs sont caractérisés par une matrice rocheuse à porosité primaire et conductivité hydraulique faible. L'aquifère est alors constitué par des zones de failles et de fissures qui créent la porosité secondaire ayant de plus fortes conductivités hydrauliques [1]. La recherche des eaux souterraines en milieu de socle repose essentiellement sur la recherche, l'identification et la caractérisation des fractures, car un forage qui ne traverse aucune fracture ne peut produire de l'eau [2]. Les fortes productivités de ces aquifères étant généralement liées à des zones de fractures conductrices, caractérisées par de fortes transmissivités. Dans la région d'Oumé, un programme de forages carottés a permis l'observation à grande échelle du comportement de la fracturation. Cette fracturation régissant l'écoulement des eaux souterraines.

I. Zone d'étude

Située au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, la région d'Oumé est à environ 250 km d'Abidjan, la capitale économique. Une région fortement agricole et minière. Le relief relativement monotone avec présence de quelques inselbergs.

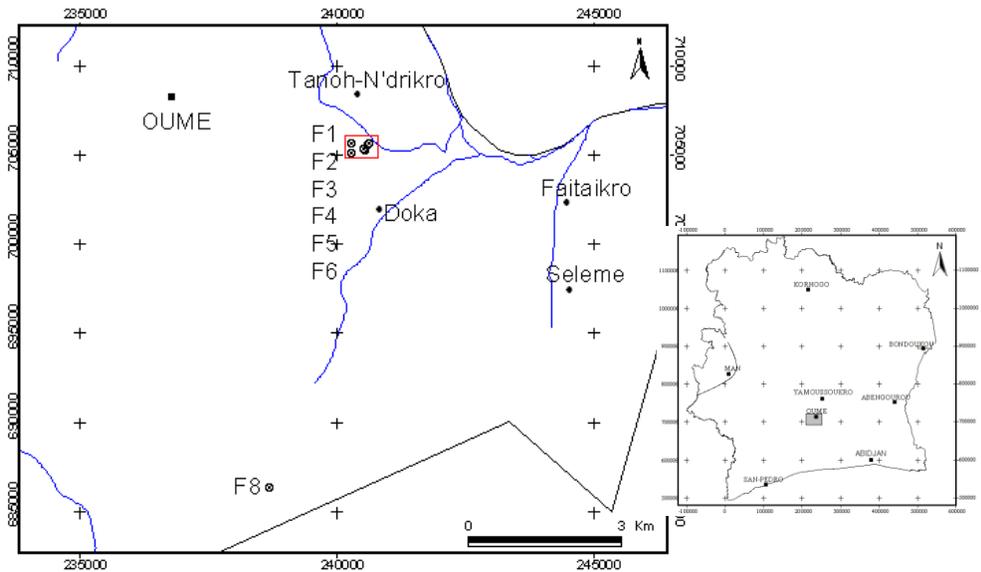


Figure 1 : Zone d'étude

II. Données et méthode

Ce sont 8 forages orientés, de profondeur variable portant près d'un km de carottes qui ont été analysés. Sur chacune de ces carottes, ont été identifiées les structures géologiques planaires de tectonique cassante ou stratigraphique pouvant être le siège de l'écoulement de fluides souterrains. Au total, 238 structures regroupées sous le vocable de « fractures » ont pu être reconnues. Les orientations de ces structures sont mesurées à l'aide d'appareils spécifiques (EzyMark® et kénomètre).



Figure 2 : Disposition des carottes à la sortie des forages

III Résultats

III.1. Répartition des fractures

Le tableau 1 présente les types de structures identifiées. Elle montre une distribution hétérogène des « fractures ». Leurs profondeurs apparition (tableau 2) sont comprises entre 35 et 430 m avec une moyenne de 188,7 m. Le coefficient de variation (61%) montre une grande variation de la distribution des profondeurs de fractures.

Tableau 1: Structures rencontrées dans les différents forages carottés

Forages	Structures						de
	Failles	Fractures	Veines	Shear zones	Joints	Zones contact	
F1	2	0	13	0	0	0	
F2	1	3	14	0	0	0	
F3	1	0	2	0	1	0	
F4	0	0	4	0	0	0	
F5	4	0	14	0	0	0	
F6	0	0	18	0	1	0	
F7	0	0	23	2	8	5	
F8	0	0	86	0	14	22	
Total ($\Sigma=238$)	8	3	174	2	24	27	

Tableau 2 : Statistique des profondeurs de fractures identifiées sur carottes

	Effectif	Minimum (m)	Maximum (m)	Moyenne (m)	Écart-type (m)	Coefficient de variation (%)	de
Profondeur fracture	238	35,90	430,58	188,71	115,13	61,00	

Les profondeurs des fractures ont été regroupées selon un pas de 25 m (Figure 88). Nous observons que la fréquence de ces fractures croît depuis la trentaine de mètre de profondeur pour atteindre un pic autour de 50-60 m, puis elle décroît jusqu'à 75 m avant de remonter de 80 à 100 m. La majorité des fractures se rencontrent dans la tranche 25-125 m. On rencontre aussi de nombreuses fractures au-delà de 150 m de profondeur. Après 325 m, la fréquence des fractures diminue.

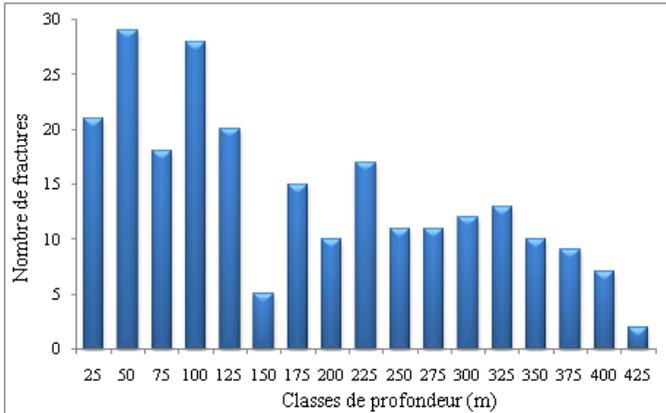


Figure 3 : Histogramme de distribution des profondeurs des fractures du site III.2. **Densité de fractures**

Les structures géologiques observées sur les différents forages apparaissent au-delà de 30 m de profondeur. Ceci s'explique par les épaisseurs d'altération. De plus, les phénomènes d'altération ont provoqué la disparition des structures de sub-surface. La densité de fractures est relativement faible au niveau des forages, particulièrement sur F3 et F4. Cette densité varie de 1 à 3 fractures par mètre de carotte avec une moyenne d'environ 0,36 fracture/m de carotte à partir du toit du socle. Les plus fortes densités de fractures sont rencontrées dans les forages F7 et F8, pour lesquelles, l'on retrouve des fractures profondes entre 80 m et 420 m (figure 4).

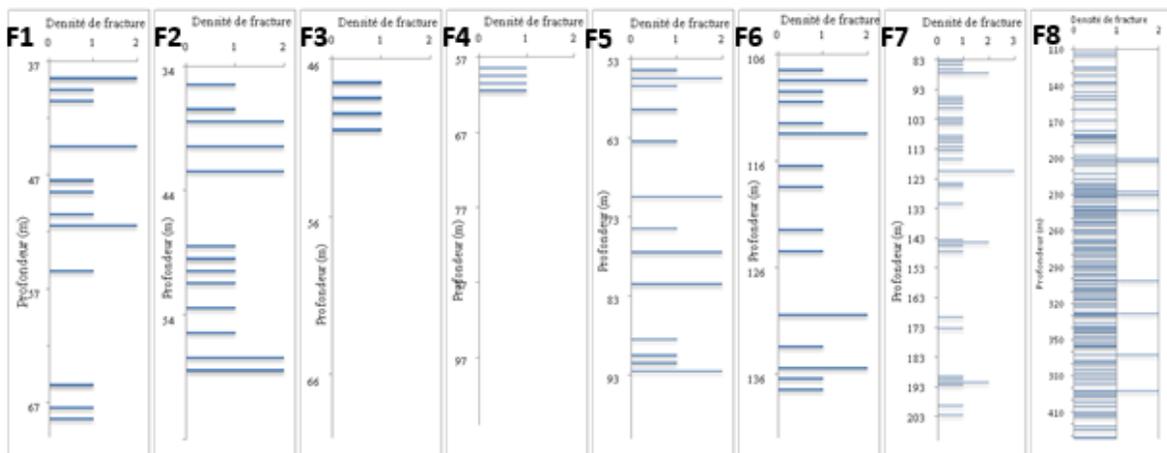


Figure 4 : Densité de fractures par forage sur le site d'étude III.3. **Orientation de l'ensemble des structures**

La direction principale est N90-100 avec plus de 12% de l'effectif des structures. Les directions secondaires sont N0-10, N50-60, N60-70, N70-80, N130-140 et N170-180.

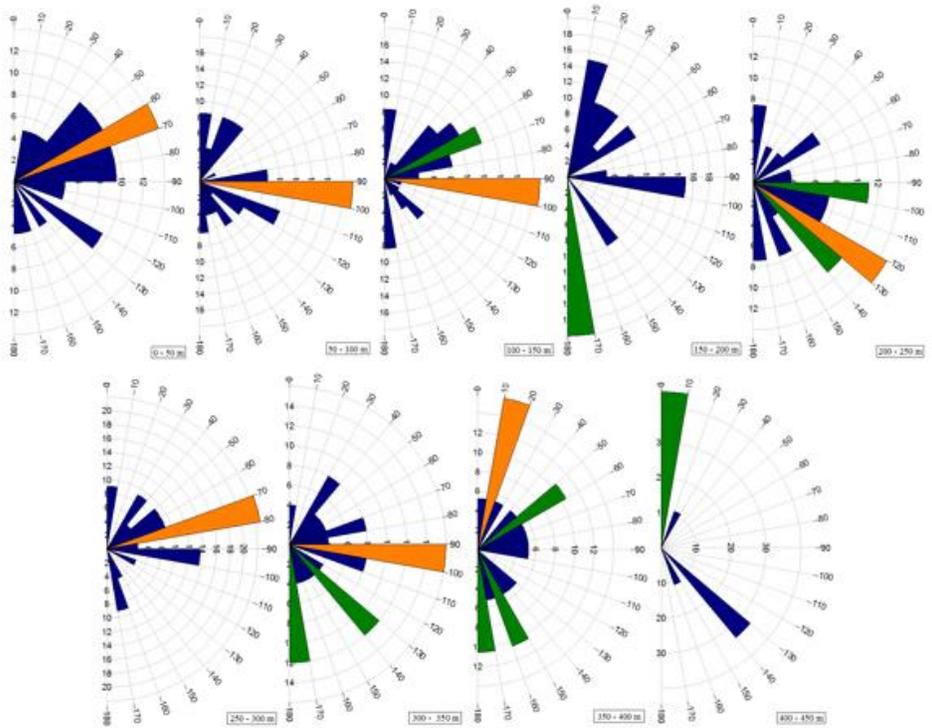


Figure 5 : Rosace directionnelle de l'ensemble des fractures mesurées sur les carottes

III.4. Orientation des fractures par tranche de profondeur

Pour mieux visualiser le comportement de la fracturation en profondeur, nous avons tracé leurs rosaces directionnelles par tranche de 50 m de profondeur (Figure 6). Les directions rencontrées pour chaque profondeur sont ainsi variables. Dans les 150 premiers mètres, deux directions principales se dégagent: N60-70 et N90-100. Au-delà de 150 m, en plus des orientations précédentes, apparaissent les directions N0-10, N120-130 et N70-80.

III.5. Discussion

Plusieurs études destinées à caractériser les réseaux de fractures à partir des forages carottés ont été menées à travers le monde sur tous types de formations rocheuses [3]; [4]; [5]; [6]; [7]. Tout comme à Oumé, certaines de ces études révèlent que la densité de fractures décroît avec la profondeur, cependant, aucune relation n'a pu être établie [8]; [7]. [9]montre, dans les formations granito-schisteuses de Ploemeur (France) que la densité varie de 0 à 6 fractures par mètre. La diminution de la densité de fracturation s'accompagne d'une baisse de la transmissivité et de la perméabilité en fonction de la profondeur. [10], [11], [12], [6], [13], [14]montrent que cette chute est non-linéaire et serait due à la fermeture des ouvertures de fractures sous l'effet des conditions lithostatiques. Les fractures de carottes d'Oumé présentent différentes directions suivant la profondeur. Les fractures s'identifient comme étant des plans plus ou moins continus dans les trois dimensions de l'espace [7], elles devraient posséder les mêmes directions dans un même système spatial (depuis la surface jusqu'en profondeur). Les études de [3]montrent la variation d'orientation par rapport à la

profondeur. Il explique la "rotation" du système de fractures soit par existence de surfaces de fissuration courbes ou sinusoïdales, soit par l'apparition au fur et à mesure de la profondeur de nouvelles générations de fractures due à plusieurs phénomènes géologiques (remontée magmatique, métamorphisme, tectonique, etc.) de différentes ampleurs et contraintes.

Conclusion

Cette étude montre que l'on peut rencontrer des fractures à des profondeurs allant jusqu'à 450 m et même au-delà. Ainsi l'on peut toujours observer des arrivées d'eau au-delà des profondeurs généralement atteintes par les forages d'eau qui sont de l'ordre de 80 m. La densité de fractures varie de 1 à 3 fractures par mètre de carotte avec une moyenne d'environ 0,36 fracture par mètre à partir du toit du socle. La direction principale des structures identifiées est N90-100.

Références

- [1] V. T. Tan, F. De Smedt, O. Batelaan et A. Dassargues, «Study on the relationship between lineaments and borehole specific capacity in a fracture and karstified limestone area in Vietnam,» *Hydrogeology Journal*, 12, (2004). 662-673
- [2] K. E. Kouadio, I. Savané, T. Lasm et J. Biémi, «Hydrogeology prospecting in crystalline and metamorphic area by spatial analysis of productivity potential,» *European Journal of Scientific Research*, 22, 13, (2008), 373-390.
- [3] N. Rampnoux, P. Broquet et J. Maniai, «Caractérisation hydraulique d'un massif calcaire fissuré de Franche-Comté (France),» *Revue des Sciences de l'Eau*, 6, 11, (1993), pp. 3-22,
- [4] A. Genter, C. Castaing et P. Martin, «Evaluation de la fracturation des réservoirs par forages : comparaison entre les données de carottes et d'imagerie de paroi,» *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 52, 11, (1997) pp. 45-60
- [5] O. Fouché, R. Cojean et M. Arnould, «Caractérisation géologique et géométrique de la fracturation naturelle d'une formation granitique à partir de carottes de forages,» *Bulletin Ingénierie Geology Environnement*, 60, (2001) 231-240.
- [6] H. S. Yang, J. G. Kang, K. S. Kim et C. S. Kim, «Groundwater flow characterization in the vicinity of the underground caverns in fractured rock masses by numerical modeling,» *Geosciences Journal*, 8, 14, (2004) 401-413.
- [7] L. Lin, H. Jia et Y. Xu, «Fracture network characteristics of a deep borehole in the Table Mountain Group (TMG), South Africa,» *Hydrogeology Journal*, 15, (2007) 1419-1432.
- [8] B. Dewandel, P. Lachassagne, R. Wyns et J. C. Marechal, «A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering,» *Journal of Hydrology*, 330, 11-2, (2006) 260-284.
- [9] A. Belghoul, *Caractérisation pétrophysique et hydrodynamique du socle cristallin, Université Montpellier*, (2007) 207
- [10] H. Carlsson, L. Carlsson, A. Jamtlid, H. Nordlander, O. Olsson et T. Olsson, «Cross-hole techniques in deep seated rock mass,» *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 1-2, 26-27, (1982) 377-384.
- [11] J. Zhao, «Rock mass hydraulic conductivity of the Bukit Timah granite, Singapore,» *Engineering Geology*, 50, (1998) 211-216.
- [12] D. A. Budd, «Permeability loss with depth in the Cenozoic carbonate platform of west-central Florida,» *AAPG Bulletin*, 85, (2001) 1253-1272.
- [13] S. N. Ehrenberg et P. H. Nadeau, «Sandstone vs carbonate petroleum reservoirs: a global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships,» *AAPG Bulletin*, 89, (2005) 435-445.

[14] X. W. Jiang, L. Wan, W. S. Wang, S. H. Liang et H. Bill, «Estimation of fracture normal stiffness using a transmissivity-depth correlation,» International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 46, (2009) 51-58.

Evolution Quantitative Et Qualitative Des Eaux De La Source De Ain Khrouf, El Bouni, Annaba

Saadane Djorfi¹, Laroussi Belloulou¹, Salima Guechi¹, Samir Djorfi¹,

¹ Laboratoire des Ressources Naturelles et Aménagement, Univ. de Annaba, BP 12, 23000

Résumé – Ce travail est une contribution à l'état des connaissances sur les caractéristiques quantitatives et qualitatives de l'eau de la source d'Ain Khrouf, commune d'El Bouni. Située dans un environnement périurbain, cette source se déverse à un débit plus ou moins régulier de l'ordre de 1,5 l/s (135 m³/j), quantité suffisante pour alimenter à raison de 100 litres par jour une population de 1350 habitants.

En dépit des difficultés rencontrées au niveau des résultats des analyses des différents prélèvements (lacunes), le peu de données collectées au cours de la présente étude, recoupées avec les résultats des analyses anciennes de l'ADE, ont permis d'esquisser un tableau relativement cohérent sur l'état des connaissances sur la minéralisation des eaux de ce complexe hydrogéologique. Les facteurs géologiques jouent un rôle prépondérant dans l'acquisition de la chimie des eaux et les processus impliqués sont la dissolution et le lessivage liés au temps de séjour de l'eau dans les formations cristallophylliennes, notamment durant la période de hautes eaux.

Les teneurs des éléments chimiques en réaction dans l'eau de la source sont, en général, conformes aux normes de potabilité établies pour l'Algérie et/ou à celles de l'OMS; il est possible que des valeurs plus fortes existent, mais en tout état de cause ce seraient plutôt des exceptions, et probablement liées à une pollution anthropique (cas des nitrates : 22 mg/l) suite à l'urbanisation du champ captant durant ces dernières années. Du point de vue bactériologique, l'eau de la source d'Ain Khrouf est propre à la consommation.

Mots-Clés : source, Ain Khrouf, Bouhamra, Edough, débit, minéralisation, pollution.

Abstract - Quantitative and qualitative evolution of the Ain Khrouf source waters , El Bouni,

This work is a contribution to the state of knowledge on the quantitative and qualitative characteristics of the Ain Khrouf Spring water, commune of El Bouni. Located in a suburban environment, this spring is discharges at a more or less regular flow rate of about 1.5 l/s (135 m³/d), a sufficient water quantity to supply, at a rate of 100 liters per day, a population of 1350 inhabitants.

Despite the difficulties encountered in the results of different water samples analyzes (missing data), the few data collected in this study, cross-checked with the results of the ADE older analyzes, made it possible to sketch a relatively coherent table on the state of knowledge on the water mineralization of the hydrogeological complex. Geological factors play a major role in the acquisition of water chemistry and the processes involved are dissolution and leaching related to the residence time of water in crystallophylian formations, especially during the high water period.

The reacting chemical elements contents in the Ain Khrouf spring water are generally in accordance with the WHO Drinking Water Standards and those established for Algeria. It is possible that relatively high values exist, but in any case, they are exceptions and probably related to anthropogenic pollution (nitrate case: 22 mg / l) following the urbanization of the watershed in recent years. From a bacteriological viewpoint, the Ain Khrouf spring water is suitable for human consumption. The reacting chemical elements contents in the Ain Khrouf spring water are generally in accordance with the WHO Drinking Water Standards and those established for Algeria. It is possible that relatively high values exist, but in any case, they are exceptions and probably related to anthropogenic pollution (nitrate case: 22 mg / l) following the urbanization of the watershed in recent years. From a bacteriological viewpoint, the Ain Khrouf spring water is suitable for human consumption

.Keywords : water spring, Ain Khrouf, Bouhamra, Edough, discharge, mineralization, pollution

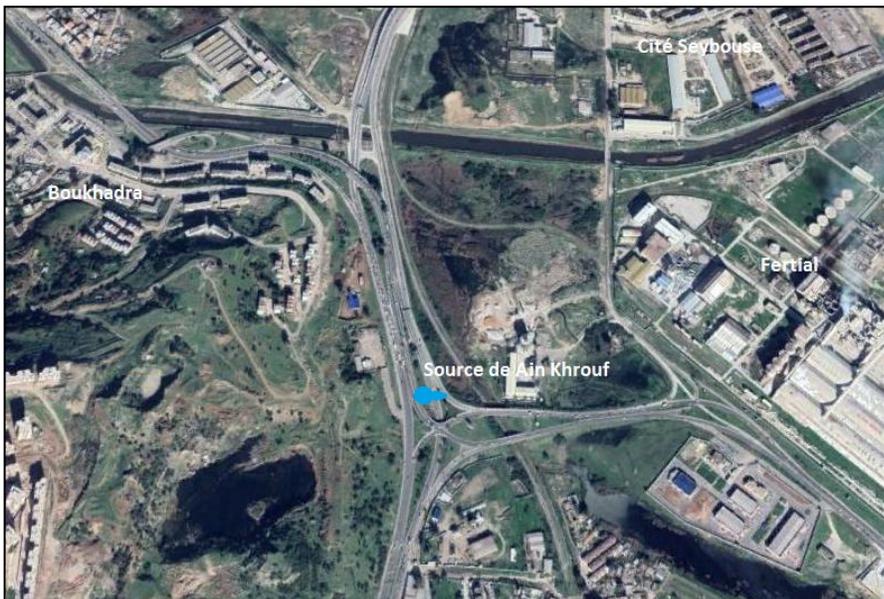
Introduction

La source d'Ain Khrouf est située au Sud-est de la Cité Boukhadra, commune d'El Bouni, wilaya d'Annaba. Elle émerge dans un environnement très vulnérable marqué par la présence d'un réseau routier assez dense (pont échangeur) et une intense extension urbaine. Etant trop sollicitée par les habitants et surtout les passagers, cette source pourrait constituer une menace pour la santé publique.

Pour mieux cerner cette problématique, il importe de passer en revue certains concepts relatifs à l'évaluation quantitative et qualitative de cette source, à savoir la caractérisation hydrologique, hydrochimique et bactériologique de l'eau.

I. Zone d'étude

Emergeant à 3 m d'altitude au pied du massif de Bouhamra (fig. 1), la source d'Ain Khrouf jouit du climat méditerranéen caractérisé par un hiver froid et humide et un été chaud et sec. En effet, cet environnement reçoit une pluviométrie moyenne de 600 à 700 mm/an inégalement répartie le long de l'année. Les facteurs climatiques (pluies relativement abondantes), géologiques (roches cristallophylliennes fortement fissurées) et topographiques (relief accidenté) confèrent à la source des conditions favorables à sa recharge. En régime non influencé, la pérennité de cette émergence est, en grande partie, assurée par le déversement de l'aquifère en milieu fissuré. Quoique de faible débit (moyenne de l'ordre de 135 m³/j en hautes eaux; sûrement un peu moins pendant les étiages), ce déversement constitue une source d'alimentation en eau non négligeable et surtout pérenne pour les



populations locales et passagères.

Fig. 1. Carte de situation de la source d'Ain Khrouf (source Google Earth)

1.1. Aperçu Géologique

L'étude géologique de la région d'Annaba met en évidence la superposition de plusieurs formations à savoir, de bas en haut, dans un ordre chronologique : les formations métamorphiques et sédimentaires (Fig. 2) :

- **Le socle métamorphique**

D'âge paléozoïque, il occupe l'Ouest de la plaine de Annaba. Il affleure au niveau des massifs de l'Edough, de Belilita et de Bouhamra. Il s'agit de gneiss, micaschistes et calcaires cristallins. L'altération superficielle et l'existence d'une multitude de failles au sein de ces formations leur confèrent une importance hydrogéologique certaine (perméabilité de fissure). Elles peuvent jouer, en effet, le rôle de zones d'alimentation des eaux souterraines.

- **Formations sédimentaires**

Le secondaire affleure à l'Ouest de la plaine d'Annaba, il est représenté par des grés argilo-calcaires peu perméables, et par des flyschs du crétacé.

Le tertiaire est largement représenté, à l'Ouest de la plaine, par des formations grés-argileuses du numidien imperméable et peu perméable, et par des sables argileux avec un lit de gravier perméable du Mio-Pliocène.

Le quaternaire est constitué de formations perméables continentales, alluvionnaires, colluviales, éoliennes et marines.

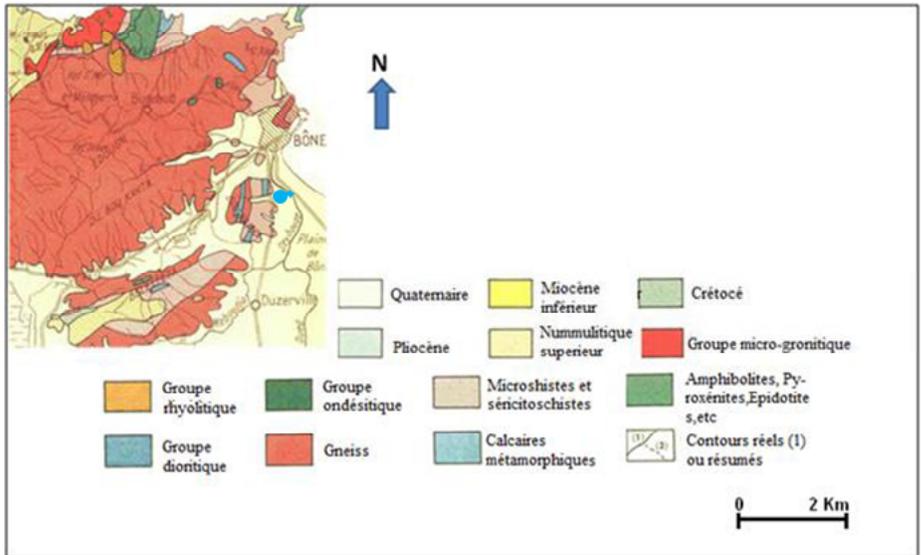


Fig. 2. Extrait de la carte géologique au 1/200 000 (Hilly, 1962)

1.2. Caractéristiques de l'écoulement

Au cours de la présente étude, le débit a été estimé par la méthode capacitive. Cette méthode consiste à mesurer à l'aide d'un chronomètre, le temps moyen (3 à 5 essais) nécessaire pour remplir un récipient d'une capacité connue.

Les résultats de plus d'une vingtaine de jaugeages (24 mesures) de la source d'Ain Khrouf, effectués entre le 12 janvier et le 31 Mai 2017 montre que la source d'Ain Khrouf se déverse à un débit plus ou moins régulier. Les valeurs mesurées en hautes eaux s'échelonnent entre 1,334 et 2,520 l/s; la moyenne étant de l'ordre de 1,567 l/s (Fig.3).

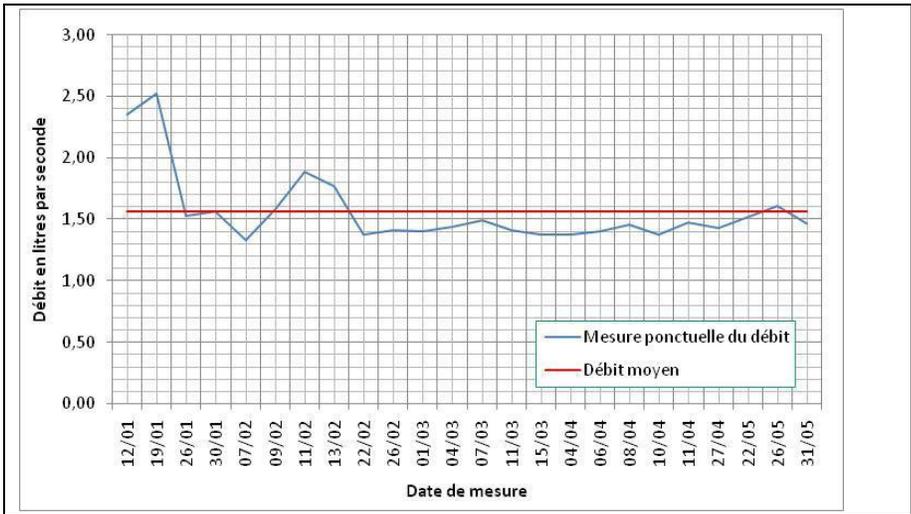


Fig. 3. Variabilité des débits journaliers de la source d'Ain Khrouf (2017)

Le coefficient de variation (C_v), de l'ordre de 19 %, et le coefficient d'immodération (Q_{max}/Q_{min}), proche de 2, traduisent la faible variabilité de l'écoulement. Selon la classification de Meinzer (1923), la source d'Ain Khrouf est de magnitude 5. Le flux moyen journalier s'estime à 135 m³/j durant les hautes eaux.

2. Caractéristiques physicochimiques et bactériologiques

Cette étude est basée sur les résultats bruts des analyses des prélèvements effectués au cours de ce travail (Janvier-Mai 2017) et celles réalisées par le Laboratoire Centrale de l'Algérienne des Eaux (ADE) d'Annaba. Compte tenu des difficultés rencontrées pour l'analyse physico-chimique de l'eau (manque de moyens de mesure et de dosage), L'interprétation porte sur les résultats bruts des analyses plus ou moins dispersées dans le temps.

2.1. Caractéristiques physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques (tab. I) pH, T°C, CE, l'oxygène dissout et la turbidité ont été mesurés in situ en utilisant un multiparamètre WTW (multi 3420) et un turbidimètre WTW (Turb 430 IR).

Tableau I. Paramètres physiques de l'eau de la source d'Ain Khrouf

Paramètres	CE $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C	pH	Turbid (NTU)	T °C	O ₂ (mg/l)
Statistique					
Nombre de mesure	25	24	19	24	6
Minimum	452	6	0,3	14	0,86
Moyenne	620	7,336	2,515	18,65	7,33
Maximum	704,9	8,1	6,26	24,1	9,44
Normes de potabilité					
OMS	1116	6,5 à 9,5	-	25	-
Algérie	maximum 2800	6,5 à 8,5	minimum 2 (unité JACKSON)	-	-

L'eau de la source d'Ain Khrouf se caractérise par une température moyenne de l'ordre de 19°C et un pH plus ou moins neutre (de l'ordre de 7). Il s'agit d'une eau douce ($450 < CE < 700$

$\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C), claire (turbidité moyenne < 5 NTU) et bien aérée ($7,5 < \text{O}_2$ dissous $< 9,44$ mg/l)

L'analyse des éléments chimiques s'est effectuée selon différentes méthodes dans les laboratoires suivants : l'ADE d'Annaba, Laboratoire Sols et Développement Durable (LSDD), Département de biologie, Université Badji Mokhtar, Annaba et Laboratoire d'Analyse des Sols et des Eaux-Horizon, Annaba.

2.2. Concentrations des éléments majeurs de l'eau

2.2.1. Dureté totale (TH), titre hydrotimétrique (TAC) et dureté permanente de l'eau

La dureté a été mesurée sur huit échantillons (01 en 2014, 01 en 2105 et 06 en 2017) par la méthode volumétrique (tab. 2).

Le calcul de la dureté totale (TH), du titre hydrotimétrique (TAC) et de la dureté permanente de l'eau (P) est réalisé selon les formules suivantes :

$$\text{TH (még/l)} = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+});$$

$$\text{TAC} = 50 \times (\text{HCO}_3 + \text{CO}_3)$$

HCO_3 et CO_3 sont exprimées en még/l.

$$\text{P} = \text{TH} - \text{TAC}$$

où TH et TAC sont exprimés en mg/l de CaCO_3 .

Tableau 2. Calcul des titres hydrotimétrique et alcalimétriques des eaux d'Ain Khrouf (2017)

Eléments	Ca ²⁺		Mg		HCO ₃		TH		TAC		P	
	mg/l	még/l	mg/l	még/l	mg/l	még/l	mg/l	még/l	mg/l	még/l	mg/l	még/l
Minimum	40.8	2.0	9.7	0.8	121.8	2.0	3.7	186.5	2.0	99.5	0.2	8.5
Moyenne	53.2	2.7	21.6	1.8	181.2	3.0	4.3	212.5	3.0	148.5	1.3	63.1
Maximum	77.8	3.9	28.6	2.3	244.0	4.0	5.3	267.0	4.0	200.0	2.4	120.5
OMS	200	10	50	4.1	-	-	200 ppm	-	-	-	-	-
Algérie	75 à 200	3.7 à 10	15.0	12.3	-	-	100 à 500 mg/l CaCO ₃	-	-	-	-	-

L'eau de la source d'Ain Khrouf se démarque par une grande dureté (186,5-267,0 mg/l de CaCO_3). Le titre hydrométrique moyen s'estime à 212,5 mg/l de CaCO_3 . Selon les caractéristiques algériennes de qualité des eaux de source (J.O de la RADP, 2006), les eaux d'Ain Khrouf sont de bonne qualité (100-500 mg/l de CaCO_3). La teneur en bicarbonates varie approximativement de 100 à 200 mg/l de CaCO_3 avec une moyenne de l'ordre de 150 mg/l de CaCO_3 . Les sels de sulfates et chlorures de calcium et de magnésium représentent 63mg/l de CaCO_3 .

2.2.2. Les chlorures, les sulfates, le sodium et le potassium

Les teneurs en chlorures, sulfates et sodium sont relativement comparables et peu dispersées; les moyennes sont proches de 50 mg/l (tab. 03).
 Les résultats des analyses effectuées au LASE –Horizon montrent que les teneurs en potassium sont très faibles (4 mg/l).

Tableau 3. Résultats des analyses chimiques de l'eau d'Ain Khrouf

Date	Na ⁺		K ⁺		NH ₄ ⁺	Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		P O ₄ ³⁻	N O ₃ ⁻	NO 2 ⁻	Labo ratoi re
	m g /l	m e q/ l	mg /l	m e q/ l	m g/l	mg/ l	me q/l	m g/l	m e q/ l	mg /l	mg /l	mg/l	
26/0 1/17	-	-	-	-	-	70	1,9 7	41 ,8 2	0,8 7	-	-	-	LSD D
30/0 1/17	-	-	-	-	-	35	0,9 8	55 ,8 2	1,1 6	-	-	-	
07/0 2/17	-	-	-	-	-	70	1,9 7	58 ,3 3	1,2 1	-	-	-	
09/0 2/17	-	-	-	-	-	35	0,9 8	64 ,3 7	1,3 4	-	-	-	
11/0 2/17	-	-	-	-	-	35	0,9 8	20 ,1 4	0,4 2	-	-	-	
11/0 4/17	4 8	2, 0 8	4	0, 1	0, 14	71	2	80	1,6 6	1	22	0,1	LAS E- Hori zon
Sept 2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<1, 1	≤0,0 2	Labo - ADE
Mai 2015	-	-	-	-	< 0. 05	47, 98	1,3 5	< 20	< 0,4 2	-	<1, 1	≤ 0,04	
Statistique													
Mini mum	-	-	-	-	-	35	0, 98	20, 14	0,4 2	-	-	-	
Moy enne	-	-	-	-	-	51, 99	1, 46	53, 41	1,1 1	-	-	-	
Maxi mu	-	-	-	-	-	71	2	80	1,6 6	-	-	-	
Normes de potabilité													
OMS	2 0 0	8, 7	1 2	0, 3	-	25 0	-	25 0	10, 4	5	50	0,1	

Algérie	200	8,7	20	0,5	max 0,5	200 à 500	5,6 à 14	200 à 400	4,2 à 8,3	-	max 50	max 0,1
---------	-----	-----	----	-----	---------	-----------	----------	-----------	-----------	---	--------	---------

2.2.3. Phosphates (PO₄³⁻)

Les phosphates rejetés dans l'environnement proviennent, à parts sensiblement égales, de sources agricoles (engrais), industrielles et de détergents ou lessives phosphatées. La concentration en phosphate, (mesurée le 11/04/2017) est très faible (1 mg/l) et reste en dessous de la norme de 5 mg/l.

2.2.4. Composés azotés

Les prélèvements effectués par l'ADE (Septembre 2014 et Mai 2015) montrent que les teneurs en nitrates (<1,1 mg/l) et en nitrites (< 0,04 mg/l) sont inférieures aux normes de potabilité (50 et 0,1 mg/l ; respectivement).

Cependant, les analyses récentes du 11/04/2017 révèlent des teneurs relativement plus grandes (NO₃⁻ :22 mg/l et NO₂⁻ : 0,1 mg/l). Cette augmentation est probablement due à l'influence des activités humaines mais l'impact sur la santé reste non démontré.

Enfin, les teneurs en ammonium (NH₄⁺) des eaux de la source sont inférieures ou égale à 0,14 mg/l ; la norme algérienne de potabilité étant fixée à 0,5 mg/l.

2.2.5. Éléments en traces

Les éléments en traces, en particulier les métaux lourds, sont des polluants à fort impact toxicologique lorsqu'ils dépassent les normes. Les métaux toxiques sont nombreux, mais on peut citer le fer (Fe), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le plomb (Pb) et le manganèse (Mn). Ils ont des impacts sur les végétaux, les produits de consommation courante et sur l'homme. Les concentrations de ces éléments dans l'eau de la source d'Ain Khrouf sont, généralement, inférieures aux normes de l'OMS (tab. 04).

Tableau 4. Concentrations en mg/l des éléments en traces des eaux de la source

Les éléments	Fe	Cu	Zn	Pb	Mn
Concentration (mg/l)	0,01	0,001	0,1	0,015	0,1
Normes de potabilité					
OMS (mg/l)	-	-	3	0,01	0,4
Algériennes (mg/l)	0,3	1,5	5	0,055	0,5

2.2.6. Faciès chimique

Plusieurs méthodes de classification des eaux naturelles, le plus souvent graphiques, ont été définies dans la littérature (diagrammes de Piper, Schoeller-Berkaloff, Stiff, Stabler, etc.). Les résultats de l'analyse de l'eau d'Ain Khrouf ont permis de tracer les graphiques sus cités à l'aide de l'application 'Diagramme' du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon.

L'examen du diagramme de Piper (Fig. 4a) montre qu'il n'y a pas d'anions et de cations dominants et l'eau est considérée chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne. Au contraire, les autres représentations (Fig. 4b, Fig. 5a et 5b) indiquent une eau dont la composition hypothétique est bicarbonatée calcique et, à un degré moindre, sulfatée magnésienne et chlorurée sodique.

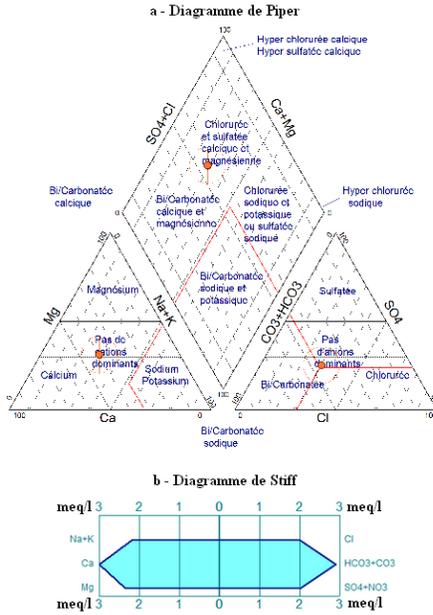


Fig. 4. Source d'Ain Khrouf : diagrammes de Piper (a) et de Stiff (b)

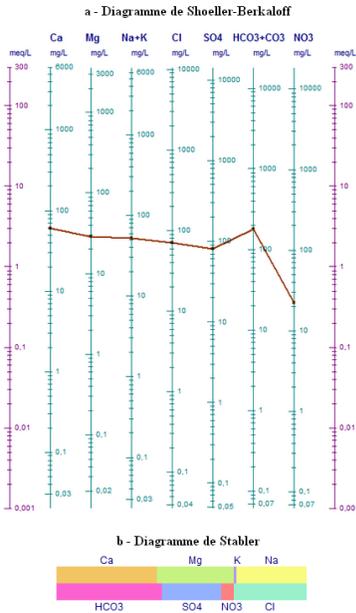


Fig. 5. Source d'Ain Khrouf : diagrammes de Schoeller-Berkaloff (a) et de Stabler (b)

2.2.7. Indices et rapports caractéristiques

2.2.7.1. Indice d'échange de base (i.e.b)

Au cours de son trajet souterrain, l'eau rentre en contact avec différentes substances qui ont la propriété d'échanger leurs ions contre ceux contenus dans l'eau, notamment les minéraux argileux (hydroxyde ferrique et substances organiques). Selon Schoeller (1934), l'indice d'échange de base (i.e.b), défini par le rapport des ions ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) à l'ion Cl^- , exprimés en meq/l, permet de tracer l'origine de l'eau :

- i.e.b < 0 ; eau d'origine cristalline.

- i.e.b = 0 ; équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et celle des terrains.

- i.e.b > 0 ; eau d'origine sédimentaire.

A la lumière du résultat de l'analyse, on s'aperçoit que l'eau de la source d'Ain Khrouf montre qu'il existe un équilibre entre la composition chimique de l'eau et celle des terrains encaissants avec une origine à tendance cristalline (i.e.b = -0,09).

2.2.7.1. Rapports caractéristiques

Le rapport caractéristique est défini comme étant le rapport de certains éléments chimiques exprimés en milliéquivalents par litre (tab. 5).

Tableau 5. . Source d'Ain Khrouf-Rapports caractéristiques

Source	$\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$	Na^+/Cl^-
Ain Khrouf	0,78	0,83	1,04

Le rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ est égal à 0,78. Ceci traduit la prédominance des ions calcium suite à la solubilité des calcaires métamorphiques (cipolins) présents dans le massif de Bouhamra.

Le rapport $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ étant inférieur à 1 ; soit 0,83 ; traduit la prédominance des chlorures issus de l'altération des argiles très abondantes dans le massif de Bouhamra.

Le rapport, $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ légèrement supérieur à 1 dans l'eau d'Ain Khrouf, indique la présence des ions Na^+ libres suite à une altération des silicates ou/et sodium des plagioclases dans les roches encaissantes.

2.3. Analyse bactériologique

Trois échantillons ont été prélevés au cours de la présente étude. L'analyse bactériologique de l'eau a été réalisée au niveau du Laboratoire d'Hygiène de la Wilaya d'Annaba, Direction de la Santé et de la Population (tab. 6)

Tableau 6. Résultats de l'analyse bactériologique de l'eau de la source d'Ain Khrouf (Valeurs moyennes - Prélèvement du 07/03/2017)

Coliforme totaux (g/100ml)	Coliformes fécaux (g/100ml)	Streptocoques fécaux (g/100ml)	Salmonella	Observation
00	00	00	Abs	Eau de bonne qualité microbienne

Il apparaît que sur le plan bactériologique, l'eau de la source est de bonne qualité

3. Place de la source d'ain khrouf dans le cadre géo-structural de l'Edough

Pour mieux comprendre la position géo-structurale de la source d'Ain Khrouf vis-à-vis des autres sources du massif de l'Edough, une analyse multidimensionnelle portant sur la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des observations s'avère nécessaire.

Dans cette analyse, les variables sont représentées par les valeurs moyennes des éléments physico-chimiques de l'eau et le débit d'écoulement et les individus correspondent aux lieux de prélèvement.

La méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH) a été appliquée sur les individus (sources) en utilisant la distance euclidienne comme mesure de distance et la méthode de Ward comme règle d'agrégation pour évaluer davantage la qualité de l'eau des sources du complexe de l'Edough (fig.6).

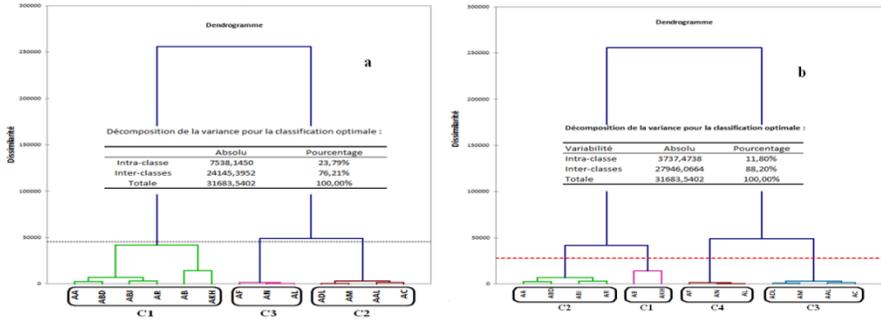


Fig. 6. Classification des sources du complexe structural de l'Edough: a- Partition en 3 classes ; b- Partition en 4 classes

Les dendrogrammes ci-dessus montrent la répartition des sources dans chaque groupe et illustrent l'affinité entre la source d'Ain Khrouf (AKH) et celle d'Ain Bendjallah (AB) qui correspond à la partition C I.

Le groupement en 3 classes montre que ces deux sources forment une partition satisfaisante avec les sources d'Ain Rahar (AR), de Boumendjel (ABJ), d'Ain Bouhadada (ABO) et d'Ain Achour (AA).

Il s'agit d'un groupe de sources (C I) dont les eaux sont caractérisées par une forte minéralisation.

Conclusion

Selon les résultats des analyses chimiques, très limitées dans le temps, la minéralisation des eaux de la source d'Ain Khrouf est contrôlée par plusieurs phénomènes : le lessivage des sols en période de hautes eaux, l'hydrolyse acide des roches sous-jacente (échanges de base) et probablement les activités anthropiques. Bien qu'elle soit de bonne qualité en termes de minéralisation globale, l'eau de la source est vulnérable à la pollution suite aux programmes d'extension urbaine de la commune d'El Bouni.

La présence des nitrates en quantité dépassant, légèrement, les normes algériennes de potabilité (22mg/l), est un signe précurseur d'une pollution d'origine anthropique.

Les analyses microbiologiques montrent bien que l'eau est jusqu'à présent exempte de toutes bactéries nuisibles à la santé humaine.

L'analyse statistique multi-variée, notamment la classification ascendante hiérarchique (CAH), a mis en évidence le lien entre cette source et certaines émergences situées sur le massif de Séraïdi.

Enfin, il est recommandé de faire des suivis réguliers pour mieux surveiller la qualité des eaux de la source et protéger la population qui continue à s'en servir sans aucun souci.

Bibliographie

- ALFARO, C. & WALLACE M. (1994) *Environmental Geology*, 24(2): pp 112-124.
 Brian, K. (1919). Classification of Springs : *The Journal of Geology* 27 (7), pp 522-561

DJORFI S., S. GUECHI, L. BELOULOU AND K. LAHMAR (2017). On the water quality degradation of the Séraïdi springs, Edough mountain (NE of Algeria), *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, Vol. 10, No. 3, p. 194-203.

EDBERG, S.C., RICE E.W., KARLIN R.J ET ALLEN M.J. (2000), *Escherichia coli*: the best biological drinking water indicator for public health protection. *Journal of Applied Microbiology*, 88:106S-116S.

JANG, C. S. (2010). Applying scores of multivariate statistical analyses to characterize relationships between hydrochemical properties and geological origins of springs in Taiwan. *Journal of Geochemical Exploration* 105: 11-18.

J.O de la RADP. (2006). Caractéristiques de qualité des eaux de source. Annexe II, *Journal Officiel de la République Algérienne* n°27.

HILLY J. (1962). Etude géologique du massif de l'edough et du cap de fer, (Est Costantinois), carte géologique Algérie, Bull, n° 19, thèse de doctorat. 399 p.

LAHMAR K. (2014). Les sources de Séraïdi : Note synthétique sur les données acquises. Mémoire de Master 2, département de géologie, université Badji Mokhtar, Annaba. 76 p.

LEVALLOIS, P. ET PHANEUF, D. (1994), La contamination de l'eau potable par les nitrates : analyse des risques à la santé, *Revue canadienne de santé publique*, 85(3), 192-196.

MCCUEN R.H. (1982). A guide to hydrologic analysis using SCS methods. Prentice Hall Inc., New Jersey, 145 p.

MEINZER, O.E. (1923). Large Springs in the United States: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 557, 94 p.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1995), *Nitrate and nitrite in drinking water*, National Academy of Science, 63 p.

OMS (2000), *Directives de qualité pour l'eau de boisson; volume 2 – critères d'hygiène et documentation à l'appui*. Organisation mondiale de la Santé, 2e édition, 1050 p. accessible à : www.who.int/water_sanitation_health/GDWQ/Summary_tables/

RODIER J. (2010) - *Analyse de l'eau naturelle, eau de mer et eau industrielle*. Édit. DUNOD, Paris, 984 p.

SCHOELLER, H. 1934. Les échanges de bases dans les eaux souterraines; trois exemples en Tunisie. *Bull. Soc. Géol. Fr.* 4, 389-420.

WORD HEALTH ORGANISATION (WHO). 2011. Nitrate and nitrite in drinking water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking water Quality http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/nitratenitrite2ndadd.pdf (accessed on May 31, 2017).

Apport de la piézométrie et de la température à la détermination de l'origine des eaux souterraines de la nappe alluviale de Oued Biskra (Algérie)

Faissal Later, Abdallah Labadi, Mohamed Tahar Kaddouri

Laboratoire aménagements hydrauliques et environnement, Université de Biskra (Algérie), E-mail :
fysl.lat@gmail.com

Résumé :

La nappe alluviale de l'oued Biskra (ville du Sahara algérien) est localisée juste à l'amont de la ville de Biskra. Cette nappe présente une superficie de 5km² et a une épaisseur moyenne de 20m ; le volume d'alluvions déduit de la géophysique étant de 100 hm³. Les calculs de la porosité effectués sur les courbes des piézomètres de la nappe ont fourni une valeur moyenne de $\phi = 30\%$, soit pour un volume d'alluvions de 100 hm³, un volume emmagasiné d'eau exploitable de 30 millions de m³ environ. L'alimentation de la nappe des alluvions de oued Biskra semble provenir de deux origines différentes : Une alimentation par les eaux de crues de l'oued et une autre superficielle, par des apports pluviométriques (150 et 200 mm/an).

Actuellement 14 forages captent les eaux de cette nappe et les débits exploités s'élèvent au total à 1409 m³/h.

Le suivi heure par heure de la variation du niveau piézométrique et de la température des eaux souterraines a mis en évidence l'existence d'une troisième source d'alimentation ; il s'agit d'eau profonde mésothermale qui remonte vers la nappe et apporte à l'aquifère une quantité supérieure à celle fournit par les eaux de crue.

La présence de cette source d'alimentation explique le non tarissement de la nappe pendant les longs étés secs et les périodes de sécheresse.

Mots-clés : Nappe alluvionnaire, Piézométrie, Température, eau mésothermale, Biskra, Algérie

Contribution of piezometry and temperature to determine the origin of groundwater in the alluvial aquifer Oued Biskra (Algeria)

Abstract:

The alluvial aquifer of Wadi Biskra (city of the Algerian Sahara) is located just upstream of the city of Bis-kra. This sheet has an area of 5km² and has an average thickness of 20m; the volume of alluvium deduced from the geophysics being 100 hm³. The calculations of the porosity made on the curves of the piezometers of the aquifer yielded an average value of $\phi = 30\%$, ie for a volume of alluvium of 100 hm³, a stored volume of exploitable water of about 30 million m³. The feeding of the sheet of Wadi Biskra alluvia seems to come from two different origins: Feeding by the flood waters of the wadi and another superficial one, by pluvio-metric contributions (150 and 200 mm / year).

At present, 14 boreholes capture the waters of this aquifer and the flows used total a total of 1409 m³/h. The hour-by-hour monitoring of the variation of the piezometric level and the groundwater temperature re-vealed the existence of a third source of food; it is deep mesothermal water that goes up to the aquifer and brings to the aquifer a quantity greater than that provided by the flood waters.

Key Words: Alluvial layer, Piezometry, Temperature, mesothermal water, Biskra, Algeria.

Introduction

La région de Biskra est située au Sud-Est Algérien (le nom géographique de la région est les Zibans -pluriel de Zab). D'un point de vue géologique, la région de Biskra se présente comme un pays de transition structural et sédimentaire entre deux domaines ; atlasique au Nord et saharien au Sud.

Les études géologiques (Cornet, 1964 ; Busson, 1971 ; ERESS, 1972 ; Fabre, 1974 ;) et hydrogéologiques ont permis de mettre en évidence l'existence de plusieurs réservoirs aquifères d'importance bien distincte de par leur constitution lithologique, leur structure géologique et les facilités d'exploitation qu'ils présentent. Ces aquifères appartiennent au Quaternaire, au Mio-Pliocène, à l'Eocène inférieur et au Sénonien supérieur (Maestrichtien) et à l'Albien.

Les nappes alluviales sont traditionnellement exploitées dans les Zibans et sont même à l'origine de certaines palmeraies qui étaient alimentées directement grâce aux sources et aux nombreux puits traditionnels. On classe dans cette catégorie la nappe alluviale de oued Biskra en amont de la ville.

En effet, depuis la plaine d'El Outaya au nord jusqu'à la limite de la ville de Biskra au sud, l'oued El Hai- Biskra serpente sur une épaisse couche d'alluvions formées de sables, graviers, galets, déposés par le cours d'eau dès le début du Quaternaire. Très perméables et poreuses, les alluvions emmagasinent l'eau formant ainsi une masse d'eau souterraine que l'on nomme nappe alluviale de oued Biskra. Le sous-sol marneux et imperméable du Miocène sur lequel elle repose forme le substratum de cette nappe.

Les débits d'eau extraits par pompage de cette nappe (plus de 1400 m³/h) sont très supérieurs aux débits entrants par infiltration lors des rares crues de l'oued et des précipitations annuelles qui ne dépassent pas les 125 mm/an.

Moyens et méthodes

Les études hydrogéologiques concernant l'aquifère alluvionnaire de oued Biskra sont extrêmement rares. La seule étude est celle réalisée en 1967 par la Société Centrale pour l'Equipement du Territoire (SCET-COOP), aucune autre étude de détail n'a été réalisée depuis.

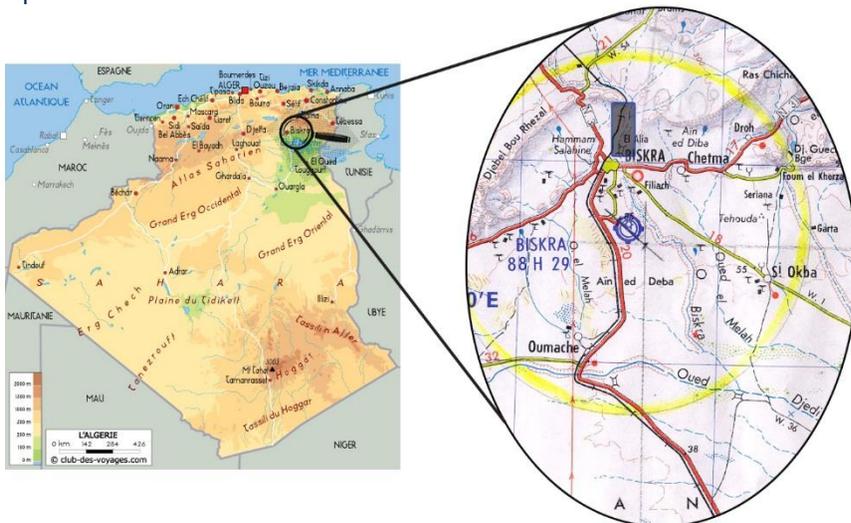


Figure 1. Situation de la nappe alluviale

L'aquifère est de forme allongée et de direction générale nord-sud (figure 2). Cette forme a été façonnée par l'écoulement de l'oued creusé dans les marnes imperméables du Miocène et remblayé par des dépôts alluvionnaires.

La nature lithologique de cette nappe est graveleuse, caractérisée par la présence de galets, cailloutis, graviers, sables et des formations conglomératiques. Les calculs de la porosité effectués sur les courbes des piézomètres de la nappe ont fourni une valeur moyenne de $\phi = 30\%$, soit pour un volume emmagasiné d'eau exploitable de 30 millions de m^3 environ, un volume d'alluvions de 100 hm^3 déduit de la géophysique (SCETCOOP, 1967).

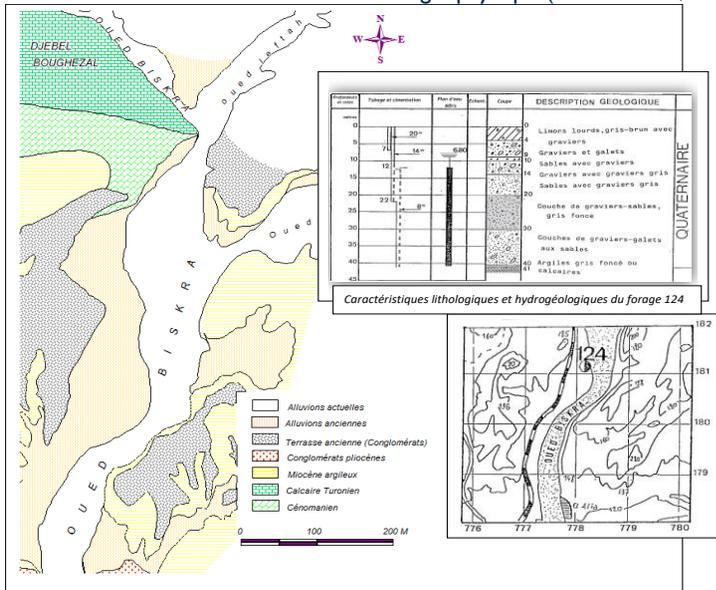


Figure 2. Esquisse géologique de la nappe alluviale

A l'image d'un climat capricieux, les cours d'eau alimentant la région de Biskra ont un écoulement périodique très irrégulier (3 à 4 crues par ans). Les oueds les plus importants prennent naissance dans les Aurès (versant Sud), où les précipitations sont de l'ordre de 400 à 500 mm/an.

L'irrégularité des écoulements des oueds, accentuée par la faiblesse (sinon l'absence) d'un équipement hydrométrique, rend extrêmement difficile la quantification des écoulements à différents niveaux des oueds.

L'exploitation des relevés effectués à la station de Djemorah (principal oued alimentant la nappe alluviale) au cours de la période 1971-78 fournit un débit moyen de $0.68 \text{ m}^3/\text{s}$. Néanmoins, nous constatons qu'au cours de cette période, l'oued a connu deux valeurs de débits extrêmes ; la première de $55.8 \text{ m}^3/\text{s}$ le 04 /11/1972 et la deuxième de $15.1 \text{ m}^3/\text{s}$ le 30/11/ 1972

La période 1988-1993 quant à elle, présente trois événements extrêmes ; le premier le 25 mai 1989, le deuxième le 11 novembre 1990 et le troisième le 7 novembre 1992 avec respectivement 3.12 , 2.77 et $5.69 \text{ m}^3/\text{s}$. Les autres valeurs ne dépassent guère $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces valeurs démontrent encore une fois l'influence et l'importance des précipitations orageuses de l'automne et du printemps sur les eaux de surface.

Actuellement 14 forages captent les eaux de cette nappe et les débits exploités s'élèvent au total à $1409 \text{ m}^3/\text{h}$. Afin de suivre la variation du niveau piézométrique dans le champ de captage d'oued Biskra, notre choix s'est porté sur deux forages ; le BI et le SIF4. Les caractéristiques de ces forages sont présentées dans le tableau I.

L'utilisation de deux TD-Diver (capteurs de pression et de température de marque VanEssen) nous a permis de suivre, heure par heure, durant la période du 22/05/2018 au

05/06/2018, la variation du niveau piézométrique et de la température des eaux souterraine après un épisode pluvieux qu'a connu la région.

Tableau I : Caractéristiques du forage B1 et SIF4.

Nom du forage	Lieu	Coordonnées	Année de réalisation	Profondeur (m)		Niveau statique (m)	Niveau dynamique (m)	Débit d'exploitation (l/s)		Etat de forage
				Initiale	Actuelle			Initial	Actuel	
B1	Oued Biskra	05°44'06,70" 34°52'49,80"	1954	41	37.10	25	30.20	130	46	En service
SIF4	Oued Biskra	05°44'32,80" 34°53'10,40"	1970	37	30.40	24.37	/	30	/	A l'arrêt

2. Résultats et discussions

2.1 La variation du niveau d'eau

Les données de la variation de la pression ($P_{atm} + P_{hauteur\ d'eau}$) et de la température de l'eau souterraine que nous avons obtenue à partir des TD-Diver installées au niveau des forages B1 et SIF4, ont été transférées à l'aide du logiciel Diver-Office. La première étape de traitement est la compensation des valeurs de pression afin qu'il ne reste que la pression hydrostatique. Cette étape a donné les schémas des figures 3 et 4 dans lesquelles on retrouve la variation du niveau d'eau par rapport à la tête du forage (pression compensée).



Figure 3. Variation du niveau d'eau par rapport à la tête du forage B1



Figure 4. Variation du niveau d'eau par rapport à la tête du forage SIF4

Pour bien observer la fluctuation de la nappe, et pour que les graphiques soient plus explicites, nous avons remplacé la variation de la profondeur du niveau d'eau à partir de la tête du forage par la variation de la hauteur de l'eau. Cette transformation a abouti à la figure 5.

Nous pouvons de prime abord constater une différence dans l'évolution des niveaux d'eau entre les deux forages. Ce qui est remarquable c'est que le niveau d'eau dans le B1 a augmenté de 1,30 m alors que dans le SIF4 il n'est que de 0,95 m, malgré que la distance qui les sépare n'est que de 925 m. Ce phénomène est dû, fort probablement, au fait que la zone du B1 possède une perméabilité beaucoup plus importante que la zone du SIF4 et que le B1

soit proche de la zone d'alimentation. En plus, l'augmentation du BI s'effectue alors que le pompage est en marche (46 l/s).

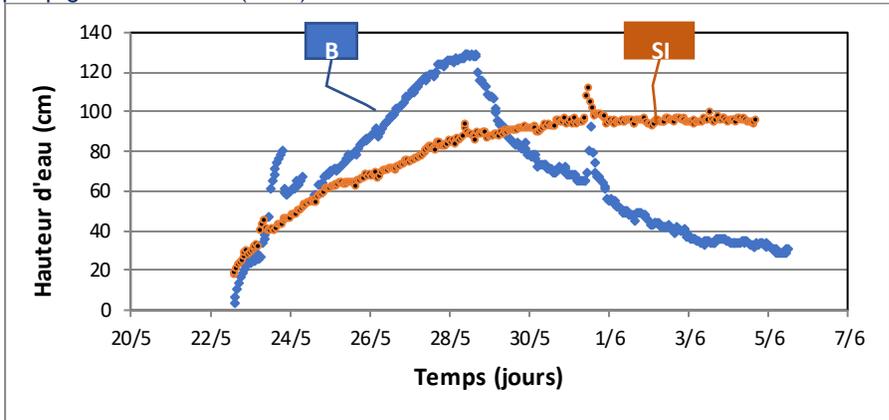


Figure 5. Fluctuation de la nappe au forage BI et SIF4.

Le 28 mai à 11h le BI entame la décrue, signalant ainsi que le débit extrait (sortant) est devenu supérieur au débit entrant (débit alimentant la nappe), alors que dans le SIF4 on observe une phase d'équilibre avec une stabilisation du niveau d'eau jusqu'à la fin de l'essai. La vitesse de la décrue du BI est plus importante que la crue, elle se poursuit jusqu'à la fin de l'essai. Le pompage du BI introduit d'autres facteurs qui peuvent contribuer à la variation du niveau d'eau, comme l'arrêt ou le redémarrage de la pompe, la diminution ou l'augmentation du débit de pompage (présence de deux pompes dans le forage), ... La deuxième chose importante qu'il faut signaler, et l'apparition d'une augmentation du niveau d'eau dans les deux forages le 31 mai à 9h, suivi après quelques heures d'une décrue. Le temps de cet épisode est de 40 heures. Il s'agit là d'une phase d'alimentation de la nappe alluviale par la crue de l'oued pendant cette période. Cette séquence est, à notre avis, une preuve que la part de Oued Biskra dans l'alimentation de la nappe alluviale pendant les périodes de crue est très minime et que l'alimentation de l'aquifère alluvionnaire doit se faire par ascendance à partir des aquifères profonds (aquifère du Turonien).

2.1 La variation de la température de l'eau

Les températures des eaux de la nappe alluvionnaire varient de 25 à 31 °C. Elles sont anormalement élevées, puisque le niveau statique n'est qu'à 25 m du sol. Ceci apporte un argument supplémentaire qui confirme l'alimentation de la nappe par des eaux profondes assez chaudes.

La figure 6 montre clairement l'augmentation de la température des eaux du SIF4 en même temps que l'augmentation du niveau d'eau dans le forage. Cet événement prouve que l'alimentation de la nappe se fait principalement par des eaux chaudes.

Nous expliquons la différence de température de 5°C entre le SIF4 et le BI par le fait que ce dernier est en perpétuel pompage et que les eaux de cette zone ne sont pas au repos comme celles du SIF4, au contraire, elles sont en perpétuel régénération. Ainsi, le pompage fait appel, d'une manière constante, aux eaux chaudes provenant de la zone d'alimentation. Un autre argument en faveur de notre hypothèse, est la légère diminution de la température lors de la recharge de la nappe par les crues de l'oued.

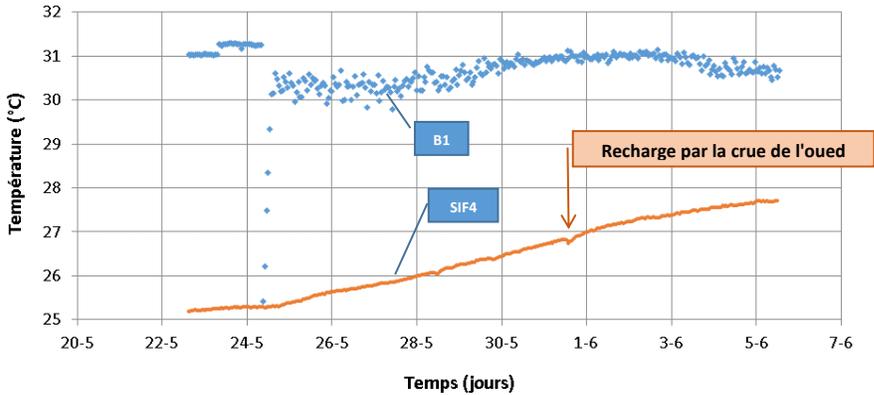


Figure 6 : Variation de la température du BI et du SIF4

Conclusion

Nous avons voulu, à travers cette étude, approcher au mieux les caractéristiques hydrodynamiques de cette nappe à travers le suivi de la variation du niveau piézométrique et de la température des eaux.

Les principaux objectifs à l'origine de ce suivi étaient les suivants :

- acquérir une meilleure connaissance du fonctionnement de l'aquifère par des enregistrements continus des niveaux,
- suivre l'évolution dans le temps du niveau en différents points du cours de la nappe alluviale,

L'équipement des forages B1 et SIF4 d'enregistreurs numériques de niveau d'eau, nous a été d'un grand secours quant à l'obtention d'une série de mesure heure par heure.

Les résultats ont mis en évidence plusieurs phénomènes hydrogéologiques, à savoir :

- Une augmentation du niveau de la nappe de 1 mètre, attestant une alimentation de l'aquifère après la période pluvieuse qu'a connu la région.
- Cette augmentation s'est faite d'une façon différente d'une zone à une autre de la nappe.
- Une alimentation de la nappe par des eaux chaudes avec des températures de 31°C.
- Une infiltration des eaux de crues quoique très inférieure à l'alimentation par les eaux profondes appartenant à des aquifères profonds.

Références

- BUSSON G. (1971). Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Thèse Doct. Sc. Univ. Paris, 441p.
- CORNET A. (1964). Introduction à l'hydrogéologie Saharienne. SNED, Alger Algérie, 572p. ; Cornet et Gouscov, 1952.
- FABRE J. (1976). Introduction à la géologie du Sahara Algérien. SNED, Alger Algérie, 422p.
- Haouchine, A. & al. (2010). Cartographie de la recharge potentielle des aquifères en zone aride. Cas de la plaine d'El Outaya, Biskra -Algérie-. European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol.45, Issue 4.
- LABADI, A.S ; MEDDI, M. (2008). Impact de la construction du barrage fontaine des gazelles sur la nappe alluvionnaire de oued Biskra. Séminaire National « L'eau dans son environnement » S.N.E. Blida, 08 et 09 juin 2008
- LABADI A.S. (2013). Contribution de l'hydrochimie à la connaissance de la structure et du fonctionnement des aquifères du Sahara septentrional. Thèse Doc. Sc. Univ. Biskra.
- Laffitte, R. (1939): Etude géologique de l'Aurès. Bull. Serv. Carte Géol. Algérie 2ème Série, Stratigr. Descript. Régio., n°15, 451 p.
- R.C (1967). Oued Biskra Eaux Souterraines, Etude des ressources exploitables sur analyseur électrique à réseau. Société d'Exploitation Urbaine et Rurale des Eaux du Sahara (S.O.D.E.X.U.R.). Département Hydrologie de la Société Centrale pour l'Equipement du Territoire (S.C.E.T./COOPERATION)
- UNESCO (1972). Projet ERESS; Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional, et rapport sur les résultats du Projet REG-100, UNESCO, Paris (1972).

Analyse De La Fracturation Extraite Des Images Satellites De La Région De Katiola : Contribution A La Caracterisation Des Reserves Souterraines

Franck Maxime Gnamba¹, Théodore Yao Koffi², Derving Baka³

¹Département de Géosciences, UFR des Sciences Biologiques, Université Peleforo Gon Coulibaly, BP 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire, +225 07-33-02-28/40-67-09-78, fmgnamba@gmail.com

²Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), UFR STRM, Université Félix Houphouët-Boigny, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire, +225 08-87-08-82, koffiyao@gmail.com

³Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), UFR STRM, Université Félix Houphouët-Boigny, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire, +225 07-65-05-94, bakad@gmail.com

Résumé :

Les fractures en zone de socle sont le siège de circulation et d'accumulation des eaux souterraines. La zone d'étude est située dans le centre-nord de la Côte d'Ivoire, en milieu de socle cristallin et cristallophyllien où la fracturation est bien développée. Pour caractériser le réseau des fractures, les techniques de télédétection et de statistique ont été utilisées. Le traitement des images satellites a permis de générer une carte de linéaments qui a été par la suite validée sur la base des études antérieures. L'analyse statistique des fractures indique que les longueurs s'étendent de 0,43 à 31,86 Km avec une classe principale (63 %) présentant des longueurs comprises entre 5 km et 15 km. Les espacements s'étendent de 0,32 à 15,71 km. L'ajustement des longueurs de fractures à la loi puissance indique que les fractures auraient atteint un stade de développement avancé. La fracturation de la région de Katiola manifeste une certaine structuration dans l'espace où elle se déploie et répond clairement à la définition de "variable régionalisée". L'ensemble des résultats obtenus contribue à une meilleure connaissance des réseaux de fractures de la région de Katiola et peut orienter lors des campagnes de prospections.

Mots-clés : Images satellites, Télédétection, Fractures, Katiola, Côte d'Ivoire.

Analysis Of Fractures Network From Satellite Images Of Katiola Area: Contribution To Caracterisation Of Groundwater Reserves

Abstract :

Fractures network in the basement area are the seat of circulation and accumulation of groundwater. The area of study is located in the center-north of the Côte d'Ivoire, in medium of crystalline and cristallophyllien basement, where the fractures are well developed. We use to identify the fractures network, the technic of remote sensing and statistics. The treatment of satellite image generate a chart of features which was validated thereafter on the basis of former study. The statistical analysis of the fractures indicates that the lengths extend from 0,43 to 31,86 km, with a principal class (63 %) presenting lengths ranging between 5 km and 15 km. Spacings of fractures network extend from 0,32 to 15,71 km. The adjustment lengths of fractures to the law power indicates that the fractures would have reached a stage of advanced development. The fracturing of the area of Katiola thus expresses a certain structuring in space where it is spread and answered clearly the definition of "regionalized variable". The sum of the results contributes to a better knowledge of the fracture networks of Katiola area and could guide during surveys campaigns.

Key Words: Satellite images, Remote sensing, Fractures, Katiola, Côte d'Ivoire

Introduction

Les réseaux de fractures constituent les principaux chemins des écoulements souterrains et partants, du transport de solutés, de polluants, de masses et de chaleur dans les roches. Ainsi, les réservoirs fracturés occupent une place de plus en plus importante dans la prospection des eaux souterraines et des fluides géothermiques [1]. La caractérisation de la géométrie du réseau de fracture affectant un réservoir rocheux est donc essentielle pour la compréhension et la modélisation des circulations.

Les roches des socles cristallin et cristallophyllien sont intrinsèquement très peu perméables. Les fractures qui les affectent sont à l'origine de la quasi-intégralité de leurs propriétés de perméabilité (perméabilité de fractures). Dans les régions où les formations géologiques sont majoritairement constituées de socle comme c'est le cas de la Côte d'Ivoire (plus de 97 %), l'étude des réseaux de fractures est fondamentale pour la recherche en eaux souterraines. En effet, l'essentiel des ressources en eau souterraine du pays est contenu dans les réservoirs formé par le socle fracturés ([2] : [3]). La connaissance du milieu fracturé apparaît comme une nécessité en vue d'une meilleure gestion et exploitation de ces ressources en eau.

La fracturation peut être étudiée aux moyens de différentes méthodes telles que la géophysique et la télédétection (photographies aériennes et satellitaires, imagerie radar). La télédétection, grâce à sa vision synoptique constitue un puissant outil pour l'étude de la fracturation et le traitement des données satellitaires est devenu incontournable pour l'évaluation des ressources naturelles [4].

L'objectif de ce travail est donc de mettre en évidence et d'analyser statistiquement les réseaux de fractures extraits des images radar des roches du socle paléoprotérozoïque de la région de Katiola. Ces réseaux sont susceptibles de développer de bons aquifères souterrains, et ce travail se veut une contribution à une meilleure connaissance de la géométrie des réservoirs fracturés de la région de Katiola.

I. Cadre d'étude et contexte géologique

La région de Katiola est située à 434 km d'Abidjan au Centre-Nord de la Côte d'Ivoire. Elle est comprise entre les longitudes 4°75 et 5°75 Ouest et les latitudes 7°95 et 9°45 Nord. Elle s'étend sur une superficie de 9452 km² soit environ 3% de la superficie totale du territoire, avec une population estimée à 165652 habitants. Le contexte climatique de la région dérive de l'interface entre climat soudanien et guinéen. La région est drainée par deux principaux fleuves et leurs affluents qui constituent des limites naturelles du département, le Bandama à l'Ouest et le N'Zi à l'Est.

Au plan géologique, la région se situe dans le domaine Baoulé-Mossi et est constituée d'une diversité de formation birimien dont les principales sont : des granitoïdes calco-alcalins et alumino-potassiques (granites à deux micas), des métavulcanites, des roches vertes, et des métasédiments [5]. Les formations cristallines se composent essentiellement de migmatites et granites indifférenciés, de gneiss ainsi que de granites syntardi-tectoniques recoupant des séquences volcano-sédimentaires dans la majeure partie du département de Katiola (Figure 1). Du point de vue hydrogéologique, on note la présence de trois types d'aquifères ; les aquifères d'altérites, les aquifères de fissures, et les aquifères de fractures.

II. Matériel et méthodes

II.1. Données

Les données cartographiques utilisées sont des cartes topographiques et géologiques au 1/200 000 du degré carré de Katiola obtenues auprès du Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT). L'extraction de la carte des linéaments a été obtenue à partir d'une scène de RADARSAT-1 de résolution 50 X 50 m prise en janvier 2001. Contrairement aux images optiques, les images radars permettent de visualiser de vastes régions dans des conditions atmosphériques diverses. Elles sont surtout sensibles à la topographie, à la rugosité et à l'humidité de la surface et pénètrent la végétation et la couverture pédologique,

même épaisses. Elles ont donc retenu notre attention pour l'étude de la fracturation de la région de Katiola.

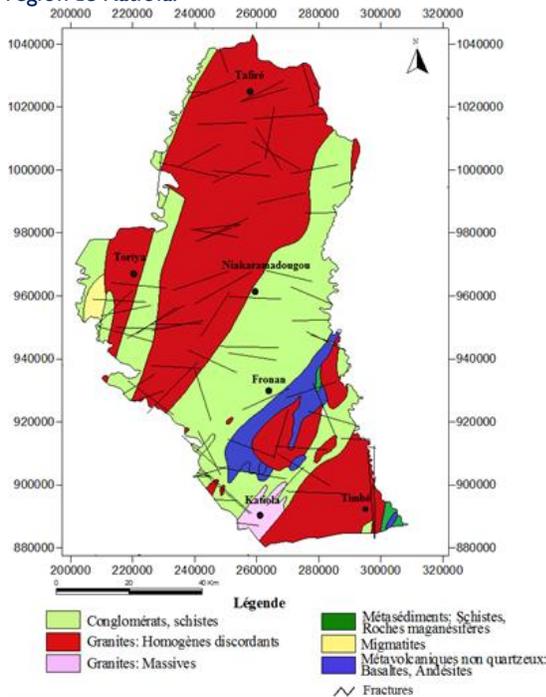


Figure 1. Carte géologique de la région de Katiola

II.2. Méthodes

Le traitement des images radar commence par la réduction des chatoiements qui rendent l'interprétation malaisée. L'utilisation des filtres adaptatifs réduit le chatoiement, tout en préservant l'information radiométrique et la variation spatiale (texture et contours). Les filtres Gamma, Kuan, Frost et Lee ont été utilisés dans cette étude car nous ayant donné les meilleurs résultats. Les images brutes ainsi générés ont été utilisés comme images d'entrée pour l'application de techniques plus pertinentes pour le rehaussement des structures linéaires correspondant à des discontinuités lithologiques et structurales. Il s'agit notamment des techniques de filtrages. Les différents filtres utilisés sont regroupés en filtres non directionnels (Laplacien modifié et gradient) et en filtres directionnels. Les filtres de Sobel 7×7 (affectés du poids 6) dans les directions N-S ; E-O, NE-SO et NO-SE ont été utilisés. La deuxième phase de la cartographie structurale est la validation de la nature structurale des linéaments issus de l'interprétation des images satellitaires. Ainsi, les données auxiliaires issues des cartes géologiques ont été comparées aux structures linéaires ou alignements morpho-structuraux (AMS) extraites des images satellitaires afin de leur donner une signification structurale [6]. Cette étape nous a permis de générer la carte détaillée du réseau de fracture de la zoné d'étude.

Le réseau de fractures a été ensuite soumis à une analyse statistique et géostatistique. Dans le premier cas, le traitement statistique des données relatives à la fracturation permet de définir divers paramètres géométriques : orientations, longueurs, espacement des fractures, ainsi que leur loi de distribution. Dans le second cas, il s'est agit d'analyser le variogramme expérimental de la densité de fracturation. Il est défini par :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{VAR}[Z(x+h) - Z(x)] \quad (2)$$

III. Résultats et discussions

III.1. Résultats

III.1.1. Analyse statistique des paramètres géométriques du réseau de fractures

La carte détaillée des linéaments réalisée grâce à une interprétation des images dérivées des différentes techniques de traitements est présentée à la figure 2. Elle comporte au total 2621 linéaments et il est possible de voir sur la carte les nœuds constitués par les intersections de fractures ayant un intérêt hydrogéologique non négligeable.

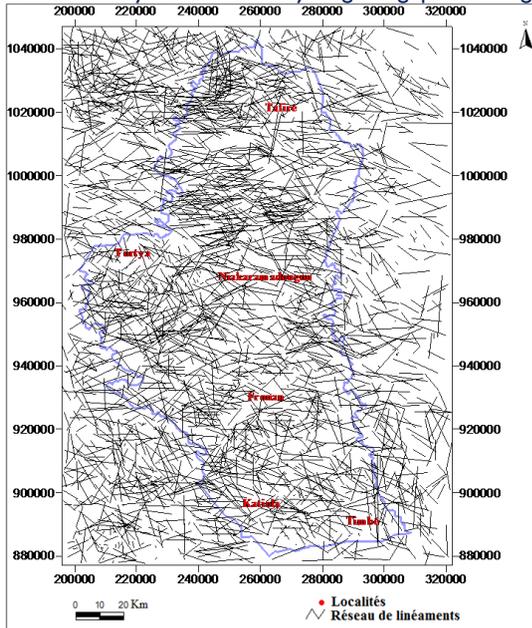


Figure 2. Carte des linéaments détaillés de la région de Katiola

L'orientation du réseau de fracture montre une hétérogénéité des directions avec 17 classes d'orientation par croissant angulaire de 10 degré. Elle indique une prédominance des fractures de directions N90-100 qui représentent plus de 14% en fréquence. Certaines familles présentent des pics directionnels et se démarquent de l'ensemble avec des fréquences proches de 10%. Il s'agit respectivement des directions N100-110, N110-120 et N0-10 dont les fréquences oscillent entre 8 et 10%.

Les longueurs de fracture sont comprises entre 0,43 km et 31,86 km avec une valeur moyenne de 7,21 km. La majorité des linéaments de la zone ont des tailles inférieures à 30 km. Les longueurs de fractures ont été ajustées aux modèles théoriques ; exponentiel, log normal, gamma et puissance. Le test de conformité du Khi-2 est négatif pour les trois premiers modèles au seuil de signification de 10 %. Cependant les longueurs de fracture s'ajustent à une loi puissance d'expression :

$$N(\ell) = 35673 \times \ell^{-2,79} \quad \text{avec } R^2 = 0,92 \quad (2)$$

L'exposant caractéristique de cette loi est de 2,79.

Le nombre total d'espacements entre linéaments recensé est de 768. Ces espacements varient de 0,32 10^{-4} km à 15,71 km avec une moyenne de 2,52 km. La majorité des linéaments (52%) ont des espacements inférieurs à 2 km.

III.1.2. Analyse géostatistique de la fracturation

Le variogramme expérimental de la densité de fracture obtenu est illustré à la figure 3. Il est caractérisé par les équations suivantes :

$$\gamma(h) = 83,33 + 250,22 \left[\frac{3}{2} \times \frac{h}{82,81} - \frac{1}{2} \times \left(\frac{h}{82,81} \right)^3 \right] \quad \text{pour } h \leq 82,81 \tag{3}$$

$$\gamma(h) = 83,33 + 250,22 \tag{4} \quad \text{pour } h > 82,81$$

Où : h représente la distance entre deux supports

Le graphe du variogramme a permis de définir la valeur de la portée pratique des fractures (a = 82,81 km).

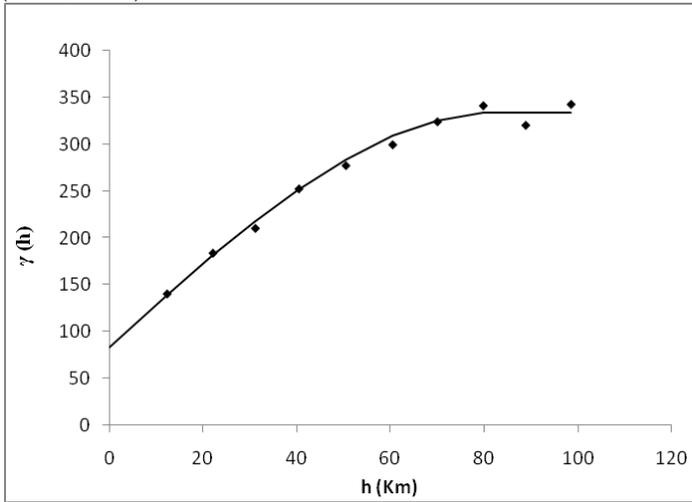


Figure 3. Variogramme de la fracturation tous azimut, Ajustement à un modèle sphérique

III.2. Discussions

La caractérisation de la géométrie du réseau de fracture, affectant un réservoir rocheux est devenue essentielle pour la compréhension et la modélisation des circulations [1]. En effet, en milieu de socle, les fractures sont le siège de circulation et d'accumulation des eaux souterraines ([7] : [8]). Ainsi la prospection hydrogéologique par diverses méthodes (télé-détection, géophysique) permet d'identifier et de localiser les réseaux de fractures susceptibles de constituer des réservoirs d'eau. Elle permet aussi de réduire le taux d'échec enregistré lors de l'implantation des forages, basé uniquement sur des considérations géomorphologique ([9] : [10] : [11]). L'orientation majeure des fractures de la région d'étude N90-N100 s'inscrit dans la gamme des principales directions tectoniques du socle ivoirien et d'Afrique : N170-N190, N80-N100, N30-N60, N120-N160 [2]. La distribution des longueurs de fractures de la région de Katiola suivant la loi puissance, indique que le réseau de fracture aurait donc atteint un stade de développement avancé. Elle caractérise les fractures comprises entre 4,54 et 23,56 km. Pour les fractures de tailles inférieures, il ya un problème de sous échantillonnage qui ne permet pas de rendre compte des petites fractures ([12] : [13]). En outre, la distribution de ce paramètre suivant cette loi indique que les réseaux de fracture de la région de Katiola possèdent également des propriétés d'auto-similarité ou un caractère fractal [6]. L'analyse géostatistique des réseaux de fractures, indique que la fracturation étudiée se comporte comme une variable régionalisée. L'existence d'un palier au niveau du variogramme traduit un phénomène stationnaire d'ordre 2 [14]. L'hypothèse

de stationnarité admise est vérifiée dans les travaux de [15] dans le sud-est de la Côte d'Ivoire.

Conclusion

L'ensemble des connaissances acquises sur la fracturation de Katiola œuvre à une meilleure connaissance de la géométrie du système fracturé et partant des réservoirs souterrains. Les différents traitements effectués à partir de l'image radar ont permis de ressortir 2621 fractures, de longueurs et d'espacements de fractures en majorité compris respectivement entre 5 et 15 km et 0 et 2 km. Les analyses effectuées sur les réseaux de fractures font ressortir que la direction E-O est l'orientation majeure dans la région. La distribution des longueurs de fractures suivant la loi puissance met en évidence le caractère fractal et le stade de développement avancé du réseau étudié. Elle reste valable pour des longueurs des fractures comprises entre 4,54 et 23,56 Km. L'analyse géostatistique fait ressortir que la fracturation globale manifeste une certaine structuration dans l'espace. Elle se déploie et répond clairement aux caractéristiques d'une variable régionalisée avec une portée pratique de 82,81 km. En somme, La carte détaillée du réseau de fractures obtenu dans le cadre de cette étude n'est certes pas exhaustive, cependant elle est représentative de la fracturation de la région de Katiola et peut servir de base pour la caractérisation des réservoirs discontinus.

Références

- [12] A. Genter, C. Castaing, P. Martin, Evaluation de la fracturation des réservoirs par forages : comparaison entre les données de carottes et d'imagerie de paroi. Revue de l'Institut Français du Pétrole, 52 (1997), 45-60.
- [13] J. Biémi, Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale hydrodynamique, hydrochimique et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aire granitique de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Université Abidjan 1992.
- [14] T. Lasm, K.F. Kouame, Y.M.-S. Oga, J.P. Jourda, N. Soro, B.H. Kouadio, Étude de la productivité des réservoirs fracturés des zones de socle. Cas du noyau archéen de Mandanané (Ouest de la Côte d'Ivoire), Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies, 5 (2004), 97-115.
- [15] M. Youan TA, Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : cas de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 2008.
- [16] S. Doumbia, Géochimie, géochronologie et géologie structurale des formations birimiennes de la région de Katiola-Marabadiassa (Centre-Nord de la Côte d'Ivoire), évolution magmatique et contexte géodynamique du paléoprotérozoïque, Thèse de Doctorat, Université d'Orléans 1997.
- [17] T. Lasm, Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: Analyses statistiques et géostatistiques de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine Archéen), Thèse de Doctorat, université Poitiers, 2000.
- [18] Y.A. N'go, T. Lasm, M. Koita, I. Savane, Extraction par télédétection des réseaux de fractures majeures du socle précambrien de la région de Dimbokro (Centre Est de la Côte d'Ivoire). Télédétection, 9 (2010), 33-42.
- [19] N. Guihéneuf, A. Boisson, O. Bour, B. Dewandel, J. Perrin, A. Dausse, M. Viossanges, S. Chandra, A. Ahmed, J.C. Maréchal, Groundwater flows in weathered crystalline rocks: Impact of piezometric variations and depth-dependent fracture connectivity. Journal of Hydrology 511 (2014), 320–334.

- [20] I. Savané, B. Goze, J. Biémi, Evaluation des ressources en eau dans le socle par l'étude des fractures à l'aide des données Landsat (Bassin d'Odienné, Côte d'Ivoire). Télédétection et Gestion des ressources en Eau, Montpellier, Novembre 29–01 (1995).
- [21] J.P. Jourda, Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat d'Etat, Université Abidjan, 2005.
- [22] B. Dibi, Cartographie des sites potentiels d'implantation des points d'eau dans le département d'Aboisso (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) : apport du SIG et de l'analyse multicritère, Thèse Unique, Université Abidjan, 2008.
- [23] J. Bodin, M. Razack, L'analyse d'images appliquée au traitement automatique de champs de fractures. Propriétés géométriques et lois d'échelles, Bulletin Société Géologique France, 170 (1999), 579-593.
- [24] K.T. Yao, O. Fouché, Y.M-S. Oga, et Assoma, Extraction de linéaments structuraux à partir d'images satellitaires, et estimation des biais induits, en milieu de socle précambrien métamorphisé. Revue Télédétection, 10 (2012), 161-178.
- [25] M. Razack, Application des méthodes numériques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie. Thèse Doctorat ès Sciences Naturelles, Université Languedoc, 1984.
- [26] A. Koudou, T.V. Assoma, B. Adiaffi, M. Youan Ta, K.F. Kouamé, T. Lasm, Analyses statistique et géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie ASAR ENVISAT du sud-est de la Côte d'Ivoire. Larhyss Journal, 20 (2012), 147-166.

Calcul des infiltrations à travers les digues en terre

Abdelkader Hachemi¹

¹Laboratoire MVRE, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique , Route de Soumaa Guerouaou ,
a.hachemi@ensh.dz

Résumé :

Le but de ce travail est d'élaborer un code de calcul par éléments finis pour calculer les infiltrations à travers les ouvrages en terre et en particulier les barrages en terre. Le modèle numérique sur lequel est basé notre code consiste à la résolution bidimensionnelle de l'équation de Richards qui décrit l'écoulement souterrain en tenant compte de la zone non saturée. L'application du code ENSAT ainsi élaboré permet de calculer les pressions interstitielles et notamment la position de la ligne de saturation (water table) à travers la digue dans l'espace et dans le temps comme dans le cas d'une vidange rapide.

Mots-clés : infiltration, ligne de saturation, éléments finis, barrage en terre

Numerical calculation of seepage through earth dams

Abstract :

The purpose of this work is to develop a finite element calculation code to calculate infiltration through earthworks and in particular earth dams. The numerical model on which our code is based consists of the two-dimensional resolution of the Richards equation which describes the subsurface flow taking into account the unsaturated zone. The application of the ENSAT code thus elaborated makes it possible to calculate the interstitial pressures and in particular the position of the saturation line (water table) across the dike in space and time as in the case of a rapid emptying.

Key Words: Seepage, water table, finite element, earth dam

Introduction

Les barrages en terre constituent des ouvrages importants pour la mobilisation des eaux. Ces ouvrages sont exposés au problème des infiltrations qui menace leur pérennité. Le calcul numérique de l'écoulement à travers les digues en terre a été largement étudié et développé par plusieurs auteurs [1],[2],[3],[4]et[5]. L'écoulement souterrain à travers les digues en terre est de type à surface libre vue la présence de la ligne de saturation qui sépare la zone saturée de la zone non saturée. La tenue en compte de la zone non saturée a fait l'objet du développement théorique effectué par Richards. Dans la zone non saturée les courbes de perméabilité relative et de la teneur en eau sont des fonctions continues de la pression interstitielle (courbes de succion). Dans ce travail nous avons choisi les courbes fournies par Vauclin[6]. Dans le présent travail, nous allons appliquer la méthode des éléments finis pour résoudre l'équation de Richards sur le domaine du barrage en terre en tenant compte de la zone non saturée et qui a conduit au développement d'un code de calcul ENSAT. Le présent code sera appliqué sur des exemples de barrages homogènes, isotropes avec ou sans tapis drainant que ce soit en régime permanent ou transitoire (cas du vidange rapide)[4].

I. Modèle mathématique

On considère que le milieu poreux est partiellement saturé d'eau supposée incompressible. Les vides de la matrice poreuse sont occupés par deux phases l'eau et l'air. Si l'on admet que l'air forme une phase continue avec l'atmosphère sous une pression uniforme, on est ramené à étudier l'écoulement d'un seul fluide (l'eau dans un milieu polyphasique à teneur en eau variable) c'est l'approche monophasique. Dans ce cas l'écoulement à surface libre est régit par l'équation de Richards :

$$c(p) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \text{div} \left[k_{sat} \cdot k_r(p) \text{grad} \bar{h} \right]$$

(1)

Où $C(p)$: capacité capillaire (m^{-1}), K_{sat} : tenseur de perméabilité à saturation (m/s), K_r : perméabilité relative, h : charge hydraulique (m), p : pression interstitielle = $h-z$ et z : altitude(m)

Les courbes de la perméabilité relative k_r et de la teneur en eau θ en fonction des pressions interstitielles p sont représentées par des fonctions continues selon Vauclin[7].

$$k_r(p) = \begin{cases} \frac{\alpha}{A + (-p)^\beta} & \text{si } p < 0 \\ 1 & \text{si } p \geq 0 \end{cases}$$

$$\theta(p) = \begin{cases} \theta_{sat} \frac{\gamma}{\alpha + (-p)^\delta} & \text{si } p < 0 \\ \theta_{sat} & \text{si } p \geq 0 \end{cases}$$

Avec α , β , γ et δ sont des constants à déterminer expérimentalement.

2. Modèle numérique

L'équation aux dérivées partielles (1) est de type parabolique non linéaire, sa résolution pourra être faite par l'application des méthodes numériques à savoir, la méthode de différences finies, méthode des éléments finis et méthode des volumes finis.

Dans ce travail, on a choisi la méthode des éléments finis pour résoudre l'équation (1) en tenant compte des conditions aux limites imposées sur les frontières du domaine.

L'application du principe de Galerkin de la MEF sur l'équation(1) en discrétisant le domaine d'études en éléments finis conduit à résoudre après assemblage, le système différentiel de premier ordre non linéaire à variable h suivant.

$$[A]\{\dot{h}\} + [B]\{h\} = \{F\}$$

(2)

A : matrice masse, B : matrice de rigidité, F : vecteur conditions aux limites, h : vecteur nodale de la charge hydraulique.

La discrétisation temporelle du système (2) est faite par le schéma de différences finies totalement implicite ou appelé schéma d'Euler. L'application du schéma d'Euler conduit à résoudre le système matriciel suivant :

$$([A] + [B])\{h\}_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t}$$

(3)

La linéarisation du système matriciel(3) est assurée par la méthode itérative de point fixe ou dite de Picard.

La mise en œuvre du modèle numérique décrit antérieurement a conduit à développer un code de calcul ENSAT écrit en langage Fortran par HACHEMI (2000) et qui permet de calculer les pressions interstitielles et la position de ligne de saturation dans les digues en terre.

3. Application et discussion des résultats :

3.1 Cas du régime permanent :

3.1.1 Barrage homogène et isotrope avec tapis filtrant :

L'exemple à traiter et le même traité par Humbert (1986). Il s'agit d'un barrage homogène isotrope à tapis filtrant. La figure (1) présente les conditions aux limites imposées sur notre ouvrage.

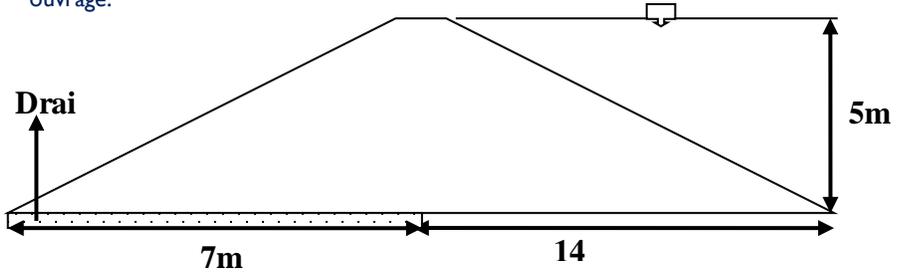


Figure 1. Barrage homogène isotrope à tapis filtrant

Les données du problème sont présentées par le tableau 1.

Il s'agit des données de perméabilités relatives et de la teneur en eau dans la zone non saturée à savoir : la perméabilité à saturation et les constantes des courbes perméabilités relatives – pression et teneur en eau –pression.

En régime permanent nous avons besoin seulement des données de la courbe de perméabilité relative en fonction des pressions interstitielles dans la zone non saturée.

Les résultats de simulation en régime permanent sont présentés par la figure (2) à l'aide de Matplotlib en langage python.

Tableau 1 jeu de données du problème (Humbert, 1986)

Paramètre	valeur	
-	Perméabilités	
$K_x = K_y$		2.10^{-6} m/s
α, β		$2.10^7, 4$
-	Teneur en	
eau		0.06
θ_s		3980
γ		1.8
δ		

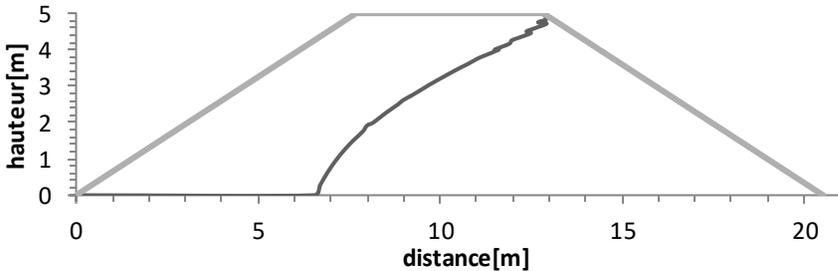


Figure 2. Ligne de saturation dans un barrage homogène à drain horizontal (régime permanent)

Les résultats montrent que la ligne de saturation en régime permanent démarre de la valeur charge imposée 5m au parement amont vers le tapis filtrant sans atteindre le parement aval. La présence du tapis filtrant fait abattre la ligne de saturation et protège le parement aval. Le tapis filtrant est traité comme une surface de suintement.

3.1.2 Barrage homogène sans tapis filtrant :

Si on ne tient pas compte du tapis filtrant, alors, la ligne de suintement (ruissellement) se trouve ainsi sur le parement aval du barrage.

Les résultats de simulation en régime permanent sont montrés par la figure 3.

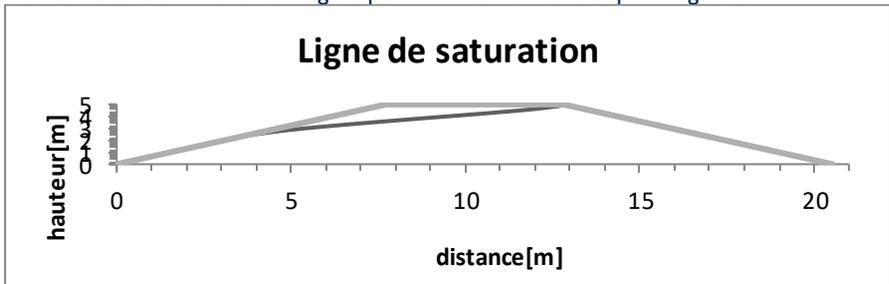


Figure 3. Ligne de saturation dans un barrage homogène (régime permanent)

Les résultats de simulation montrent que la ligne de saturation débute de la charge imposée 5m vers le parement aval où la charge imposée est 0m. On remarque qu'il y 'a une surface de suintement (ruissellement) sur le parement aval. Cette surface de suintement se trouve à une distance de 4.62m et à une hauteur de 2.75m

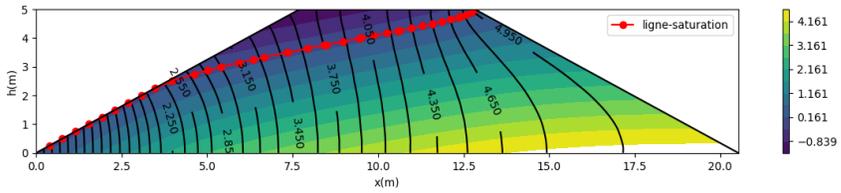


Figure 4 lignes d'équipotentiels et lignes d'équipressions (régime permanent)

3.2 Régime transitoire :

Le calcul en régime transitoire, traite le cas du vidange rapide il s'agit de ramener le niveau d'eau à l'amont du barrage de 5m à 1m sur un temps de 24h puis elle est maintenue constante pendant 10 jours [humbert]selon la formule suivante.

$$H(t) = 4.62 \times 10^{-5} \cdot t * 3600 + 5 \quad \text{si } t \leq 24 \text{ heure}$$

$$H(t) = 1m \quad \text{si } 24 \text{ h} < t < 10 \text{ jours}$$

Les résultats de simulation aux temps 20h , 30h et 10j sont présentés par les figures 5, 6 et 7.

Les résultats montrent qu'il y 'a présence du gonflement de la ligne de saturation aux temps 20 et 30h cela est due au phénomène d'emmagasinement et que la dissipation de la teneur en eau (saturartion) n'est pas instantanée mais prend un certain temps.

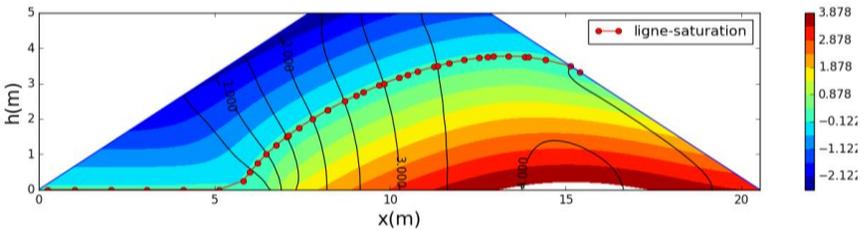


Figure 5. Ligne de saturation dans un barrage homogène à drain horizontal après 10heures de vidange

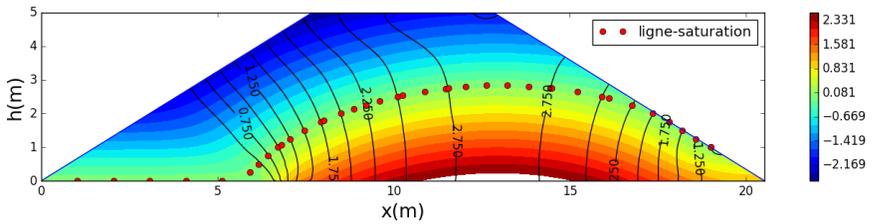


Figure 6. Ligne de saturation dans un barrage homogène à drain horizontal après 30 heures de vidange

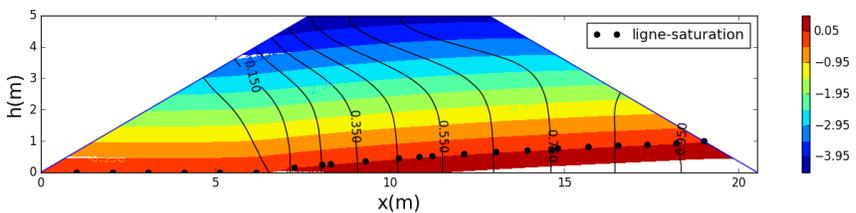


Figure 7. Ligne de saturation dans un barrage homogène à drain horizontal après 10 jours de vidange

Les résultats montrent que la ligne de saturation varie en fonction du niveau d'eau à l'amont, la dissipation de la saturation se fait avec le temps cela est vue après 10 jours de vidange où la ligne de saturation atteint la position du régime permanent.

Conclusion

L'écoulement à travers les digues en terre est un écoulement à surface libre, il est régi par l'équation de Richards qui tient compte la zone non saturée située au-dessus de la ligne de saturation.

L'application du principe de Galerkin de la méthode des éléments finis sur l'équation de Richards après discrétisation du domaine d'étude en éléments finis a conduit à la résolution d'un système différentiel du premier ordre fortement non linéaire. Les non linéarités apparaissent dans les coefficients de la perméabilité relative et de la teneur en eau qui dépendent de la charge hydraulique. Le code de calcul ainsi développé a permis de déterminer la position de la ligne de saturation dans un barrage homogène avec ou sans tapis filtrant en régime permanent et transitoire (vidange rapide).

Les résultats trouvés montrent que la ligne de saturation démarre du parement amont (niveau d'eau de la retenue) vers le parement aval où bien vers le tapis filtrant sous forme d'une parabole.

En cas du vidange rapide la retenue, la ligne de saturation présente un maximum qui correspond à un point de partage des eaux. Ce gonflement est expliqué par l'emménagement qui retarde la dissipation de la saturation.

Dans ce cas la surface du parement amont située au-dessus du niveau d'eau est une surface de ruissellement.

Alors on peut dire que le code de calcul ENSat développé dans ce travail permet de simuler l'écoulement à travers les barrages en terre et déterminer la position de la ligne de saturation et la répartition spatiales des pressions interstitielles dans les digues.

Références

- [27] R. Allen Freeze, Influence of the of the saturated flow domain on seepage through earth dams ».Water ressource research, Vol 7, n°4,(1971), pp 929-941.
- [28] I.M Smith & D.V Griffiths, Programming the finite element method. John Wiley & sons Ed, deuxième edition, (USA) 1988.
- [29] S.J Lacy & J.H Prevost, Flow through porous media A procedure for locating the free surface. Int. Journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol 11,(1987), pp 585-601.
- [30] P.Humbert, Application de la M.E.F aux écoulements en milieu poreux » Bulletin de L.C.P.C n° 132 Juin- Aout (1984).
- [31] A.Hachemi, Modélisation numérique des écoulements dans les barrages en terre, Thèse de Magister, université Hassiba Ben Bouali Chlef 2000.
- [32] M. Vauclin, D.Khanji. et G. Vachaud, Etude expérimentale et numérique du drainage et de la recharge des nappes à surface libre avec prise en compte de la zone non-saturée. » Journal de mécanique, Volume 15, n°6(1976), pp 12- 36.

Evaluation de la performance du service d'eau potable en utilisant deux méthodes de pondérations

HAMCHAOUI Samir¹, BOUCHRAKI Faiza¹, BERREKSI Ali¹, BENZERRA Abbas¹, BOUDOUKHA Abderrahmane²

¹Laboratoire de recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement (LRHAE). Faculté de Technologie, Université de Bejaia, 06000, Bejaia, Algérie. Email : hamchaouisamir@gmail.com

²Laboratoire de recherche en Hydraulique Appliquée (LRHA), University of Batna 2.

Résumé :

Ce travail de recherche sera consacré au développement d'un outil d'aide à la décision pour soutenir les gestionnaires des services d'eau potable. L'outil permet d'évaluer la performance des services d'eau potable tenant compte des spécificités locales de l'Algérie.

La méthodologie adoptée sera composée de deux phases. Dans la première phase, nous identifierons les objectifs, sous-objectifs, critères et indicateurs de performance associés à chaque critère. Dans la deuxième phase, nous évaluerons la performance du service d'eau potable.

L'évaluation de la performance nécessite l'agrégation des indicateurs et des critères. Cette agrégation sera effectuée en utilisant la méthode dite la somme pondérée. Dans notre recherche, la pondération sera effectuée par la méthode Analytical Hierarchy Process (AHP) et la méthode Rank Order Centroide (ROC). Cela nous permettra de comparer les performances obtenues à l'aide des deux méthodes de pondération.

Cette méthodologie proposée sera appliquée au service d'eau potable de la ville de Bejaia, Algérie. Les résultats de calcul de la performance placent le service d'eau à un bon niveau de service. En effet, la performance obtenue avec la méthode AHP est de 79,13% et de 76,79% avec la méthode ROC.

Mots-clés : développement durable, évaluation, indicateurs, AHP, ROC, service d'eau potable.

Assessment of the performance of water supply service using two weighting methods

Abstract :

This research work will be devoted to the development of a decision support tool to support the managers of water supply services. The tool makes it possible to assess the performance of water supply services taking into account the local specificities of Algeria.

The methodology adopted is composed of two phases. In the first phase, we will identify the objectives, sub-objectives, criteria and indicators of performance associated for each criterion. In the second phase, we will evaluate the performance of the water supply service.

The assessment of performance requires the aggregation of indicators and criteria. This aggregation will be done using the weighted sum method. In our research the weighting is determined by using both Analytical Hierarchy Process (AHP) method and Rank Order Centroide (ROC) method. This will allow us to make a comparison of the performance obtained using the two weighting methods.

This proposed methodology will be applied to the water supply service of the city Bejaia, Algeria. The results of calculation of the performance put the water service at a good level of service. Indeed, the performance obtained with the AHP method is 79.13% and is 76.79% with the ROC method.

Key Words: sustainable development, assessment, indicators, AHP, ROC, water supply service.

Introduction

Aujourd'hui, les gestionnaires des services d'eau potable doivent améliorer l'accès à l'eau potable et la qualité de gestion des services d'eaux potable. A cet effet, les pouvoirs publics commencent à s'intéresser d'avantage aux résultats et à la manière dont ils peuvent contribuer à les améliorer. Dans un premier temps, un partenariat a été mis en place avec des firmes privées étrangères afin de gérer et de former le personnel des services d'eau potable dans de grandes villes pilotes comme Alger, Oran, Annaba. Cette coopération est très bénéfique pour l'Algérie mais pas suffisante. En effet, au terme des contrats, les services d'eau potable Algériens ne peuvent compter que sur leurs compétences. C'est dans cette optique que s'inscrit notre travail de recherche. Notre but est de mettre à disposition des services d'eau potable Algérien un modèle permettant d'apprécier la gestion des services afin de renforcer les capacités de gestion dans le domaine de l'Alimentation en Eau Potable. Dans ce papier, nous présenterons la méthodologie mise en œuvre. Nous décrivons la manière d'évaluer la performance des services d'eau potable. Afin de calculer la performance d'un service d'eau potable, nous allons pondérer au préalable les indicateurs, critères, sous objectifs par deux méthodes. Ces méthodes sont *Analytical Hierarchy Process (AHP)* [1] et *Rank Order Centroide (ROC)* [2]. Par la suite, nous allons exploiter la méthode de la somme pondéré afin d'avoir la performance des critères, sous objectifs et objectif. Cette démarche nous a permis de comparer la performance d'un service d'eau potable en utilisant les deux méthodes de pondération. Cet outil sera illustré par une application sur le service d'eau potable de la ville de Béjaia, Algérie

1. Méthodologie

La méthodologie d'évaluation de la performance des services d'eau potable, utilisée dans ce papier comporte deux parties. La première partie représente la partie construction. La deuxième partie représente la partie évaluation. La démarche que nous avons engagée est inspirée de la définition de Brugman sur l'évaluation de la durabilité. En effet, sa définition est la suivante : « *Evaluer la durabilité des ressources en eau nécessite un cadre approprié d'indicateurs, qui peuvent idéalement : décrire et communiquer les conditions actuelle, favoriser la réflexion critique sur les mesures correctives nécessaires et faciliter la participation des diverses parties prenantes dans les processus décisionnels* » [3].

1.1. Partie construction

Dans la partie construction, nous avons engagé une large consultation avec les acteurs en liens avec les ressources en eaux (Algérienne Des Eaux, Direction des Ressources en Eau, Experts universitaires, etc...). Cette coordination a pour but d'identifier les différents objectifs prioritaires liés à la gestion durable du service d'eau potable en Algérie. Cette partie est particulièrement difficile ; mais elle est d'un intérêt cruciale afin d'identifier des objectifs admis et accepté par tous [4]. Par la suite, l'objectif prioritaire est subdivisé en sous objectifs. Chaque sous objectif est défini par un ensemble de critères évalués par des indicateurs de performances adaptés à la situation et au contexte actuel de la gestion du service d'eau potable Algérien.

1.2. Partie évaluation

Dans la partie évaluation, nous avons commencé par collecter les données nécessaires au calcul des indicateurs définis lors de la partie construction. Ces données sont issues des compagnes de mesure. Les valeurs sont transposées sur des échelles de performance pour obtenir les notes de performance de chaque indicateur. La performance des critères est déduite par pondération et agrégation des notes de performances des indicateurs. La pondération est faite par deux méthodes. Ces méthodes sont *Analytical Hierarchy Process (AHP)* et *Rank Order Centroide (ROC)*. L'agrégation de la performance des critères fournira ainsi la performance des sous objectifs. Enfin, l'agrégation de ces derniers permet l'obtention de la performance de l'objectif. La méthodologie développée a pour objet d'être intégrée dans un outil d'aide à la décision.

1.3. Objectif traité

Dans ce papier, nous allons étudier l'objectif prioritaire « Satisfaire le client ». La satisfaction est définie comme étant « Le jugement d'un client vis-à-vis d'une expérience de consommation ou d'utilisation résultant d'une comparaison entre ses attentes à l'égard du produit et ses performances perçues » [5]. La satisfaction est parfois perçue comme une émotion, parfois comme une appréciation rationnelle. Dans tous les cas, elle est fonction d'une différence. Trois situations peuvent apparaître : les performances sont en deçà des attentes (mécontentement), à leur niveau (satisfaction), au-delà (enthousiasme). Pour une entreprise « orientée client », la satisfaction de la clientèle est à la fois un objectif et un outil de marketing. Les entreprises qui atteignaient des taux de satisfaction élevés communiquent cette information.

« Satisfaire le client » (Figure 1) est un objectif prioritaire pour lequel les gestionnaires des services d'eau potable active pour une meilleures mise en œuvre. Cet objectif englobe la distribution d'une eau en quantité suffisante et de bonne qualité, d'une part. D'autre part, un service rendu au client de meilleure qualité. Il est représenté par un service en continu, un traitement des toutes sortes de réclamations et un raccordement maximal au réseau d'eau potable ceci dans les meilleurs délais.

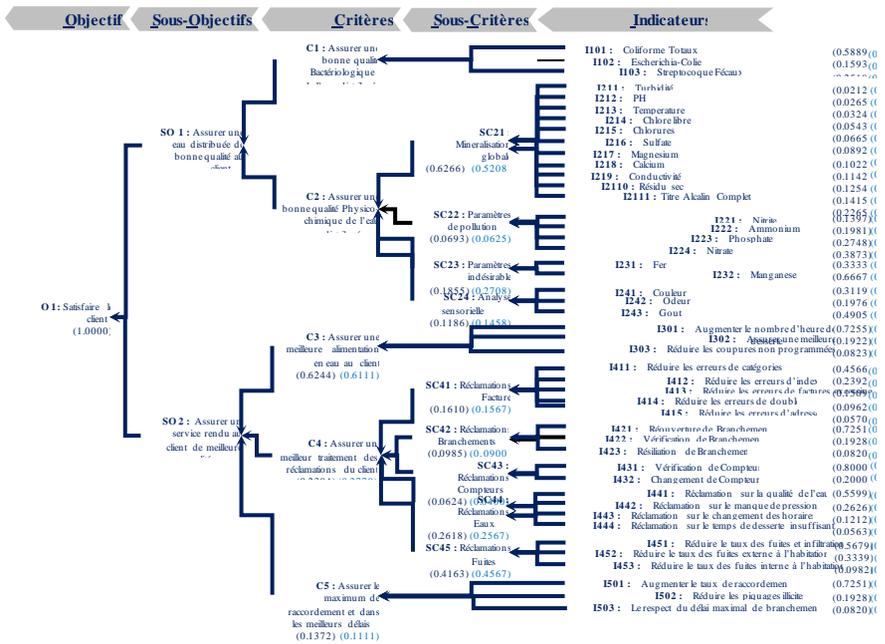


Figure 1. Structure hiérarchique de l'objectif étudié [6].

3. Résultats et discussion

3.1. Zone d'étude

L'outil d'évaluation et d'aide à la décision est appliqué sur le service d'eau potable de la ville de Béjaia. Ce service est géré par l'Algérienne Des Eaux.

L'objectif prioritaire traité est «Satisfaire le client». A cet effet, nous allons exploiter les données recueillies par les différents services publics, de la ville de Béjaia. L'année prise en considération est l'année 2013.

L'approche participative nous a permis d'identifier, lors de la première partie les indicateurs, sous critère, critère et sous objectif associé à l'objectif traité. Cette partie a nécessité une

longue et laborieuse contribution des gestionnaires du service d'eau potable de la ville de Béjaia. Ajouté à cela, le service d'eau potable nous a permis de collecter, la majorité des données nécessaires à notre application. Ces données sont indispensables pour obtenir la performance de chaque indicateur. D'où la nécessité de la mise en place de mécanisme actif permettant une collecte et un archivage des données relatives aux services d'eau potable. C'est à partir de l'exploitation de ses statistiques que nous pouvons construire une idée sur la performance de gestion durable des services d'eau potable en Algérie.

3.2. Synthèse de l'évaluation de l'objectif traité

Les résultats de l'évaluation des critères, sous objectifs et objectif de l'année 2013 sont récapitulés dans la figure 2 ci-dessous.

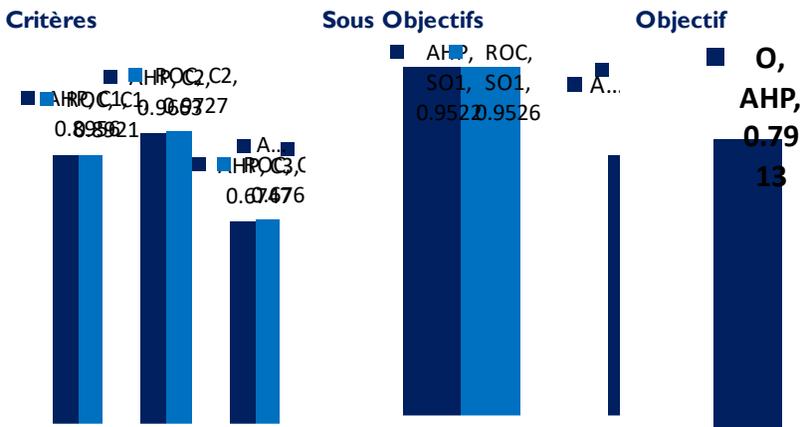


Figure 2. Comparaison des performances des critères, Sous Objectifs et Objectif en exploitant AHP et ROC de l'année 2013.

La performance obtenue sur l'objectif étudié est de 79.13 % en utilisant la méthode AHP et 76.79 % en utilisant la méthode ROC. Les résultats obtenus montrent que les valeurs sont généralement presque égales. En exploitant l'échelle de Coulibaly [7], la performance du service d'eau potable de la ville de Béjaia est située dans la classe *bon service*.

Conclusion

Dans ce papier, nous avons proposé un outil d'aide à la décision appliqué dans le cadre de la gestion des services d'eau potable prenant compte les spécificités locales de l'Algérie. Le choix des objectifs et des indicateurs a nécessité une collaboration et une large consultation avec les gestionnaires de l'Algérienne des Eaux. L'outil proposé nécessite le passage par deux parties. La première a pour but d'identifier les objectifs liés à la gestion durable du service d'eau potable. La deuxième commence par une collecte de données. Les valeurs sont transposées sur des échelles de performance pour obtenir des notes de performance de chaque indicateur. Pour réaliser la pondération, nous avons exploité deux méthodes. La méthode AHP et la méthode ROC. Cette démarche nous a permis d'avoir des performances différentes pour les sous critère, les critères, les sous objectifs et l'objectif final. Par la suite, une comparaison des résultats obtenus a été effectuée.

L'exploitation des données fournies par l'Algérienne Des Eaux nous a permis d'apprécier la qualité de l'objectif prioritaire étudié. Durant l'année 2013, l'objectif étudié se situe dans la classe *bon service* avec un score de 79.13 % en utilisant la méthode AHP et 76.79 % en utilisant la méthode ROC.

Références

1. K. M. A.-S. Al-Harbi, Application of the AHP in project management, International Journal of Project Management, 19 (2001)19-27.
2. Tayeb Louafa, Francis-luc Perret, (2008). Créativité et innovation. L'intelligence collective du management de projet. Presse polytechnique et universitaires romandes, 352p.
3. J. Brugmann, Sustainability indicators revisited: Getting from political objectives to performance outcomes - a response to Graham Pinfield, Local Environment, 3 (1997) 299-302.
4. A. Milman, A. Short, Incorporating resilience into sustainability indicators: An example for the urban water sector, Global Environmental Change, 18 (2008) 758 -767.
5. Kotler Philip, Dubois Bernard, (2000). Marketing et Management. Publi-Union Edition ; 10ème édition, Paris, 629 p.
6. S. Hamchaoui, A. Boudoukha, A. Benzerra, Drinking water supply service management and sustainable development challenges: case study of Bejaia, Algeria. Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA, 64 (2015) 937-946.
7. Coulibaly, H. D., Rodriguez, M. J., (2004). Development of performance indicators for small Quebec drinking water utilities. Journal of Environmental Management, vol.73, n°3, pp. 243-255

Prévision des crues d'un bassin non jaugé : cas du bassin versant de Tessa au Nord de la Tunisie

Taoufik HERMASSI¹, Habiba FERCHICHI², Hechmi BELAID²

¹ Institut de recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts ; Rue HédiKarray B.P.10, 2080, Ariana, Tunisie E-mail : taoufikhermassi@yahoo.com

² Ecole Supérieure des Ingénieurs de Medjez El Bab

Résumé

La modélisation hydrologique des bassins non jaugés présentant un risque élevé d'inondation représente un important défi pour les gestionnaires et les décideurs. Le bassin versant de Tessa site de l'étude est un bassin représentatif, car il s'agit d'un bassin non jaugé qui participe fortement aux écoulements de la Medjerda. Les inondations sont les principaux dangers dans cette zone, qui menacent les activités socio-économiques principalement dans la zone de Boussalem. Pour évaluer le risque d'inondation, nous avons utilisé la modélisation hydrologique et hydraulique par le biais du modèle HEC-HMS sous le logiciel WMS pour mettre en place un modèle ayant le potentiel de simuler les fortes crues suite à des averses inhabituelles ou extrêmes. L'utilisation de modèles hydrologiques et hydrauliques quotidiens pour la prévision et la simulation des inondations semble satisfaisante, mais il est recommandé d'utiliser des modèles événementiels.

Mots clés : inondation, Prévision, modèle pluie-débit, bassin non jaugé

Flood forecasting of ungauged basin: Case study of Tessa Watershed - Northern Tunisia

Abstract

Hydrological modeling of ungauged basins which have a high risk of flooding is always imperative for managers and policymakers. The Tessa watershed is a representative case study, as it is ungauged watershed and it participates strongly in the discharge of the Medjerda river. Flooding is the main hazards in this area, which threaten socio-economic activities in the downstream area of Boussalem. To evaluate the flooding risk, we used hydrological and hydraulic modeling via HEC-HMS model under the WMS software to set up a simulation tool in the ungauged basin of Tessa. Using daily-based hydrological and hydraulic models for the prediction and the simulation of flooding events seems satisfactory but it is recommended to use event's models.

Key Words: flood, forecasting, rainfall-runoff model, ungauged basin

INTRODUCTION

Flood forecasting for a site in an uncertain context during periods of intense rainfall presents a scientific challenge for the prospect of an improved flood warning. The prediction for ungauged basins using simplified model parameters has met with mixed success and provided some progress in our understanding of hydrological science. Spatial models with a physical-conceptual basis, using topographic and soil data, are tested and show their advantages for complex response basins. On the basis of extreme historical events case study and their amplification, the potential of rainfall-runoff models for flood analysis can be demonstrated, particularly in unusual or extreme events and ungauged sites [1, 2, 3].

A considerable contribution of an extrapolation methodology may provide solutions to hydrologists mainly with some measurement points within the catchment area. The problems of initialization of the model, the updating of predictions and the estimation of uncertainties are discussed in relation to the nature of these models, the expected advances in rainfall prediction and the benefits of decision-making tools based on the risk analysis applied to the flood announcement.

The objective of this paper is to simulate the discharges at the outlet of the ungauged Wadi Tessa. This Wadi is a tributary of the right bank of Medjerda river. The used hydrological model is HEC-HMS under WMS software. The model was applied at sub-basin level, the calibration and validation results are very satisfactory with Nash criteria between 60% and 90%. Finally, the simulation was extrapolated throughout the entire watershed by simulating the discharges at its outlet for flow values varying between 100 and 1000 m³/s.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Study Area

The Wadi Tessa is a tributary of the right bank of the Medjerda river. It crosses the north-western part of Tunisia (Kef, Jendouba, Beja and Siliana) and flows into the Medjerda river a few kilometers from wadi Mellegue. The Tessa watershed is characterized by a Mediterranean climate and it is located in the north-west of Tunisia. The area of the watershed is about 2500 km².

The soil map shows that the Tessa watershed is occupied mainly by Lithosols and Fluvisols (28% of the total area) and Cambisols (18% of the total area). The complexe units of soils with undetermined spatial pattern, showing variable depth and loamy texture (Regosols and Leptosols) cover 23% of the total area of the study area [4].

The dominant vegetation cover are agricultural lands and forests, the land use map shows that most of the surface of Tessa watershed is occupied by farmlands (70%) consisting mainly of cereals, the forests (15%) are located in the hilly zones.

The rainfall is irregular; the annual average rainfall of the watershed is about 480 mm. The rainy seasons are winter and spring. The rainy month is March.

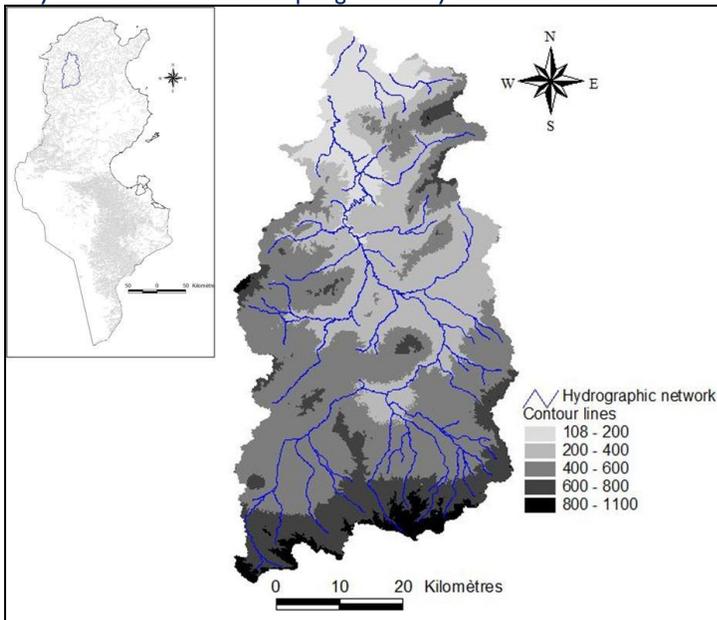


Fig.1- The location of Tessa Watershed

2.2. Model Presentation

The Watershed Modeling System (WMS) is a comprehensive graphical modeling environment for all phases of watershed hydrology and hydraulics. WMS includes powerful tools to automate modeling processes such as automated basin delineation, geometric parameter calculations, GIS overlay computations (CN, rainfall depth, roughness coefficients, etc.), cross-section extraction from terrain data, etc... With the release of WMS 7, the

software supports hydrologic modeling with HEC-I (HEC-HMS), TR-20, TR-55, Rational Method, NFF, MODRAT, and HSPF. In this Study we choose HEC-HMS model [5].

The Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) is designed to simulate the complete hydrologic processes of dendritic watershed systems. The software includes many traditional hydrologic analysis procedures such as event infiltration, unit hydrographs, and hydrologic routing. HEC-HMS also includes procedures for continuous simulation including evapo-transpiration, snowmelt, and soil moisture accounting. Advanced capabilities are also provided for gridded runoff simulation using the linear quasi-distributed runoff transform.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Data collection

For this study, data collection concerns 14 rainfall stations for the period between 1984 and 2014 from the Water Resources Direction. These stations are distributed irregularly throughout the study area and represent the longest period available for the highest quality data covering the area.

For the runoff data, we have only Sidi Medien gauge station located in the central part of the watershed, for the period between 1993 and 2010 [6, 7, 8].

For GIS data base, we used the soil map (scale: 1/50 000), the land use is given by satellite images (Landsat 2000 with a resolution of 20 m), the topographic map (scale 1:25 000) (Ministry of Agricultural and Hydraulic Resources, mission 1998; scale: 1:20 000). The topographic data was derived based on the Aster (Advanced Spaceborne Thermal Emission the Reflection Radiometer) GDEM (Global Digital Elevation Model) images acquired in 2011 with a resolution of 30 m.

3.2. Rainfall and runoff analysis

First, the spatio-temporal study of rainfall was carried out on the basis of statistical tools and spatial interpolation methods. The spatial interpolation was performed using the Thiessen Polygon method.

Then, in order to find a lower discharge limit for choosing the rainfall events to simulate, the discharges could be estimated on different return periods by selecting two sets of data from two different methods: the daily maxima method and the threshold method based on a frequency analysis. The application of the two methods gives the quantiles for the return periods of 5, 10, 20, 50, 100 years by the adjustment methods available in the Hyfran software.

Tableau 1- Statistical analysis of rainfall and runoff at Tessa watershed

Return period (year)	2	5	10	20	50	100
Rainfall						
Rainfall (daily maxima method) (mm)	28.0	39.4	47.0	54.5	64.3	71.8
Rainfall (daily threshold method) (mm)	15.4	22.6	28.1	33.5	40.7	46.1
Runoff						
Runoff (daily maxima method) (m3/s)	98.1	241	351	462	610	722
Runoff (daily threshold method) (m3/s)	138	258	349	440	559	650

Comparing the results of these two methods, we chose the results of the daily maxima method, which overestimates slightly the rainfall values. We choose the biennial runoff value as a lower limit for rainy events.

3.3. Hydraulic and hydrological modeling

The modeling of the hydrological functioning of the rainwater-flow catchment basin is carried out by applying the HEC-HMS model under the WMS software.

Our modeling under HEC-HMS has two parts. The first part consists of several stages: first, two models were prepared for the event simulation one for the autumn floods and another one for the winter floods in a sub-basin of the BV Tessa. Then, they are calibrated to optimize parameters and validate them using Nash performance criterion. For the second

part, the simulation is extrapolated for the two winter and autumn models at the confluence of the Tessa watershed with the Medjerda river.

The WMS platform was an important tool for determining the geometric and hydrological parameters. It also allows us to define the production and transfer functions, the input variables, the time step and the simulation scale of the model.

a/ Flood simulation in the Sidi Medien Sub-watershed

Floods in the sub-catchment area are mainly autumn and winter floods. The Tessa watershed experienced large autumn floods which are concentrated at the end of September characterized by intensive rainfall.

Tableau 2- Subwatershed modeling results

Event	ObservedDischarge (m ³ /s)	SimulatedDischarge (m ³ /s)	NASH
11-15 sep 1995	123	115	98,3%
21-27 sep 1998	465	426	88,5%
5-9oct1995	149	100	77,1%
06-12sep1996	159	221	53,0%
22-23 jan 2003	154	198	72,0%
7-14 feb 2005	90,8	74,1	85,9%

In the table, we can notice that the Nash coefficient varies between 53% and 98.3% but generally we have a good performance for the autumn events with CN set at 99. This high value can be explained by the intensive autumn rainfall which imbue the top soil quickly then the precipitation will be transformed into a direct runoff.

For winter events, the high performance of the simulation, which varies between 72% and 86% is explained: first of all, the winter month characterized by the plowing of the agricultural lands that already dominate the watershed which generate a better porosity and more soil permeability than those in autumn.

b/ Flood simulation in the Tessa watershed

The discharge at the outlet of Tessa watershed is the aggregation of two discharges from two subwatersheds: SubWatershedI representing the upstream (Sidi Medien station) and SubWatershedII representing the downstream (outlet of Tessa watershed).

Tableau 3- Watershed simulation results

Event	SimulatedDischarge (m ³ /s)	Simulated volume (m ³)
11-15 sep 1995	255	29500
21-27 sep 1998	940	117000
5-9oct1995	130	16500
06-12sep1996	435	56000
22-23 jan 2003	480	165000
7-14 feb 2005	175	36500

The simulation of the autumn events at Tessa watershed is given by table 3. We notice that the discharge varies between 100 m³/s and 1000 m³/s, especially during the month of September. These extreme and exceptional flows are catastrophic at the confluence of BV Tessa with Medjerda.

For winter events simulations, the volume of water at the outlet is greater than the autumn events since the number of rainfall events is concentrated more in winter than autumn.

CONCLUSION

The objective of this work is the simulation of discharges at the unedged outlet of Wadi Tessa. This Wadi is a tributary of the right bank of Medjerda river. It crosses the northwestern part of Tunisia and flows into the Medjerda river a few kilometers from Mellegue wadi. The Tessa watershed, a Mediterranean basin, is located in the north-west of Tunisia. It is arural catchment with relatively steep relief covering an area of about 2500 km². This watershed belongs to the Tunisian High Tell region characterized by a subhumidclimate. The HEC-HMS model under WMS software seems to be a powerful tool for modeling extreme events in the Tessa watershed. This simple tool represents an effective solution for the estimation of the floods at the outlet of Tessa watershed at the Medjerda confluence.

Références

- [32] Moore, R. J., Bell, V. A. & Jones, D. A. (2005) Forecasting for flood warning. *C. R. Geoscience* 337, 203–217.
- [33] Moore, R. J., Bell, V. A., Cole, S. J. & Jones, D.A. (2006) Rainfall–runoff and other modelling for ungauged/low-benefit locations. R&D Project W5-113, Report to the Environment Agency and Defra, CEH Wallingford, UK.
- [34] Wagener, T., Wheater, H. S. & Gupta, H. V. (2004) Rainfall–runoff Modelling in Gauged and Ungauged Catchments. Imperial College Press, London, UK.
- [35] ABIDI Sahar, HERMASSI Taoufik, HAJJI Olfa, HABAIEB Hamadi, 2013. Vers une modélisation hydrologique (ATHYS) adaptée à la prévision d'une crue exceptionnelle du bassin versant de Tessa au nord de la Tunisie. Colloque International Eau Et Climat: Regards Croisés Nord / Sud. Eau : Ressource, risque et développement durable dans les pays de la Méditerranée occidentale. La Faculté des Lettres et Sciences Humaines Sais-Fès, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah. Fès- Maroc, 27-28 novembre 2013.
- [36] Ertuck, A., et al. (2006). "Application of Watershed Modeling System (WMS) for Integrated Management of a Watershed in Turkey." *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 41(9): 2045-2056.
- [37] Sahar Abidi, Hajji Olfa, HermassiTaoufik and Habaieb Hamadi, 2014. Influence of considering tributaries to reconstruct flood hydrograph of an extreme event on the upstream portion of Medjerda River. *International Research Journal of Public and Environmental Health* Vol.1 (3),pp. 54-62, May 2014. ISSN 2360-8803.
- [38] SaharAbidi, Olfa Hajji, Habaieb Hamadi 2015 : Application du modèle de Muskingum pour la prévision des crues de la Medjerda en Tunisie. *International Journal of Innovation and AppliedStudies*. Vol. 10.pp. 1277-1285
- [39] TaoufikHermassi, Sahar Abidi, Hamadi Habaieb, 2014. Reconstitution of extreme events on three main sections of the Mejerda river, Tunisia. (Reconstitution and forecasting of flow hydrographs). 13th CAS-TWAS-WMO Forum, the International Symposium on Extreme Weather and Climate: Past, Present, Future. Beijing, China, September 8-11, 2014.

Évaluation de l'érosion des sols par le modèle RUSLE à l'aide de la télédétection et du SIG - Étude de cas du bassin de Boussalem Algérie

Elhadj Mokhtari¹

Département d'hydraulique, Faculté de technologie, université Mohamed Boudiaf de M'sila. Algérie.

E-mail : hadjmokhtari@gmail.com

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'estimer les pertes en sol par érosion au niveau du bassin versant de l'Oued Boussellam dans le Nord-est de l'Algérie par l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique. Le modèle de Wischmeier a été adopté pour la modélisation des principaux facteurs impliqués dans les phénomènes érosifs. Le bassin versant de Boussellam s'étend sur une superficie de 4296 Km², de forme allongée du Sud -est au Nord -ouest. La confrontation des différentes cartes de ces paramètres a permis de déduire la carte d'érosion à partir de laquelle, il ressort que le phénomène d'érosion touche l'ensemble du bassin versant de Boussellam mais à des niveaux différents. Ainsi, le taux moyen des pertes en sol est de 6.35 t/ha/an. Les taux d'érosion diffèrent d'une zone à l'autre du bassin versant, selon l'influence des différents facteurs qui contrôlent l'érosion. La répartition des pertes en terre n'est pas proportionnelle aux surfaces ; en effet, 3.73% de la surface du bassin contribuent à 33.73 % des pertes totales.

Mots-clés : Bassin versant Boussellam, érosion, modèle RUSLE, SIG. Télédétection, Algérie

Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - Case study of Boussalem Basin Algeria

Abstract :

The objective of this work is to estimate soil losses by erosion at the Oued Boussellam watershed in northeastern Algeria through the use of Geographic Information Systems. The Wischmeier model has been adopted for modeling the main factors involved in erosive phenomena. The Boussellam watershed extends over an area of 4296 square kilometers, elongated from south-east to north-west. The comparison of the different maps of these parameters made it possible to deduce the erosion map from which, it appears that the erosion phenomenon affects the whole area of the Boussellam watershed but at different levels. Thus, the average rate of soil losses is 6.35 t / ha / year. Erosion rates differ from one area of the watershed to another, depending on the influence of the different factors that control erosion. The distribution of soil losses is not proportional to the areas; in fact, 3.73% of the basin area contributes to 33.73% of total soil losses.

Key Words: Boussellam watershed, erosion, RUSLE model, GIS. Teledetection, Algeria.

1.Introduction

L'érosion des sols est un processus naturel qui est sans doute largement responsable de la géomorphologie actuelle. Le terme érosion des sols ne peut être utilisé dans un contexte de menace ou de risque que s'il s'agit d'une érosion accélérée, au-delà des taux modérés, suite à des facteurs anthropiques, qui causera la perte d'une ou de plusieurs fonctions du sol. L'érosion hydrique constitue le principal facteur de la dégradation de la ressource sol. Les études réalisées au Maghreb montrent que la dégradation des sols touchent 40 % des terres au Maroc (FAO, 1977 ; Allili, 2015), 45 % en Tunisie (Chevalier et al., 1995 ; Boussema, 1996) et 45 % des zones telliennes en Algérie (Chebbani et al., 1999), soit 12 millions d'hectares.

Dans la région du Maghreb dont les potentialités en eau et en sol sont sérieusement menacées (Heush, 1971 ; Demmak, 1982 ; Lahlou, 1994 ; Touaibia et al., 2001 ; Meddi, 1992 ; Terfous et al., 2003 ; Allili et al., 2015), les quantités de sédiments transportés en suspension susceptibles de se déposer dans le littoral méditerranéen des côtes algériennes sont estimées à 47 millions tonnes par an.

La détection des zones érodées, ainsi que l'évaluation des facteurs qui contrôlent l'érosion et ses caractéristiques, sont des tâches complexes mais pouvant être résolues avec l'intégration de plusieurs sources de données (données spatiales, mesures et enquêtes sur le terrain et images satellitaires) dans des systèmes de traitement géo-spatial, tels que les GIS (Markhi et al., 2015).

L'approche par télédétection et SIG est utilisée pour spatialiser des modèles ponctuels d'évaluation de l'érosion, et pour l'intégration des différentes informations et la cartographie des résultats. Elle constitue un outil d'aide à la décision en permettant la localisation des zones prioritaires et de proposer des scénarios d'intervention.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant de l'Oued Boussellam fait partie du bassin versant de Oued Soummam est situé au Nord-est du pays entre 3° 60' et 5° 55' de longitude Est et entre 35° 75' et 36° 75' de latitude Nord. S'étend sur une superficie de 4296 Km² (Fig 1).

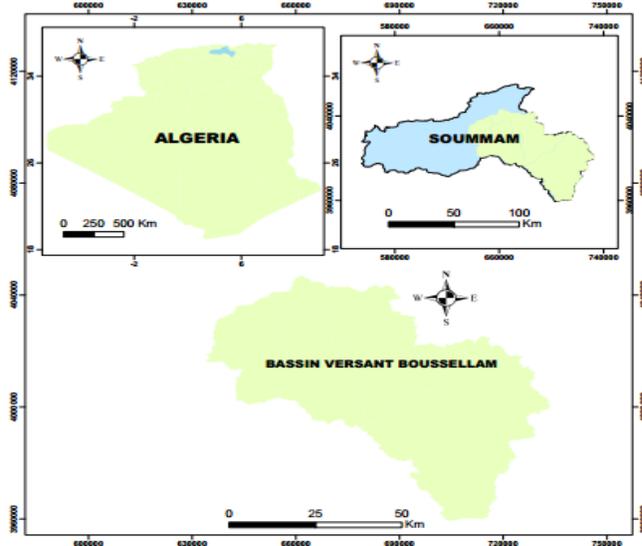


Fig.1. Location du bassin versant Boussellam

2.2. Méthode d'évaluation de l'érosion

Plusieurs modèles d'érosion des sols existent avec différents degrés de complexité. Même si une grande variété de modèles est disponible pour l'estimation du risque d'érosion, la plupart demande tellement de données-sources que leur application à l'échelle régionale devient un problème. L'équation bien connue USLE (Wischmeier et Smith, 1978) a été utilisée car c'est le modèle qui demande le moins de données-sources, et il a été appliqué largement à toutes les échelles (Fistikoglu et al, 2002).

Fondamentalement, USLE a l'avantage de fournir des estimations à long terme de moyenne de perte annuelle de sol à partir de petites zones et est considéré comme un « bon modèle » si le but de la modélisation est d'arriver à des estimations globales de l'érosion des sols.

Cependant, le modèle est limité dans le sens où il ne peut pas simuler l'érosion du lit de dépôt, ou en ravin (Foster, 1988).

L'Equation universelle de pertes en sol (Wischmeier et Smith, 1978) s'applique à la quantification des pertes en sol par érosion en nappe et en rigole. C'est une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique: agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et pratiques antiérosives:

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1)$$

Les unités de la perte de sol annuelle moyenne (A) sont portées par les facteurs R et K. Ces deux facteurs représentent la cause de l'érosion des sols. Le facteur R représente érosivité de la pluie, ou le pouvoir érosif de la pluie sur le sol quel que soit son type. Le facteur K représente l'érodibilité du sol, ou dans la mesure où le type de sol spécifique résiste aux forces érosives.

La méthodologie suivante a été utilisée pour générer les grilles des facteurs du modèle RUSLE (Fig 2).

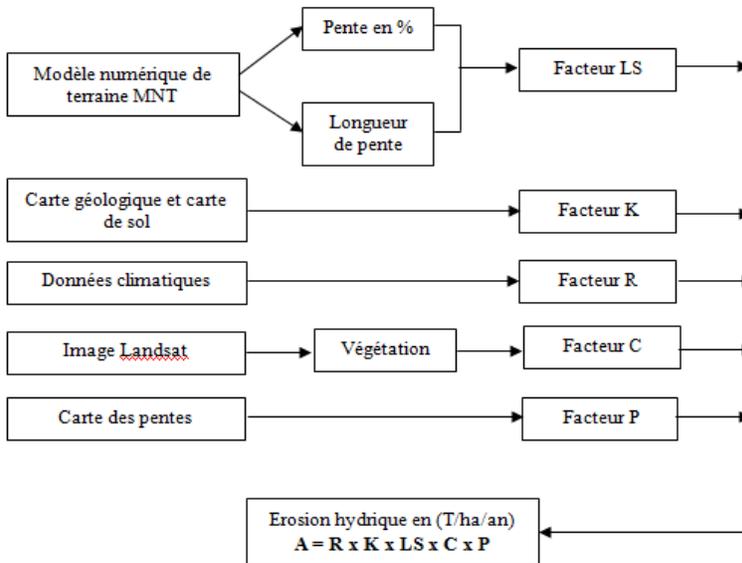


Fig. 2. Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Boussellam (Soummam) par le modèle RUSLE

3. RESULTATS ET DISCUSSION

RUSLE est la combinaison de six facteurs spécifiques qui décrivent les caractéristiques du bassin versant.

Le facteur R est le facteur climatique déterminant la force érosive des précipitations sur le sol. Il considère les différences régionales du climat selon le type, l'intensité et la fréquence des précipitations. Hudson (1981) définit l'érosivité comme étant la capacité potentielle de la pluie pour produire de l'érosion, souvent attribuée à ses caractéristiques physiques.

Le facteur topographique LS regroupe les effets de la longueur L et de l'inclinaison S de la pente sur l'érosion (Renard et al., 1997). La longueur de pente conditionne la vitesse de

ruissellement et le transport des particules croît en fonction de la longueur de la parcelle (McCool et al., 1989).

L'érodibilité d'un sol K se traduit par la résistance inhérente au détachement et au transport des particules par l'eau. Les paramètres intrinsèques du sol (stabilité structurale, croûte de battance, état dispersé, matière organique, texture) contribuent largement à influencer la sensibilité des sols à l'érosion (Roose et Sarrailh, 1990). Le facteur K est fonction de la texture, la teneur du sol en matière organique, et la perméabilité du sol. Le facteur K a donc été calculé à l'aide du tableau de correspondance de Stone et Hilborn (2000) permettant ainsi de déduire à partir de la texture les valeurs d'érodibilité des sols.

Pratique anti-érosive P Les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage sont les pratiques les plus efficaces de conservation des sols. Les valeurs de P sont inférieures ou égales à 1. La valeur 1 est attribuée aux terrains sur lesquels aucune des pratiques citées n'est utilisée. Les valeurs de P varient selon la pratique adoptée et aussi selon la pente. Dans tout le bassin versant de l'oued Boussellam, il n'y a pas d'aménagements anti-érosifs, et les agriculteurs n'utilisent pas de pratiques culturales anti-érosives. Les cultures sont surtout céréalières et les labours sont rarement parallèles aux courbes de niveau. Il y a quelques essais de réhabilitation des forêts par des reboisements mais pas en banquettes. Dans ce contexte, la valeur $P = 1$ a été attribuée à toute la superficie du bassin.

Le facteur couvert végétal C est le second facteur le plus important qui contrôle le risque d'érosion des sols (Kalman, 1967). L'occupation des terres et la végétation sont en rapport avec d'autres facteurs tels que: la topographie, la géologie, les sols, le climat et les caractéristiques hydrologiques. L'occupation du sol, sauf dans les endroits éloignés, est en rapport direct avec les activités humaines. Les activités qui ont la plus grande influence sur l'érosion des sols sont l'agriculture, l'élevage, les exploitations minières, l'abattage du bois, la construction de routes et l'urbanisation (White, 1986).

L'intégration des couches thématiques des facteurs du modèle RUSLE dans le SIG permet de cerner l'impact de chaque facteur dans les pertes en sol, de classer par importance relative les zones d'érosion, et de quantifier les pertes en sol dans le bassin. La détection des zones érodées, ainsi que l'évaluation des facteurs qui contrôlent l'érosion et leur caractéristiques, sont des tâches complexes mais pouvant être résolues avec l'intégration de plusieurs sources de données (données spatiales, mesures et enquêtes sur le terrain et images satellitaires) dans des systèmes de traitement géo-spatiale, tels que les systèmes d'information géographique (SIG). (Fig. 3).

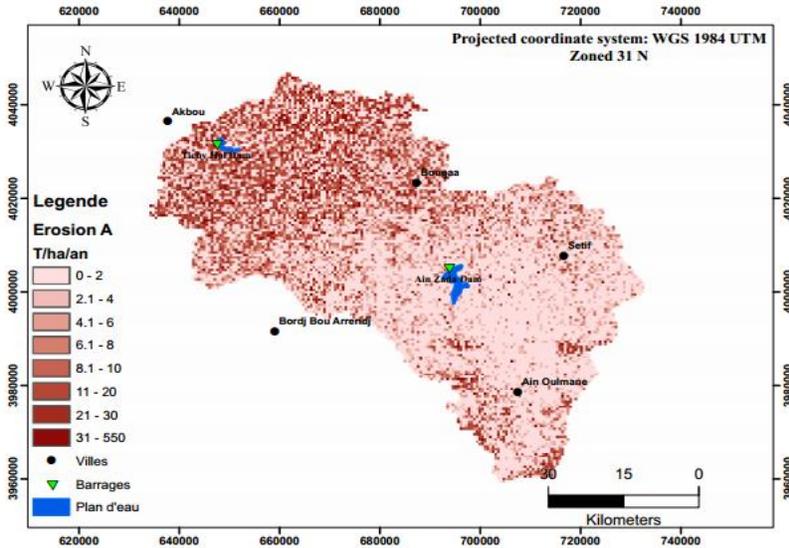


Fig. 3. Carte d'érosion hydrique du bassin versant de l'Oued Boussellam

La perte moyenne par érosion hydrique en nappes pour l'ensemble du bassin versant est d'environ 6.35 t/ha/an. Les pertes maximales et minimales par unité sont respectivement de 550 t/ha/an et de 0.0 t/ha/an. Les pertes totales annuelles du bassin sont de 2727960 t/an. Les taux d'érosion diffèrent d'une zone à l'autre du bassin versant, selon l'influence des différents facteurs qui contrôlent l'érosion.

L'application du modèle RUSLE donne des résultats relativement très fiables qui peuvent apporter une aide précieuse, aux décideurs et aménageurs du territoire dans le but de simuler des scénarios d'évolution et par suite cibler les zones prioritaires qui nécessitent des actions de conservation et de lutte contre l'érosion.

Les taux d'érosion diffèrent d'une zone à l'autre du bassin versant, selon l'influence des différents facteurs qui contrôlent l'érosion. La répartition des pertes en terre n'est pas proportionnelle aux surfaces ; en effet, 3.73% de la surface du bassin contribuent à 33.73 % des pertes totales (Fig.4).

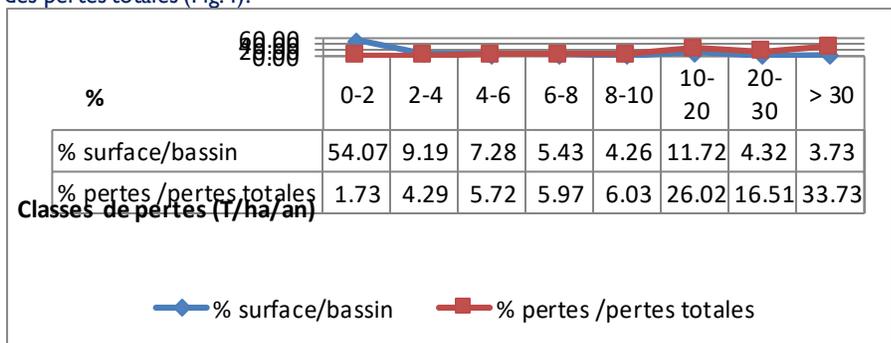


Fig.4. Répartition des pertes en sols dans le bassin versant de l'oued Boussellam

4. CONCLUSION

Le problème de l'érosion des sols abordé au travers de l'équation de Wischmeier & Smith s'applique aisément au GIS par la comptabilité entre RUSLE et l'algèbre de carte (Khali Issa et al., 2016). Le GIS permet de gérer d'une façon rationnelle une multitude de données à

référence spatiale, relatives aux différents facteurs de la dégradation des sols, ce qui nous a permis de conclure que ces facteurs principaux (R, LS, K, C, P) influencent l'érosion hydrique.

L'application du modèle RUSLE donne des résultats relativement très fiables qui peuvent apporter une aide précieuse, à coûts très bas, aux décideurs et aménageurs du territoire dans le but de simuler des scénarios d'évolution, et par suite cibler les zones prioritaires qui nécessitent des actions de conservation, de protection du milieu naturel et de lutte contre l'érosion.

References

- [33] Allili C, Laigne BI, Adjeroud N, Bir H, Madani K .2015. Particulate Flow at the Mouth of the Soummam Watershed (Algeria), *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 35 (1) (2015) 204 – 211.
- [34] Boussema, 1996. Système d'information pour la conservation et la gestion des ressources naturelles ; Colloque International sur le rôle des technologies de télécommunication et de l'information en matière de protection de l'environnement, Tunis, 1-2 Novembre 1994, P.P.64-70.
- [35] Brown R B .2003. Soil Texture, Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Fact Sheet SL29, 8 p.
- [36] Chebbani, R., et al, 1999. Etude des risques d'érosion dans le bassin versant Isser, Algérie. *Bulletin Réseau Erosion* 19 : 85-95.
- [37] Chevalier, J.J., et al 1995. Système d'aide à la planification pour la conservation des eaux et des sols (Tunisie). Système d'information géographique utilisant les données de télédétection. Act du colloque scientifique international, Hammamet. Tunisie, 1-2 Novembre 1994, 4-12
- [38] Demmak A .1982. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de Dr. Ing., Université de Pierre et Marie Curie, Paris XI. (in French)
- [39] Eidenshink C .1992. The 1990 Conterminous US AVHRR Data Set. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 58, No. 6, pp. 809-813.
- [40] FAO, 1977. Assessing soil degradation. *Soils Bulletin*, vol.34, 83p
- [41] Heusch, B., 1971. Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin versant .Aplication au Maghreb.mines et géologie, Rabat .
- [42] Kustas W P et all .1993. Relationships between evaporative fraction and remotely sensed vegetation index and microwave brightness temperature for semiarid rangelands. *Journal of Applied Meteorology*. 32, pp. 1781-1790.
- [43] McColl C, Aggett G .2006. Land use forecasting and hydrologic model integration for improved land use decision support, *Journal of Environmental Management*, 84 (4) 494-512.
- [44] Markhi. A., et al , 2015. Quantification et évaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrés dans un SIG. application dans le bassin versant n'fis dans le haut atlas de marrakech (maroc), *European Scientific Journal* October 2015 edition vol. II, No.29
- [45] Meddi, M., 1992. Hydropluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina .Thèse unique, Université louis Pasteur.
- [46] Stone R.P, Hilborn D.2000. Equation universelle des pertes en terre (USLE).*SoilErosion.WaterResources Management* 16: 447–467, 2002.
- [47] Shin G J .1999.The analysis of soil erosion analysis in watershed using GIS", Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Gang-won National University.

- [48] Terfous, A., Megnounif, A., Bouanani A., 2003. Détermination des dégradations spécifiques dans trois bassins versants des régions méditerranéennes. IAHS pub. n° 278 , 366-372.
- [49] Touaibia, B., Gomer.D, Aidaoui.A et Achite, 2001. Quantification et variabilité temporelles de l'écoulement solide en zone semi aride, de l'Algérie du Nord . journal des science hydrologique. 46(1), 41-53.
- [50] Wischmeier W H, Smith D D .1978. Predicting Rainfall Erosion losses, Agriculture Handbook no. 57, US Department of Agriculture. Washington DC. USA. 58p.,
- [51] White W R .1986. Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants, Projet 5.3 du programme hydrologique international, 155 pages.

Scaling potential of the continental intercalaire geothermal waters in the grand erg oriental basin (Algeria and south Tunisia)

Radhia Essamin ¹, Samir Kamel ²

1. Institut Supérieur des Sciences et Techniques des Eaux, 6072 Zrig Gabès, 20 544946, radhiaessamin@isstegb.rnu.tn
2. Institut Supérieur des Sciences et Techniques des Eaux, 6072 Zrig Gabès, 52557056, samir.kamel@isstegb.rnu.tn

Résumé

La composition chimique des eaux souterraines des puits captant l'aquifère du Continental Intercalaire (CI) dans le bassin du Grand Erg Oriental et l'analyse détaillée des indices de saturation permettent d'identifier l'origine de la minéralisation. L'eau souterraine de CI est caractérisée par un type d'eau riche en Ca-SO₄ / Cl et un second type en Na-Cl. La composition chimique est contrôlée par la dissolution des évaporites (halite, anhydrite et gypse). Récemment, la diminution de la performance de ces puits d'eau géothermale s'explique par une incrustation dans les conduites du puits. Pour étudier le processus d'incrustation, nous avons utilisé le degré de saturation de la calcite, la dureté et l'indice de saturation de Langelier (LSI). Il a été démontré que le potentiel d'incrustation est le plus important dans l'axe du bassin, autour de la région d'El Oued (sud de l'Algérie) et dans le sud-est de la Tunisie et les frontières du Chott Djerid (El Hamma de Gabès, Tozeur et Kebili) qui correspondent aux zones de décharge. Cependant, le phénomène d'incrustation diminue vers les reliefs algériens (Tademait et Tinrhert) représentant les zones de recharge de l'aquifère.

Mots clés: Bassin du Grand Erg Oriental, Continental Intercalaire, Saturation en calcite, Dureté, LSI, Potentiel d'incrustation

Abstract

The chemical composition of groundwater from wells tapping the Continental Intercalaire (CI) aquifer in the Grand Erg Oriental basin and the detailed analysis of saturation indices enable identification of the mineralization origin. CI groundwater is characterized by a Ca-SO₄/Cl abundant water type and a Na-Cl second type. Chemical pattern is controlled by evaporites dissolution (halite, anhydrite and gypsum). Recently, the decrease in these CI geothermal water wells performance is explained by an incrustation in the well screen. To study the scaling process, we used the degree of calcite saturation, hardness and Langelier Saturation Index (LSI). It has been demonstrated that scaling potential is the most important in the basin axis, around El Oued region (southern Algeria) and in the south-east of Tunisia and the Chott Djerid borders (El Hamma of Gabes, Tozeur and Kebili) corresponding to the discharge zones. However, the scaling potential decreases towards algerian reliefs (Tademait and Tinrhert) representing aquifer recharge zones.

Keywords: Grand Erg Oriental basin, Continental Intercalaire, Calcite saturation, Hardness, LSI, Scaling potential

1. Introduction

Les ressources géothermales en Tunisie sont estimés de 4850 l/s (Ben Mohamed, 2003), avec 70% sont localisés dans la partie sud du pays où il est localisé le domaine géothermale de CI. L'eau géothermale est généralement utilisée pour la production d'électricité et l'agriculture. La production conventionnelle d'énergie électrique est limitée à des températures de fluide, d'environ 150°C (Fridleifsson, 1996).

The geothermal resources in Tunisia are estimated at 4850 l / s (Ben Mohamed, 2003), with 70% located in the CI geothermal area in the southern part of the country. Geothermal water is generally used for electricity generation and agriculture. Conventional production of electrical energy is limited to fluid temperatures of about 150 ° C (Fridleifsson, 1996).

Scaling and corrosion represent a major issue for many geothermal system operations. Aggressive properties and deposition of mineral scale can be exhibited by dissolving materials in geothermal waters. These phenomena constitute technical barriers to the utilization of geothermal resources that may gravely reduce the life of pipes, and of production or reinjection wells (Papic 1991). The boreholes that tap the geothermal Continental Intercalaire (CI) aquifer, in the Grand Erg Oriental basin, are submitted to proliferation phenomena of incrustation and corrosion. After a few years of utilization, incrustation may occur in the reservoir, as well as in the production, utilization and reinjection facilities. This may constitute one of the major problems in geothermal operations (El Guedri 1999).

The aim of this study is the delimitation and identification of the areas of the Grand Erg Oriental basin where the CI aquifer water represents a source of scaling and corrosion. The Tunisian databases, established by the Avicenne and RAF/8/35 projects, have been used (Table 1).

2. Materials and methods

2.1 Study area

The north-western Aquifer System of Septentrional Sahara (ASSS) extends over a vast area. Its boundaries are located in three countries: Algeria, Tunisia and Libya. The ASSS area, as determined by the Observatory of the Septentrional Sahara (OSS 2003), is about one million km² divided between the three countries mentioned above with 700,000 km² in Algeria, 80,000 km² in Tunisia and 250,000 km² in Libya. The study area is a part of the ASSS, specifically the Grand Erg Oriental basin, and it covers large territories of southern Algeria and Tunisia. This region is characterized by an arid desert climate, with high temperatures and low rainfall. An interesting thing about the hydrological system of the northern Sahara is its aquifer pattern that consists of the Saouara and the Melrhir basins, in Algeria. This system has a synclinal structure limited from the west and the south by the Mzab ridge and the Tademaït and Tinrherth uplands, respectively. The synclinal plunges eastward in Tunisia and Libya (Houari 2012).

At its maximum, the aquifer thickness exceeds 1500 m in depth (Edmunds et al. 2003). Its depth exceeds 2600 m in Djerid–Nefzaoua regions (Kamel 2011). The aquifer is hydraulically continuous over the whole basin from north to south, eastward from the Saharan Atlas to Tinrherth plateau and further south to the Tassili mountains, and west to east from western Algeria to the Libyan border (Edmunds et al. 2003). Recharge areas are localized in the Piedmont south of Atlas, Tinrherth uplands, Dahar, Jebel Nafusa and Jebel Hassawna (Fig. 1). The discharge areas in the Foggaras Tuat–Gourara and Tidikelt in Algeria, Ain Tawargha in Libya and the Gulf of Gabes in Tunisia. It was shown that the CI aquifer consists of several horizons, with strong artesian pressure (5–25 bars) (Guendouz 1985). Groundwater wellhead temperatures increase from less than 30 °C in the recharge area to more than 70 °C at depth (Edmunds et al. 2003). Geothermal gradient shows a variation of temperature according to depth, at each point of the CI aquifer. It varies widely from one place to another; sometimes, it is no more than 3 °C/100 m (Agoun 2010).

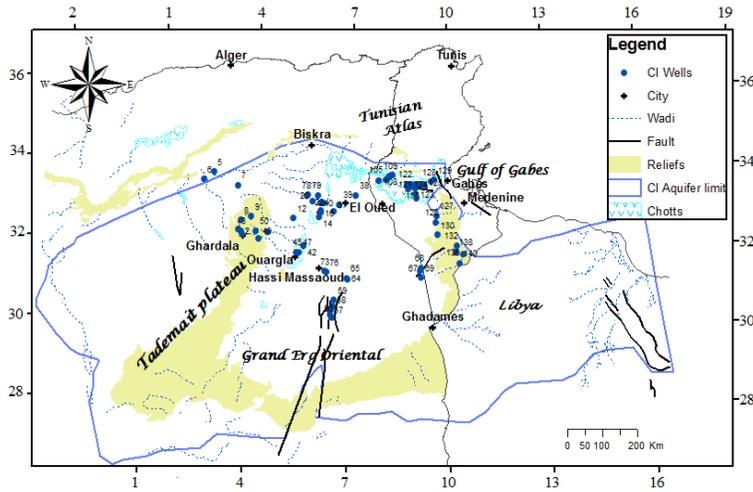


Figure 1: Location Map of CI wells in the Grand Erg Oriental basin

2.2 Groundwater sampling

More than 200 samples were collected from boreholes for chemical analysis, in the British Geological Survey (BGS) laboratories. Physical parameters such as temperature, pH, redox potential (Eh) and electrical conductivity (EC) were measured in situ using a symphony SP80PC portable instrument. Accuracy was $\pm 0.1^\circ\text{C}$ for temperature, ± 0.05 for pH; ± 0.01 V for Eh and 1% for electrical conductivity. Eh was referenced to the standard hydrogen electrode by measurement against a ZoBell's solution (Nordstrom 1977). Alkalinity (HCO_3^-) was measured in the field by acidimetric titration with 0.1 N HCl. Samples for laboratory analyses were filtered through $0.45 \mu\text{m}$ membranes. Chloride was analysed by automated colorimetry. Filtered and acidified samples (1% v/v HNO_3) were collected in polyethylene bottles for the analysis of major cations, SO_4^{2-} and a wide range of trace elements (not used in this study) by ICP-OES and ICP-MS (Edmunds et al. 2003). Calibrations for cation analyses were performed using appropriately diluted standards, and both laboratory and international reference materials were used as checks of accuracy. The precision and accuracy was verified by ionic balance which lay below $\pm 6\%$. Instrumental drift during ICP-MS analysis was corrected using In and Pt internal standards. Only analyses of water whose charge balance errors are less than 5% are used in this study.

2.3 LSI calculation

Langelier Saturation Index (LSI or saturation index) (Langelier 1936) is the most valid index in water treatment industry. It is used to evaluate the nature of water source. This index is based on calculating the pH of calcium carbonate saturation (pHs). The pHs and the measured pH are then used to calculate the SI. There are two methods of calculation, either manually or automatically.

$\text{SI} = \text{LI} = \text{pH} - \text{pHs}(1)$ where pH is actual or measured pH of the water and pHs: saturation pH (measured calcium and alkalinity concentrations are in equilibrium with solid calcium carbonate)

$\text{LSI} = \text{pH measured} - \text{pHsaturation} (2)$

where LSI is Langelier Saturation Index; pHmeasured is the measured hydrogen potential; pHsaturation is potential hydrogen saturation.

Table 3 indicates the corresponding directions at each LSI values interval.

3. Results and discussion

3.1 Water type

Water specificity relies on various factors such as the lithological characteristics of aquifers, retention time and flow pattern of groundwater flow (Baghvand et al. 2010). In order to identify the dominant water type within the CI aquifer, all samples were plotted in a Chadha diagram (Chadha 1999), which is a slightly adjusted model of the Piper diagram and the expanded Durov diagram. The difference lies on the omission of the two equilateral triangles (Chadha 1999). Samples plotted in this diagram (Fig.2) shows two groups; the alkaline earth group (group A) and the alkali metals-rich group (group B). Group A, which comprises the majority of samples, indicates that the alkaline earths (Ca+Mg) exceed the alkali metals (Na+K) and that the strong acids (Cl+SO₄) dominate over the weak acid (HCO₃⁻). Group B, assume that (Ca+Mg) are much lower than (Na+Cl) and strong acids (Cl+SO₄) dominate over the weak acid (HCO₃⁻). The two Groups A and B are plotted on the fields of the Ca-Mg-SO₄/Cl and Na-Cl water types respectively.

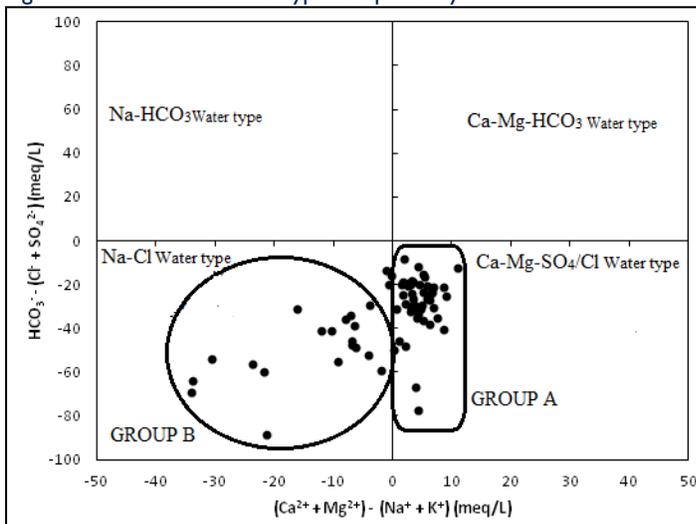


Figure 2 : Chadha Diagram showing the water type of the CI groundwater samples. Two sub-groups are identified in the Ca-Mg-SO₄/Cl water type.

3.2 Water chemistry and scaling potential

The decrease of well performance is commonly explained by an incrustation in the well screen and a clogging of particles near its entrance (Larroque and Franceschi 2011). Usually, scale is formed kinetically slowly over months or years (Rafferty 1999). Incrustation is caused by the chemical processes which control chemical precipitation of minerals in oxic environment. The calcite saturation degree is a powerful index used in the investigations of corrosion and scaling. Calcium carbonate precipitates could be formed in geothermal water by combining calcium and carbonates ions. Once the thermodynamic conditions of supersaturation are reached, calcite scales are formed swiftly (Elguedri 1999).

The calcite scaling potential is estimated by calculating SI_{calcite} . A positive value of the relative logarithmic solubility of a mineral means that the solution is oversaturated with such a particular mineral, and theoretically speaking, which ultimately would start to precipitate (Elguedri 1999). Water from CI wells is highly oversaturated with the calcite carbonate minerals (Tab.2). Figure 3 shows that the majority of oversaturated waters, with respect to SI_{calcite} , represent a scaling problem at a SI_{calcite} higher than 0.5 and a temperature higher than

30°C. Furthermore, it is apparent in figure 10 that scale problems (LSI>0.5) (Tab.2) are unlikely at pH values higher than 7.8. It is equally clear that severe scale (LSI>1) (Rafferty 1999) occurs at water hardness values between 800 and 1000 ppm (Fig.4) in Staffimi, Djemna CI 11, El Hamma CI2, El Hamma CI4, Mansoura CI13 and in Ksar Ghilane with a hardness of 2010 ppm as CaCO₃.

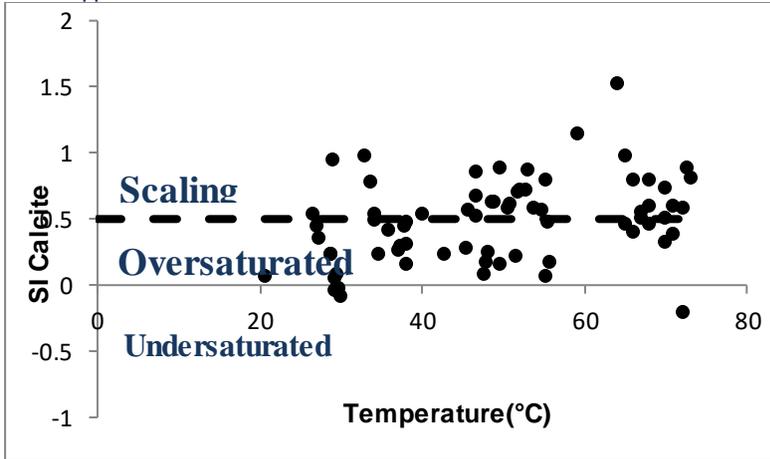


Figure 3: Saturation index of calcite vs. Temperature.

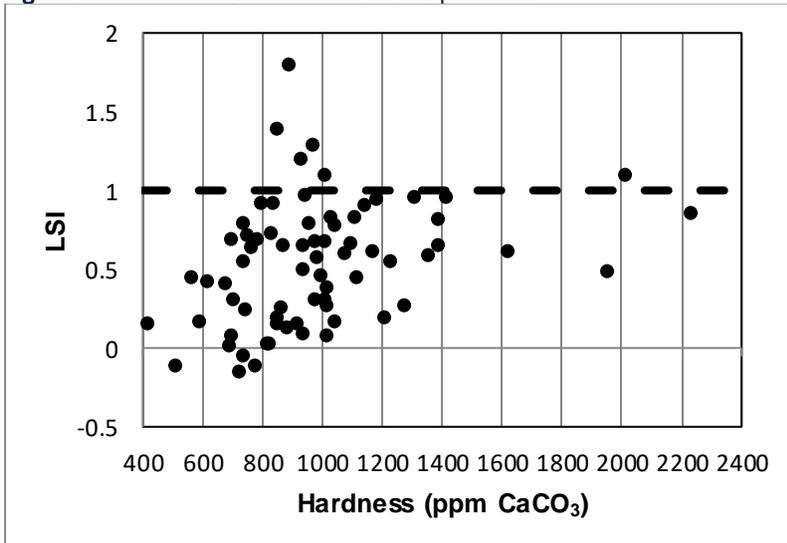


Fig. 4: Correlation of Hardness (ppm CaCO₃) and Langelier Saturation Index LSI.

The repartition map of CI water hardness shows the distribution of regions with different scaling potential. The highest potential is localised in southeastern Tunisia and the Chott Djerid borders (El Hamma of Gabes, Tozeur and Kebili regions corresponding to the CI aquifer discharge zone) and around El Oued, Biskra and Hassi Messaoud regions (Fig.4).

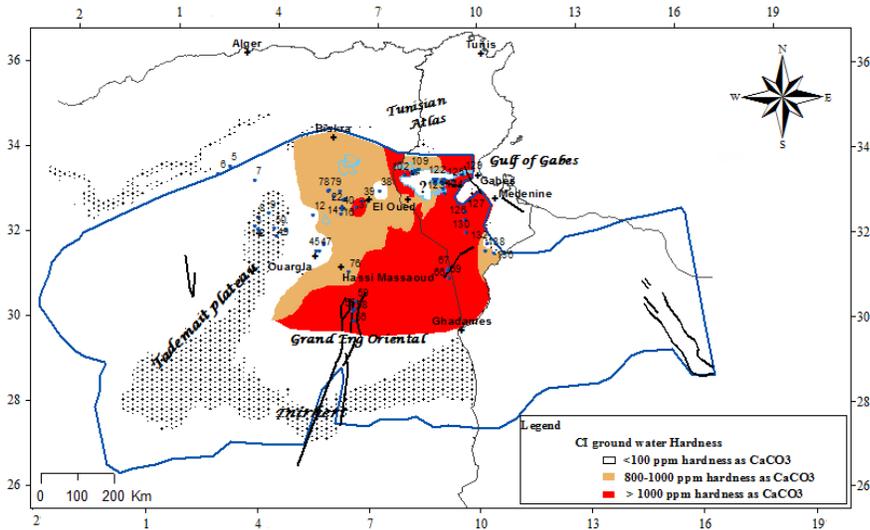


Figure 5 : Hardness repartition map.

Waters of Continental Intercalaire aquifer, in the Grand Erg Oriental basin, show the encrusting potential due to high temperatures (30-75°C). The pipes are clogged with the scale even after cooling to 30° C. However, originally, these waters are corrosive enough because of the high load of CO₂ and H₂S (Elguedri 1999). After degassing and temperature change, there will be a change in the ionic balance of acids and bases. Furthermore, an account should be taken concerning the piping material. These pipes are mostly made of steel that supports the detrimental thermodynamic instability. Steel can corrode at all pH levels. Therefore, the problems encountered by users of Cl waters will vary with the material used.

Conclusions

The detailed hydrogeochemical study conducted in the Grand Erg Oriental basin has provided data on Cl groundwater chemistry patterns and on the main processes of water mineralization. It shows two main groundwater types Na-Cl and Ca-Mg-SO₄/Cl. The major mechanisms responsible for groundwater composition is evaporite dissolution (halite, gypsum and anhydrite). Saturation state of waters with respect to these minerals reinforce mineralization assumption. The performance of wells capturing geothermal Cl waters was decreased by incrustation in the well screen. In this study, hardness was chosen as the parameter to indicate the scaling potential. A map was developed according to the hardness of Cl groundwater wells in order to demonstrate the following three levels: <800 ppm, 800 ppm to 1000 ppm, and >1000 ppm. These three concentrations reflect the areas where there would be minor regard to scaling which doesn't require any particular precautions, areas where slight amounts of scaling are possible and areas where more significant scaling could occur under appropriate conditions. The water hardness repartition map of the Grand Erg Oriental basin shows that waters with hardness values more than 800 ppm and LSI>0.5 represent a serious scale problems in the basin axis (El Oued, Biskra and Hassi Messaoud regions), in Southeastern Tunisia and in the Chott Djerid borders (El Hamma of Gabes, Tozeur and Kébili regions corresponding to the Cl aquifer discharge zone).

Acknowledgements

The authors wish to thank the anonymous reviewers for their constructive comments that improved the paper. We thank Jennifer and Charlie BLACK and Jemaa ESSEMINÉ for proofreading the manuscript.

References

- Agoun A (2010) Hydrogeological characteristics of the geothermal transboundary aquifer reservoir case study of the continental Intercalaire aquifer system in North Sahara Aquifer System (NSAS) in southern Tunisian field. Proceedings World Geothermal Congress, Bali: 25–29
- Baghvand A, Nasrabadi T, Bidhendi GN, Vosoogh A, Karbassi A, Mehrdadi N (2010) Groundwater quality degradation of an aquifer in Iran central desert. Desalination 260 : 264-275. doi: 10.1016/j.desal.2010.02.038
- Chadha DK A (1999) proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. Hydrogeology Journal 7:431-439. doi: 10.1007/s100400050216
- Edmunds W. M, Guendouz A, Mamou A, Moulla A, Shand P, Zouari K (2003) Groundwater evolution in the Continental Intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators. Appl. Geochem. 18 : 805-822
- El Guedri M (1999) Assessment of scaling and corrosion problems in the Kebili geothermal field, Tunisia. Report I in: Geothermal Training in Iceland 1999, UNU G.T.P. Iceland, pp 1–40
- Guendouz A (1985) Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara nord-est septentrional, Algérie. Dissertation, University of Paris-Sud, Orsay
- Houari IM (2012) Contribution to the study of the geochemical evolution of water from the table of Complex Terminal of the northern Sahara). Dissertation, University Kasdi Merbah, Algeria.
- Kamel S (2011) Application of selected geothermometers to Continental Intercalaire thermal water in southern Tunisia. Geothermics 41 : 63-73. doi: 10.1016/j.geothermics.2011.10.003
- Langelier WF (1936) The Analytical Control of Anti-Corrosion Water Treatment. American Water Works Association 28 : 1500-1521
- Larroque F, Franceschi M (2011) Impact Of Chemical Clogging On De-Watering Well Productivity: Numerical Assessment. J Environmental Earth Science 64 :119-131. doi:10.1007/s12665-010-0823-9
- Nordstorm DK (1977) Thermochemical redox equilibrium of ZoBell's solution. Geochimica et Cosmochimica Acta 41 :1835-1841. doi: 10.1016/0016-7037(77)90215-0
- OSS (2003). Système Aquifère du Sahara Septentrional. Volume 2: Hydrogéologie, Projet SASS, Rapport interne, Direction Générale des Ressources en Eau, Tunis, pp275
- Papic P (1991) Scaling and corrosion potential of selected geothermal waters in Serbia. The united nations university.
- Rafferty K (1999) Scaling in geothermal heat pump systems. Prepared for : U.S. Department of Energy, Idaho Operations Office and 785 DOE Place, Idaho Falls, ID 83401

Calcul et Cartographie de l'infiltration en zone semi-aride

Rym Ait Mohamed Amer I

¹ Doctorante en hydraulique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, BP1505 El Mnaeour 31000, Oran – Algérie, (+213) 041 56 03 44
aitamerrym@gmail.com

Résumé

Les ressources souterraines dans le plateau de Mostaganem (Nord-Ouest Algérien), sont très exploitées tant par l'AEP, l'industrie et l'agriculture qui connaît une demande croissante ces dernières années ; ce qui engendre une eau souterraine non contrôlée. Pour assurer sa pérennité, il est impératif d'affermir une gestion adéquate. Selon ce but, la connaissance du taux de recharge des nappes aquifères est d'un grand intérêt dans toute étude. Cet article constitue une contribution à la détermination de la recharge de la nappe du Plateau. L'étude est basée sur l'analyse des facteurs majeurs régissant l'infiltration dans cette zone, par une approche cartographique du phénomène. L'analyse a été faite par l'utilisation d'un Système d'Informations Géographiques et a été rendue possible grâce à l'élaboration des différentes couches de données spatialisées descriptives de ces différents facteurs. Cette étude a permis de classer la zone d'étude en cinq niveaux descriptifs quant au taux de recharge démontrant un zoning des valeurs varie de (0.0017% à 18%) des précipitations, permettant ainsi une recharge globale de (82mm/an).

Mots clés : recharge, infiltration, zone semi-aride, cartographie, SIG, analyse spatiale.

Calculation and mapping of infiltration in semi-arid region

Abstract

The underground resources in the tableland of Mostaganem (North-West Algeria), are very exploited both by the AEP, the industry and agriculture which knows a growing demand these last years; which generates uncontrolled groundwater. To ensure its sustainability, it is imperative to strengthen an adequate management. according to this purpose, knowledge of the recharge rate of sheets aquifers is of great interest in any study. This article is a contribution to the determination of the recharge of the tablecloth of the tableland. The study is based on the analysis of the major factors governing the infiltration in this zone, by a cartographic approach of the phenomenon. The analysis was made by the use of a Geographic Information System and was made possible thanks to the development of the different spatialized data layers describing these different factors. This study has classified the study area into five levels describing the recharge rate showing a zoning values varies from (0.0017% to 18%) of precipitation, allowing an overall recharge of (82mm/year).

Key Words: recharge, infiltration, semi-arid zone, cartography, GIS, spatial analysis

1. INTRODUCTION

La région d'étude jouit d'un climat méditerranéen semi-aride à pluies irrégulières et insuffisantes (300-400mm) [3] [4] [16] et une sécheresse qui ne cesse de persister [14] ; dont les effets se font sentir sur les ressources en eau. Parallèlement à ces conditions naturelles défavorables, le développement des activités industrielles et agricoles et l'extension des périmètres irrigués en particulier, n'ont pas été sans conséquences sur les réserves en eau. Ceci a été à la base d'une surexploitation de la ressource hydrique [1]. Face à cette situation, établir une évaluation et asseoir une gestion optimale des ressources en eau dans ces zones est devenu indispensable et afin d'y parvenir, les gestionnaires de l'eau ont besoin d'informations très précises sur les conditions de réalimentation et d'exploitation au niveau de chaque bassin hydrogéologique.

L'évaluation de la recharge des nappes d'eau souterraine est sans aucun doute l'un des paramètres les plus pertinents mais aussi le plus difficile à estimer et diverses approches ont été envisagées [12] [15]. Dans cette étude on utilise la méthode d'analyse spatiale (superposition pondérée), pour le calcul et la cartographie de la recharge du plateau de Mostaganem. Cette étude repose sur la définition des paramètres régissant l'infiltration, leurs degrés d'influence et les relations éventuelles qui existent entre eux. Chaque facteur étant étudié indépendamment, et au final on procède à la sommation de tous les indices de de la zone étudiée. L'implémentation sur un SIG (superposition des cartes thématiques des paramètres) permettra alors d'établir une carte synthèse sur laquelle seront circonscrites les zones de recharge potentielle.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

D'une superficie de 768Km², le Plateau de Mostaganem occupe toute la partie Est et Sud de la ville de Mostaganem, elle-même située dans l'Ouest Algérien à environ 80Km à l'Ouest d'Oran. Le plateau est limité au Nord par l'Oued Chéllif, à l'Ouest par la mer, au sud par la plaine de Bourdjas, à l'Est par le synclinal de Bouguirait (Fig.1).

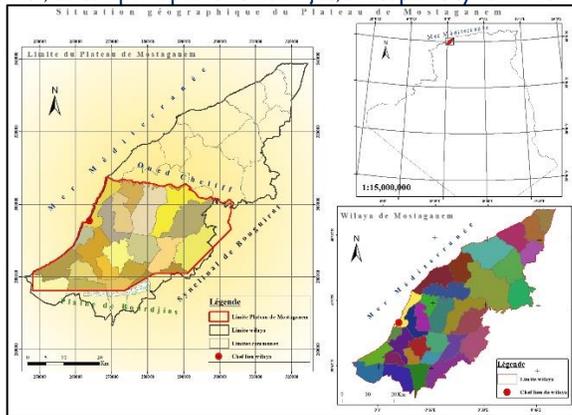


Fig. 1 - Situation géographique du plateau de Mostaganem

La méthodologie consiste à étudier chacun des facteurs qui régissent la recharge des aquifères séparément et relativement appréciés par rapport aux autres paramètres. Ensuite croiser les informations spatiales relatives aux différents facteurs. Une classification et une pondération sont ainsi définies pour chacun d'eux. Une cote (allant de 1 à 10) sera affectée à chaque classe. Par la suite, le rôle de chacun de ces paramètres dans l'infiltration est pondéré, évalué et exprimé sous le terme « d'Indice d'Infiltration » ainsi que son taux de contribution. Cet indice est une valeur numérique égale à la cote affectée d'un coefficient de pondération (poids) exprimant l'importance de l'effet exercé par rapport aux autres paramètres. La détermination des poids repose sur l'analyse des effets relationnels inter-paramètres : un point (1 pt) est attribué pour chaque effet majeur, et un demi-point (0.5 pt) pour chaque effet mineur. Le poids de chaque facteur sera alors égal à la somme des effets qu'il exerce sur les autres [5]. Le taux de contribution de chaque facteur dans la recharge potentielle correspondra alors au rapport en (%) de son indice d'infiltration sur la somme des indices de tous les facteurs. Une carte thématique est alors établie pour chaque paramètre. En dernier ; tous les indices sont sommés de la zone étudiée et l'application d'un SIG (superposition des cartes thématiques des paramètres) permettra de dresser une carte synthèse sur laquelle seront circonscrites les zones de recharge potentielle.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Etude des facteurs régissant la recharge

Les paramètres les plus utilisés dans la littérature [2] [9] sont : la lithologie, la nature du sol, le couvert végétal, la nature du relief (pente), le réseau hydrographique caractérisant la zone d'étude (densité de drainage).

3.1.1. Couvert végétal-occupation du sol (CV et OS)

La carte d'occupation des sols de la wilaya de Mostaganem, nous permet de définir les principaux types d'occupation des sols. Deux (02) classes ont été définies en fonction de la densité du couvert végétal.

Table 1 -Récapitulation des différentes classes du CV et OS.

N° classe	Classe	Type CV et OS	% surface occupée/à surface totale
1	Moyenne	Agriculture	26%
2	Forte	Materral/foret	73%

3.1.2. Couvert végétal-occupation du sol (CV et OS)

Nous avons utilisé, la carte géologique et hydrogéologique, pour regrouper les différentes lithologies rencontrées dans la zone d'étude en classes ayant les mêmes caractéristiques hydrogéologiques, en connaissant leurs capacités d'infiltration finale (If) et leurs perméabilités (K) [11]. Quatre (04) classes ont été déterminées.

Table 2 - Différentes classes en fonction de lithologie.

N° classe	Classe	Lithologie	If (mm)	K
1	Faible	Grès altérés	If < 1	Très peu perméable
2	Moyenne	Grès massifs	1 - 4	Peu perméable
3	Forte à moyenne	Calcaires massifs - sables et graviers	4 - 8	Perméable
4	Forte	Basaltes - calcaires crastiques	8 - 12	Fort perméable

3.1.3. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique a été extrait à partir du MNT [7]. Le classement des cours d'eau est en fonction de leur densité de drainage (Id). La classification adoptée permet de distinguer une (01) classe.

Table 3 - Différentes classes des sols.

N° classe	Classe	Id (Km/Km²)
1	Moyenne à faible	<1

3.1.4. Type de sol

D'après l'étude agro-pédologique, quatre (04) sols ont été observés

Table 4 - Différentes classes des sols.

N° classe	Classe	Type de sol	Superficie (Km²)
1	Très faible	Argiles	102
2	Faible	Limons / Limons silteux	56
3	Moyenne	Sables / Limons sableux	581
4	Forte à moyenne	Graviers	26

3.1.5. La pente (P)

La réalisation de la carte thématique de la pente nécessite l'établissement d'un modèle numérique de terrain. L'examen des valeurs de pentes sur ce MNT [7] a permis de déterminer quatre (04) classes.

Table 5 - Différentes classes des pentes.

N° classe	Classe	P (%)
1	Faible	0 -3
2	Moyenne	3 - 12
3	Forte à moyenne	12 - 25
4	Très forte	> 25

3.2. Evaluation des cotes des paramètres

Une cote de chaque classe a été affecté pour chacun des paramètres étudiés

Table 6 – Catalogage des cotes pour les paramètres affectant la recharge potentielle dans le plateau.

Paramètres	Description de la classe	Cote de l'effet
Couvert végétal et occupation des sols	Forte	8
	Moyenne	5
Lithologie	Forte	8
	Forte à moyenne	6.5

	Moyenne	5
	Faible	2
Réseau hydrographique	Moyenne à faible	3.5
Sol	Forte à moyenne	6.5
	Moyenne	5
	Faible	2
	Très faible	1
Pente	Très forte	10
	Forte	8
	Moyenne	5
	Faible	2

3.3. Détermination des poids

La détermination de la pertinence de chacun des paramètres face à l'infiltration, se base sur l'analyse des effets relationnels inter-paramètres, comme le montre la (Fig.2).

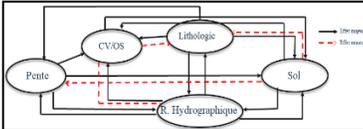


Fig. 2 – Effets entre les paramètres

Le poids de chacun des facteurs est exprimé comme suit :

Couvert végétal: 1 majeur + 2 mineurs = (1 x 1) + (2 x 0.5) = 2 pts

Lithologie : 4 majeurs = (4x1) = 4 pts

Réseau hydrographique : 4 majeurs = (4x1) = 4 pts

Sol : 2 majeur + 2 mineurs = (2x1) + (2x0.5) = 3 pts

Pente: 3 majeurs = (3x1) = 3 pts

3.4. Détermination des indices d'infiltration

L'évaluation des indices d'infiltration et du taux de contribution des paramètres sur la recharge mentionnée sur la Table7

Table 7 – Indices d'infiltration et les taux de contribution.

Facteur	Indice d'infiltration	Taux de contribution
CV et OS	26	11%
Lithologie	86	35%
Réseau hydrographique	14	6%
Sol	43.5	18%
Pente	75	31%
Total	244.5	

3.5. Etablissement de la carte de recharge potentielle

La superposition pondérée et l'agrégation des couches de dessin des cinq paramètres précédents dans le SIG a mis en place la carte cythèse. Cette carte démontre les zones majeures d'infiltration (Fig.3). Ainsi, cinq (05) niveaux descriptifs ont été mis en évidence. La projection de ces niveaux sur l'échelle proposée par la FAO [10], montre des classes d'infiltration à valeurs similaires qui vont de très faibles à très forte infiltration.

Table 8 – Indices d'infiltration et les taux de contribution.

Classe de recharge	Très faible	Faible	Moyenne	Moyenne à forte	Forte	Très forte
Taux déterminé	< 3%	5 - 10%	10 - 20%	20 - 30%	30 - 35%	-----
Taux moyen	1%	7,50%	15%	25%	32,50%	-----
Taux FAO (1967)	<5%	5 - 10%	10 - 20%	-----	30 - 35%	45 - 50%

Calcul la quantité d'eau réellement infiltrée globale et zonale, un calcul simplifié est proposé par la FAO (1967) :

$$\text{Volume infiltré } (V_{inf}) = \text{volume précipité } X (\Sigma \text{ taux de recharge } X \% \text{ de la surface}) \quad (I)$$

$$\text{Volume précipité } (V_{préc}) = \text{précipitation moyenne } X \text{ surface totale} \quad (II)$$

Surface 1=1.28Km²(0.17%), Surface 2=2.42Km²(0.32%), Surface 3=197Km²(25.66%), Surface 4= 549Km²(71.51%),

Surface 5=18Km²(2.34%). Surface totale égale à 767.7 Km².

$$P = 394 \text{ mm} = 0.394 \text{ m}, S = 767.7 \text{ Km}^2 = 7.677 \cdot 10^8 \text{ m}^2 \Rightarrow V_{préci} = 3 \cdot 10^8 \text{ m}^3/\text{an}$$

$$\text{Donc: } V_{inf} = 3 \times 10^8 (0.0017 \times 0.01 + 0.0032 \times 0.075 + 0.2566 \times 0.15 + 0.7151 \times 0.25 + 0.0234 \times 0.325)$$

$$\Rightarrow V_{inf} = 6.75 \cdot 10^7 \text{ m}^3/\text{an}$$

La lame infiltrée serait alors : $L_{inf} = 81.65 \text{ mm/an}$. Ceci veut dire que **22.51 %** des précipitations s'infiltrent.

Cette infiltration ou quantité de recharge se répartit sur la zone d'étude comme suit : **$1.7 \cdot 10^{-3}$** au niveau des terrains très peu perméables, **$2.4 \cdot 10^{-2}$** dans les régions montagneuses, **3.8%** au niveau des formations géologiques perméables à faible pente, **18%** et **0.76%** où la recharge varie de moyenne à forte et parfois très importantes, cette zone (une plaine avec plusieurs bassins versants), ceux qui favorisent l'infiltration Table 9 et (Fig.3).

Table 9 – Classes de recharge potentielle du Plateau de Mostaganem

Classe de recharge	Très faible	Faible	Moyenne	Moyenne à forte	Forte
Surface (Km ²)	1.28	2.42	197	549	18
% de surface	0.17	0.32	25.66	71.51	2.34
Volume infiltré (M ³ /an x 10 ⁶)	0.001125	0.00213	0.1723	0.48	0.1583
Lame infiltrée (mm/an)	0.000017	0.00024	0.038	0.18	0.0076

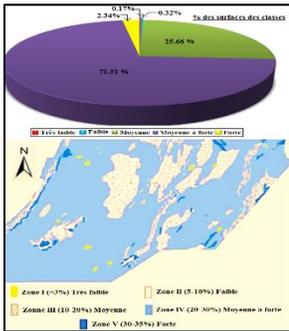


Fig. 3 – Carte synthèse de la recharge réelle Plateau de Mostaganem.

CONCLUSION

L'analyse qui a été effectuée sur une période de 17 ans, donne les résultats suivants : Précipitations (394 mm) et Ruissellement + Infiltration (139.2 mm). L'excédent (R+I) représente alors 35 % des Précipitations. La recharge réelle obtenus dans notre travail est de (81.65 mm/an). Le résultat de cette étude a été comparé à celui obtenu par la méthode du bilan hydrique effectuée au pas de temps mensuel (84.93 mm/an), ce qui montre que le résultat est significatif et comparable à celui obtenu dans notre travail.

D'après les résultats obtenus de ce travail, le taux d'infiltration ds eaux de précipitation vers la nappe du plateau de Mostaganem est moyen. Ce résultat est parfaitement logique par rapport aux propriétés hydrogéologiques et climatiques (la pluviométrie) du plateau.

Cependant, cette approche reste une proposition d'analyse spatiale qui devrait être confirmée par des mesures de terrain avant de pouvoir être utilisée dans le cadre de prises de décisions. Une validation plus rigoureuse impliquerait des mesures en différents points et une quantification de l'effet des paramètres. La validation pourrait aussi conduire à définir de nouveaux critères ou à en modifier les pondérations affectées.

Références

1. A. BAICHE & al, Surexploitation des ressources en eau de l'aquifère du Plateau de Mostaganem, Larhys Journal, 22 (2015), 153-165.
2. A. Musy, M. Soutter, Physique du sol., Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1991, p.335.
3. A. Nekkache & al, Analyse des précipitations dans le Nord-Ouest Algérien, Sécheresse, 24 (2013),107-114.
4. A.R.N.E.A, Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie, 2009, p.3-4.
5. A. Shaban & al, Assessment of road instability along a typical mountainous road using GIS and aerial photos, Lebanon - eastern Mediterranean. Bull. Eng. Geol. Env, 60 (2001), 93-101.
6. B. R. Scanlon, & al, Choisir des techniques appropriées pour quantifier la recharge des eaux souterraines, Hydrogeol. J, 10 (2002), 18-39.
7. DEM, ASTER Global DEM V2 30m, <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>
8. DEMRH, Carte Hydrogéologique du plateau de Mostaganem au 1/100 000, 1978.
9. E. K. Kouadio & al, Hydrogeology Prospecting in Crystalline and Metamorphic Area by Spatial Analysis of Productivity Potential, European Journal of Scientific Research, 22 (2008), 373-390.
10. FAO, The state of food and agriculture, 1967.
11. G. W. Musgrave, "Combien de pluie entre dans le sol ?" Dans l'eau, l'Annuaire de l'agriculture., Superintendent of Documents, Washington DC., 1955, 151-159.

12. Il-M. Chung & al, Assessing distributed groundwater recharge rate using integrated surface water-groundwater modelling: application to Mihocheon watershed, South Korea. *Hydrogeology Journal*, 18 (2010), 1253–1264.
13. J. Gauchez, Etude hydrogéologique du plateau de Mostaganem (Algérie), Thèse Doctorat 3ème cycle de géologie des ensembles sédimentaires. Tome 1. Univ. Lyon 1, p.1981, 125.
14. M. NICHANE, M. A. KHELIL, Changements climatiques et ressources en eau en algérie : vulnérabilité, impact et stratégie d'adaptation, *Revue des BioRessources* 2 (2014), 1-7.
15. M. Sophocleous, Groundwater recharge and the water budgets of the Kansas High Plains and related aquifers. *Kansas Geological Survey Bulletin*, 13 (2005), 351-365.
16. S.A. Bellal, Les ressources en eau et leur utilisation dans le plateau de mostaganem, Thèse de magister, Université Oran 1998.

Caractérisation physico-chimique et biologique des eaux du barrage de Béni-Haroun dans l'est Algérien

Saliha Kherief Nacereddine I, Hamssa Djeddi I, Naila Yasmine Benayache I et Fatima- Zohra Afri-Mehennaoui I

Laboratoire de Biologie et Environnement Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Université Frères Mentouri Constantine I. Algérie
0213555164520 / kheriefecologie@yahoo.fr

Résumé

Dans le but d'un suivi de la qualité écologique des eaux du barrage de Béni-Haroun situé à environ de 40 kilomètres au nord de la ville de Constantine et 350 Km à l'est d'Alger dans le nord-est de l'Algérie sur l'Oued Kébir ; clé du projet de transfert des ressources en eaux mobilisées par ce barrage vers Six Wilayas et l'irrigation d'environ 30000 hectares dans les plaines de TeleghmaChemoura et Tafouna. Le principal objectif de ce travail est de contribuer à l'acquisition d'une première base de données sur le phytoplancton du barrage, en termes qualitatif et quantitatif (diversité et biomasse) vis-à-vis à la variation de la qualité physico-chimique de ce dernier. Des échantillons d'eau ont été prélevés mensuellement et saisonnièrement de décembre 2015 à novembre 2016 au niveau de quatre stations, réparties sur le réservoir. L'exploitation d'une base de données, relative à douze variables physico-chimiques et biotiques, a permis de déterminer : l'évolution spatio-temporelle de chaque variable, les corrélations entre variables, la variabilité saisonnière et annuelle de la biomasse algale, de la richesse et de la dominance des groupes microalgales.

Mots clés : Barrage Béni Haroun, physico-chimique, Biologique, microalgue, est algérien

Physico chemical and biological characterization of waters dam of BeniHaroun in east Algeria

Abstract

At vicinity of the recharge site, groundwater quality was monitored to trace the progression of artificial recharge in With the aim of an ecological quality monitoring of waters of the dam of Beni-Haroun situated in approximately of 40 km in the North of the city of Constantine and 350 km east of Algiers in the north east of Algeria on OuedKebir; key of the project of transfer of the resources in waters mobilized by this dam towards Six Wilayas and the irrigation about 30000 hectares in the plains of TeleghmaChemoura and Tafouna. The main objective of this work is to contribute to the acquisition of a first database on the phytoplankton of the dam, in qualitative and quantitative terms (diversity and biomass) counterpart in the variation of the physico-chemical quality of the latter. Samples of water were taken monthly and seasonally from december 2015 to november 2016 at the level of four stations, distributed on the reservoir. The exploitation of a database, concerning twelve physico-chemical variables and bioticks, allowed determining: the spatiotemporal evolution of every variable, the correlations between variables, the seasonal and annual variability of the algal biomass, the wealth and the dominance of the group microalgal.groundwater.

Key Words: AdmBeniHaroun, Physico chemical, Biological, Microalga, East Algeria.

I. Introduction

A la suite de l'expansion démographique importante et de l'essor économique qu'a connu le pays durant ces dernières années, on assiste à des changements inquiétants dans la qualité des eaux superficielles des principaux cours d'eau algérien, engendrés par une pollution massive et anarchique tant par des matières organiques naturelles que par des produits industriels [1]. Plusieurs retenues de barrages connaissent donc des problèmes de la dégradation de leur qualité d'eau due essentiellement aux différentes sources de pollution. Le barrage de Béni Haroun est un grand complexe hydraulique stratégique en Algérie, situé dans la Wilaya de Mila au nord-est de l'Algérie. Les pollutions les plus graves à ce jour qui touchent le bassin de Béni-Haroun, sont celles dues aux activités humaines, à savoir les pratiques agricoles, industrielles, rejets domestiques diffus et, dans une moindre mesure, aux retombées atmosphériques [2]. Dans le domaine de l'environnement, il est très important de disposer d'outils capables de détecter la présence de polluants ou de substances toxiques au sein des écosystèmes aquatiques, l'eau des stations d'épuration et les effluents industriels. L'une des conséquences de cette situation est l'enrichissement de l'eau par les nutriments (P et N) indicateur d'un état avancé de l'eutrophisation. Ce phénomène provoque un déséquilibre de l'écosystème avec un développement anarchique d'algues et même une consommation intense de l'oxygène au fond des réservoirs [3]. Dans ce contexte, des études physico-chimiques et biologiques ont été réalisées, pour la première fois, dans ce système hydrologique afin de suivre son état écologique.

2. Matériels Et Méthodes

a. Présentation de la zone d'étude

Le bassin de Béni Haroun est situé en grande partie sur le versant méridional du Bombement tellien. Il représente à ce titre une zone intermédiaire entre le domaine tellien à très forte influence méditerranéenne au nord et le domaine des hautes plaines à forte influence continentale au sud. Il couvre une superficie de 5328 km², soit plus 60 % de la superficie totale du grand bassin KebirRhumel dont il fait partie [4].

Le barrage de Béni Haroun est un grand complexe hydraulique stratégique en Algérie, situé dans la Wilaya de Mila au nord-est de l'Algérie. Le barrage de 120 m de hauteur, est le plus grand barrage en Algérie avec une capacité de 960 millions de mètres cubes. Le barrage proprement dit est capable de stocker un volume d'eau (environ un milliard de m³) [5]. Avec sa grande station de pompage d'eau brute, dont la puissance est de 180 MW, le barrage alimente en eau potable plusieurs régions limitrophes de la wilaya de Mila, notamment les wilayas de Jijel, Constantine, Oum el Bouaghi, Batna et Khenchela. Le barrage fournit également une quantité importante d'eau d'irrigation pour quelques centaines d'hectares d'exploitations agricoles dans les régions voisines [6].

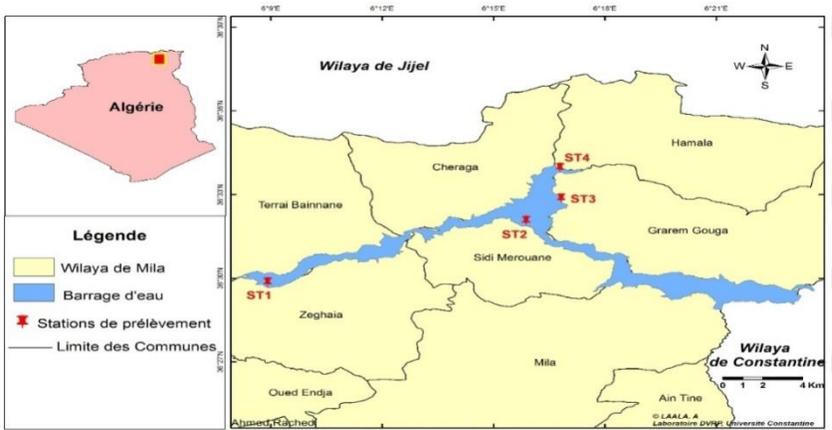


Fig. 1 - Situation géographique du Barrage (retenue) de Béni Haroun et localisation des stations de prélèvement.

2.2. Stations d'étude

Le choix des 4 stations retenues pour la présente étude est basé sur leur appartenance au barrage, ainsi que leur potentielles de pollutions. Elles sont disposées géographiquement comme ci-dessous (coordonnées GPS et altitude) (Tab.1 et Fig. 1).

Tableau 1 : Localisation des 4 stations de prélèvement

Stations	Code	Localisation	GPS	Altitude
Station 1	St1	Lieu-dit Kripssa, située en aval de Zeghaia	N : 36° 29' 33,73" E : 06° 07' 12,08"	194 m
Station 2	St2	Lieu-dit Haloufa, située en aval de Sidi Merouan	N : 36° 31' 49,06" E : 06° 15' 47,65"	197 m
Station 3	St3	Lieu-dit Anouche Ali, située en aval de Grarem Gouga	N : 36° 32' 49,51" E : 06° 16' 51,61"	197 m
Station 4	St4	Digue du barrage	N : 36° 33' 59,49" E : 06° 16' 47,16"	196 m

2.3. Méthodologie de travail

Durant la période allant de décembre 2015 à novembre 2016, quatre prélèvements saisonniers ont été effectués en surface, au niveau de quatre stations situées (Fig.1). Les paramètres physico-chimiques : pH, CE, T° et O2 dissous, sont mesurés in situ moyennant respectivement un pH-mètre, un conductimètre, un thermomètre et un oxymètre avec un Multi 3420 SET G. Les autres paramètres nutritifs (PO4-2, NO3-, NO2-, Ca2+, Mg2+, Na+, K+) sont déterminés selon les méthodes décrites par[7]. Les analyses quantitatives du phytoplancton ont été accomplies sur un litre d'eau collecté à l'aide d'une bouteille d'eau en polyéthylène. L'aspect qualitatif du phytoplancton a été réalisé selon des traits verticaux et

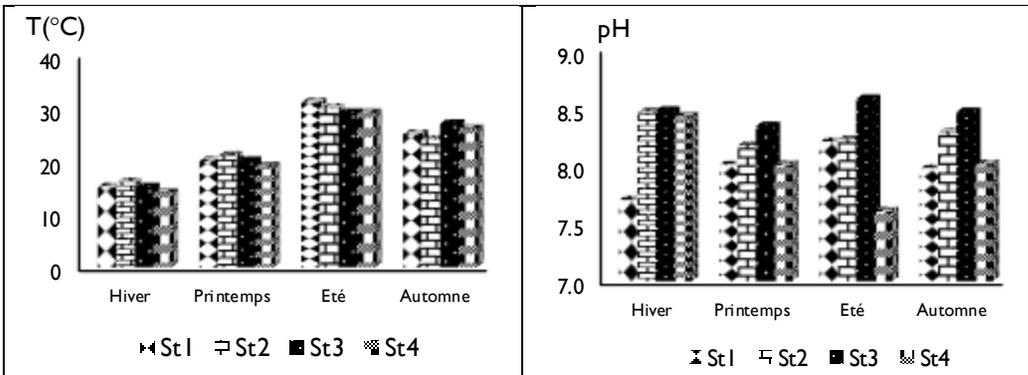
horizontaux à l'aide d'un filet à plancton de 20 µm de maillage. L'examen qualitatif et quantitatif a été établi à l'aide d'un microscope de type Leica, ayant subi fixation au lugol et concentration par sédimentation. Les cellules, les colonies et les filaments, ont été comptés en triplicats à la cellule de Thoma, au microscope optique (x 400). L'identification a nécessité des clefs de détermination spécialisées dont celles de [8,9, 10], [11], [12], [13] et [14]. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel (SPSS 19).

3. Résultats Et Discussion

3.1. Paramètres abiotiques

Les paramètres physico-chimiques mesurés varient légèrement durant la période d'étude à toutes les stations. Les valeurs de températures sont comprises entre 14° et 31°C, les plus basses en saison hivernale et printanière alors que les plus élevées en été et automne, cette variation est liée pratiquement aux variations des températures de l'air [15]. Les couches superficielles de la retenue sont bien oxygénées durant la période d'étude et le pourcentage de saturation varie entre 69 et 132%. La sursaturation est observée essentiellement en saison printanières et estivale pratiquement dans toutes les stations d'étude ceci est due peut être à l'augmentation de l'activité photosynthétique. Le pH de l'eau demeure alcalin. Les valeurs varient globalement entre 7,6 et 8,9 (fig 2). Les quatre saisons enregistrent en générale les plus fortes valeurs spécialement à la station (St3), ceci est lié probablement à l'importante activité photosynthétique qui commence à la fin de la saison hivernale et s'étale jusqu'à la fin de la saison automnale, d'ailleurs, nous avons remarqué une présence accrue du phytoplancton durant cette période d'étude de l'année 2016. Les valeurs de la conductivité oscillent entre 1175 et 1288 µS/cm. Celles les plus élevées sont enregistrés en saison hivernale et automnale expliquant une forte minéralisation des eaux de ce barrage.

Le suivi saisonnier d'un ensemble d'éléments nutritifs (fig. 3) a révélé des valeurs de nitrates qui oscillent entre 4 et 9,2 mg/l. Suite à la chaleur qu'a connue la région pendant la période d'étude, les teneurs en nitrates montrent un léger gradient saisonnier avec de fortes concentrations pendant les périodes des basses eaux (été et automne), ce résultat peut être lié au phénomène d'évapotranspiration qui concentre les ions nitrates [16]. En outre, les plus fortes concentrations ont été enregistrées aux stations les plus exposées aux apports de pollution par les eaux de ruissellement et les différentes activités anthropiques pratiquées par les populations des régions à proximité du barrage



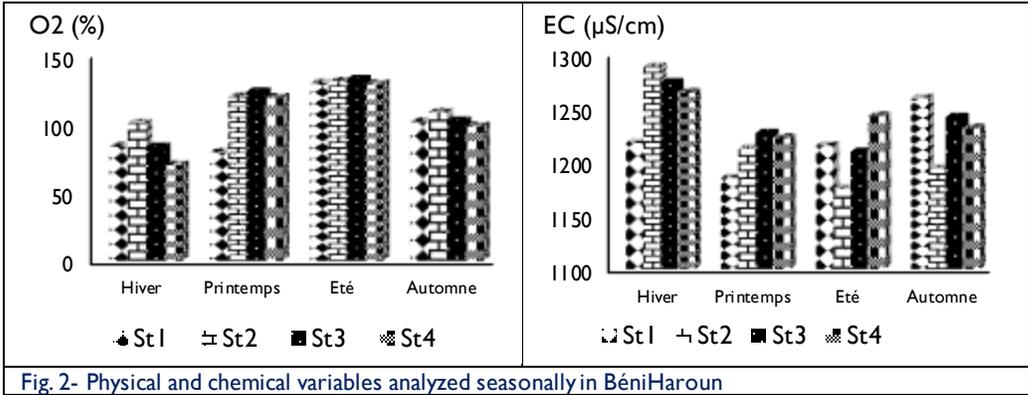
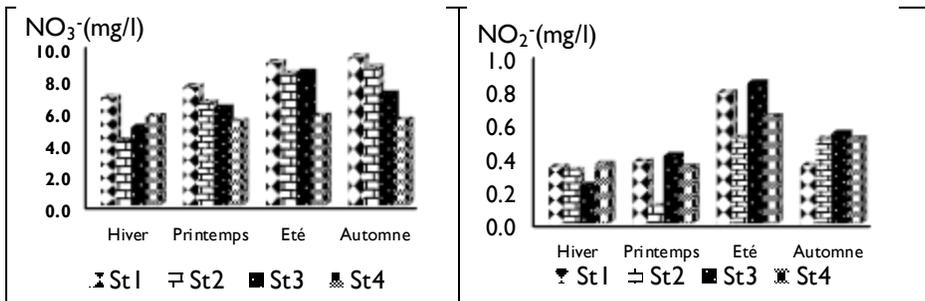


Fig. 2- Physical and chemical variables analyzed seasonally in BéniHaroun

D'après [17], la plupart des pollutions par les nitrates sont causées par l'élevage intensif ce qui est largement pratiqué dans notre région d'étude. Les valeurs des nitrates obtenus restent inférieures à celles admises par le [18] qui sont 50mg/l. Les nitrites quant à eux varient entre 0,1 et 0,8 mg/l ; les plus fortes valeurs sont obtenues en saison estivale et automnales avec des valeurs qui dépassent 0,2 mg/l, valeur limite des eaux destinés à l'alimentation humaine. Concernant les phosphates, l'ensemble des résultats obtenus n'excèdent pas la valeur limite 0,7 mg/l [7], ce qui ne présente aucun risque actuellement. De même que ces derniers, le calcium, le sodium, le magnésium et le potassium présentent des valeurs ne dépassant pas respectivement les valeurs limites 200 mg/l pour le Ca⁺² et le K⁺, 150 mg/l pour Mg⁺² et 12 mg/l pour le Na⁺ [18]. En générale l'ensemble des éléments nutritifs varient dans le temps et légèrement dans l'espace. La saison chaude enregistre les teneurs les plus élevés, ceci est expliqué par l'effet de l'évaporation. Selon, les normes des eaux de surface [19]; la qualité des eaux du barrage ne présente aucuns aléas pour la santé. Néanmoins l'eau a pour exception, les nitrites qui excèdent les valeurs limites. Comme nous signalons, une minéralisation souvent excessive des eaux du bassin versant Kébir-Rhumel due essentiellement à la nature géologique des terrains drainés [2].



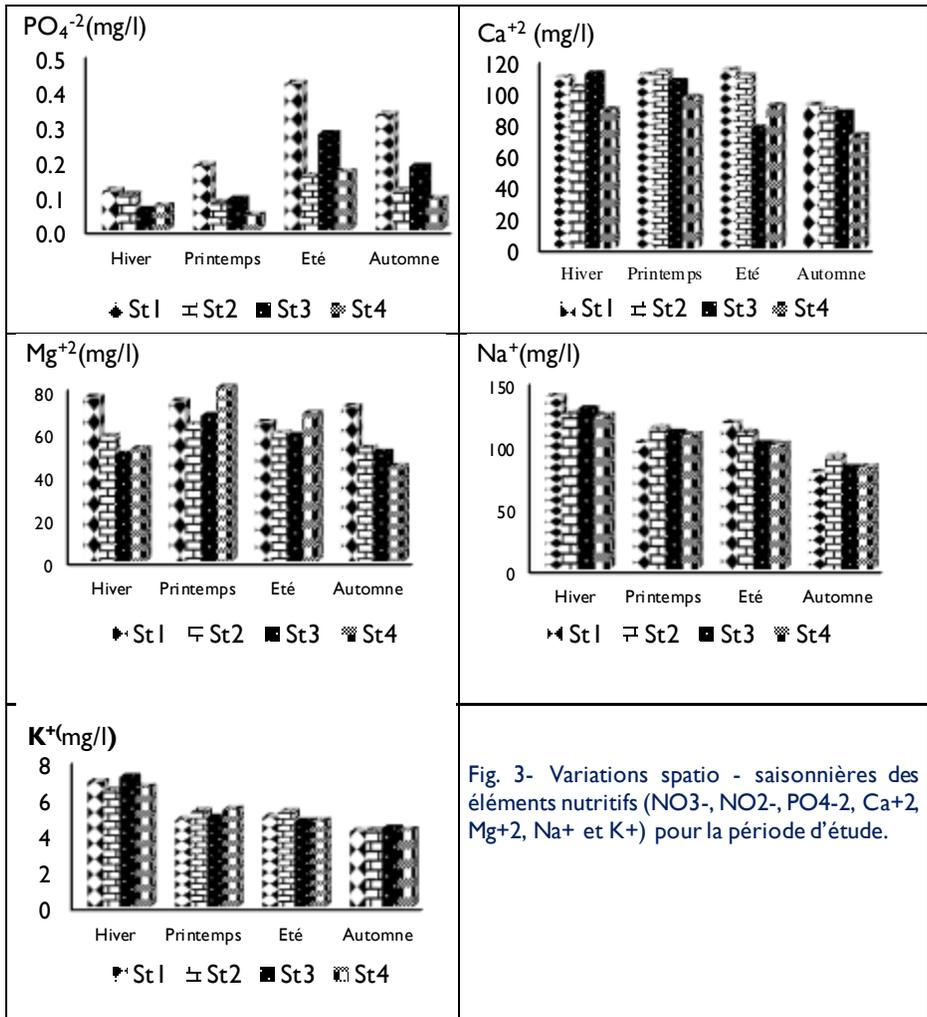


Fig. 3- Variations spatio - saisonnières des éléments nutritifs (NO₃⁻, NO₂⁻, PO₄⁻², Ca⁺², Mg⁺², Na⁺ et K⁺) pour la période d'étude.

3.2. Paramètres biotiques

Les barrages se distinguent des autres écosystèmes hydrologiques par des caractéristiques physico-chimiques et biologiques particulières [20]. L'effet de quelques paramètres nutritifs sur la composition phytoplanctonique a révélé des variations saisonnières très importantes au cours de l'année 2016. Selon la figure 4, la quantité de biomasse varie entre 10.10³ et 23.10³Cell/l. Les plus importantes pendant la saison chaude (été et automne) avec des valeurs pic à la station (St3) (23.10³ et 19.10³Cell/l) respectivement en saison estivale et automnale. La saison printanière n'est pas non plus négligeable c'est le début du développement phytoplanctonique représentées essentiellement par des Bacillariophycées et des Cyanophycées, dont la densité est nettement plus élevée durant l'année d'étude à cause de la chaleur très fréquentée. En général, trois phases de croissance caractérisent le développement du phytoplancton : i) Printanière caractérisée par une abondance des Bacillariophycées, des Cyanophycées (Cyclotellasp) et des Chlorophycées ; ii) Estivale marquée par un développement intensif des Cyanophycées et des Chlorophycées

(Cosmariumsp) et iii) automnale dominée par es Cyanophycées caractérisant la région méditerranéenne.

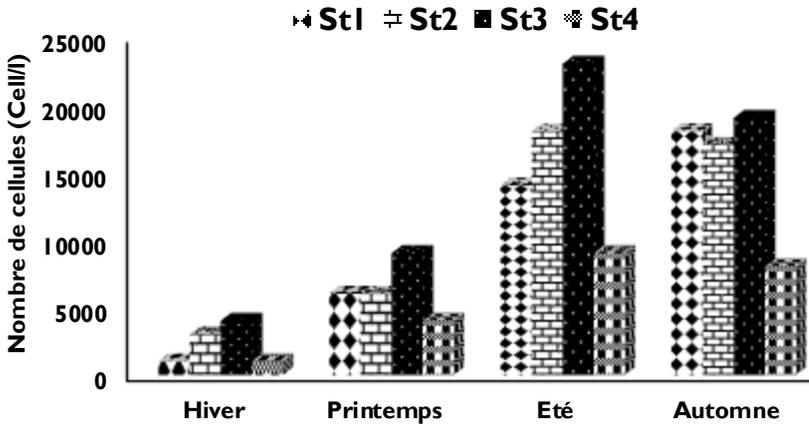


Fig. 4 - Variation saisonnière de la quantité de biomasse dans les quatre stations d'étude durant la période allant de décembre 2015 à novembre 2016

Pendant la saison hivernale (fig.5), la contribution des groupements phytoplanctoniques est attribuée au Bacillariophycées > Cyanophycées > Chlorophycées suivi par une faible apparence Euglenophycées et les Mediophycées qui ne dépassent pas le 10%; le printemps avec une contribution intense des Bacillariophycées > Cyanophycées > Chlorophycées ; l'été avec une forte contribution des Cyanophycées > Bacillariophycées > Chlorophycées > Cryptophycées. La saison automnale se présente avec la même formation phytoplanctonique que celle précédente. Cependant, notre région fait partie du climat méditerranéen, ceci favorise la persistance des Cyanophycées dans les eaux douces eutrophes qui peuvent aller jusqu'au début de la saison hivernale [21 ; 22]. L'effet saisonnier lié aux facteurs abiotiques agit fortement sur la dynamique de la composition algale. Des fluctuations saisonnières de l'abondance ont été observées chez de nombreuses espèces, même dans un environnement dont la salinité varie peu (limnétique / oligohaline) [23].

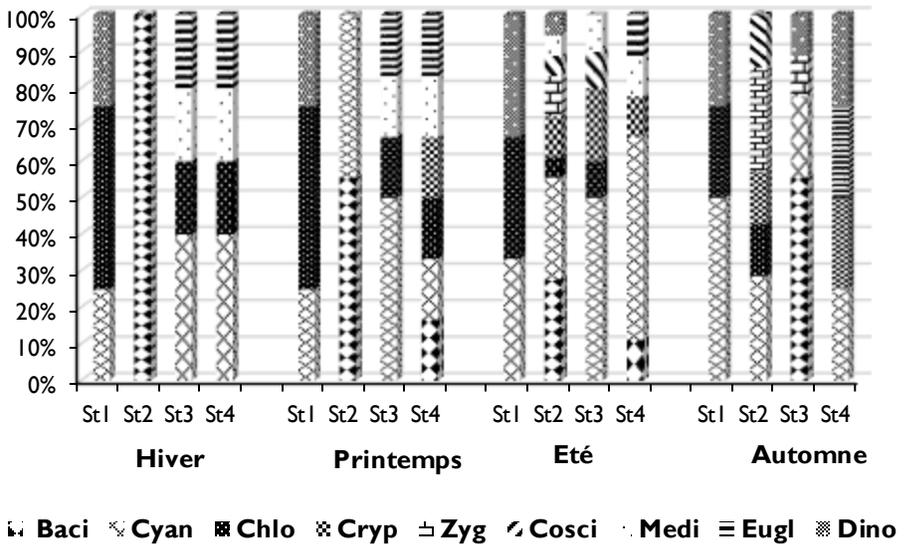


Fig. 5 - Contribution relative (%) des groupements phytoplanctoniques dans le Béni Haroun (Abréviations: Cryp—Cryptophyceae; Cyan—Cyanophyceae; Baci—Bacillariophyceae; Chlo—Chlorophyceae; Eugl—Euglenophyceae; Cosci—Coscinodiscophyceae; Dino—Dinophyceae; Medi—Mediophyceae; Ulvo—Ulvophyceae; Zyg—Zygnematophyceae

3.3. Analyse statistique

Par le biais du logiciel (SPSS19) et d'après le résultat du test de corrélation, reflétant, la relation entre les paramètres abiotiques et la quantité de biomasse phytoplanctonique, on constate en générale que la quantité de biomasse est hautement corrélée positivement ($p < 0,01$) avec la température ($r = 0,712$), le pH ($r = 0,432$), l'oxygène dissous ($r = 0,441$) et les nitrates ($r = 0,577$). Et significativement positive ($p < 0,05$) avec le les phosphates ($r = 0,531$) et les nitrites ($r = 0,364$; alors que négativement avec le sodium ($r = -0,469$) et le potassium ($r = -0,499$). D'autres corrélations ont été bien observées entre les paramètres abiotiques eux même. D'après [24], l'effet le plus important de la pollution organique dans un milieu aquatique est dû à l'enrichissement en substances nutritives et qu'il y a une corrélation claire entre la pollution organique et le développement du phytoplancton.

CONCLUSION

Les résultats présentés dans cette étude relatifs aux eaux de Béni Haroun constituent une contribution à la compréhension de l'état actuel de ce système hydrologique. Bien que, les paramètres physico-chimiques semblent être les premiers descripteurs de la qualité des eaux, la partie biologique reste la plus représentative car elle donne une idée réelle de la composition et la structure trophique liée aux conditions environnementales. Une variation saisonnière dans l'ensemble des paramètres physico chimique et nutritifs est bien observée au cours de notre période de travail. Cette dernière agit fiquement sur la composition phytoplanctonique. Les cyanophycées sont le groupement le plus abondant caractéristique des régions semi-aride et qui apparaisse presque le long de l'année, ce qui, mérite une bonne attention dans l'avenir.

Références

- [40] L. Bennasser, M.Fekhaoui, J. L. Benoit-Guyoud et G. Merlin, Influence of tide on water quality of lower Sebou polluted by Gharb plain wastes (Morocco). *Wat. Res.* 31, 4, (1997) 867 – 867.
- [41] S. KheriefNacereddine, H. Djeddi, N.Y. Ben Ayache et F.Z. Afri-Mehenaoui, Dynamique des éléments nutritifs et du phytoplancton dans le barrage Béni Haroun dans l'est Algérien. *European Scientific Journal..* Vol.14, No.12 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431. (2018)111-129.
- [42] Y. El Ghachtoul, M.Alaoui, H. Gabi, Eutrophisation des eaux des retenues des barrages Smir et Sehli (Maroc) : Causes, conséquence et consignes de gestion. *Revue des Sciences de l'Eau*, (2005) 75-89.
- [43] S.Kerdoud, Le bassin versant de Béni Haroun eau et pollution. Mémoire de Magister en Aménagement du territoire. Université de Constantine I Algérie(2006).
- [44] L.Chebbah, A.Kabour, Impact de la retenue d'un barrage sur le régime climatique local : cas de Béni Haroun (Est Algérien). *Larhyss Journal*, ISSN 1112- 3680, n°33, (2018) 51-69
- [45] ANBT, Agence Nationale des barrages et transferts, Mila. Barrage de Béni Haroun sur l'Oued Kebir, Monographie, volume I, Tractebel Engineering.2002
- [46] J.Rodier, L.Bernard, M.Nicole, coll., L'analyse de l'eau. 9e édition Dunod Paris, 2009, pp. 1579
- [47] P.Bourrelly, Les algues d'eau douce. Initiation à la systématique. Tome I : Les algues vertes. Eds. Boubée et Cie, Paris, 1966.pp.510
- [48] P. Bourrelly, Les algues d'eau douce. Initiation à la systématique. Tome II : Les algues jaunes et brunes, Chrysophycées, Phéophycées, Xanthophycées et Diatomées. Eds. Boubée et Cie, Paris, 1968. pp.438
- [49] P. Bourrelly, Les algues d'eau douce. Initiation à la systématique. Tome III: Les algues bleues et rouges. Les Eugléniens, Péridiniens et Cryptomonadines. Eds. Boubée et Cie, Paris, 1970. pp.512
- [50] G. Drebes, Marine Phytoplankton: Auswahl der HelgolanderPlanktonalgen (Diatomeen, Peridineen). Ed. George Thiems, Stuttgart, 1976. pp.177
- [51] H.Germain, Flore des Diatomées. Eaux douces et saumâtres. Eds. Boubée et Cie, Paris, 1981. pp.443
- [52] E.Balech, Los Dinoflagelados Del Atlantico Sud-occidental. *Publ Esp Ocean I*, 1988. pp.310
- [53] I.Lavoie,PB.Hailton, S.Campeau, M. Grenier, PJ.Dillon, Guide d'identification des diatomées des rivières de l'est de Canada. Presse de l'université du Québec. Imprimé au Canada,2008. pp. 241
- [54] J. Rodier, Analyse de l'eau ; Eaux naturelles, Eaux résiduares, Eau de mer. Ed. 2005
- [55] N. Bougherirra et B. Aoun-Sebaiti, Impact des rejets urbains et industriels. *Courrier du Savoir – N°13*, Avril 2012, 63-69
- [56] F. Derradji, H. Bousnoubra, N. Kherici, M. Romeo, R. Caruba, Impact de la pollution organique sur la qualité des eaux superficielles dans le Nord-Est algérien. *Sécheresse*, 18 (1):(2007) 23-27.
- [57] Joradp, Décret exécutif fixant les objectifs de qualité des eaux superficielles et souterraines destinées à l'alimentation en eau des populations. Joradp n°34 du 19 juin 2011.
- [58] ABH, Aménagement des bassins hydrauliques. Constantine. Algérie. (1999)
- [59] O.Chérifi, M.Loudiki, Variations de la structure du lac-réservoir oligotrophe Bin El Ouidane (Maroc). *Rev. Sci. de l'Eau* 75,1, (2002)193-208
- [60] K. Ar. Kormas, S. Gkelis, El. Vardaka, M. Moustaka-Gouni, *Limnologica* :

Morphological and molecular analysis of bloom-forming Cyanobacteria in two eutrophic shallow Mediterranean lakes, 41: (2011)167-173

[61] K. Sivonenn, G. Jones, Edited by Ingrid Chorus and Jamie Bartram: Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management. (1999) 55-124

[62] M.R. Chapman, B.M. Funnell, P. E. Weaver, Marine Micropaleontology: Isolation, extinction and migration within Late Pliocene populations of the planktonic foraminiferal lineage Globorotalia (Globococcone) in the North Atlantic., (1998)203-222

[63] C.M. Palmer, Journal of Phycology: A Composite rating of Algae Tolerating Organic Pollution., (1969) 75-82.

Experimental study of the effect of the compactness on the sequent depths ratio of the hydraulic jump controlled by thin sill in a rectangular channel

Sonia Cherhabil¹

¹Research Laboratory in Civil and Hydraulic Engineering,
Sustainable Development and Environment (LARGHYDE)
University of Biskra, BP145 RP07000.ALGERIA
tel: 213 550878215
soniacherbabil@hotmail.fr

Abstract: Our study is an experimental analysis of the effect of the compactness $\gamma = \frac{L^*}{h_1}$ on the sequent depths ratio $Y = h_2/h_1$ of the hydraulic jump evolving in a rectangular channel. Experimental results have shown that the movement of the sill to the upstream causes the compactness of the jump, and gives several configurations of the latter. This influence translated by the different parameters of the hydraulic jump, such as the sequent depths ratio. Concerning the relation of the sequent depths ratio Y as a function of the inflow Froude number F_1 and the compactness γ , we found that it is linear in the form $Y = aF_1$. For a given value of the inflow Froude number F_1 , the sequent depths ratio decreases when the ratio of compactness increases. These results lead us to an optimal sizing of channels similar to the one which has been studied.

Keywords: open channels, hydraulic jump, rectangular channel, compactness, sequent depths ratio, stilling basins.

1. Introduction

A hydraulic jump is a phenomenon in the hydraulics science which is frequently observed in open channels flow such as rivers and spillways. When liquid at high velocity discharges into a zone of lower velocity, a rather abrupt rise occurs in the liquid surface. The rapidly flowing liquid is abruptly slowed and increases in height, converting some of the flow's initial kinetic energy into an increase in potential energy, some energy is irreversibly lost through turbulence to heat.

These last years the hydraulic jump has been the subject of several fundamental and applied researches. From a practical point of view, these are mainly the geometrical dimensions of the basin of dissipation which concern the hydraulics engineer. These dimensions are closely related to the characteristics of the jump and the geometric shape of the channel in which it evolves. The bibliography shows that the modification of the conditions to the upstream (flow, heights... etc.) and downstream (type of obstacle, its position, height, the slope of the channel, the roughness of the bottom ...etc.) can lead to different configurations of the projection. The study of the hydraulic parameters of the hydraulic jump, such as the sequent depths ratio, the loss of energy as well as the length of the jump has attracted the attention of various researchers. In effect, several authors have addressed the question of the hydraulic jump in different geometric profiles.

Hager and Bretz (1987), Rajaratnam (1964, 1965, 1967 and 2002), Rajaratnam and Murahari (1971), Rajaratnam NR, Subramania K (1967) and Rand (1957 and 1965) which studied the hydraulic jump in a horizontal rectangular channel.

2. Experimental set up

Experimentation was made in a rectangular channel of 7m length and 29.23cm width; at the Research Laboratory (LARGHYDE) of the hydraulic department of University of Biskra (fig. 1). The hydraulic jump was created by setting a sill at the channel extremity. Initial flow is generated by a bottom sluice gate (fig. 2) and the opening heights correspond to the

upstream sequent depths: h_1 (mm)= 30 ; 40 ; 50 and 60 mm. For each Initial flow h_1 , 09 thin sills of different heights $s = 2$ cm; 3 cm; 4 cm; 5cm ; 6cm ;7cm; 8cm; 9cm and 10cm; were used to control the hydraulic jump (fig.3). A practical range of inflow Froude number was obtained ($3 \leq F_1 \leq 9.11$).



Fig. 1. Experimental model of the rectangular channel.



Fig. 2. Manual metal plate (bottom sluice gate).

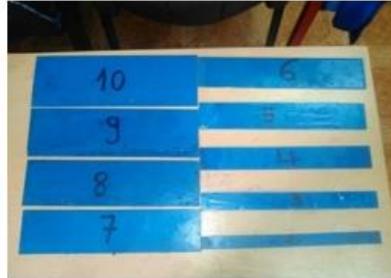


Fig. 3. Thin sills with different heights.

For a height s and a position x of the sill and for a height h_1 of the incident flow, the increase of the flow discharge Q causes the appearance of the jump. The value torque (Q, h_1) also makes it possible to calculate the inflow Froude number F_1 . Each value of the inflow Froude number F_1 corresponds to a value of the length L_j , a value of the roller length L_r^* and a value of the height s of the sill.

A sample of more than 88 experimental measurement points, for each of the parameters involved in the phenomenon, led to significant results. These parameters are: the flow discharge Q , the upstream height h_1 , the downstream height h_2 , the sill height s and the position x of the sill with respect to the beginning of the jump Δx . This allows the following non-dimensional products to be composed: the inflow Froude number F_1 , the sequent depths ratio Y and the compactness ratio γ . L_r^* being the length of the roller of the classic jump which is given by the experimental relation of the relative length of the classical jump

$L^*/h_1 = f(F_1)$. The inflow Froude number F_1 is such that: $F_1^2 = \frac{Q^2}{g \cdot b^2 \cdot h_1^3}$ (1). These non-dimensional products can be linked by the functional relations: $f_i(F_1, Y, \gamma) = 0$. One of the objectives of this part of our study is to define, by laboratory experimentation, the functional relationship f_i . This will also make it possible to evaluate the ratio γ of compactness of the jump, knowing one of the pairs of values (F_1, Y) .

For each pair of values (h_1, Q) , the inflow Froude number F_1 is calculated according to relation (1). In fact, each series of tests was carried out for a given opening h_1 and under different flow discharge, while considering the length Δx . Thus, for h_1 and x known, different profiles of the projection are obtained with increasing flow rate each corresponding to a given value of the height s of sill.

Thus, we obtain a configuration of the controlled jump (Fig. 4, 5, 6, 7).

The knowledge of the values of L^* and of x allow the determination of the ratio γ of compactness of the projection, this being equal to

$$L^* / x.$$

The displacement of the sill in the upstream direction causes the compactness of the hydraulic jump and leads to several configurations of the latter. The various configurations of the hydraulic jump can also be obtained with an increasing flow rate by fixing the height s of the sill, which causes a progressive decrease in the distance x between the beginning of the jump and the position of the sill. This decrease is followed by a slight increase in the upstream sequent depth h_1 . The latter is significant only for relatively large distances Δx .

Four (04) intervals of compactness ratios, covering the entire range of experimental measurement points (47 points), were analyzed, each corresponding to an intermediate configuration of the controlled jump.

$$\gamma \leq 0,9 ; 0,91 \leq \gamma \leq 1,10 ; 1,11 \leq \gamma \leq 1,30 ; 1,31 \leq \gamma \leq 1,50 ; 1,51 \leq \gamma \leq 1,70.$$

Each class of measurements is represented by its center as shown in Table 2.2:

Table 1. Mean ratio of the compactness ratios

Ratio intervals of γ	$\leq 0,9$	0,91 – 1,10	1,11 – 1,30	1,31 – 1,50	1,51 – 1,70
Average ratio Of γ	-	1,01	1,21	1,41	1,61

The values of γ less than or equal to 0.9 correspond in fact to the configuration of the conventional jump.

The following photographs (Fig.4), (5), (6), (7), represent five different configurations of compactness of hydraulic jump controlled by thin sills in rectangular channel.



Fig.4. hydraulic jump controlled by a thin sill

$IF_1 = 4,801$ $s = 8$ cm, $h_2 = 19,1$ cm, $h_1 = 4$ cm, $\gamma = 0,205$, $x = 400$ cm.



Fig.5. hydraulic jump controlled by a thin sill

$IF_1 = 5,70$ $s = 7$ cm, $h_2 = 18,82$ cm, $h_1 = 3,7$ cm, $\gamma = 1,37$, $x = 200$ cm, $\Delta x = 105$ cm



Fig.6. hydraulic jump controlled by a thin sill

$IF_1 = 4,72$ $s = 7$ cm, $h_2 = 16,72$ cm, $h_1 = 4$ cm, $\gamma = 1,22$, $x = 81$ cm



Fig.7. hydraulic jump controlled by a thin sill

$IF_1 = 8,03$ $s = 7$ cm, $h_2 = 14,4$ cm, $h_1 = 2,95$ cm, $\gamma = 1,13$, $x = 116$ cm, $\Delta x = 40$ cm

3. Experimental results

3.1. Variation of the relative length L_r^*/h_1 of the surface roll as a function of the inflow Froude number F_1

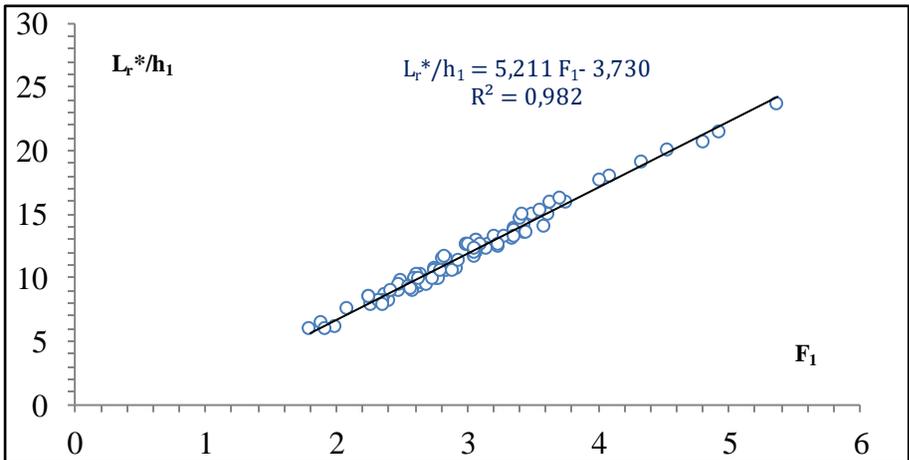


Fig.8. variation of L_r^*/h_1 as a function of the inflow Froude number F_1 ,

(-) Curve of adjustment of the relative length of the classical roller L_r^*/h_1 .

(o) Experimental Points.

Figure 8, shows that increasing the inflow Froude number F_1 generate that of the relative length of the roller.

The adjustment of the experimental points has led to a linear relation of equation:

$L_r^*/h_l = (5, 211 F_l - 3,730)$ (2)
 For $1, 80 < F_l < 5.37$

Table 2. Experimental measurements used to trace Figure 8

F_l	L_r^*/h_l	F_l	L_r^*/h_l	F_l	L_r^*/h_l	F_l	L_r^*/h_l
2,27	8,33	3,36	14,00	3,23	12,50	2,36	8,33
2,91	10,83	2,78	10,00	3,24	12,75	2,73	10,00
2,62	9,33	4,34	19,14	2,60	10,00	2,32	8,33
3,58	14,17	2,33	8,25	2,99	12,67	3,05	11,67
2,77	10,00	2,62	10,25	2,75	10,67	1,91	6,00
3,34	13,17	3,07	12,99	4,80	20,80	2,08	7,60
2,37	8,33	2,48	9,50	3,36	13,33	2,25	8,60
2,50	9,83	2,75	10,75	3,63	16,00	2,63	10,00
2,64	10,33	3,16	12,75	3,07	13,00	2,35	8,00
2,27	8,00	2,40	8,30	3,75	16,00	2,58	9,00
3,07	12,00	2,65	9,75	4,09	18,00	2,89	10,60
3,44	13,60	2,83	11,67	3,10	12,67	2,57	9,20
2,35	8,20	3,21	13,33	3,44	14,33	2,94	11,40
2,60	10,00	4,93	21,55	3,71	16,33	2,80	10,70
2,87	11,00	3,14	12,33	4,01	17,67	3,45	13,60
3,00	12,60	3,62	15,00	1,80	6,00	2,25	8,50
2,68	9,80	2,84	10,66	1,89	6,50	3,01	12,75
2,84	11,50	3,28	13,33	1,99	6,25	2,42	9,00
3,50	15,00	3,56	15,33	2,37	8,75	3,06	12,00
2,48	9,00	4,53	20,06	2,55	9,38	3,40	14,75
2,82	11,60	5,37	23,67	2,69	9,50	3,06	12,40
3,06	12,60	3,37	13,75	3,07	12,25	3,42	15,00

3.2. Ratio of the conjugate heights of the hydraulic jump for $\gamma \leq 0.9$

For a wide range of inflow Froude number F_1 , placing a thin sill downstream of the channel at a distance x from the sill greater than the length L_r of the roller, corresponding to a compactness ratio $\gamma \leq 0,9$, has practically no influence on the Y^* ratio of the conjugate heights of the classical jump.

3.3. Ratio of the conjugate heights of the hydraulic jump for $\gamma > 0.9$

Figure 9, shows the experimental measurement points and their adjustments. The experimental measurement points move away from the theoretical curve of the conventional jump ($\gamma \leq 0.9$), as the compactness ratio γ increases. This distance starts to be noticed from $\gamma \geq 1.21$.

Moreover, for each compactness ratio γ , relating to a given configuration of the hydraulic jump, the experimental measurement points adjust to the turn of a linear type curve of the form $Y = aF_1$.

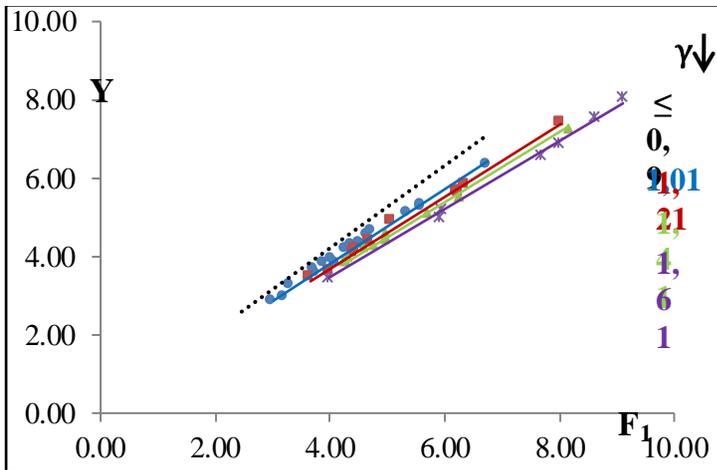


Fig.9. Variation of the sequent depths ratio Y as a function of the inflow Froude number F_1 and for different values of the ratios intervals of compactness γ : (●) 1.01, (■) 1.21, (▲) 1.41, (*) 1.61. (... ..) Experimental curve of the classical jump for $\gamma \leq 0.90$. (-) Adjustment curves.

The graphical representation of the experimental measurement points shows that the relation $Y = f(F_1)$ is linear for each configuration of the jump. Moreover, for a given value of the inflow Froude number F_1 , the sequent depths ratio Y , of the jump decreases when the compactness ratio γ increases.

Table 3. Experimental values of the sequent depths ratio Y of the hydraulic jump controlled by a thin sill for different values of compactness γ and for different values of the inflow Froude number F_1

$\gamma=L_r^*/x$	$Y=h_2/h_1$	F_1	$\gamma=L_r^*/x$	$Y=h_2/h_1$	F_1	$\gamma=L_r^*/x$	$Y=h_2/h_1$	F_1
0,91	3,93	4,06	1,03	4,63	4,73	1,37	5,09	5,70
0,92	4,19	4,27	1,05	5,29	5,60	1,40	4,24	4,61
0,92	3,84	4,10	1,09	4,37	4,71	1,43	7,27	8,16
0,92	4,29	4,39	1,12	3,46	3,66	1,45	5,52	6,27
0,94	2,86	3,02	1,13	7,39	8,03	1,45	4,44	4,99
0,94	3,84	3,91	1,14	5,80	6,36	1,46	4,58	4,97
0,95	2,96	3,21	1,17	4,88	5,07	1,47	4,25	4,77
0,97	5,26	5,62	1,18	5,68	6,24	1,49	4,46	4,99
0,98	3,25	3,30	1,19	4,06	4,41	1,51	4,99	5,91
0,98	4,32	4,52	1,19	3,62	4,01	1,53	3,46	3,98
0,99	6,33	6,75	1,22	4,18	4,44	1,58	5,20	5,94
0,99	4,51	4,66	1,25	4,40	4,72	1,63	7,54	8,61
0,99	4,28	4,61	1,29	5,59	6,27	1,64	6,58	7,67
1,00	3,55	3,76	1,34	3,87	4,25	1,69	6,88	8,00
1,01	5,08	5,34	1,35	3,85	4,28	1,70	8,05	9,11
1,03	3,65	3,74	1,37	3,98	4,32			

Table 3 summarizes the different coefficients (a) of the adjustment lines of the experimental relations linking the sequent depths ratio $Y = h_2 / h_1$ to the inflow Froude number F_1 , for different ratios of compactness γ :

Table 3. Coefficients of the experimental relations resulting from the adjustment of the relation linking Y to the inflow Froude number F_1 for different ratio γ of compactness.

Intervals of the ratio of compactness	Average reports γ of compactness	Equations of straight	coefficients a	Correlation coefficients R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,10$	1,01	$Y = 0,953F_1$	0,953	0,989
$1,11 \leq \gamma \leq 1,30$	1,21	$Y = 0,92F_1$	0,92	0,992
$1,31 \leq \gamma \leq 1,50$	1,41	$Y = 0,897F_1$	0,897	0,994
$1,51 \leq \gamma \leq 1,70$	1,61	$Y = 0,868F_1$	0,868	0,996

Table 3, shows that the coefficient (a) decreases progressively from one configuration to another. It gives the possibility of the existence of a unique linear relation collecting four (04) intermediate configurations of the controlled jump, linking the ratio of the conjugate heights Y to the inflow Froude number F_1 and the compactness ratio of the jump γ .

Figure 10, shows that the coefficient - (a) as a function of the compactness ratio γ , following an equation curve:

$$a = -0.139 + 1.09 (3)$$

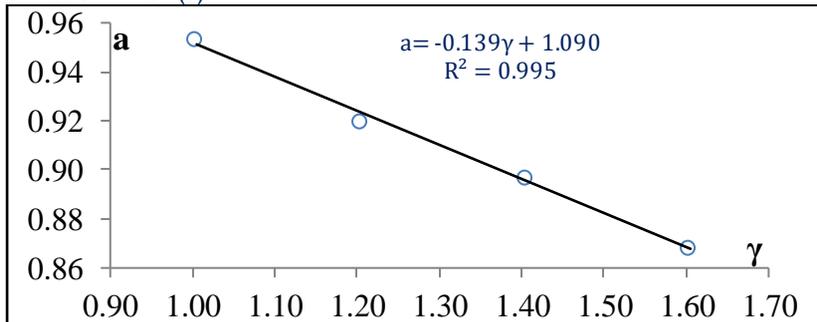


Fig.10. Variation of the coefficient (a) as a function of the ratio γ of Compactness. (-) adjustment curve.

A unique relation of the form $Y = \psi (F_1, \gamma)$ is then proposed, allowing the $Y = h_2/h_1$ ratio to be determined as a function of the inflow Froude number F_1 for all configurations of the hydraulic jump controlled by thin sills in a rectangular channel. This is written as follows:

$$Y = (-0,139 \gamma + 1,09).F_1 \quad (4)$$

For a range of inflow Froude number: $3.02 \leq F_1 \leq 9.11$

And values of the compactness ratio: $0.91 \leq \gamma \leq 1.70$

The graphical representation of the measurement points and the experimental equation is shown in Figure 11.

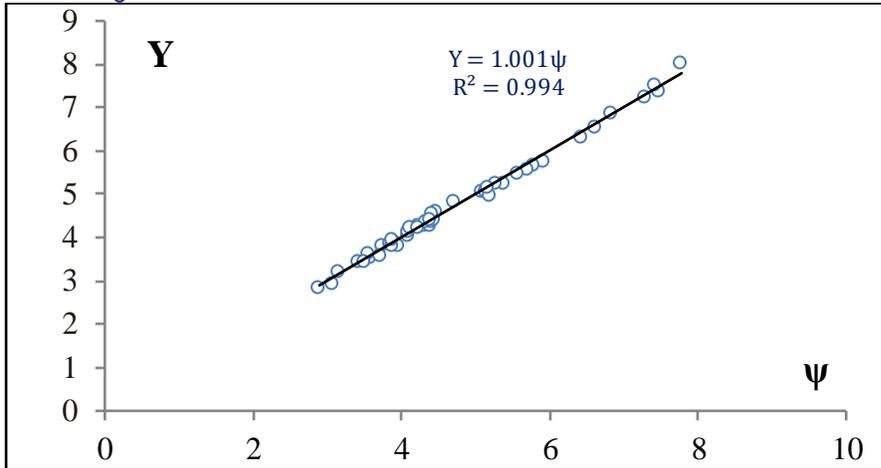


Fig.11. Variation of $Y = h_2 / h_1$ as a function of $\psi = (-0,139\psi + 1,09) F_1$.
 (o) Experimental points. (-) line of equation: $h_2 / h_1 = (-0,139\psi + 1,09) .F_1$

Figure 11, shows that the relative error between the experimental relation ψ and the experimental results of the ratios of the conjugate heights is 1,001%, it is the slope of the fitting line which passes through the origin.

II.4. Conclusion

This article presents an experimental study of the effect of the compactness γ of the hydraulic jump on the sequent depths ratio Y in a rectangular channel, controlled by thin sill. In a first step, we explained the experimental procedure followed during the tests. Passing second to the experimental results, with five (05) inflow depths (h_1) were tested and nine (09) sills s of different heights. A practical range of inflow Froude number was obtained.

In the second time we analyzed the effect of the compactness γ of the hydraulic jump on the sequent depths ratio Y of the hydraulic jump in a rectangular channel. The experimental results have shown that the displacement of the sill to the upstream causes the compactness of the jump $\gamma = Lr^*/x$, and gives several configurations of it. This influence is reflected by the different parameters of the jump, such as the ratio of the sequent depths ratio $Y = h_2/h_1$. Concerning the relation of the sequent depths ratio Y as a function of the inflow Froude number F_1 and the compactness γ , we have found that it is linear with the form $Y = (-0,139\gamma + 1,09) .F_1$. The experimental measurement points move away from the theoretical curve of the classical jump ($\gamma \leq 0.9$), as the compactness ratio γ increases. This distance starts to be noticed from $\gamma \geq 1,21$. In addition, each value of the compactness ratio γ is relating to a given configuration of the jump.

4. REFERENCE

- Bradley, J.N., Peterka, A.J., (1957), The hydraulic design of stilling basins : Hydraulic jumps on a horizontal apron, paper 1401, proc. Amer. Soc. Civ. Engrns., J. Hydraulic. Division, Vol.83, HY5.
- Chanson, H. (2004). The hydraulics of open channel flow: An introduction, 2nd Ed., Butterworth-Heinmann, Oxford,UK.
- Cherhabil, S., (2010) Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques à pente variable, Thèse de doctorat en sciences, département de génie-civil et hydraulique, de l'université Mohamed Khider, Biskra, Algérie.
- Forster, J.W, Skrinde, R.A (1950), Control of the hydraulic jump by sills, Trans Asce, 115, 973-1022.
- Hager, W.H., Sinniger, R., (1987), Construction hydraulique, Ecoulement stationnaire, Edition suisse romande.
- Hager, W.H, and Nicola V.Bretz (1988, Sill-Controlled stilling basin, the international symposium on hydraulics for high dams, 273-280.
- Mc Corcodal, 1994, Journal of Hydraulic Research, VOL. 32, 1994, NO.1; 119-130.
- Ohashi et al. (1973) :Design of Combined Hydraulic Jump and Ski-Jump Energy Dissipator of Flood Spillway. XIII ICOLD Congress Madrid Q.41, R.19: 311-333.
- Pagliara, S. et peruginelli, A. 2000, Journal of Hydraulic Engineering/ November 2000/ 847-850.
- Posey, C.J and Hasing, P.S, (1938), Hydraulic jump in trapezoidal channel, Engineering News Record, Vol.121, Des.22 nd, 797-798.
- Press, M.T, (1961), The hydraulic jump Engineering honors thesis, University of western Australia, Nodlands, Australia.
- Rajaratnam, N., (1965), Hydraulic Jump in horizontal conduit, Water Power, 17, pp. 80-83.
- Rajaratnam, N (1967), hydraulic jumps. Advances in Hydroscience. Vol4. Academic Press, New York, 197-280.
- Silvester, R (1964), Hydraulic jump in all shapes of horizontal channel, Journal of hydraulic division, ASCE (HY1), 23-55.
- Sinniger, R.O, Hager W.H -1988), Ecoulement stationnaire, Presses Polytechniques Romandes, 439p.

5. LIST OF SYMBOLS

- D Diameter of the channel [m]
F_i inflow Froude number [-]
g acceleration of gravity [m.s⁻²]
h₁ upstream sequent depth [m]
h₂ downstream sequent depth [m]
L_j length of jump [m]
L_r length of roller [m]
L_j* classical length of jump [m]
L_r* classical length of roller [m]
Q flow discharge [m³.s⁻¹]
Y sequent depth ratio
 γ compactness of jump $\gamma = L_r^* / x$

Les pertes karstiques du Gardon (Gard, France) : évaluation à partir de chroniques de débit à haute résolution

Philippe Martin

¹Avignon université, UMR ESPACE 7300 du CNRS, 74 rue L. Pasteur 84029 Avignon cedex. Tel. 0490162695, fax 0490162699; philippe.martin@univ-avignon.fr

Résumé

Le Sud méditerranéen de la France est soumis à une période sèche d'été et à des sécheresses majeures plus ou moins récurrentes : 1877, 1921, 1945, 2017 dont la fréquence et l'intensité pourraient s'accroître en raison du changement climatique. Les besoins en eaux dans ces régions sont de plus en plus importants. Localement, cette situation de tension est aggravée par des pertes karstiques en lit vif qui sont mal connues (cours moyens du Gardon en amont des gorges). Deux stations hydrométriques à haute résolution (5 mn) permettent d'en connaître le débit. Une méthodologie pour comparer les débits amont et aval lors du cycle 2017 – 2018 est proposée. Elle consiste à lisser le bruit de l'enregistrement, puis à comparer les débits en fonction de l'état hydrologique. Cette analyse permet de caractériser des situations de hautes eaux sans pertes karstiques mesurables, des situations avec des pertes mesurables qui augmentent, en pourcentage du débit amont, de la pointe de crue à la montée de crue suivante. Ces pertes peuvent être totales au bout de quelques jours comme en novembre 2017. Lors de cette crue entre Ners et Russan (16,25 km à vol d'oiseau) les pertes ont été à 18m³/s, soit au maximum à 1 l/s/km. 12 heures après le pic de crue la moitié des pertes était déjà réalisée en raison de débits forts et d'un taux de perte proche de 35 % du débit amont. Ces pertes alimentent un aquifère karstique majeur, peu sollicité, mais qui pourrait être plus utilisé lors de sécheresses quitte à ce qu'il se remplisse fortement lors des crues d'automne. Sur plusieurs années cette exploitation est toutefois liée, en partie, à ses capacités de recharge par ces pertes karstiques en lit vif.

Mots clés : Hydrologie, Méditerranée, karst, aquifère, recharge, lissage de chroniques

The karstic losses of the Gardon (Gard, France): evaluation from high resolution flow rate records

Abstract

The southern Mediterranean is subject to a dry summer season and major droughts more or less recurrent: 1877, 1921, 1945, 2017, whose frequency and intensity could increase due to climate change. The water needs of these regions are becoming increasingly important. At the local level, this situation of tension is aggravated by karst losses very poorly known (middle stream of Gardon, gorges upstream). Two hydrometric stations with high resolution (5mn) allow to know the flow. A methodology for comparing upstream and downstream flows for the 2017–2018 cycle is proposed. This analysis first consists in smoothing the noise of the recording and then comparing the flow rates according to the hydrological state. This analysis makes it possible to characterise situations of high water without measurable karst losses. This analysis also makes it possible to characterise situations with measurable losses that increase, as a percentage of the upstream flow, from the peak of the flood to the next rise of flood. These losses can be total after a few days as during the flood of November 2017. In November 2017 between Ners and Russan (16.25 km as the crow flies) the losses were 18 m³/s, at most 1 l/s/km. 12 hours after the flood peak, half of the losses were already achieved due to high flows and a loss rate close to 35% of the upstream flow. These losses feed a major karstic aquifer which is little used, but which could be used more during dry periods and during droughts even if it fills up

strongly during the autumn floods. This exploitation over several years is, however, partly linked to its recharging capacity by these karst losses in the bed of the river.

Key Words: hydrology, Mediterranean, karst, aquifers, recharge, chronics smoothing

I PERTES KARSTIQUES ET TENSION SUR LA RESSOURCE EN EAU

Le Gardon est un cours d'eau méditerranéen français connu pour ses crues exceptionnelles (1907, 1933, 1958, 2002). Ces « gardonnades » sont la conséquence d'une part, de précipitations majeures (épisode cévenol) qui tombent sur les Cévennes à l'automne (septembre – octobre) à la suite de remontées de masses d'air chaudes et humides provenant de la Méditerranée obligées de s'élever de plus de 1000 mètres le long du rebord sud-est du Massif central (pluie orographique), mais aussi, d'autre part, d'un dispositif drainant qui articule, à l'amont, sur le socle cévenol, un bassin où se concentrent les débits et à l'aval, au-delà de Ners, un chenal d'écoulement, d'abord la Gardonnenque - sise dans le bassin oligomiocène de St Chaptès - puis les gorges du Gardon qui recoupent de très épaisses couches crétacées à faciès urgonien qui recèlent un karst important polyphasé. Ces deux unités hydrologiques étant souterrainement en connexion (prouvée par traçage). Étant sous climat méditerranéen, le bassin du Gardon est aussi marqué par une absence (ou une quasi-absence) de précipitations de la fin du printemps au début de l'automne. Les débits sont alors indigents (quelques mètres cubes au mieux à Ners). En outre ces écoulements se perdent lors de leur traversée du cours aval (à partir de Ners en phase sèche la plus aigüe), pour réapparaître très largement aux sources de La Baume situées au début du dernier tiers aval des gorges. Les conséquences de ces pertes sont d'une part un assèchement quasiment tous les étés des gorges jusqu'aux sources de La Baume qui peuvent, semble-t-il, descendre à des niveaux très faibles, proches du tarissement, mais aussi d'autre part, un assèchement du lit vif du Gardon, en Gardonnenque, progressivement de l'aval (Russon) à l'amont (Ners), au fur et à mesure que la saison estivale avance. Ceci correspond à un abaissement progressif de la « nappe » karstique sous-jacente (aplatissement).

2 PHASES DE FONCTIONNEMENT

Nous avons donc, en simplifiant, un réservoir karstique alimenté (plus ou moins) par des pertes en lit vif qui se vidange largement par les sources de La Baume. La connaissance d'une partie du fonctionnement de cet aquifère passe donc par une caractérisation des pertes qui l'alimente. Celle-ci est possible en considérant, en première hypothèse, que chaque cycle hydrologique peut être divisé en trois phases de longueurs variables : - 1- à l'automne des apports importants en surface, par le Gardon (gardonnades), vont emplir les terrains détritiques du bassin de St Chaptès et la partie dénoyée du karst urgonien ; -2- de l'automne au printemps on observe une phase durant laquelle le karst peut être considéré comme plein (toutes les sources, même les plus petites, coulent) ; le niveau piézométrique est donc au moins égal à l'altitude du lit ; l'écoulement est continu et permanent en surface ; les pertes, sans être totalement exclues, sont très vraisemblablement limitées aux capacités d'exhaure des sources des gorges (La Baume...) et -3- une période de la fin du printemps au début de l'automne où le karst se vide progressivement comme le montrent certaines mesures sur les niveaux d'eau endokarstiques dans les gorges (Martin Ph., ce volume) ; cette situation implique que les pertes ne compensent pas les sorties d'eau à l'aval (déstockage des réserves karstiques).

3 DISPOSITIF DE MESURE ET LISSAGE DES CHRONIQUES A HAUTE RESOLUTION

Pour étudier ce phénomène, nous disposons de stations limnimétriques au droit de Ners (début de la Gardonnenque) et de Russon (entrée des gorges). Par ailleurs, des mesures sont à nouveau effectuées, depuis quelques années, au niveau des sources de La Baume, en été. Elles ne permettent toutefois pas de couvrir l'ensemble d'un cycle ; la courbe de tarage est actuellement limitée aux débits d'étiage. Les pertes entre les sources de La Baume et Russon ne peuvent donc être connues avec précision. Les deux stations en lit vif de Ners et Russon sont gérées par le Service de Prévision des Crues (SPC : <https://www.vigicrues.gouv.fr/niv2-bassin.php?CdEntVigiCru=20>). Elles ont donc été plutôt pensées comme des éléments d'un système d'annonce des crues. La station de Ners bénéficie d'un seuil artificiel en béton et est l'une des deux stations de référence pour la gestion du Gardon (EPTB Gardons : <https://www.les-gardons.fr>). Sa précision, pour des débits de basses eaux, est limitée. La station de Russon bénéficie d'un seuil naturel constitué aujourd'hui par des calcaires (bed-rock) mis à nu par les dernières très grandes crues qui ont largement chassé la nappe alluviale faiblement alimentée, depuis quelques dizaines d'années (reforestation), par des apports cévenols.

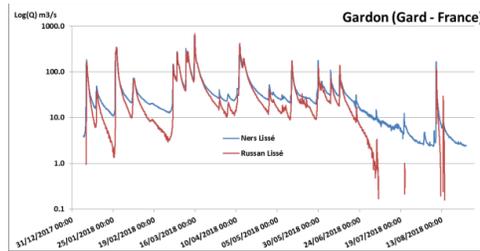


Fig. 1 - Hydrogrammes lissés des stations de Ners et de Russan

Les mesures (pas de 5 mn) sont disponibles gratuitement pendant deux jours (<https://www.vigicrues.gouv.fr/niv3-station.php?CdStationHydro=V71640150I&CdEntVigicru=20&GrdSerie=Q&ZoomInitial=I&CdStationsSecondaires=V71840150I;V719401001>) à cette résolution, puis pendant deux mois à une résolution horaire, ce qui est cohérent avec la gestion recherchée des crues. Cela étant les données livrées ne sont pas critiquées. Ce sont des données brutes. Celles-ci présentent donc un certain nombre de problèmes comme un bruit aléatoire lié au fonctionnement des sondes de pression. Certaines lacunes ou certains comportements aberrants peuvent aussi apparaître. Une analyse, très largement manuelle, est donc indispensable. Pour les deux chroniques de Ners et de Russan, nous avons donc procédé à une récupération journalière des données et à une critique visuelle (pour corriger les aberrations et dans une certaine mesure combler les lacunes), puis nous avons filtré ces chroniques. Plusieurs solutions ont été envisagées : d'une part des moyennes mobiles simple, pondérée, exponentielle, de Savitzky-Golay, etc. avec des tailles de fenêtres variables (3, 5, 7 pas soit 15 mn, 25 mn et 35 mn) et d'autre part des changements de pas : 10 mn, 15 mn, 30 mn. Il est clair qu'un changement de pas majeur, comme dans le calcul d'un débit moyen journalier moyenne et lisse les imperfections d'une chronique à 5 mn, mais en retour fait perdre beaucoup d'information et introduit une incertitude trop forte pour nos travaux, car le décalage temporel entre les pointes de crue (à Ners et à Russan) est généralement inférieur à 12 heures. Nous avons donc choisi d'une part de lisser cette chronique avec un filtre de Savitzky-Golay avec une fenêtre de 5 pas (25 mn) en utilisant les coefficients de la solution quartique/quintique (4/5), puis de procéder à un changement de pas de cinq à quinze minutes. Le filtre de SG 4/5 a été préféré, car il conserve mieux les pics et donc les pointes de crues que la solution quadratique/cubique (2/3). Dans ce cas avec une fenêtre de 5 pas la hauteur moyennée a été portée à la place du pas médian de la fenêtre. Le changement de pas de 5 à 15 mn permet de diminuer le nombre de valeurs de 288 à 96 et permet d'avoir une seule pointe de crue par crue. Des expérimentations ont montré que pour garder la meilleure synchronisation des pics observés et des pics lissés, il fallait porter le résultat du changement de pas à la place de la dernière valeur de la fenêtre. Ces chroniques sont dites : lissées (Fig.1).

4 RECALAGE DES CHRONIQUES ET ECARTS DE DEBITS SPECIFIQUES

Pour faire une comparaison significative entre les débits à Ners et les débits à Russan il est nécessaire de statuer sur deux points : d'une part il faut comparer des moments hydrologiques identiques, ce qui revient à recalcr la chronique aval (Russan) par rapport à la chronique amont (Ners) en particulier en utilisant la pointe des crues, faute de quoi l'écart mesuré correspondrait pour partie à un déphasage temporel lié à la vitesse d'écoulement de l'eau. Celle-ci dépend de l'état hydrologique du lit vif (16,25 km à vol d'oiseau) et du niveau du débit. Les mesures faites montrent que le déphasage peut atteindre 400 minutes (7 h) et qu'il varie en fonction des conditions hydrologiques (Fig.2). Les carrés noirs sur la figure 2 correspondent à de très petites crues (de 10 à 50 m³/s) en situation de moyennes eaux qui s'écoulent à une vitesse moyenne de l'ordre de 1,5 cm à la minute.

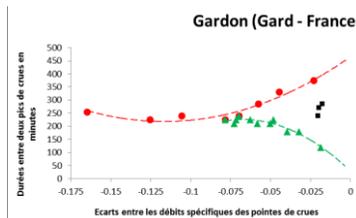


Fig. 2 - Relation entre les écarts de débits spécifiques à Ners et à Russan et le décalage temporel des pointes de crues

Dans ce cas les écarts entre les débits spécifiques des pointes de crue sont faibles (en valeur absolue). On peut avoir les mêmes écarts pour des vitesses 2 fois supérieures (points rouges) ou 2 fois inférieures (triangles verts). Le triangle vert, avec la vitesse la plus forte et l'écart le plus faible, correspond à une crue majeure de milieu de cycle (phase 2 ci-dessus). Les autres triangles verts correspondent à des crues de même nature, mais moins rapides et avec des pertes plus importantes. Les points rouges renvoient aux phases 1 et 3. Ils correspondent à des crues de débuts de cycle (point rouge le plus à gauche (-0,16 et 250), mais ils correspondent aussi à des crues de fin de cycle durant lesquelles un certain déstockage du karst peut être contre balancé par des apports limités. À partir de ces éléments, il est possible de recalculer chaque pointe de crue. Les chroniques obtenues, à partir des chroniques lissées, sont alors dites : recalées. Sans pertes karstiques (ou autres : prélévement...), les débits à Russan devraient être au moins égaux à ceux de Ners. Et dans la mesure où l'ensemble du bassin aurait été arrosé par des précipitations semblables, les débits à Russan devraient être supérieurs à ceux de Ners et donc, ramenés en débits spécifiques, devraient être assez semblables. Tout au long du cycle 2017 – 2018 nous observons que les débits recalés sont inférieurs à Russan à ceux de Ners (sauf exception : petite crue d'août 2018). Il semble donc bien que les pertes en lit vif soient permanentes. Par exemple pour la crue de tout début de cycle de novembre 2017 qui est advenue après une très longue phase aride et qui constitue le premier et le seul épisode cévenol de ce début de cycle, l'écoulement à Russan est d'environ 1/3 plus faible qu'à Ners, la relation étant globalement linéaire.

5 AMPLUR DES PERTES : APPROCHE STRUCTURELLE

Il est dès lors possible de faire une simple différence entre la chronique de Ners et la chronique de Russan (Fig3). En théorie cela donne l'ampleur des pertes, quelles que soient leurs natures. Plusieurs essais en ce sens ont été faits. Ils font apparaitre des structurations temporelles dans les pertes. On peut ainsi observer des modulations sur environ 24 heures. Cela étant, ces réflexions font l'impasse sur la précision comparée des courbes de tarage à Ners et à Russan. Il est en théorie possible de soutenir que les pertes calculées par simple soustraction sont le résultat d'une surestimation, pour tous les débits calculés pour Ners, car liés à une courbe de tarage qui est structurellement majorante, et que toutes les valeurs de Russan ont été obtenues avec une courbe dont l'écart à une valeur « vraie » ne peut « compenser » l'erreur possible faite avec la courbe de Ners, soit dans un sens : majorer autant, soit dans l'autre : accroître les pertes par une minoration des débits. Nous avons donc là une incertitude majeure liée aux modalités de mesure qu'il faut essayer de réduire. Le mieux serait d'avoir 2 seuils artificiels bien calibrés, ce qui est inimaginable.

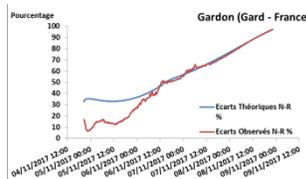


Fig. 3 – Exemple de pertes apparentes entre Ners et Russan en pourcentage du débit à Ners, obtenues par simple soustraction (points rouges) et après ajustement de modèles empiriques et recalcul de débits théoriques (points bleus).

Pour caractériser l'ampleur des pertes, il faut essayer de travailler sur la structure temporelle des baisses de débit et comparer ces structures. C'est alors le fonctionnement en tendance qui est comparé. Il faut donc arriver à les modéliser. Une bonne solution est obtenue en ajustant des polynômes sur la variation du logarithme du débit en fonction de la racine carrée du temps ($\ln(Q) \text{ vs } t^{0.5}$). Comme attendu, puisque la crue de novembre 2017 a été suivie par un assec à Russan, alors qu'un écoulement de quelques mètres cubes était observable à Ners, les calculs établissent une perte totale des débits le 9/11. Pendant plus de la moitié du temps, les informations apportées par une simple soustraction et par ajustement de modèles sont très semblables. Par contre elles diffèrent dans la phase initiale de la décrue. La soustraction donne des pourcentages assez faibles (10 – 20 %) alors que les modèles conduisent à des valeurs plus élevées (30 – 40 %). Si on se base sur les valeurs obtenues après modélisation des récessions il apparait que lors de cet épisode les pertes ont été, en moyenne, de l'ordre de 16 000 m³ chaque quart d'heure ou de 18 m³/s sur les 16,25 km ; ce qui donne une infiltration moyenne maximale de l'ordre de 1 l/s/m linéaire. Le trajet de l'eau étant plus long, cette valeur doit être en réalité plus basse. Cela étant le cumul de ces valeurs montre que la moitié des pertes totales observées pendant cette crue (environ 3 millions de m³) l'a été lors de la première demi-journée ; ceci est logique, car les débits sont parmi les plus importants et les taux de pertes très conséquents. À ce moment l'ensemble de la Gardonnenque est en eau puisque l'écart entre les deux pointes de crues n'est que de 4 h. Il faut donc voir dans cette phase qu'il a dû se terminer le 5/11 vers 6 h un moment de

remplissage de tous les biefs et autres diverticules. Cela correspond temporellement sur la courbe bleue de la figure 3 à la fin de la stabilité du taux de pertes de 35 % (le 5/11 vers 14 h). Ensuite les débits perdus par unité de temps vont diminuer, même s'ils vont représenter des proportions de plus en plus fortes du débit mesuré à Ners. L'appréciation doit donc être faite en taux (qui tendent vers 100 %) et en masses qui tendent vers 0.

6. CONCLUSIONS

Le Gardon présente des pertes karstiques en aval de Ners qui peuvent être évaluées à partir des enregistrements faits à Ners et à Russan (entrée des gorges). Ces pertes sont probablement continues, mais globalement non visibles lors des moyennes ou hautes eaux. En phase de recharge ou de décharge de l'aquifère qui se déploie sous la Gardonnègne et sous les gorges du Gardon elles peuvent être caractérisées et évaluées à partir de chroniques à haute résolution (5 mn) lissées et recalées. Lors de la première crue du cycle 2017 – 2018 (en novembre) le débit moyen perdu entre Ners et Russan est de l'ordre de 18m³/s, soit environ au maximum 1 l/s/km de lit. Ceci comprend les ennoissements nécessaires au rétablissement du lit vif, puisque la crue s'est avancée sur un lit mineur pour l'essentiel asséché. Dans ces conditions il est logique qu'environ la moitié des pertes mesurées l'ait été au bout d'une demi-journée. Mais comme cet épisode a débouché sur un nouvel assec à Russan, on peut penser, vu la saison, que la plus grande partie de ces eaux s'est, au final, infiltrée et a alimenté le karst urgonien. De nouveaux travaux sur les chroniques de Ners et de Russan et sur les enregistrements faits aux sources de La Baume permettront peut-être d'étayer ces hypothèses.

Fonctionnements karstiques et mesures de températures à haute résolution : quelques résultats obtenus dans le sud de la France

Philippe Martin

¹ Université d'Avignon, UME ESPACE 7300 du CNRS, 74 rue L. Pasteur 84029 Avignon cedex. Tel. 0490162695, fax 0490162699 ; lphilippe.martin@univ-avignon.fr

Résumé :

Mesurer la température de l'eau de rivières karstiques, à haute résolution, peut se faire aujourd'hui assez facilement (prix bas des boutons thermiques [BT] et mesure systématique par les sondes de pression), mais ces données sont rarement exploitées. Dans des karsts du sud de la France, nous avons déployé un réseau de mesures thermiques en Basse Cévenne Carbonatée [BCC] et dans les gorges du Gardon. Ces mesures sont réalisées parfois avec quelques difficultés (encapsulation métallique des BT). Mais ces mesures ont permis de mettre en évidence les variations thermiques de la nappe du karst urgonien (plateau des Garrigues) dans des gorges du Gardon qui s'assèche chaque été. -a- en montrant, avec les BT, le tarissement progressif, d'amont en aval, en phase de basses eaux, des sources des gorges, ainsi que la variabilité de leur fonctionnement et -b- les modalités de ré-ennoiement de la vallée lors de la première crue du cycle (gardonnade). Ces analyses montrent l'importance des sources de rive gauche (plus chaudes et plus homothermes). Elles permettent de calculer le taux d'augmentation de la température de l'entrée à la sortie des gorges. De plus elles montrent que la progression de la crue est plus rapide que les circulations d'en l'endokarst. Des sources comme celle de Télamode fonctionnent alors en perte. En outre l'analyse de la conductivité permet de mettre en évidence des phénomènes très locaux et précoces à la crue qui descend des Cévennes (effet de la pluie). Ce signal thermique recèle donc une information riche. Il convient -1- de lui porter une attention plus forte et -2- de travailler à de nouvelles approches (statistique, etc.) afin d'en tirer le plus d'enseignements possibles.

Mots-clés : Gard, Gardon, karst, aquifère, assec, crue

Karst functioning and high-resolution temperature measurements: some results obtained in the south of France

Abstract :

Measuring the water temperature of karstic rivers at high resolution can be done today quite easily (low thermal buttons [BT] and systematic measurement by hydrological probes), but these data are rarely used. In karsts in the south of France, we deployed a network of thermal measurements in the Basse Cévenne Carbonatée [BCC] and in the gorges du Gardon. These measures are sometimes carried out with some difficulty (metallic encapsulation of BT). But these measures have made it possible -1- to highlight the thermal variations of the groundwater of urgonian karst (plateau of Garrigues) in Gorges du Gardon which dries up every summer. -a- showing with the BT the gradual drying, from upstream to downstream, in the low water phase, of the sources of the throats, as well as the variability of their functioning and -b- the modalities of the valley's flood during the first flood of the cycle (gardonnade). These analyze show the importance of left bank sources (warmer and more homothermal). They make it possible to calculate the rate of increase of the temperature of the entrance at the exit of the valley. In addition they show that the progression of the flood is faster than the circulation of the endokarst. Sources like Telamode then work in loss. In addition, the analysis of the conductivity makes it possible to highlight very local and early phenomena to the flood coming down from the Cevennes (effect of the rain). This thermal signal therefore contains rich information. It is important to pay more attention to it and to work on new approaches (statistics, etc.) in order to draw as many lessons as possible.

Key Words: Gard, Gardon, karst, aquifer assec, flood

Flux massiques et énergétiques karstiques dans un processus inverse

L'étude du fonctionnement des karsts s'appuie depuis longtemps sur la mesure des débits et sur la quantification de solutés présents dans les eaux. L'étude de l'évolution des produits (minéraux...) dissous a été développée par des mesures en routine de la charge carbonatée et par la recherche d'éléments trace (y compris radioactif : radon...) ou présents à des concentrations très faibles. Ces deux approches se fondent d'une part sur l'idée d'érosion (mises en solution pour l'essentiel, en subsurface - épikarst - et dans l'endokarst - cavernement -), laquelle aboutit à l'évaluation de pertes de masses (en mm^3/km^2 ou en m^3/an), et d'autre part sur l'idée qu'il existe en surface et à l'intérieur des karsts une morphologie qui joue un rôle de filtre vis-à-vis du signal pluie (généralement aléatoire, au moins sur une période de temps : de 3 jours à 3 mois environ en région méditerranéenne).

Ces morphologies, issues des processus d'érosion, envisagés ci-dessus sont par hypothèse considérées comme organisées (drainage exo et endokarstique) et capables de moduler tant l'écoulement de l'eau (signal hydrodynamique : crue, décrue, tarissement...) que la charge dissoute comme le montre les variations de la conductivité (minéralisation totale) et, si les vitesses sont suffisantes et que l'encaissant le permet (produits insolubles : limon, argile, sable...), une charge solide qui trouble l'eau des crues, essentiellement. Dans le cas de la chimie des eaux, les matières solubles sont réputées disponibles et infinies en quantité et c'est largement l'interaction avec l'eau en recherche d'équilibre (pCO_2) ou en capacité de dissolution (hydrolyse...) qui doit produire les modulations observées en fonction des cinétiques des réactions chimiques, des temps de contact, etc. En d'autres termes il s'agit de mesurer et d'étudier des fluctuations de matières et, en mettant en œuvre un processus inverse (remontée des conséquences aux causes) d'essayer de déduire de ces fluctuations, des informations pertinentes sur l'encaissant lui-même et sur la configuration du drainage (plus ou moins fonctionnel), sur le cavernement et sur son fonctionnement dans le cadre très généralement d'une approche systémique de type boîte noire.

Sans être totalement ignoré, le signal thermique (température de l'eau et de l'air en différents points du karst) a été globalement assez peu utilisé. On trouve dans la littérature des températures moyennes de sources ou d'autres points de « nappes » karstiques et assez rarement, mais de plus en plus, des modélisations de la variation de la température. Pour une aire climatique donnée, ces variations en moyenne, ou autres, sont généralement rapportées à l'influence plus ou moins grande du gradient géothermique (donc à la profondeur de circulation) et à la vitesse de circulation, laquelle si elle est importante limite le réchauffement de l'eau. Ceci est surtout visible en période hivernale en France métropolitaine. Il s'agit dans ce cas de la variation d'un flux d'énergie et non plus de matière. Ce flux est donc conceptuellement assez différent et est plus difficilement mis en relation avec les processus morphogénétiques, d'autant que ses sources sont duales, d'une part, pour partie, l'énergie est apportée par un flux solaire et thermique (air plus ou moins chaud) au niveau de la surface du karst et, d'autre part, grâce au gradient géothermique qui se déploie de bas en haut, des couches les plus profondes vers la surface. On négligera en première analyse toutes les réactions chimiques dont certaines peuvent être exothermiques, tout comme les phénomènes physiques (agitation mécanique des molécules).

I. Problème de mesure et complexité conceptuelle

Le moindre usage de cette information est lié, d'une part, à la relation moins directe que la température entretient avec la dynamique karstique contrairement aux exportations en masse, mais aussi pendant longtemps, d'autre part, à des problèmes de mesure en routine. Autant la détermination d'une température dans une source avec un thermomètre à mercure est aisée, autant la mesure dans l'endokarst, et *a fortiori* à une cadence temporelle élevée (5 mn par exemple), est plus difficile à réaliser. Toutefois cette situation a changé avec l'arrivée progressive de sonde de pression (SDEC miniDiver de Schlumberger, Levellogger de Solinst...) et/ou de matériels détournés de leurs usages premiers (Sensus Ultra de ReefNet Inc, bouton thermique pour la chaîne du froid...). Les sondes de pression sont systématiquement équipées d'un capteur de température. Cette mesure étant effectuée au même pas que celle de la charge hydraulique (5 mn par exemple) nous disposons donc d'une information à haute résolution couplée avec une mesure de hauteur d'eau (après correction de la pression atmosphérique) ou de débit, si une courbe de tarage peut être établie.

Ces sondes étant tout de même onéreuses et donc peu nombreuses elles sont généralement placées en des points particuliers (source, siphon, puits noyé, forage...) qui constituent autant de regards sur

l'écoulement de l'eau et plus généralement sur la dynamique de la « nappe » karstique étudiée. Les informations ainsi obtenues sont donc intégratives des processus qui se déroulent en amont et/ou autour. En chacun de ces points, l'étude est donc d'abord temporelle. Il s'agit d'analyser des variations thermiques temporelles enregistrées pour essayer de résoudre, là encore, un problème inverse, pour comprendre certains aspects du fonctionnement de l'hydrosystème étudié.

Cette information est spécifique pour au moins deux raisons. D'une part, il ne peut s'agir que d'une information sur le transit de l'eau (comme la minéralisation), alors qu'un débit peut rendre compte d'un transfert de pression. D'autre part, la température mesurée est un mixte entre la température liée au flux géothermique qui définit très largement la température de l'encaissant et l'apport d'énergie externe (rayonnement par conductivité et par convection et circulation d'air dans les vides karstiques). Autant le flux géothermique peut être considéré comme constant et spatialement globalement stable, autant l'apport par le soleil (et les masses d'air) varie au cours d'une journée et en fonction des saisons. Ce flux externe, en particulier en été en région méditerranéenne, peut se diffuser assez profondément par conduction à partir de la surface (et de façon plus limitée par des mouvements d'air dans les cavités ouvertes, ce qui est bien visible par exemple en situation de courtes périodes de gel durant lesquelles la pénétration plus ou moins importante du froid peut être mise en évidence), mais aussi transporté par les eaux d'infiltration qui peuvent circuler rapidement dans les karsts transmissifs. Celles-ci peuvent être soit plus chaudes que l'encaissant (été), soit plus froides que ce dernier (hiver). Dans un cas la température mesurée montera, dans l'autre plus commun, elle baissera).

II. Lieux d'étude : Basses Cévenne Carbonatée et gorges du Gardon

Cette approche locale et chronologique a été mise en œuvre (travail en cours), dans un petit karst de piémont de la Cévenne formé des premiers termes de la série sédimentaire secondaire reposant en discordance sur un socle comportant des formations schisteuses, mais aussi des dépôts de houille tranchés par la surface d'aplanissement antétriasique.

Cette approche ponctuelle et mono dimensionnelle peut être complétée par une approche spatiale qui conduit à réfléchir dans un espace à 4 dimensions. Les petits dispositifs techniques comme les boutons thermiques [BT], qui sont relativement peu chers et de petite taille, permettent d'avoir une approche spatiale du phénomène thermique, en surface ou dans l'endokarst. Il s'agit donc d'essayer de voir, dans l'espace, comment les niveaux de température et leurs variations se transforment en fonction du lieu de mesure. Ceci conduit à l'idée de structure spatiale laquelle peut être décrite par des coupes verticales selon différentes orientations qui peuvent mettre en évidence des gradients ou des discontinuités, etc. Cela étant, il est aussi possible d'envisager les variations dans l'espace en fonction d'une logique particulière. C'est le cas par exemple pour les gorges du Gardon (Martin Ph., ce volume).

Dans cette portion de la vallée karstique, on observe deux phénomènes essentiels. D'une part un assèchement progressif, d'aval en amont, du lit vif, à partir de la fin du printemps et jusqu'à l'arrivée de la première grosse crue (gardonnade) produite par un épisode cévenol intense (généralement de 200 à 400 mm en quelques heures) et d'autre part, un assèchement, d'amont en aval, des petites sources qui alimente ce cours d'eau en rive droite et en rive gauche et cela jusqu'aux sources de La Baume situées en gros au début du dernier tiers des gorges qui se terminent à Collias. Les griffons, qui les forment et qui s'étagent en rive gauche sur au moins 500 m, semblent pouvoir connaître des débits très faibles, voir selon certain (communication orale d'un Garde départemental), pouvoir s'assécher.

Cette source est calée sur un accident majeur d'orientation WNW – ESE qui recoupe très obliquement, en ces lieux, les gorges. On notera que contrairement à beaucoup d'autres sources : Firole, Télémode, Cougniès, du Barrage, de la Fausse monnaie, de Barbegrèze, de la grotte de Pâques, etc. aucun conduit karstique n'est connu à proximité, qu'il soit horizontal ou vertical. Ces multiples griffons restent spéléologiquement impénétrables, et donc non explorables en plongée. Toutefois, leur dispositif géométrique apparent laisse penser qu'en dessous de ces griffons multiples doit exister une branche ascendant, sous les gorges donc, relativement verticale. Une sorte de puits noyés ou de cheminées calées sur la fracturation dont les têtes ou les parties sommitales seraient régulièrement érodées par le Gardon lui-même, par l'encaissement de la vallée.

La charge alluviale, au droit de ces sources, ayant été, en particulier lors des dernières grandes crues (1958, 2002), largement décapée, il ne semble pas qu'au niveau de l'exutoire elle joue actuellement un rôle majeur. Morphologiquement le site laisse apparaître une très belle terrasse rocheuse et un surcreusement dans les calcaires urgoniens qui pourrait être lié, pour partie, aux dernières oscillations froides du Quaternaire. Ces gorges ne comportant aucun dépôt messinien connu, il est très probable que leur creusement se place à la toute fin du Tertiaire et plus largement au Quaternaire, à partir d'une position de surimposition. L'apparition très nette de cette terrasse rocheuse, qui est aussi visible au Pont du Gard bien plus en aval, est très largement liée à la diminution de la nappe alluviale dans les gorges dépendant elle-même de prélèvements importants (construction...), mais aussi, et surtout à un blocage des colluvions en Cévennes (bassin versant amont sur socle et piémont carbonaté) à la suite d'une très forte revégétalisation des versants (Restauration des Terrains de Montagne – RTM) depuis le Second Empire et à la suite de la remontée biologique observée après la Deuxième Guerre mondiale qui a vu la fin de l'exploitation, largement domestique, des bois en raison de l'introduction du pétrole et du gaz naturel pour le chauffage et la cuisine, mais aussi la fin des mines de charbon (boisement...).

III. Variations thermiques des sources des gorges du Gardon

Lors de l'été 2014, 8 sources ou regards sur le karst des gorges du Gardon ont été suivis avec des boutons thermiques étanches.

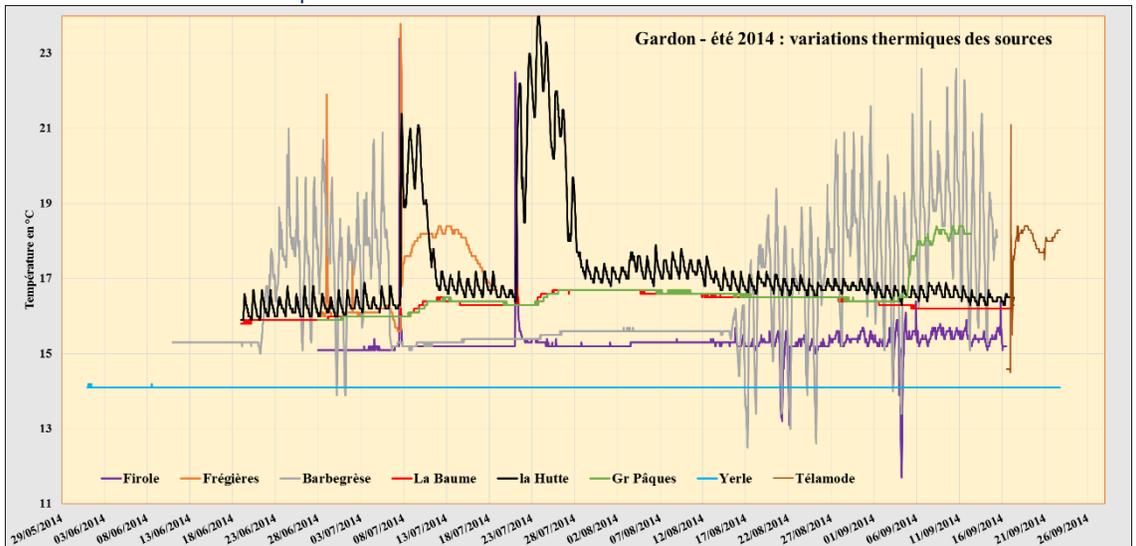


Figure 1. Gorges du Gardon (Gard – France) Variation thermique aux différentes sources et regard.

Yerle est une cavité souterraine située dans le grand méandre de l'entrée des gorges. La grotte de Pâques est une cavité à l'aval des gorges constituée de nombreux siphons. Tous les autres points suivis sont des sources temporaires, sauf celle de La Baume. À Yerle le BT était placé au point le plus bas de la cavité, mais dont l'enneoiment n'est pas établi. Il donne donc la température de l'encaissant. Les températures les plus stables sont ensuite celles de La Baume et de la grotte de Pâques qui sont les deux sorties majeures de ce karst. La grotte de Pâques est toutefois secondaire comme le montre la variation positive de la température à partir du 6/9 (influence probablement du rayonnement et de la température de l'air externe). La petite source de la Hutte montre de fortes variations journalières en rapport avec l'influence du rayonnement solaire comparée à son débit très limité. Cela étant les crues du 7 et 23/7/14 ont eu sur sa température un effet important et relativement durable. La source des Frégières montre une variation de température après la crue du 7/7/14, mais aucune réaction le 23/7 ; la nappe était déjà trop basse pour que la remise en fonction de cet exutoire soit possible. La source de Barbegrèze présente dès le 22/6 de forte oscillation (variation de la température externe) qui marquent un

dénnoisement du BT. Puis de nouveau un écoulement le 8/7 et un assèchement le 17/8. La grotte de Télamode est donnée pour mémoire à partir de la mi-septembre.

À partir de la valeur très stable de Yerle il est aisé de juger des valeurs moyennes maximales et minimales (Fig.2). La Baume et la grotte de Pâques ont des températures moyennes fortes (+2 à +2,5 °C / Yerle) et des écarts mini – maxi faibles. Certaines sources apparaissent « fraîches » comme Firole et Barbègrèze. Firole, les Frégières et la Hutte, situées en rive droite où l'extension du karst drainé vers les gorges est limitée, ont de très fortes amplitudes ce qui est cohérent avec la taille possible de leurs hydrosystèmes. Par contre Barbègrèze en rive gauche des sources de La Baume et la Grotte de Pâques ont des écarts faibles (sans la curieuse remontée finale, la grotte de Pâques présente un écart de 0,8 ; max à 16,7 et moyenne à 16,4). Ce sont donc bien des sources homothermes liées à de gros réservoirs et l'on peut penser que Barbègrèze et la grotte de Pâques, plongée sur plusieurs centaines de mètres, représentent un ancien niveau d'exhaure.

Tableau 1. Température des différents exutoires des gorges du Gardon lors de l'été 2014

	Yerle	Firole	Télamode	Frégières	Barbègrèze	la Hutte	La Baume	Gr Pâques
Moyenne	14,1	15,3	17,7	17,1	15,4	17,2	16,3	16,6
Min	14,1	13,1	14,5	15,6	15,0	15,9	15,8	15,9
Max	14,2	23,4	21,1	23,8	15,7	24,0	16,8	18,4
Écart	0,1	10,3	6,6	8,2	0,7	8,1	1,0	2,5

Il est ensuite aisé d'ajuster un modèle sur les valeurs minimales qui renseignent sur les états non ou peu influencés par l'apport instantané d'énergie externe (Fig.2) pour voir que ces températures croissent de l'entrée des gorges à Collias et que cette augmentation est de l'ordre de 0,2 °C à l'entrée des gorges et de 0,05 °C à la fin.

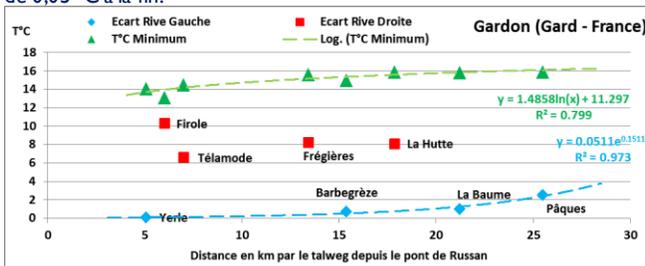


Figure 11. Variations des températures lors de l'été 2014 le long des gorges du Gardon

Tous ces éléments montrent une très nette différence entre les phénomènes karstiques de rive droite (très locaux et modestes) et ceux de rive gauche (bien plus fondamentaux et devant donc intéresser un ou de vaste(s) aquifère(s)). Tout ceci confirme que l'alimentation des gorges se fait essentiellement à partir de la rive gauche et que c'est donc au nord des gorges qu'il faut rechercher l'aquifère alimentant les sources de La Baume, lequel peut être (doit être ?) soutenu par les pertes observées en lit vif entre Ners et La Baume (Martin Ph. ce volume), lesquelles doivent être permanentes, plafonnées en hautes eaux et dépendantes des débits disponibles de la fin du printemps à la première Gardonnade qui établit et maintiendra l'écoulement en lit vif. Les capacités d'exhaure à l'aval (grotte de Pâques, sources de La Baume, Barbègrèze) doivent régler les possibilités de pertes à l'amont (Ners – Russan...) en hautes eaux.

V. Fluctuation physique de la nappe du Gardon lors de la crue de novembre 2017

L'assèchement des gorges implique que le niveau de l'eau s'abaisse au cours de la phase de tarissement des sources de La Baume. Cette variation a pu être suivie en un point, à la source de Télamode qui est un regard sur la « nappe » karstique souterraine du Gardon, tout comme le retour de l'eau lors de la première crue du cycle (gardonnade). La figure 3 montre la remise en eau du système karstique des gorges par la première crue du cycle 2017 – 2018. La question qui se posait était de savoir si l'écoulement en surface se faisait plus rapidement et donc emplissait au moment du passage du front de crue la cavité de Télamode ou si, par transfert de pression produit par l'entonnement de débits importants (cf. Martin Ph., ce volume), la cavité de Télamode se mettait à déborder avant l'arrivée du front de crue ? Des mesures réalisées avec une sonde Solinst à demeure dans un puits noyé de cette

cavité montrent clairement que c'est la rivière qui emplit la cavité et donc que l'eau en surface va plus vite que le transfert de pression dans l'endokarst et a fortiori que son transit entre la Gardonnègue et les gorges. Ceci est visible au travers de l'abaissement de la température (l'eau du Gardon en ce mois de novembre était assez fraîche) à partir du moment où la cavité s'est remplie. En fonction de ces mesures effectuées toutes les 30 mn il apparaît que l'eau arrive le 5/11 à 1 h et à 3 h le niveau est quasiment à son maximum (+12,44 m), ce qui donne un remplissage de 10 cm par minute. Le maximum absolu qui correspond à la hauteur d'eau maximale de la crue en ces lieux, est atteint le 5/11 à 6 h 30 avec 12,91 m. La température à partir de l'arrivée de la crue baisse pour atteindre une valeur minimale (8,9 – 9 °C) dans la nuit du 7 au 8/11 entre 20 h et 8 h 30. La température remonte ensuite progressivement.

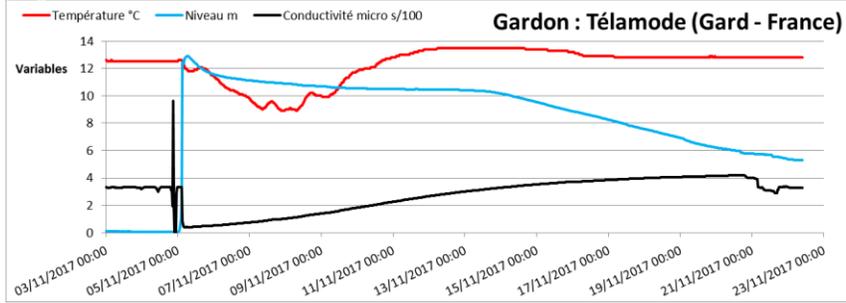


Figure 111. Variation de la température en °C, du niveau de l'eau en cm et de la conductivité en micro siemens lors de la première crue du cycle 2017 – 2018 à Téalomode

Cela étant une analyse fine de la courbe montre des petits pics : le 5/11 vers 15 h, le 7/11 vers 15 h (9,6 °C) et le 8/11 entre 17 h et 18 h (10,2). Une observation encore plus précise de la courbe montre même qu'il y a un petit ralentissement de la baisse le 6/11 vers 15 h. Nous avons donc là, très clairement, un effet thermique externe lié à un très léger réchauffement de l'eau du Gardon ; le temps s'étant remis au beau. Ceci implique aussi que lors de ces journées l'eau entre continuellement dans l'endokarst sans quoi ces petits signaux thermiques mesurés sous près de 13 m d'eau ne pourraient apparaître. Ces éléments montrent donc indubitablement que c'est de l'eau de surface qui inonde le karst et donc il faut imaginer, lors de la première crue de cycle et vraisemblablement lors de toutes crues avançant sur un assés, un système de pertes certes dans le lit vif, mais surtout des modalités de débordement et d'entonnement dans les cavités karstiques, connues ou non, s'ouvrant au-delà du lit mineur dans le lit majeur et cela particulièrement dans la partie amont des gorges lieu où la « nappe » karstique est plus basse en fin d'été. Ces eaux peu filtrées vont donc rejoindre des niveaux noyés alimentant les sources de La Baume. Ceci pourrait avoir des conséquences en cas de pollution majeure lors d'une crue de ce type.

La figure 3 montre très clairement aussi que la température ensuite remonte et dépasse la valeur d'avant crue. Ces niveaux ne peuvent en aucune façon être liés à l'eau de surface dont nous avons vu la « fraîcheur » et les pics journaliers. C'est donc de l'eau, ou du moins c'est un flux énergétique profond, qui apparaît ici au travers d'une crue thermique. L'écart entre la valeur d'avant crue (12,5 °C) et le pic thermique (13,5 °C) est de 1 °C. Thermiquement la crue apparaît le 5/11 à 3 h alors que le premier maximum (il y a une longue phase de stabilité ensuite) est observé le 12/11 à 5 h 30. Il y a donc 7 jours entre l'arrivée de l'eau du Gardon au droit de Téalomode et le transit endokarstique qui conduit à faire apparaître une crue thermique.

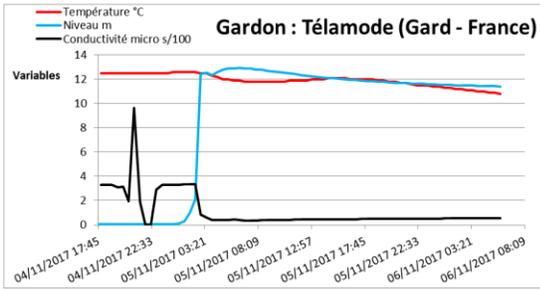


Figure 1 V. Variations de la température en °C, du niveau de l'eau en cm et de la conductivité en micro siemens lors de la première crue du cycle 2017 – 2018 ; zoom sur les 24 h qui ont vu la crue passer Il est probable que dès la nuit du 7 au 8/11 des eaux profondes entrent en jeu pour faire remonter la température à Télamode. Il est toutefois impossible de savoir sous quelle forme. On peut toutefois envisager une réduction des entrées d'eau du Gardon, le pic de crue étant passé, et une augmentation des circulations profondes en raison de la remontée progressive du niveau de la « nappe » karstique alimentée qu'elle est par toutes les entrées d'eau (en lit vif ou non) amont. C'est ce système de bascule que traduit la baisse puis la remontée de la température jusqu'à son maximum.

La conductivité nous permet toutefois de préciser d'autres choses. Très classiquement elle baisse au moment de la crue – les eaux de surface pour partie issues du socle cévenol sont globalement peu chargées, tout comme la pluie – et remonte ensuite de façon très régulière. La dynamique est toutefois plus lente puisque le maximum, qui est supérieur à la valeur d'avant crue, n'est atteint que dans la nuit du 20 au 21/11. Cette dynamique ne peut être due qu'à des mélanges d'eaux. Le 5/11 il y a très peu d'eau du karst et beaucoup d'eau du Gardon autour de la sonde, mais progressivement cette proportion va être modifiée au bénéfice des eaux du karst dans la mesure où de nouveau le Gardon va s'assécher. La toute fin de la courbe montre une baisse qui n'est pas sans rappeler la hausse de la température à la grotte de Pâques. Il se pourrait que nous ayons là les traces d'un épisode local encore à interpréter (petite pluie qui fait baisser la conductivité à Télamode et produit un effet de chasse thermique par lessivage d'un épikarst encore « chaud » à la grotte de Pâques ?). La suite de l'enregistrement, nécessaire pour mieux comprendre, est dans la sonde qui n'a pas encore pu être récupérée à l'heure où nous écrivons.

Cela étant si nous faisons un zoom sur la nuit du 4 au 5/11 il apparaît une variation de la conductivité qui n'est pas sans intérêt. On observe le 4/11 à 20 h 30 une petite baisse puis à 21 h une forte hausse de la conductivité, puis celle-ci baisse à nouveau au niveau observé à 20 h 30 avant d'aller à zéro entre 22 h et 23 h. La valeur remonte ensuite à son niveau d'avant crue et y reste pendant 3 h. Thermiquement nous avons une infime variation positive (+0,1 °C) pendant ces 3 h. Ensuite intervient la grande phase de crue. Pour que la conductivité baisse à zéro il faut un apport d'eau très peu minéralisée. Inversement pour qu'elle monte presque à 10 il faut un drainage d'eau fortement minéralisée. Comme la crue arrive presque une journée après nous ne pouvons conclure qu'à un épisode très local qui en toute logique doit être lié à l'épisode cévenol de dimension régionale qui a provoqué la crue. Nous aurions donc eu, près de 24 h avant l'arrivée du Gardon des précipitations qui ont lessivé très localement le karst et provoqué une petite crue chimique en l'absence de modification du niveau piézométrique et une toute petite variation thermique liée à la chaleur encore emmagasinée près de la sonde. Ensuite les eaux de pluie ont été suffisantes pour, dans le puits, faire chuter pendant quelques heures la conductivité. Il est donc logique de penser que ces eaux sont arrivées par le haut, sans quoi elles auraient été tamponnées par celles stockées dans l'aquifère. Ce qui ne manquera pas au final de se produire pendant presque une journée avant l'arrivée de l'eau. Donc avec ce petit enregistrement nous pouvons mesurer le déphasage entre la formation de la crue et son transit et les précipitations qui lui ont donné naissance.

Des enregistrements faits avec des boutons thermiques dans les gorges, au droit ou au niveau des principales sources, permettent maintenant, sur ces bases, d'envisager de caractériser la progression de la crue dans les gorges voire depuis Ners et jusqu'aux sources de La Baume (travail en cours).

Conclusion

Ces observations permettent donc de croiser plusieurs variables temporelles et spatiales pour commencer à dessiner les logiques de fonctionnement des karsts polyphasés du bassin du Gardon. Très clairement, il apparaît une différence nette entre les sources de rive gauche et les sources de rive droite

des gorges du Gardon. Celle-ci traduit une dissymétrie forte dans l'alimentation. L'essentiel des apports provient d'un aquifère situé au nord des gorges alimenté par les pertes en lit vif. La température minimale augmente régulièrement le long des gorges. Les sources aval sont donc les exutoires d'un aquifère majeur (faible différence entre température minimale et maximale) très largement tamponné par le gradient géothermique. Les crues du Gardon s'avançant sur un assec vont plus vite que le remplissage de l'aquifère. Il y a donc à un moment un espace d'air dans le karst entre le lit vif en eau du Gardon et le niveau piézométrique sous-jacent. Ce vide d'eau est en partie rempli par des entrées (massives ?) qui s'effectuent par des exutoires comme Télamode qui fonctionnent alors en pertes. Le croisement des informations hydrodynamiques (niveau d'eau), de température et de conductivité acquises à haute résolution permettent donc de mettre en évidence des phénomènes très fins, locaux ou globaux, qui éclairent d'un jour nouveau le fonctionnement de ce que d'aucuns ont appelé le « Gardon souterrain ».

Computation of Normal Depth in an Open Channel with Horizontal Bottom and Circular Walls Using the Rough Model Method

Moussa LAKEHAL*, Bachir ACHOUR**, Naim MANSRI*** and Ali BEDJAOUI**

*Department of Hydraulic, University of Badji Mokhtar Annaba, Algeria, Research Laboratory in Civil Engineering, Hydraulic, durable development and environment (LARGHYDE) (E-mail: moussalakehall@gmail.com)

**Department of Civil and Hydraulic Engineering, Research Laboratory in Subterranean and Surface Hydraulics (LARHYSS) University of Biskra, Biskra, Algeria (E-mail: bachir.achour@larhyss.net)

*** Department of Civil Engineering, University of Constantine, Algeria

Abstract:

Computation of normal depth of the flow in open channels is a topical field in the practice of hydraulic engineers. Many methods consider the Chezy's coefficient or Manning's roughness coefficient as a given data of the problem. This seems unjustified since these coefficients depend in particular on the normal depth. The objective of this study is to propose an explicit method allowing the calculation of the normal depth in a channel with horizontal bottom and circular walls using the rough model method which is based on parameters easily measurable in practice. These parameters are namely discharge, longitudinal slope, absolute roughness and kinematic viscosity. After establishing the equations governing the geometric and hydraulic characteristics of the rough model, the study shows that the normal depth is equal to the normal depth in the rough model corrected by the effects of a non-dimensional correction factor. A practical example is proposed to show the simplicity and validity of the proposed method.

Key Words: Linear dimensions, Open channel with horizontal bottom and circular walls, Uniform flow, Discharge, Slope, Turbulent flow, RMM.

1. Introduction

It is well known that the normal depth plays a major role in the classification of varied flow and in the design of canals and conduits (Achour, 2015). For the most part, the well known Manning and Chezy resistance equations are extensively used. Due to their implicit form, graphical methods have been presented in the past for uniform flow computation in the common rectangular, trapezoidal, triangular and circular cross sections (Henderson, 1966; Chow, 1973; French, 1986 cited by Achour and Khattaoui, 2008). The power-law section allows the modeling of natural channels and artificial channel shapes. When the general river behavior under different flow regimes is studied, the simplification of the real geometry is very important (Valiani and Caleffi 2009 cited by Vatankhah, 2014). Generally, the actual geometry can be well represented by a power-law section. The generic results for a power-law channel can also be applied to its special forms such as the parabolic and the triangular channels. This type of channel has become very famous because of these advantages (Vatankhah, 2014). In addition, in the design, the power-law form presents more flexibility (Easa and Vatankhah, 2014). The shape chosen in this paper is that of a channel with horizontal bottom and circular walls. This is a particular form of power-law section. But, obtaining the expressions of the wetted area and wetted perimeter is much simpler compared to those of the power-law section. As with other forms of channels, the problem does not lie in the iterative nature of calculation by current methods, but rather that they consider the Chezy and Manning coefficients as data of the problem. Since these latter

depend on the normal depth sought, the main question is: how do we impose these coefficients? Before determining the value of the normal depth, it is very difficult, if not impossible, to evaluate the value of these coefficients in advance even with much experience. In practice, absolute roughness is the only measurable parameter that reflects the internal state of the channel wall called \mathcal{E} . It is this characteristic that it is imported to be, in principle, a given data of the problem in place of Chezy and Manning coefficients (Achour, 2014a; 2014b; 2014c; Lakehal and Achour, 2014). It is in this context that the present study is suggested based on a new method known as the Rough Model Method called RMM (Achour, 2013; 2014a; 2014b; 2014c; 2014d; 2014e; 2015b; Achour and Bedjaoui, 2012; 2014; Achour and Khattaoui, 2014; Achour and Sehtal, 2014; Achour and Riabi, 2014; Lakehal and Achour, 2014; Riabi and Achour, 2014). This method does not require to know in advance neither Chezy's Coefficient nor Manning's roughness coefficient. For the calculation of the normal depth in an open channel with a horizontal bottom and circular walls, one must know the practically measurable parameters, such as the discharge Q , the longitudinal slope i of the channel, the channel base width b , the diameter D (Fig. 1), the absolute roughness \mathcal{E} and the kinematic viscosity ν of the flowing liquid. The aspect ratio $\eta = y_n/b$ and the fill-rate $\xi = y_n/D$ of channel (Fig. 1) is, on other hand, unknown. The present study differs from that of Lakehal and Achour (2017), which suggests calculating the dimensions of the channel with horizontal bottom and circular walls, including the normal depth, knowing the aspect ratio η and fill-rate ξ . The method used considers a referential rough model whose geometric and hydraulic parameters are well determined (Achour, 2014a; Lakehal and Achour, 2017). The normal depth can then be easily computed using a non-dimensional correction factor of linear dimension (Achour, 2015a). Resulting relationships from application of RMM are applicable throughout the range of turbulent flow, corresponding to Reynolds number ≥ 2300 and in wide range of relative roughness \mathcal{E}/D_h [0; 0.05] (Achour, 2014b). An application example is proposed to show the calculation steps and to examine the simplicity and efficiency of the proposed procedure.

2. Basic Equations

Three universal formulas used in the field of hydraulics will be applied in this research work: the Darcy-Weisbach relationship (Darcy, 1854), the Colebrook-White formula (Colebrook, 1939) and Reynolds number equation. Concerning the Colebrook-White formula, it is used to determine the friction coefficient f as a function of the Reynolds number R and the relative roughness \mathcal{E}/D_h . This formula is written as:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\mathcal{E} / D_h}{3.7} + \frac{2.51}{R \sqrt{f}} \right) \quad (1)$$

The Reynolds number R is expressed as follows:

$$R = \frac{4Q}{P\nu} \quad (2)$$

As regards to Darcy-Weisbach relationship, it expresses the longitudinal slope i of the channel as a function of the discharge Q , the acceleration due to gravity g , the wetted area A , the hydraulic diameter D_h and the friction factor f . It is given by the following expression:

$$i = \frac{f}{D_h} \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (3)$$

3. Referential Rough Model

The symbol " $\bar{\quad}$ " denotes all the geometrical and hydraulic parameters of the rough model. Fig. 1 shows the geometric and hydraulic characteristics of the channel studied as well as its rough model. The rough model, then, has the same shape as that studied but it is specially characterized by an arbitrarily chosen relative roughness $\bar{\varepsilon} / \bar{D}_h = 0,037$, where $\bar{\varepsilon}$ represents the absolute roughness of rough model and \bar{D}_h is the hydraulic diameter of the latter. The high chosen value of relative roughness implies that flow regime is in the rough turbulent domain. Then, for a very high value of Reynolds number $R = \bar{R}$ and applying Eq. (1), the friction factor for the rough model assumes a constant value $\bar{f} = 1/16$ (Achour, 2013; 2014a; 2014b; 2014c; 2014d; 2014e; 2015a; 2015b; Lakehal and Achour, 2014; 2017; Achour and Bedjaoui, 2012; 2014; Achour and Khattaoui, 2008; 2014; Achour and Sehtal, 2014; Achour and Riabi, 2014; Riabi and Achour, 2014). The other characteristics to be considered for the rough model are namely the width of its base $\bar{b} = b$, the diameter $\bar{D} = D$ and the longitudinal slope $\bar{i} = i$ (Fig. 1). The discharge is $\bar{Q} = Q$ leading to $\bar{y}_n \neq y_n$ and even $\bar{y}_n > y_n$. As well as for trapezoidal channel (Achour, 2014c), the shape parameter or non-dimensional normal depth is therefore $\bar{\eta} = \bar{y}_n / b \neq \eta = y_n / b$ and the fill-rate is $\bar{\xi} = \bar{y}_n / \bar{D} \neq \xi = y_n / D$.

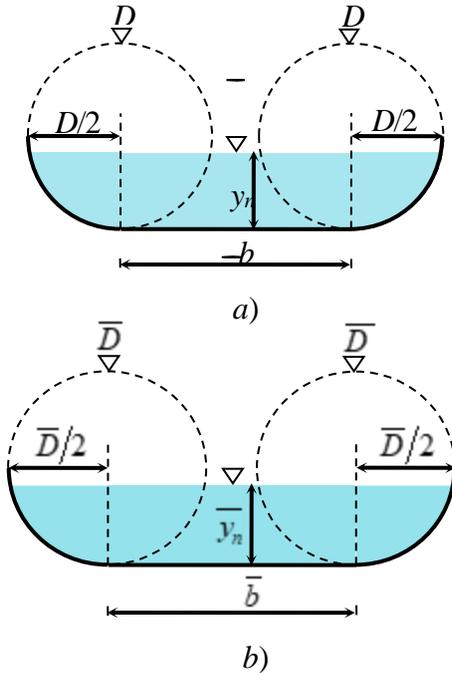


Fig. 1. Schema of representation of normal depth in channel cross section with horizontal bottom and circular walls.
 a) Channel studied b) Referential rough model

Considering Eq (3), one can write for the rough model:

$$i = \frac{\bar{f}}{D_h} \frac{Q^2}{2gA} \quad (4)$$

Considering that $\bar{D}_h = 4\bar{A}/\bar{P}$ and $\bar{f} = 1/16$, Eq. (4) becomes after simplification and rearrangement:

$$i = \frac{1}{128g} \frac{\bar{P}}{\bar{A}^3} Q^2 \quad (5)$$

Bearing in mind that $\bar{b} = b$, the water area of the rough model is written as (Fig. 1b):

$$\bar{A} = b^2 \left[0.25\sigma(\bar{\xi})\rho(\bar{\xi})/\beta^2 + \bar{\xi}/\beta \right] \quad (6)$$

where:

$$\sigma(\bar{\xi}) = \cos^{-1}(1 - 2\bar{\xi}) \quad (7)$$

$$\varphi(\bar{\xi}) = 1 - \frac{2(1 - 2\bar{\xi})\sqrt{\bar{\xi}(1 - \bar{\xi})}}{\cos^{-1}(1 - 2\bar{\xi})}$$

(8)

$$\beta = b/D$$

(9)

The parameter β is by definition the relative width.

In addition, the wetted perimeter of rough model is expressed as follows (Fig. 1b):

$$\bar{P} = b[\sigma(\bar{\xi})/\beta + 1]$$

(10)

By virtue of Eqs. (6) and (10), Eq. (5) can be written as:

$$\left\{ \frac{\beta^5 [\sigma(\bar{\xi}) + \beta]}{2[\sigma(\bar{\xi})\varphi(\bar{\xi}) + 4\beta\bar{\xi}^{\frac{2}{3}}]} \right\} \frac{Q^2}{gib^5} = 1$$

(11)

By introducing the notion of relative conductivity, one can write:

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{gib^5}}$$

(12)

Therefore, Eq. (11) becomes:

$$\left\{ \frac{\beta^5 [\sigma(\bar{\xi}) + \beta]}{2[\sigma(\bar{\xi})\varphi(\bar{\xi}) + 4\beta\bar{\xi}^{\frac{2}{3}}]} \right\} Q^{*2} = 1$$

(13)

The relative conductivity can, easily, be calculated since all parameters of Eq. (12) are known.

What is needed is the computation of the fill-rate $\bar{\xi}$ of the rough model using Eq. (13) for

the given value of Q^* and β . However, it is easy to observe that Eq. (13) is implicit with

respect to the fill-rate $\bar{\xi}$. Therefore, the calculation requires the use of an iterative

procedure or a graphical process. In order to avoid this constraint, one may propose an

approximate relationship in place of Eq. (13). The calculation shows that Eq. (13) can be

replaced with an excellent approximation by the following explicit polynomial law:

$$\bar{\xi} = a_6(\beta)Z^6 + a_5(\beta)Z^5 + a_4(\beta)Z^4 + a_3(\beta)Z^3 + a_2(\beta)Z^2 + a_1(\beta)Z + a_0(\beta)$$

(14)

The parameter Z depends solely on the relative conductivity Q^* , that is :

$$Z = \log Q^*$$

(15)

The adjustment parameters $a_6(\beta)$, $a_5(\beta)$, $a_4(\beta)$, $a_3(\beta)$, $a_2(\beta)$, $a_1(\beta)$ and

$a_0(\beta)$ depend on the fill-rate relative width Q^* . Their values are grouped in Table I.

Table I: Values of the adjustment parameters of Eq. (14)

		$a_6(\beta)$	$a_5(\beta)$	$a_4(\beta)$	$a_3(\beta)$	$a_2(\beta)$	$a_1(\beta)$	$a_0(\beta)$
β	1	$\frac{109}{2389}$	$-\frac{89}{13051}$	$\frac{47}{1351}$	$\frac{202}{2311}$	$\frac{545}{3286}$	$\frac{328}{1423}$	$\frac{836}{5199}$
	1.2	$\frac{289}{6616}$	$\frac{137}{4389}$	$\frac{245}{5501}$	$\frac{673}{6113}$	$\frac{401}{1907}$	$\frac{1090}{3821}$	$\frac{304}{1545}$
	1.4	$\frac{155}{3713}$	$\frac{96}{1603}$	$\frac{193}{2692}$	$\frac{543}{3929}$	$\frac{985}{3844}$	$\frac{364}{1065}$	$\frac{361}{1547}$
	1.6	$\frac{124}{3109}$	$\frac{307}{3752}$	$\frac{437}{4110}$	$\frac{327}{1874}$	$\frac{904}{2961}$	$\frac{549}{1373}$	$\frac{815}{3013}$
	1.8	$\frac{84}{2203}$	$\frac{181}{1832}$	$\frac{659}{4595}$	$\frac{386}{1771}$	$\frac{533}{1487}$	$\frac{307}{668}$	$\frac{269}{873}$
	2	$\frac{293}{8029}$	$\frac{355}{3168}$	$\frac{935}{5183}$	$\frac{187}{701}$	$\frac{435}{1046}$	$\frac{358}{687}$	$\frac{974}{2813}$
	2.5	$\frac{120}{3647}$	$\frac{2553}{19024}$	$\frac{437}{1646}$	$\frac{387}{964}$	$\frac{1631}{2832}$	$\frac{2983}{4367}$	$\frac{173}{390}$
	3	$\frac{179}{5977}$	$\frac{505}{3444}$	$\frac{756}{2245}$	$\frac{1009}{1866}$	$\frac{818}{1087}$	$\frac{89}{104}$	$\frac{845}{1554}$
	3.5	$\frac{199}{7236}$	$\frac{472}{3073}$	$\frac{369}{934}$	$\frac{577}{854}$	$\frac{979}{1044}$	$\frac{2162}{2085}$	$\frac{1154}{1785}$
	4	$\frac{102}{4007}$	$\frac{281}{1786}$	$\frac{654}{1477}$	$\frac{7621}{9495}$	$\frac{778}{691}$	$\frac{2070}{1691}$	$\frac{2337}{3110}$
	4.5	$\frac{533}{22465}$	$\frac{807}{5072}$	$\frac{552}{1145}$	$\frac{1358}{1475}$	$\frac{1563}{1190}$	$\frac{1261}{891}$	$\frac{115}{134}$
	5	$\frac{155}{6967}$	$\frac{224}{1403}$	$\frac{2471}{4800}$	$\frac{861}{836}$	$\frac{418}{279}$	$\frac{7630}{4743}$	$\frac{633}{655}$

Note that Eq. (14) is applicable in the following relative width values: $\beta = 1, 2, 3, 4$ and 5 , for the range of relative conductivity indicate in table 2 and for the following wide range of fill-rate $0.1 \leq \bar{\xi} \leq 0.5$. It is necessary to point out that this last value represents the maximum value that the fill-rate $\bar{\xi}$ can take and 0.1 is a minimum practical value.

Table 2. Limits of applicability of Eq. (14)

β	1	1.2	1.4
Q^*	$0.4666 \leq Q^* \leq 5.9515$	$0.3409 \leq Q^* \leq 4.2616$	$0.2625 \leq Q^* \leq 3.2330$
β	1.6	1.8	2
Q^*	$0.2100 \leq Q^* \leq 2.5557$	$0.1728 \leq Q^* \leq 2.08355$	$0.1454 \leq Q^* \leq 1.7395$
β	2.5	3	3.5
Q^*	$0.1013 \leq Q^* \leq 1.1947$	$0.07567 \leq Q^* \leq 0.8840$	$0.05927 \leq Q^* \leq 0.6876$
β	4	4.5	5
Q^*	$0.04803 \leq Q^* \leq 0.5544$	$0.03994 \leq Q^* \leq 0.4592$	$0.03389 \leq Q^* \leq 0.3884$

Fig. 2 represents graphically the relative deviations corresponding to different values of $\bar{\xi}$ and β . These deviations result from application of the approximate Eq. (14).

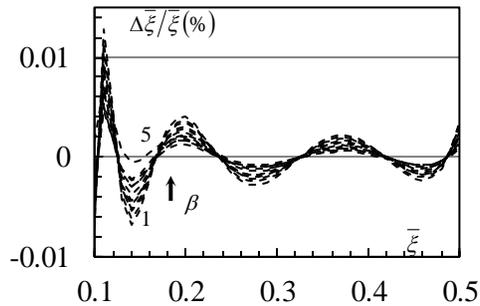


Fig. 2. Relative deviation, $\Delta \bar{\xi} / \bar{\xi}$, of different values of β

Fig. 2 clearly shows that the maximum relative deviation $\Delta \bar{\xi} / \bar{\xi}$ is less than 0.013%. But for the values of fill-rate such that $\bar{\xi} \geq 0.12$ the relative deviations $\Delta \bar{\xi} / \bar{\xi}$ are less than 0.007% in absolute value. All indicated values of relative deviations are really insignificant, which validates the approximate Eq. (14) proposed to replace implicit Eq. (13). The limits of application the

In addition, the non-dimensional normal depth can be calculated by the following relationship:

$$\bar{\eta} = \bar{\xi} / \beta \quad (16)$$

4. Non-Dimensional Correction Factor of Linear Dimension

The rough model method suggests that any linear dimension L of a channel is related to its homologue \bar{L} in the rough model by the following relationship (Achour, 2014a):

$$L = \psi \bar{L} \quad (17)$$

It is important to note that Eq. (17) is applicable to entire turbulent flow regime. In this equation, ψ is known as a non-dimensional correction factor which is given by the following formula (Achour and Bedjaoui, 2006; 2012):

$$\psi \cong 1.35 \left[-\log \left(\frac{\varepsilon/\overline{D}_h}{4.75} + \frac{8.5}{\overline{R}} \right) \right]^{-2/5}$$

(18)

This correction factor is less than unity.

The Reynolds number of rough model \overline{R} is governed by the following equation:

$$\overline{R} = \frac{4Q}{Pv} \tag{19}$$

5. Computation Steps of Normal Depth

In order to be able to calculate normal depth y_n in a channel with horizontal bottom and circular walls, the following parameters must be known: the discharge Q , the bottom width b , the diameter D , the longitudinal slope i , the absolute roughness ε and the kinematic viscosity ν . On the one hand, it should be noted that all these parameters are measurable in practice, and the flow resistance coefficient know as Manning's roughness coefficient or Chezy's coefficient is not imposed, on the other hand. The calculation of the normal depth y_n can be done by referring to the following steps:

1. Determine the relative conductivity Q^* by applying the Eq. (12).
2. Calculate now the parameter Z using the Eq. (15).
3. Calculate the value of fill-rate $\overline{\xi}$ in rough model according to explicit Eq. (14). Use Table I to choose the values of adjustment parameter $a_6(b)$, $a_5(b)$, $a_4(b)$, $a_3(b)$, $a_2(b)$, $a_1(b)$ and $a_0(b)$ according to relative width b .
4. From the value of $\overline{\xi}$, calculate the functions $\square\square(\overline{\xi})$ and $\square\square(\overline{\xi})$ using respectively Eqs. (7) and (8).
5. The result obtained during step 4 permits calculating water area \overline{A} and the wetted perimeter \overline{P} respectively by application of Eqs. (6) and (10). It is then possible to deduce the value of hydraulic diameter $\overline{D}_h = 4\overline{A}/\overline{P}$ and Reynolds number \overline{R} using Eq. (19).
6. After calculating the values of \overline{D}_h and \overline{R} , determine the value of non-dimensional correction factor ψ of linear dimension according to Eq. (18).
7. Assign the new linear dimension $\overline{b} = b/\psi$ to rough model by referring to Eq. (17) and deducing the corresponding value of the relative conductivity Q^* by applying Eq (12).
8. Using the new value of Q^* , calculate the corresponding value of the parameter Z according to Eq. (15).
9. By inserting the new value of Z and values of adjustment parameters $a_6(b)$, $a_5(b)$, $a_4(b)$, $a_3(b)$, $a_2(b)$, $a_1(b)$ and $a_0(b)$ determined during step 3 in Eq. (14), one can write that the fill-rate $\overline{\xi}$ of rough model is equal to that ξ of the current channel. Deduct the value of non-dimensional normal depth h in current channel according to Eq. (16).
10. Finally, the normal depth sought is $y_n = b\eta$.

6. Practical Example

Determine the value of normal depth y_n in a channel with horizontal bottom and circular walls, knowing that:

$$Q = 15.197 \text{ m}^3/\text{s}, b = 10 \text{ m}, D = 5 \text{ m}, i = 10^{-4}, e = 10^{-3} \text{ m}, n = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}.$$

(For a verification need, the results will not be rounded).

1. The relative conductivity Q^* is calculated by applying Eq. (12):

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{gib^5}} = \frac{15.197}{\sqrt{9.81 \times 10^{-4} \times 10^5}} = 1.53434619$$

2. Let us deduce the parameter Z using Eq. (15):

$$Z = \log Q^* = \log(1.53434619) = 0.18592336$$

3. Using Eq. (14), the fill-rate $\bar{\xi}$ in the rough model is:

$$\begin{aligned} \bar{\xi} &= a_6(\beta)Z^6 + a_5(\beta)Z^5 + a_4(\beta)Z^4 + a_3(\beta)Z^3 + a_2(\beta)Z^2 + a_1(\beta)Z + a_0(\beta) \\ &= \frac{293}{8029} \times (0.18592336)^6 + \frac{355}{3168} \times (0.18592336)^5 + \frac{935}{5183} \times (0.18592336)^4 \\ &\quad + \frac{187}{701} \times (0.18592336)^3 + \frac{435}{1046} \times (0.18592336)^2 + \frac{358}{687} \times (0.18592336) \\ &\quad + \frac{974}{2813} = 0.45946738 \end{aligned}$$

The adjustment parameters $a_6(x)$, $a_5(b)$, $a_4(b)$, $a_3(b)$, $a_2(b)$, $a_1(b)$ and $a_0(b)$ are deduced from table 1 according to value of relative width $b = b/D = 10/5 = 2$.

4. Compute the functions $\sigma(\bar{\xi})$ and $\varphi(\bar{\xi})$ respectively by Eqs. (7) and (8):

$$\sigma(\bar{\xi}) = \cos^{-1}(1 - 2\bar{\xi}) = \cos^{-1}(1 - 2 \times 0.45946738) = 1.48964204$$

$$\begin{aligned} \varphi(\bar{\xi}) &= 1 - \frac{2(1 - 2\bar{\xi})\sqrt{\bar{\xi}(1 - \bar{\xi})}}{\cos^{-1}(1 - 2\bar{\xi})} \\ &= 1 - \frac{2(1 - 2 \times 0.45946738)\sqrt{0.45946738 \times (1 - 0.45946738)}}{\cos^{-1}(1 - 2 \times 0.45946738)} = 0.94575983 \end{aligned}$$

5. The water area \bar{A} of rough model is determined by virtue of Eq. (6):

$$\begin{aligned} \bar{A} &= b^2 \left[0.25\sigma(\bar{\xi})\varphi(\bar{\xi})/\beta^2 + \bar{\xi}/\beta \right] \\ &= 10^2 \times \left[0.25 \times 1.48964204 \times 0.94575983/2^2 + 0.45946738/2 \right] = 31.7786415 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

The wetted perimeter \bar{P} of rough model is given by Eq. (10):

$$\bar{P} = b \left[\sigma(\bar{\xi})/\beta + 1 \right] = 10 \times \left[1.48964204/2 + 1 \right] = 17.4482102 \text{ m}$$

The hydraulic diameter $\bar{D}_h = 4\bar{A}/\bar{P}$ is therefore:

$$\bar{D}_h = 4\bar{A}/\bar{P} = 4 \times 31.7786415/17.4482102 = 7.28524958m$$

The Reynolds number \bar{R} of rough model can be calculated by applying Eq. (19). Is then:

$$\bar{R} = \frac{4Q}{Pv} = \frac{4 \times 15,197}{17.4482102 \times 10^{-6}} = 3483910.349$$

6. According to Eq. (18), the non-dimensional correction factor of linear dimension ψ is such that:

$$\begin{aligned} \psi &\cong 1.35 \left[-\log \left(\frac{\varepsilon/\bar{D}_h}{4.75} + \frac{8.5}{\bar{R}} \right) \right]^{-2/5} \\ &= 1.35 \times \left[-\log \left(\frac{10^{-3}/7.28524958}{4.75} + \frac{8.5}{3483910.349} \right) \right]^{-2/5} = 0.73942962 \end{aligned}$$

7. Let us assign to the rough model new linear dimension such that:

$$\bar{b} = b/\psi = 10/0.73942962 = 13.5239375m$$

And then calculate the corresponding value of the relative conductivity using Eq. (12)

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{gib^5}} = \frac{15.197}{\sqrt{9.81 \times 10^{-4} \times 13.5239375^5}} = 0.72138228$$

8. For this new value of Q^* , calculate the parameter Z according to Eq. (15):

$$Z = \log Q^* = \log(0.72138228) = -0.14183453$$

9. Let us insert this new value of Z and the adjustment parameters $a_6(\beta)$, $a_5(\beta)$, $a_4(\beta)$, $a_3(\beta)$, $a_2(\beta)$, $a_1(\beta)$ and $a_0(\beta)$, chosen during step 3, in Eq. (14), the fill-rate is obtained as follows:

$$\begin{aligned} \xi = \bar{\xi} &= a_6(\beta)Z^6 + a_5(\beta)Z^5 + a_4(\beta)Z^4 + a_3(\beta)Z^3 + a_2(\beta)Z^2 + a_1(\beta)Z + a_0(\beta) \\ &= \frac{293}{8029} \times (-0.14183453)^6 + \frac{355}{3168} \times (-0.14183453)^5 + \frac{935}{5183} \times (-0.14183453)^4 \\ &\quad + \frac{187}{701} \times (-0.14183453)^3 + \frac{435}{1046} \times (-0.14183453)^2 + \frac{358}{687} \times (-0.14183453) \\ &\quad + \frac{974}{2813} = 0.28001049 \end{aligned}$$

One deduce the value of non-dimensional normal depth in current channel according to Eq. (16) such that:

$$\eta = \xi/\beta = 0.28001049/2 = 0.14000524$$

10. Finally, the normal depth sought is:

$$y_n = b\eta = 10 \times 0.14000524 = 1.40005243m \approx 1.4m$$

11. Through this step, one will try to validate the calculation by determining the longitudinal slope i of channel using Eq. (3). The longitudinal slope that will be calculated must be equal to that indicated in data of problem.

The rough model method suggests that the friction factor f and non-dimensional correction factor ψ are related by following relationship formula (Achour, 2013; 2014a; 2014b; 2014c; 2014d; 2014e; 2015a; 2015b; Lakehal and Achour, 2014; 2017; Achour and Bedjaoui, 2006; 2012; 2014; Achour and Khattaoui, 2008; 2014; Achour and Sehtal, 2014; Achour and Riabi, 2014; Riabi and Achour, 2014):

$$f = \psi^5 / 16 = 0.73942962^5 / 16 = 0.01381542$$

Compute the functions $\sigma(\xi)$ and $\varphi(\xi)$ in current channel according to Eqs. (7) and (8) respectively:

$$\sigma(\xi) = \cos^{-1}(1 - 2\xi) = \cos^{-1}(1 - 2 \times 0.28001049) = 1.11522101$$

$$\begin{aligned} \varphi(\xi) &= 1 - \frac{2(1 - 2\xi)\sqrt{\xi(1 - \xi)}}{\cos^{-1}(1 - 2\xi)} \\ &= 1 - \frac{2(1 - 2 \times 0.28001049)\sqrt{0.28001049 \times (1 - 0.28001049)}}{\cos^{-1}(1 - 2 \times 0.28001049)} = 0.64571623 \end{aligned}$$

The wetted perimeter P in current channel is given according to Eq. (10):

$$P = b[\sigma(\xi)/\beta + 1] = 10 \times [1.11522101/2 + 1] = 15.576105m$$

The water area A in current channel is given according to Eq. (6):

$$\begin{aligned} A &= b^2 \left[0.25\sigma(\xi)\varphi(\xi)/\beta^2 + \xi/\beta \right] \\ &= 10^2 \times \left[0.25 \times 1.11522101 \times 0.64571623 / 2^2 + 0.28001049 / 2 \right] = 18.5012512m^2 \end{aligned}$$

The hydraulic diameter D_h in current channel is deduct such that:

$$D_h = 4A/P = 4 \times 18.5012512 / 15.576105 = 4.7511881m$$

Finally, the longitudinal slope is, by virtue of Eq. (3):

$$i = \frac{f}{D_h} \frac{Q^2}{2gA^2} = \frac{0.01381542}{4.7511881} \times \frac{15.197^2}{2 \times 9.81 \times 18.5012512^2} = 0.000099995 \approx 10^{-4}$$

It can easily be seen that the longitudinal slope thus calculated is practically equal to that indicated in the data of problem.

7. Conclusions

Explicit hydraulic relationships have been proposed in order to calculate the normal depth in a open-channel with horizontal bottom and circular walls by applying the rough model method. The channel studied is characterized by its referential rough model of same shape and whose geometric and hydraulic parameters are known. One of the most advantage of the rough model method is that it is based on easily measurable parameters in practice and, therefore, does not take the Manning's roughness coefficient or Chezy's coefficient as a given data of problem. The method considers three practical equations universally known which are the Colebrook-White equation, Rynolds number relationship and Darcy-Weisbach formula. This latter equation has been applied to the referential rough model where the friction factor has been arbitrarily chosen. These equations were subsequently used to derive explicitly the searched normal depth by the use of a non-dimensional correction factor of linear dimension whose major role has been highlighted. The practical example we suggested showed the reliability of the RMM as well as its simplicity and efficiency.

Notations

The following symbols are used in this paper:

A = Water area;

$a_0(b), a_5(b), a_4(b), a_3(b), a_2(b), a_1(b)$ and $a_0(b)$ = Parameters of ajustemnt;

\bar{b} = Bottom width of current channel;

$\bar{\bar{b}}$ = Bottom with of rough model;

D = Diameter of circular parts of channel;

D_h = Hydraulic diameter in current channel;

\bar{D}_h = Hydraulic diameter in rough model;

f = Friction factor in current channel;

$\bar{f} = 1/16$ = Friction factor in rough model;

g = Acceleration due to gravity;

i = Longitudinal slop of current channel;

\bar{i} = Longitudinal slop of rough model;

L = Linear dimension of current channel;

\bar{L} = Linear dimension of rough model;

Q = Discharge;

Q^* = Relative conductivity;

R = Reynolds number in current channel;

\bar{R} = Reynolds number in rough model;

P = Watted perimeter in current channel;

\bar{P} = Watted perimeter in rough model;

y_n = Normal depth in current channel;

\bar{y}_n = Normal depth in rough model;

Z = Function of Q^* ;

$\Delta \bar{\xi} / \bar{\xi}$

e = Absolute roughness in current channel;

e/D_h = Relative roughness in current channel;

$\bar{e} / \bar{D}_h = 0,037$ = Relative roughness in rough model;

h = non-dimensional normal depth of current channel;

$\bar{e} / \bar{D}_h = 0,037$ = Relative roughness in rough model;

h = non-dimensional normal depth of current channel;

$s(x), j(x)$ = Fuctions of x in current channel;

$\sigma(\bar{\xi}), \varphi(\bar{\xi})$ = Functions of $\bar{\xi}$ in rough model;

n = Kinematic viscosity;

x = fill-rate in current channel;

$\bar{\xi}$ = fill-rate in rough model;

y = Non-dimensional correction factor of linear dimension;

References

- Achour, B. (2013). "Design of pressurized vaulted rectangular conduits using the rough model method." *Adv. Mater. Res.*, vols. 779-780, pp. 414-419.
- Achour, B. (2014a). "Computation of normal depth in parabolic cross sections using the rough model method." *Open Civ. Eng. J.*, vol. 8, pp. 213-218.
- Achour, B. (2014b). "Computation of normal depth in horseshoe shaped tunnel using the rough model method." *Adv. Mater. Res.*, vols. 1006-1007, pp. 826-832.
- Achour, B. (2014c). "Computation of normal depth in trapezoidal open channel using the rough model method." *Adv. Mater. Res.*, vols. 955-959, pp. 3231-3237.
- Achour, B. (2014d). "Design of a pressurized rectangular-Shaped conduit using the rough model method (Part 1)." *Appl. Mech. Mater.*, vols. 641-642, pp. 261-266.
- Achour, B. (2014e). "Design of a pressurized rectangular conduit with triangular bottom using the rough model method." *Open. Civ. Eng. J.*, vol. 8, pp. 205-212.
- Achour, B. (2015a). "Computation of Normal Depth in a U-Shaped Open Channel Using the Rough Model Method." *American Journal of Engineering, Technology and Society*. Vol. 2, No. 3, pp. 46-51.
- Achour, B. (2015b). "Analytical solution for normal depth problem in a vertical U-Shaped open channel using the rough model method." *J. Sci. Res. Rep.*, vol. 6, no. 6, pp. 468-475.
- Achour, B. and Bedjaoui, A. (2006). Discussion of "Exact solutions for normal depth problem." *J. Hydraul. Res.*, vol. 44, no. 5, pp. 715-717.
- Achour, B. and Bedjaoui, A. (2012). "Turbulent pipe-flow computation using the rough model method (RMM)." *J. Civ. Eng. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 36-41.
- Achour, B. and Bedjaoui, A. (2014). "Design of a pressurized trapezoidal shaped conduit using the rough model method (Part 2)." *Appl. Mech. Mater.*, vols. 580-583, pp. 1828-1841.
- Achour, B. and Khattaoui, M. (2008). "Computation of Normal and Critical Depths in Parabolic Cross Sections." *The Open Civil Engineering Journal*, vols. 2, pp. 9-14.
- Achour, B. and Khattaoui, M. (2014). "Design of pressurized vaulted rectangular conduits using the rough model method (Part 2)." *Adv. Mater. Res.*, vols. 1025-1026, pp. 24-31.
- Achour, B. and Riabi, M. (2014). "Design of a pressurized trapezoidal shaped conduit using the rough model method (Part 1)." *Adv. Mater. Res.*, vols. 945-949, pp. 892-898.
- Achour, B. and Sehtal, S. (2014). "The rough model method (RMM). Application to the computation of normal depth in circular conduit." *Open Civ. Eng. J.*, vol. 8, pp. 57-63.
- Chow, V. T. (1973). *Open channel hydraulics*. McGraw Hill.
- Colebrook, C. F. (1939). "Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws." *J. Inst. Civ. Eng.*, vol. 11, pp. 133-156.
- Darcy, H. (1854). "Sur les recherches expérimentales relatives au mouvement des eaux dans les tuyaux." *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, vol. 38, pp. 1109-1121.
- Easa, S. M. and Vatankhah, A. R. (2014). "New Open Channel with Elliptic Sides and Horizontal Bottom." *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(4), pp. 1197-1204
- French, R. H. (1986). *Open Channel Hydraulics*. McGraw Hill.
- Henderson, F. M. (1966). *Open channel flow*, MacMillan Publishing.
- Lakehal, M. and Achour, B. (2014). "Calcul de la profondeur normale dans une conduite ovoïdale par la methode du modele rugueux." *Larhyss Journal*, pp. 101-113.
- Lakehal, M. and Achour, B. (2017). "Sizing an open channel with horizontal bottom and circular walls using the rough model method." *Larhyss Journal* (To be published).
- Riabi, M. and Achour, B. (2014). "Design of a pressurized circular pipe with benches using the rough model method" *Adv. Mater. Res.*, vols. 960-961, pp. 586-591.
- Valiani, A. and Caleffi, V. (2009). "Depth-energy and depth-force relationships in open channel flows. II: Analytical findings for power-law cross-sections." *Adv. Water Resour*, 32(2), pp. 213-224.
- Vatankhah, A. R. (2014). "Normal depth in power-law channels." *Journal of hydrologic engineering*, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001083, 06014008-5.

Diagnostic De La Qualité Des Eaux Des Barrages Algériens: Étude De Six Cas Régionaux.

Belkacem Bekkoussa, Laouni Benadela, Habib Azzaz.

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau, Université Mustapha Stambouli de Mascara, BP
305 Mascara 29000 Algérie, Tel/Fax : 045 707004. Email : b.bekkoussa@univ-mascara.dz.

Résumé :

Ces dernières années, la problématique de la qualité des eaux souterraines en Algérie a été largement étudiée. Cependant, celle des eaux de surface, notamment les eaux des barrages, restent assez mal documentée et cela malgré leurs vulnérabilité et leurs exposition aux différents contaminants. Ce qui accentue le risque d'une contamination menaçant la santé du consommateur, c'est le fait que le traitement des eaux destinées au consommateur est souvent insuffisant (en majorité un traitement primaire et une chloration). Or, ces contaminations sont parfois même non décelée, ou non détectable, puisque le suivi de la qualité des eaux distribuée ne concerne que quelques éléments physico-chimiques ou microbiologiques. Cette étude vise à donner un aperçu sur la qualité des eaux de six barrages algérien se situant à l'ouest, au centre et à l'est. La forte présence des composés azotés, des phosphates et des matières organiques dans les barrages de l'ouest (Bouhanifia et Ouizert) indique une qualité médiocre des eaux et un amorcement d'un phénomène d'eutrophisation. Par ailleurs, les méthodes d'estimation de la qualité des eaux ont confirmées l'état de pollution de ces barrages. Les méthodes IPO et IHE étant les plus pertinentes.

Mots-clés : indice de qualité, eau superficielle, paramètres physico-chimiques, paramètres biochimique.

Diagnosis of the Water Quality of Algerian Dams: Study of Six Regional Cases.

Abstract :

In recent years, the issue of groundwater quality in Algeria has been extensively studied. However, quality of surface water, especially dam water, remains poorly documented, despite their vulnerability and exposure to various contaminants. What increases the risk of a contamination threatening the health of the consumer, it is the fact that the treatment of the water intended for the consumer is often insufficient (mainly a primary treatment and a chlorination). However, these contaminations are sometimes even undetected, and not detectable, since the monitoring of the quality of the water distributed concerns only a few physicochemical or microbiological elements. This study aims to provide an overview of the water quality of six Algerian dams located in the west, center and east. The strong presence of nitrogen compounds, phosphates and organic matter in the western dams (Bouhanifia and Ouizert) indicates a poor quality of water and a start of a eutrophication phenomenon. In addition, the methods for estimating water quality have confirmed the pollution status of these dams. The IPO and IHE methods are the most relevant.

Key Words: quality index, superficial water, physic-chemical parameters, Biochemical parameters.

1. INTRODUCTION

La vulnérabilité des eaux de surface face aux déférentes contaminations extérieures est indéniable. Cette vulnérabilité est accentuée par la proximité des activités anthropique (agriculture, industrie, habitations) de cette ressource. Or, les eaux des barrages sont distribuées aux consommateurs, très souvent après des traitements insuffisants. Par conséquent, la protection de cette ressource en amont reste une priorité absolue. Ce travail consiste à diagnostiquer l'état qualitatif des eaux de six barrages algérien (Bouhanifia, Ouizert, Keddara, Hamiz, Beni Zid et Zit Emba) représentants respectivement trois régions distinctes du nord à savoir l'ouest, le centre et l'est. Une approche de comparaison entre les résultats issus des méthodes de classification de la qualité des eaux a été réalisée pour les six barrages étudiés.

2. MATERIELS ET METHODES

Cette étude est basée sur le suivi de dix paramètres (pH, RS, O₂ dissous, NO₃, NO₂, NH₄, PO₄, DBO₅, DCO et MO) sur une période d'une année allant de janvier à décembre 2014. Les données ont été fournies par l'ANBT (agence nationale des barrages et transferts). Afin de mesurer la pollution organique trois indice ont été utilisés à savoir: Indice de pollution organique (IPO) [1]; Lisec-Index [2]; Classification des paramètres par l'Institut d'Hygiène et d'Epidémiologie (IHE) [3]. Les trois méthodes comportent cinq classes qualitative de pollution : nulle, faible, modérée, forte, très forte. Elles sont basées sur le calcul d'un indice en relation avec des paramètres pouvant indiquer une dégradation de la qualité des eaux tel que DBO₅, DCO, Oxygène dissous, ammonium, nitrite...

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Les eaux des barrages de l'Ouest (Bouhanifia et Ouizert) ont des RS très importants. Ceci pourrait être en relation avec les terrains traversés et la forte érodabilité des sols dans ces régions. Les teneurs en nitrate les plus élevées (max=15 mg/l pour le mois de mai 2014) sont enregistrées au niveau du barrage d'Ouizert à l'ouest. De même, les NO₂ sont présentes avec des valeurs inquiétantes au niveau des barrages de l'ouest avec un pic de 0.7 mg/l enregistré au barrage d'Ouizert en février 2014 (Fig. 1). Un autre dérivé de l'azote, à savoir le NH₄, est également retrouvé dans les eaux des deux barrages précédemment cités, ce qui laisse penser à une transformation par les micro-organismes des produits azotés. L'augmentation de la DBO₅ et de la DCO est un autre indice de la dégradation des matières organiques (d'origine urbaine ou agricole) au niveau des barrages de la région Ouest (Bouhanifia et Ouizert).

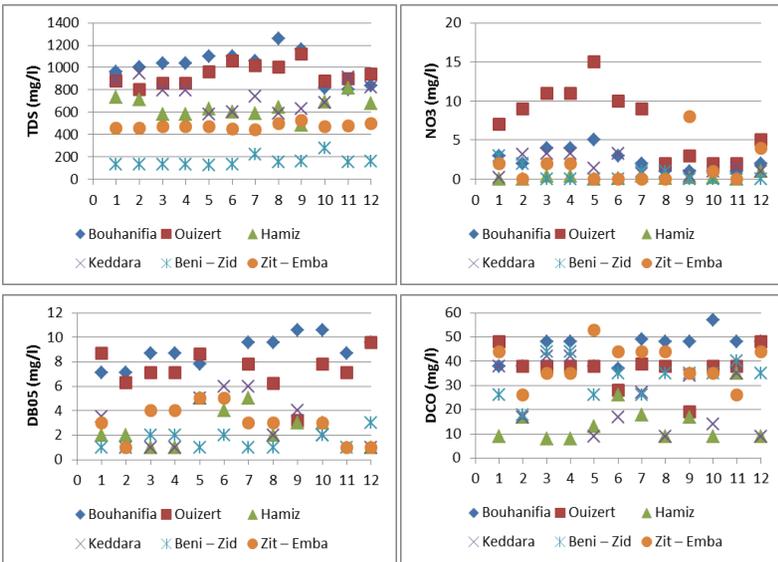


Fig. 1 – Evolution du TDS, NO₃, DBO₅, DBO pour les barrages étudiés.

L'application des méthodes d'indexation tel que IPO, Lisec Index et IHE permet par ailleurs d'apprécier le degré de la pollution d'une eau superficielle en la classant dans cinq classe : nulle, faible, modéré, forte ou très forte [4,5]. Les résultats permettent de placer les deux barrages de l'ouest dans la catégorie pollution modérée à très forte. Les barrages du centre et de l'Est semblent être beaucoup moins affectés par la pollution avec des classes s'étalant de nulle à modérée (Fig. 2).

On constate de facto que la méthode Lisec-Index est trop optimiste, puisqu'elle classe des pollutions flagrantes (dépassement des normes de DBO₅, RS... ect [6,7]) comme pollution modérée. Les deux autres indices sont assez proches et plus réalistes. Ils repèrent bien les pollutions les plus fortes notamment l'altération par les phosphates et les produits azotés qui annoncent l'eutrophisation.

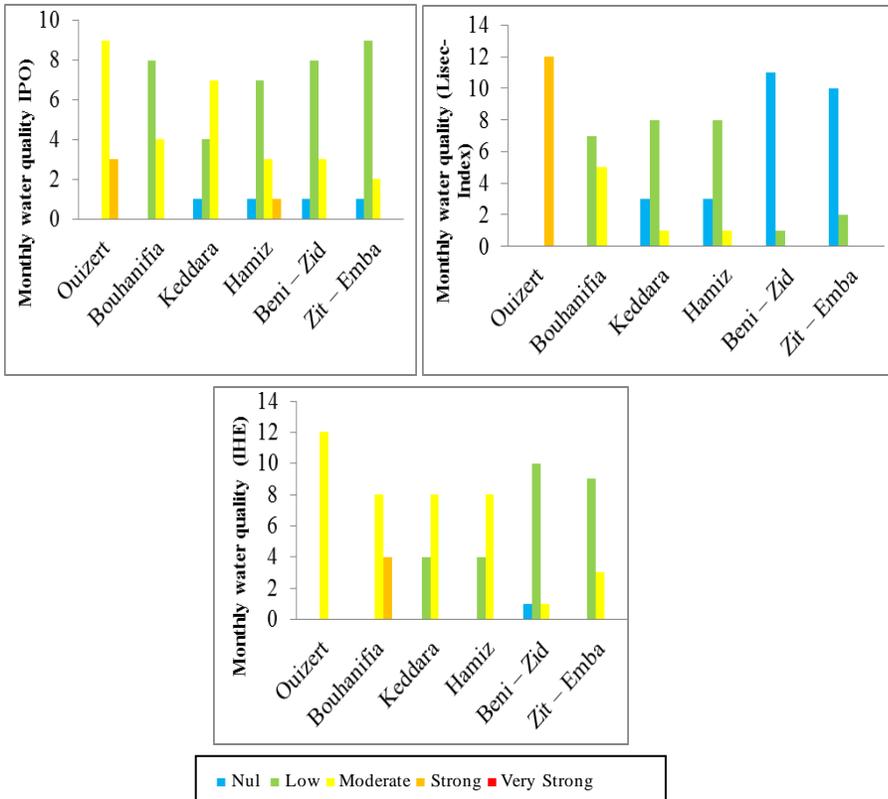


Fig. 2 –Résultats de l'application des méthodes IPO, Lisec-Index et IHE pour les barrages étudiés.

4. CONCLUSION

Ce travail a permis de mettre en exergue la qualité médiocre de quelques barrages algériens. Les méthodes de classification de la qualité sont un outil pratique pour l'identification du degré de contamination d'un barrage. Néanmoins, les résultats devront être impérativement comparés aux concentrations dans les eaux des éléments indicateurs de pollution. Les eaux des barrages classées dans la catégorie forte à très forte doivent par conséquent être traitées convenablement et distribuées aux consommateurs avec un suivi beaucoup plus strict.

Références

1. Leclercq L. & Maquet B. Deux nouveaux indices chimique et diatomique de qualité d'eau courante. Application au Samson et à ses affluents (Bassin de la Meuse belge). Comparaison avec d'autres indices chimiques, biocénotiques et diatomiques. Inst. roy. Sc. Nat. Belg., Document de travail, 1987, 38: 113 p.
2. Beckers B. & Steegmans R. De kwaliteit van de oppervlaktewateren in Limburg. Rapport non publié du LISEC 1979 (Studiecentrum voor ecologie en bosbouw, Gent).
3. IHE, 1986. Cartes de la qualité chimique des cours d'eau en Belgique en 1985. Inst. Hyg. Epid, Bruxelles, 49 p.

4. Leclercq L. Intérêt et limites des méthodes d'estimation de la qualité de l'eau. Rapport de la Station scientifique des Hautes-Fagnes, 2001, 57p.
5. Leclercq L., Rosillon F. & Vander Borgh P. Qualité chimique et biologique du bassin de la semois (partie belge). Bull. Fr. Pêche Piscic. (1996) 341/342:81.
6. WHO (World Health Organization). Guidelines for drinking water quality, third edition. Geneva: WHO, 2004.
7. Rodier J., Bazin, C., Broutin, J. P., Chamon, P., Champseur, H. & Rodi L. L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires et eaux de mer. Dunod édition, Paris, France 1365 p, 1996.

Les Ouvrages Hydrauliques au long de l'histoire

Monia Jeridi

*Agronome /spécialités Horticulture +Ressources en eaux
et active dans la vie associative
adresse email :apakairouan@gmail.com;Tel 0021624707356*

Résumé :

Kairouan a toujours émerveillé les chroniques et géographes par la majesté de ses installations hydrauliques qui a voulu à la ville de porter au moyen âge le nom de « la ville des citernes » et les bassins des Aghlabides par leurs dimensions gigantesques et l'ingéniosité de leur système d'alimentation constituent un rappel de la gloire de la ville et de sa lutte passé contre la soif et la disette. En effet, contrairement aux métropoles médiévales qui disposaient d'une rivière et des sources, Kairouan souffrait d'un manque flagrant en eau. L'ingéniosité de ses habitants s'est efforcé à résoudre ce problème épineux .cette épopée de kairouan avec l'eau a commencé avec la conquête .La première étape constitue à creuser des puits publics en raison de la proximité de la nappe phréatique ; à l'instar des puits creusés par Maouia Ibn Alhoudaj ; près de la porte de Tunis ; du puits d'Om Yadh ; à l'ouest de la grande mosquée et de puits Rawta au souk de dimanche .Puis on procéda à l'édification des citernes de collecte des eaux pluviales dans les mosquées et les oratoires du quartier .ce phénomène s'étendait au souk et aux habitations de la ville ; à telle enseigne que presque toutes les maisons kairouanaïses furent dotées d'un puits ou d'une citerne ou des deux à la fois .La croissance de la ville et son développement urbain ont nécessité la recherche des solutions plus adaptés pour l'approvisionnement de la population en eau .Ce qui a engendré le phénomène des bassins gigantesques dont l'écho ont atteint les horizons les plus éloignés .Le géographe Al Bakri nous rapporte que Kairouan disposait d'une quinzaines de bassins situés extra- muros .Le plus important fut édifié en 248 H/862 JC. Le prince aghlabide Ibn Ibrahim Ahmed.

Les différents types d'ouvrages édifiés au long de l'histoire constituent une banque de donnés et de références pour rénover les solutions antérieures et les adapter au savoir et connaissances techniques et scientifiques requises chez les spécialistes actuels. De même cette banque de données peut servir aux étudiants et chercheurs dans le domaine des ressources en eaux et de sa gestion.

Notre communication va porter sur les techniques de collecte de l'eau ; son acheminement et l'édifice des différents types d'ouvrages.

Mots-clés : ouvrage hydraulique, acheminement de l'eau, gestion de l'eau, principe de fonctionnement, édifice, Tunisie.

Introduction

Les ouvrages hydrauliques au long de l'histoire, constituent un témoignage d'une série de batailles de la gestion et l'exploitation des eaux depuis des millénaires.

Eu égard les activités agricoles des nomades arabes qui étaient essentiellement les cultures annuelles, bisannuelles et l'élevage. Ils ont déterminé leur occupation des lieux selon deux critères les sources en eau et la fertilité du sol. Lorsque les nomades ont pensé à se stabiliser, les sources d'eau étaient les conditions essentielles pour déterminer leurs lieux d'hébergement. Le Nile a recueilli les gens qui ont planté leurs habitats à ses bords pour en profiter et l'exploiter pour leurs vies quotidiennes depuis des millénaires. La Mésopotamie « Biled Errafidin » étant classée parmi les premières civilisations dans le monde .Elle existe actuellement a l'Iraq se situe entre les fleuves Tigre Et L'Euphrate « Dejla et Fourat » ; Un pivot d'une croissance démographique et de l'exploitation commune des eaux.

Ainsi, les anciens ouvrages hydrauliques sont considérés comme indicateurs de base de lecture de l'histoire et les circuits des civilisations qui ont passé par les zones en question.

Les arabes continuent a se professionnaliser en agriculture et surtout les cultures basées sur l'irrigation et l'innovation de techniques agricoles et des systèmes d'irrigation pour la distribution des eaux à plusieurs points en début de leur historique d'accès à la modernité ;la civilisation et l'urbanisation .On a noté aussi l'évolution des techniques de creusage des puits pour réserver et exploiter les eaux des pluies. Et; c'est ainsi que sont nés les ouvrages hydrauliques pour la collecte des eaux comme les barrages, les ouvrages de collecte et de puisage de l'eau (réservoir d'eau) pour les périodes de disette qui s'appellent en Tunisie « Majel » ou « Jabia » .Malgré l'évolution humaine et les moyens technologiques qui ont fait inapparents les ouvrages de collecte ; d'acheminement et de partage de l'eau ,le citoyen arabe continue jusqu'à nos jours ci à utiliser les anciennes techniques d'acheminement et d'approvisionnement surtout dans le milieu rural .Ces puits et ces bassins continuent à exister soit comme des œuvres monumentaux ou bien des ouvrages hydrauliques utiles pour la vie quotidienne de nos jours.

1. les « Hneyas » à l'époque romaine en Tunisie

Pendant l'époque romaine ; les eaux ont été acheminées moyennant des canaux bâtis en pierre. La longueur et le calibre de ces canaux sont déterminés selon la quantité d'eau acheminée et sur une hauteur lui assurant la protection de l'exploitation abusive en dehors de la destination fixée et de la pollution (acheminement sécurisé) comme les « Hnaya » qui sont bâtis pour approvisionner les villes romaines au début et puis vers les résidences beycales partant de Zaghouan .Les « Hnayas » demeurent actuellement des œuvres monumentaux qui souffrent de la négligence avec l'apparition de nouveaux moyens d'acheminement de l'eau comme les canaux plastiques et en aluminium ,béton armés et maçonnerie pour les eaux pluviales en rigoles à ciel ouvert ,des fossés bétonnés, les dallols urbaines .Pour l'acheminement des eaux usées par l'ONAS (l'office national de l'assainissement) les canaux les plus employés actuellement sont en PVC ou en polyéthylène ;par contre l'amiante en ciment n'est plus utilisée pour des raisons d'hygiène .Pour l'eau potable, les canaux en fente sont les plus employés pour acheminer l'eau et le partager aux ménages pour sa résistance aux pressions d'eau.

Les Hneyas de Chérichira à 40 Km de Kairouan



2. Ibn Chabbat

Le père des technologies appropriées :né en 1221 et mort en 1282.La prospérité reconnaît à Ibn Chabbat la paternité du système de distribution des eaux à Tozeur .Cette conception de

partage selon l'histoire est une amélioration de traditions antérieures adoptées à l'époque romaine en utilisant les troncs des palmiers comme canaux de distribution surtout concernant le départ de canalisation. Les « jéridiens » ont hérité de lui les termes de sa description relative au partage des eaux dont l'extrait : « Le fleuve de Tozeur jaillit du sable et se divise en trois grandes rivières dont chacune se subdivise en six ruisseaux. Ces ruisseaux se ramifient en rigoles innombrables dans des canaux bâtis en pierre selon un système scrupuleusement équitable.

Statue de
Ibn Chabt



Les Bassins
Aghlabides



Les Bassins
de Marrakech



3. Les bassins des Aghlabides

Nous trouvons aussi les bassins des Aghlabides dont les plus connus et les plus anciens existent à Kairouan (ville au centre de la TUNISIE) et constituent des monuments historiques témoins de l'ingéniosité des aghlabides dans l'art de l'urbanisme et la pertinence de la bonne exploitation et gestion des ressources en eau dans une région connue par le manque de pluviométrie.

Les aghlabides sont une dynastie de princes arabe qui a régné l'Afrique du nord :l'Est de l'Algérie la Tunisie ; l'ouest de la Lybie avec le sud de l'Italie et Malte de 800 et 909JC.

Les bassins des aghlabides sont considérés parmi les plus importants et les plus célèbres installations hydraulique de tout le monde musulman .Ces bassins aux dimensions gigantesques dénotent de la ville de la lutte contre la soif et le manque en eau contrairement aux autres grandes métropoles de l'époque médiévale qui disposait de rivières ou de sources abondantes ,le problème de l'eau fut crucial à Kairouan qui se trouve dans une dépression à climat semi aride mais balayée par des oueds intermittents .Depuis la fondation de la ville, les gouverneurs et princes ont œuvré à palier à cette défaillance .plusieurs puits furent creusés et une quinzaines de citernes furent aménagées .Ce qui a valu à Kairouan le nom de la ville des citernes. L'alimentation des besoins en eau fut assurée par un système peu coûteux mais très ingénieux. Aux moments des crues des oueds, les eaux de pluie sont captées par des petits barrages qui aboutissent à un canal d'adduction pourvu en aval de brise -lame qui permet une pénétration facile de l'eau dans le bassin de décantation. Ce système fut amélioré en 384H/960JC ,à l'époque du Calife Al Muiez qui édifia une adduction qui amène les eaux souterraines depuis Ain Ayoub à Chéricira à une quarantaine de kilomètres de l'ouest de Kairouan jusqu'aux citernes de la ville .Les eaux récupérées dans les bassins servaient à subvenir aux besoins de la populations essentiellement aux moments de la sécheresse, mais surtout à approvisionner les caravanes et abreuver les troupeaux.

Le principe de la récupération des eaux de pluies dans les citernes couvertes a été déjà utilisé en Syrie dans la région de Humayma et le long de la route vers le pèlerinage qui fut doté de basins édifiés par la princesse Zoueirat ,femme du Calife Haroun al -Rachid(169-193 H/786 - 789 JC).Le mérite de l'Ifriqiya et 'avoir développée ce système en construisant des installations hydrauliques impressionnantes uniques dans le monde méditerranéen .Le prototype des bassins des Aghlabides se répandit partout en Ifriqiya sur une ère géographique allant de Tunis au nord jusqu'à Gafsa au sud . Il prit des formes variées. Les plus réputés est le bassin du palais Al bahr à Raqada, de forme rectangulaire ; il fut édifié en 293H/906JC par le prince aghlabide ZI âdat Allah III .

3.1. Les Bassins de « Ksar Al Bahr »

Les hydrauliciens parvinrent par la suite, à implanter de grands bassins pour la collecte des eaux pluviales à l'intérieur du tissu urbain, à l'exemple des bassins majestueux de Raqqada, jouxtant le palais Al Bahr et édifiés par les derniers princes régnant Aghlabides

Ce système de collecte des eaux est maintenu en Tunisie jusqu'à l'époque contemporaine .De l'Ifriqya ,il s'est propagé au Maghreb surtout au Maroc à l'exemple du grand bassin Norias de Meknes ,édifiés par le souverain Moulâÿ Ismail 1672/1727 JC.L'eau fut ramenée de Ain Ayoub dans la région de Chérichira après avoir traversé des collines et des ravins moyennant la canalisation en pierre « Hnaya »jusqu'à sa capitale Sabra. Cette réalisation gigantesque représente l'apogée des ouvrages hydrauliques à Kairouan avant les invasions hilaliennes (443H/1053JC)qui ont provoqué l'interruption de l'alimentation des grands bassins et la destruction de l'aqueduc fatimide .

3.2. Les Bassins de Abou Ibrahim Ahmad

Edifiés 246-248 H/860/862JC. Ces bassins se composent de trois organes essentiels :

3.2.1 Le petit bassin ; Le petit bassin de forme polygonale épaulé de 17 contreforts intérieurs et 26 contreforts extérieurs qui permettent de consolider les murs face à la poussée latérale des eaux. Cette aptitude est renforcée par leur forme semi-cylindrique et arrondie. Le diamètre du bassin étant de 30 m et sa profondeur approche les cinq mètres, ce qui lui offre la contenance de 400m³.Son rôle consiste à décanter les eaux des débris et alluvions qu'elles charrient. Les eaux ainsi purifiées, le remplissent jusqu'à deux tiers et s'écoulent dans le grand bassin par une ouverture que l'on nomme Es-sarh « le déversoir »

3.2.2 Le grand bassin ; de même forme que le petit bassin, il est épaulé de 118 contreforts externes et 64 contreforts internes construits en moellon couvert d'un enduit coupé à la chaux ;il est orné au centre d'une pile formé d'un noyau quadrilobé. Cette structure pouvait supporter la coupole octogonale dont parle le géographe Al BAKRI et qui servait de pavillon de plaisance aux princes aghlabides .les générations des années 50 et 60 nous ont raconté les fêtes animées par le feu chanteur Ali Riahi moyennant une vedette navigant dans ce bassin

3.2.3 Les citernes de puisage ; Elles sont constituées par deux réservoirs parallèle et perpendiculaire adossées aux bassins .Elles sont couvertes de voûtes soutenues par des arcs doubleaux qui reposent sur des piliers .six ouvertures, placées aux sommets de voûtes, permettent d'y puiser de l'eau.la contenance de chacune d'entre elles dépasse les 1000m³.

Bien que les bassins des aghlabides constituent un monument historique unique ce monument est menacé par l'infiltration des eaux stagnante tout autour par une terre trop salée.

Donc ce fait ; l'existence de ce monument est menacée ainsi que son classement : patrimoine international Ce qui fait appel à une intervention scientifique pertinente et urgente. qui répond aux normes scientifiques mondiales du patrimoine international.

Le grand bassin
petit bassin de
décantation



Les citernes
de puisage
adossées
Au grand
bassin.



Les bassins
de Sidi
Dehmeni



3.3. Les Bassins de Sidi Dehmeni, Ils portent le nom du muselé du saint kairouanais Sidi Youssef Dahmani au treizième siècle qui se trouve dans la zone environnante .Au fait ces bassins sont plus anciennes que celles du prince aghlabides Abou Ibrahim Ahmad et datant très probablement au début du sixième siècle. Ils répondent aux mêmes principes architecturaux et de fonctionnement déjà commentés.

4. Le Puits « Barrouta » Les sources historiques attribuent le creusement de Bir Barrouta «au gouverneur Harthama Ibn Al Ain en 1807H/796 JC. Mais, le monument actuel est la rénovation du bey Mohamed Ben Mourad qui procéda en 1101 H/1690 JC, à la rénovation complète de tout l'édifice auquel il a ajouté une fontaine en marbre .Creusé au sein de la ville ;il est l'objet d'une vénération particulière de la part de la population . D'après la légende le puits communique avec celui de Zemzem à la Mecque .Une autre légende affirme que celui qui boit de l'eau de Barrouta est assuré de revenir à Kairouan.

A l'intérieur de l'édifice on trouve une noria(système d'engrenage) actionnée par un chameau .A l'extérieur de l'édifice on trouve une fontaine avec un abreuvoir et des robinets en marbres adossés au mur .Ce Système De Puisage qui date depuis le moyen âge introduit de la Syrie à l'Ifriqiya a été diffusé et pratiqué par les andalous et les marocains .Cette pratique de système de puisage moyennant la noria a été développée et utilisée d'une façon massive pour l'irrigation des cultures agricoles .

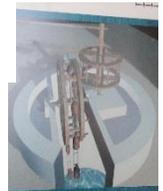
Le chameau
de bir
barrouta
actionnant le



Fontaine –
abreuvoir et
robinets en
marbres
adossés au



Noria :
Système
d'engrenag
e de deux



5. Les Barrages :

5.1 Définitions : Action de barrer une voie, un cours d'eau : *Le barrage d'une rue.*

Obstacle artificiel au moyen duquel on crée une retenue d'eau, généralement en coupant un cours d'eau. Un barrage est destiné à circonscrire l'eau dans le lit de la rivière pour élever leur niveau d'eau afin d'en tirer, par le biais de canaux d'irrigation, une utilisation telle que l'irrigation, la production d'électricité, ou prévenir des inondations en aval du barrage. Il existe différents types de barrages, formant réservoir ou non: le barrage alluvial ou barrage capteur de dépôts d'alluvions, le barrage de retenue, le barrage de stériles (eaux usées miniers), le barrage en terre, le barrage filtrant, le barrage régulateur, le barrage simple, le barrage souterrain ou encore le barrage-réservoir.

5.2 Utilités : Les barrages sont construits de manière à accumuler le maximum d'eau possible, soit de l'eau de pluie soit par la capture d'eau ruisselante , aussi bien par la pluie que par la capture de l'eau normale de la rivière existante. Les barrages sont très importants pour le monde moderne, car ce sont eux qui permettent de canaliser l'eau potable dans les grandes

métropoles du monde. Les réservoirs d'eau et les ouvrages qui en découlent ont pour objectifs l'approvisionnement en eaux de boissons, et tous les besoins des ménages, pour l'irrigation des cultures agricoles et aquatiques et produire une énergie électrique peu coûteuse et constitue un des facteurs qui assurent un environnement sain et pour servir aux projets de développement industriels et urbains.

Et pour montrer l'importance de stockage de l'eau au niveau national, il suffit de donner l'exemple du grand barrage sur la fleuve Nile à l'Egypte au sud de la ville Aswan .

ce barrage a permis a ces zones l'augmentation des ressources annuelles en eaux et a permis l'occupation du sol assurant trois récoltes par année.

Il a été noté aussi le stockage de l'eau dans le lac « Naceur » a fait face aux menaces des inondations deux fois et des dégâts du déficit hydrique plusieurs fois pendant les périodes de disettes.

5.3 Historique : le barrage le plus ancien au monde connu c'est le barrage « El Kaffara » à l'Egypte édifié 2600 AJC d'une hauteur de 14 m .Et parmi les barrages les plus connus au monde aussi c'est le barrage « Marbanthi »AJC au Yémen avec une hauteur de 20 m et il a tenu pendant des centaines ; puis disparu suite à un séisme.

Les pays soviétiques se sont distingués par la création des barrages géants selon les statistiques de l'instance internationale non gouvernementales des établissements de construction de barrages .En 1984 la Russie a construit plus que 250000 barrages ; et au cours de l'année 1984 selon la même source d'information le nombre de barrages dont la hauteur dépassent 15 m est élevé à 35000 barrages et le barrage le plus élevé est « Roujan » avec une hauteur de 335m.

5.4 Classification des plus importants lacs industriels dans le monde :

Il existe quatre lacs industriels géants classés comme suit :

5.4 .1 Kariba à Zimbabwe : avec une hauteur de 128 m créé en 1959/avec une contenance de 180.6 Mm3 d'eau.

5.4 .2 Bratesque en Russie ; Kariba à Zimbabwe : avec une hauteur de 125m créé en 1964 /avec une contenance de 169.3Mm3 d'eau.

5.4 .3 Noceur (Essod El Ali) en Egypte : avec une hauteur de 111m en 1970 avec une contenance de 168.9 Mm3 d'eau.

5.4 .4 Ocosmo à Ghana : avec une hauteur de 134 m ; créé en 1965 avec une contenance de 148.0 Mm3.

5.5 Les différents types des bassins de stockage de l'eau .On distingue :

5.5.1 Ouvrages de renforcement et relèvement des ponts, dont les objectifs sont la protection des cultures et des constructions urbaines des menaces des inondations.

5.5.2 ouvrages des cassis et ponts dont les objectifs rationaliser l'exploitation des eaux et leurs acheminement afin d'améliorer les conditions du cours navigation.

5.5.3 ouvrages des canaux d'épandage dans les plaines et faire face aux pertes des eaux par évaporation et la menace de l'alimentation excessive causant l'asphyxie des plantations .Ils servent aussi à l'épandage pour l'alimentation de la nappe moyennant l'approfondissement Des cours d'eau dans les plaines. Ici nous citons l'exemple du canal de « Jonjili » au sud du Soudan qui a permis d'alimenter la fleuve du Nile avec une quantité de plus de six milliards de m3 par an .sachant que ces quantités sont perdues actuellement par effet de l'évaporation des plaines submergées d'eau et l'exploitation excessive des cultures aquatiques .

5.5.4 Les ouvrages d'évacuation des eaux usées

5.5.5 Les citernes sont des ouvrages métalliques installées à une hauteur du sol et destinées à l'alimentation sectorielle en eau et au besoin.

5.5.6 Les barrages qui constituent les ouvrages les plus importants pour des fins de développement et environnementaux.

5.6 Les barrages en Tunisie :

Le plus ancien grand barrage créé en Afrique du nord étant le barrage du la grande fleuve à 70 km du sud ouest de Tunis la capitale en 1928 pendant l'ère coloniale française.

5.6.1 : Infrastructure actuelle. La première génération : 33 barrages édifiés en Tunisie pendant la période qui s'étale entre l'ère coloniale française et les premières années d'indépendance, étant pour, répondre à l'approche fixée

Pour la gestion des aménagements de stockage de l'eau de surface qui est basée sur les grands barrages.

Le traitement de grands barrages est assuré par les bassins et lacs collinaires et par d'autres ouvrages CES .(conservation des eaux et du sol) et les interventions des travaux annexes: aménagement des

digues , cordons en pierres , banquettes mécaniques ,canaux et ouvrages d'épandages ; fixation des sols par des plantations...Les grands barrages et les bassins collinaires sont œuvrés par la direction générale es grands travaux hydraulique (DGGTH) tandis que les lacs collinaires sont œuvrés par la direction générale des l'aménagement et la conservation des terres agricoles (DGAETA).

5.6.2 : Horizons: Selon les références bibliographique, nous constatons, que le gouvernement tunisien qui est entrain de piquer les jalons pour un nouveau système de pouvoir/: Gouvernance dont les adoptifs principaux sont les anglo-saxons depuis les années 90 ; et comme alternative d'un aqueduc

Vertical qui a pérennisé depuis des centaines en Tunisie, nous découvrons l'approche américaine moderne qui est : la prospection ou science de futur comme base d'études stratégiques pour les générations futures à travers les mesures indiquées relatives aux barrages et tous les édifices qui en découlent. En effet ; nous citons dans notre cas :

-Renforcement de cette infrastructure de mobilisation des eaux de surface durant les prochaines décennies en vue de préserver la capacité de mobilisation des ouvrages existants ; par leur entretien et la création de nouveaux ouvrages de renforcement- Faire évoluer le potentiel de rétention par an. . La nouvelle mobilisation évitant les pertes en mer, par la maîtrise du régime d'écoulement des principaux oueds des pays par un réseau d'ouvrages de rétention bien réparties et interconnectés

La mise en place de la deuxième génération de barrages visant à mobiliser le maximum de disponibilités en eaux de crues ; de réduire l'apport au maximum aux barrages situés en aval et de renforcer la capacité de stockage des eaux des grandes crues.

6. Mesure du temps /les horloges hydrauliques :

L'horloge hydraulique est une horloge d'un ancien type, qui permet d'indiquer l'heure à partir de l'écoulement de l'eau contenu dans un récipient, à travers un petit orifice.

D'après Vitruve (Marcus Vitrai), un architecte et ingénieur en génie civile grec qui est née 90 AJC et mort 20 AJC ; dans son traité : Architectura les premières horloges hydrauliques ou horloges à eau, sont issues de la simple clepsydre dont le principe d'édification est décrit comme suit : Les premières clepsydres se présentent sous la forme d'un bol, avec un trou à leur point le plus bas, permettant l'écoulement de l'eau. C'est à l'aide des graduations à l'intérieur du bol que le temps écoulé est déterminé. La mise en équation des clepsydres utilise

la mécanique des fluides classique et plus particulièrement la formule de Torricelli. $V^2=2gh$. v : vitesse ; g l'accélération de la pesanteur et h hauteur du fluide .

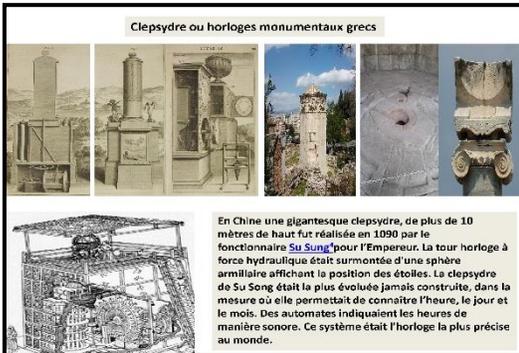
L'horloge hydraulique antique est une horloge hydraulique qui, par définition est tributaire de l'invention des heures datant du septième siècle AJC .Précédemment quelques essais pour mesurer le temps par l'eau ont vu le jour en Chine, en Mésopotamie (terre entre deux fleuves :Tigre et Euphrate) et en Egypte

Dès l'apparition des heures dans l'antiquité gréco-romaine, ce sont surtout les grecs qui ont développés ces horloges qu'elles soient monumentales ou individualisées.

On les retrouvera plus tard à l'époque médiévale sous formes complexes en Chine .Mais les héritiers de l'antiquité gréco-romaines seront les peuples de la civilisation arabe .Elles y seraient pérennisées avant d'être introduite dans le monde occidental ; ou bientôt les horloges mécaniques les remplacera avantageusement.

Au moyen-âge, les arabes et les chinois sont les maîtres de la conception d'horloges à eau. Les physiciens arabes reprennent, s'inspirent et développent les études des savants grecs. En 802 l'ambassadeur de Charlemagne à Bagdad lui ramène une horloge à eau mettant en action des automates, offerte par le calife de Bagdad Haroun al-Rachid. Les horloges hydrauliques construites dans les villes arabes atteignent souvent des dimensions monumentales, telle l'horloge de Fez au Maroc.

Au XII^e siècle **Al- Jazari** porte la technologie arabe à son plus haut niveau. Son œuvre maîtresse est une horloge à eau dans laquelle le cercle du zodiaque pivote et le Soleil et la Lune apparaissent alternativement. Douze ouvertures s'éclairent la nuit. Chaque heure, deux oiseaux laissent tomber une boule et à 6h, 9h et 12h les automates musiciens se mettent à jouer.



7. 1. Définition :

Selon dictionnaire Larousse :

Source d'eau vive jaillissant du sol naturellement ou artificiellement, et se déversant généralement dans un bassin.

Édicule de distribution d'eau, simple ou architecturé, comprenant au moins une bouche d'où l'eau s'écoule dans une vasque ou un bassin. Une fontaine est un ouvrage, généralement accompagnée d'un bassin, du quel jaillit l'eau. Une fontaine peut être naturelle, c'est-à-dire alimentée par une source ou faire partie d'un réseau de distribution d'eau, un réseau d'aqueducs, ou un réseau alimenté par des pompes.

7. 2. Historique et évolution :

La fontainerie classique distingue les fontaines des jets d'eau, nappes d'eau et cascades. Des sources supposent que les perses ont œuvré à l'édification des fontaines depuis l'an 4000 AJC.

Puis adoptés par les grecs et romains puis par les andalous. Et au moyen âge les européens ont édifié les fontaines les plus fabuleuses.

Les fontaines ont participé à l'hygiène publique, limitant le risque de choléra ou de maladies véhiculées par les puits susceptible d'être contaminés par les excréments et eaux usées. Certaines fontaines ont servi d'abreuvoir. En Europe, le fontainier, parfois désigné par la population était chargé de l'entretien, des réparations ou de dégeler la fontaine en hiver.

Les fontaines sont en ville, un élément encore utilisé comme tel dans certains parcs et jardins.

7.3. Identification physique :

Une fontaine est un jet d'eau produit sous pression à travers des petits orifices qui s'élèvent à une hauteur déterminée puis s'écoule vers le bas. La hauteur du jet d'eau est effectuée soit naturellement ; soit artificiellement .Les fontaines modernes sont actionnées par l'énergie électrique et ornées par des lumières .Dans le cas de fontaines naturelles ,cette pression est effectuée sous la pression du poids de l'eau collectée dans un réservoir , sous l'effet de sa chaleur ou bien les deux effets précités .Pour les fontaines artificielles la pression est actionnées par un dispositif de pompage.

8. L'Arbre : Un ouvrage hydraulique, Dr Slaiem Ammar a décrit ses effets bénéfiques, entre autre, ses propriétés captives de l'eau dans son poème scientifique présenté au cous du colloque national en Novembre 1990 intitulé : Arbre et Aménagement du Territoire/l'Arbre et Urbanisme

L'arbre nous a précédé sans doute sur la terre ; Et cela depuis quelque million de millénaires. Car la végétation fût la forme de vie ; Qui très tôt apparu foisonnant à l'envi.

Bien avant les êtres humains et les pithécantcopes ; Les séquoias géants et les héliotropes. Nouaient avec le ciel des rapports singuliers ; Que d'autres végétaux reprendrons par milliers. Les végétaux enfuis vont se changer en houille ; Bien avant que les hommes enterrent leurs dépouilles.

Le pommier est connu depuis Adam et Eve ; Et son fruit défendu nous attire sans trêve. C'est le fruit de pêché qui nous poursuit sans cesse ; Avant que nos actions ici bas se redressent.

En vue du paradis eternal qui perdure ; Dans les jardins d'Eden selon les écritures

L'arbre fût ainsi chanté dans la mythologie ; Et nous sert à fixer la généalogie.

L'arbre est un élément vital de la nature ; Et c'est bien, grâce à lui, que le bien être dure.

C'est l'élément central du cycle carbonique ; Sans lequel toute vie devient problématique.

L'eau et la chlorophylle forment son aliment ; Tandis que l'oxygène est produit constamment.

C'est la photosynthèse du cycle végétal ; Assurant de ce fait, le processus vital.

Un processus vital pour bien de mécanismes ; Dont ceux des êtres humains et de leurs organismes.

L'arbre régit ainsi notre environnement ; Et nos écosystèmes inéluctablement.

Il prévient l'érosion, règle l'humidité ; Le débit des cours d'eau et leur salinité.

L'arbre affaiblit ainsi les effets érosifs ; Des grands vents et des pluies dont le rôle est nocif.

Il conserve les sols et toujours les protège ; Si bien que l'arracher devient un sacrilège.

Les feuilles et racines retiennent l'eau des pluies ; Et nous évitent ainsi un tas d'ennuis.

En fixant le climat et son humidité ; Et par là la fraîcheur au sein de nos cités.

En évitant ainsi des tas d'inondations ; En assurant des sols la conservation.

Il fournit à beaucoup de précieux combustibles ; Sans quoi, la vie serait, pour ceux -la, impossible.

Il nous fournit le bois, parfois des aliments ; Les meubles, le papier et des médicaments.

L'arbre produit aussi des engrais, du fourrage ; Des fibres, des essences sans parler e l'ombrage.

On en retire ainsi des fibres synthétiques ; Des huiles des résines et des produits chimiques.

Et sans parler des fruits, des fleurs et des odeurs ; Qui meublent nos instants d'un peu plus de bonheur.

L'arbre est un ornement des plus beaux paysages ; Ou roucoule souvent des plus doux des ramages.

Ainsi lorsqu'il fait nuit, souvent sa majesté ; impose la croyance en les divinités

On le rencontre aussi dans les fables et les contes ; Et dans les légendes qu'aux enfants on raconte.

Par le temps calme aussi, il est majestueux, Et pendant les tempête ; il résiste aux cieux.

Sauf si nous l'avions très mal entretenu ; Alors les vents violents l'arrachent vers les nues.

Mais s'il s'épanouit, ses bienfaits sont immenses ; Et si l'on réfléchit, c'est là une évidence.

L'arbre est un agrément quand il se trouve en fleur ; Et un enchantement pour l'esprit et le cœur.

On dialogue avec lui dans la paix, le silence ; Car c'est l'être vivant qui n'a pas d'insolence.

Qui ne sait pas hurler, mordre ni insulter ; Et sous l'ombre duquel on peut bien s'abriter.

De l'homme, il assure la protection ; En luttant contre les facteurs de pollution.

Protège nos maisons contre les poussières ; Emportées par les vents et de bien de manières.

Les arbres constituent le milieu naturel ; Ou bien des animaux prospérant de plus belle

Les insectes et oiseaux aux couleurs chatoyantes ; Et qui pullulent, dans les contrées verdoyantes.

Egayant notre vie pour notre enchantement ; Ils restent très utiles à l'environnement.

Ils harmonisent ainsi la climatologie ; En réglant les facteurs de notre écologie.

Mais l'arbre freine aussi l'avancée du désert ; Qui empiète aujourd'hui constamment sur nos terres.

Aujourd'hui en Afrique le déboisement ; Progresse 30 fois plus que le boisement.

Et l'on sait qu'est perdu chaque année en Afrique ; Un territoire vert grand comme la Belgique.

Le recul désastreux des forêts tropicales ; Compromettent ainsi nos conditions vitales.

Deux milliards d'êtres humains tirent leur énergie ; Des ressources bois, de là la gabegie.

Epuisant les forêts, et bradant le milieu ; Surtout dans le Tiers monde souvent à qui mieux mieux.

Puisque la terre manque, les forêts sont détruites ; En faveur des cultures et ainsi de suite.

Or le sol s'appauvrit et l'on manque d'engrais ; Mais l'on défriche encore toujours bon malgré mal.

Et lorsque le bois manque, alors tout est possible ; C'est alors le fumier qui devient combustible.

Dégradation des sols au sein d'une spirale ; Qui tourne sans répit d'une façon infernale.

C'est une catastrophe d'ordre géologique ; Car la terre est **une** au plan géographique.

Car l'arbre est essentiel et à bien des égards ; Sachons-le donc avant qu'il ne soit un peu tard !! Aussi pour protéger notre environnement ; Il faut en Tunisie agir rapidement.

Les arbres en Africa à l'époque romaine ; Couvraient notre pays, ses montagnes et ses plaines.

De trois millions d'hectares nous en sommes au dixième ; Malgré bien des efforts le bilan est le même.

Malgré bien des efforts depuis l'indépendance ; L'arbre est menacé avec persévérance.

Le fellah continue à employer du bois ; pour sa vie domestique et en dépit des lois.

Mais surtout les dégâts du surpâturage ; Du parcours des troupeaux entraînent des ravages.

Qui rongent les forêts et les petits arbustes ; Si bien que le bilan au total est tout juste.

Ce qu'on gagne par ici, on le reperd par là ; Et il y faudra bien, mettre un jour le holà.

C'est pourquoi il nous faut et partout ou nous sommes ; Ne plus nous conduire comme des bêtes de somme.

Mais respecter partout l'Arbre et la Forêt ; Et contre leur recul mettre un cran d'arrêt.

« Pour chaque enfant un arbre » telle serait la devise ; A répandre partout pour qu'elle soit mieux comprise.

Car de fait, le programme des Nations Unies ; Pour l'environnement a un jour défini.

Ce slogan éloquent et mobilisateur ; un arbre pour chaque enfant quelque soit sa couleur.

C'est ainsi qu'en Turquie avec persévérance ; On plante un peuplier lors de chaque naissance.

Et cette tradition fixée sous d'autres cieus ; Devrait être prônée chez nous à qui mieux mieux.

Chaque gouvernorat pourrait ainsi fixer ; La nature de l'arbre qui serait indexé.

A tout nouvel enfant qui naît dans ses limites ; Pour que finalement tous les gens en profitent.

Ici un oranger, et là un olivier ; Au nord un Pin d'Alep et au sud un Palmier.

Ici un chêne liège, là un Eucalyptus ; Ou alors un Cyprès ou bien un Hibiscus.

Aussi pourrions répandre la verdure ; Et veiller à ne pas dégrader la nature.

Car notre bien être physique et psychique ; En dépend largement de façon scientifique.

Il faudrait, pourquoi pas ? systématiquement ; fleurir nos fenêtres et balcons constamment.

Planter nos avenues et nos places publiques ; Border nos autoroutes de verdure en pratique.

Et non pas arracher les arbres centenaires ; Quelqu'en soit le prétexte de toutes les manières.

Et non plus polluer notre végétation ; En jetant nos déchets sans autres précautions.

Et aussi bien chez nous que partout ou nous sommes ; Car la terre est la même pour l'ensemble des hommes.

Ainsi les droits de l'homme sur le plan sanitaire ; Visent ils les milieux à travers les frontières.

Et y compris ses droits à une écologie ; Ou ils puissent survivre contre la gabégie.

Contre ce grand bradage de l'environnement ; Dont notre début de siècle souffre éperdument

La terre ou nous vivons ne nous appartient pas ; Quand nous la piétons évitons les faux pas.

Nous en sommes en effet, de simples locataires ; Et nous la cèderons à ses propriétaires.

Et qui sont nos enfants et nos petits enfants ; Car c'est à leur survie que répond ce slogan.

Comme si nos enfants un jour nous l'on prêté ; Et il faut la leur rendre quand nous l'aurons quitté.

C'est là notre devoir et ce droit est leur.

Lac
collinaire
Bouazroug
Ouslatia
Kairouan



B.Collinaire(
ELBaldia) à
Ouslatia
/Kairouan



**Le barrage
Lakhmess)**
est un barrage tuni
inauguré en 1966,
, situé à environ
15 kilomètres



Buckingham-
Fountain



Versailles-
Park-and-



Alhambra
-fontaine



Chatsworth-
House



Jet-
d'eau



The-
Bellagio-
Hotel-and-
Casino



En Conclusion,

L'évolution et la diffusion de nos savoirs acquis relatifs aux modes de stockage des eaux et toutes les actions de mobilisation, constituent les pivots de l'accès à la modernité, l'urbanisation puis la civilisation. Grâce à ces connaissances l'homme a évolué : De la pratique de la chasse au pâturage ; du pâturage à l'élevage ; de l'Agriculture à l'Agronomie ; de l'Agronomie à l'industrie et de l'industrie aux arts scientifiques.

Et merci de m'avoir prêté votre attention tout au long de cette brève communication. En guise de clôture de ces belles journées qu'on s'organise les scientifiques de l'ASTEE.

Références :

- Les lacs et Retenues collinaires en Tunisie (Décembre 1997) par Dr Shah Selmi et M. Salah Nasri (ORSTOM) et INGREF ; programme EUROMED
- Rapport final de Septembre 2016 : Monographie des Oasis Traditionnelles du Gouvernorat de Tozeur/Ministère de l'Environnement et de développement durable.
- Etude Stratégique du Système Hydraulique en Tunisie à l'Horizon 2030 / ITES (institut tunisien des études stratégiques). En Décembre 2014.
- Travaux de recherche de l'ASMK (association de sauvegarde de la Médina Kairouan).
- L'encyclopédie koweïtienne en ligne (chapitre 9)
- Article de Hatem Bouriel dans Tunis Web do publié le 18 Février 2016.
- Poème de Dr Slaiem Ammar (Pr agrégé en psychiatrie) présenté le 2 Novembre 1990 au cours d'un colloque national intitulé ; Arbre et Urbanisme.
- Les travaux de recherches effectuées par l'institut national du patrimoine INP avec L'association De Sauvegarde De LA Médina Kairouan financés par l'union européenne dans le cadre du programme : EUROMED.
- WILKIPEDIA L'Encyclopédie Libre.
- Dictionnaire Larousse.
- Salah Jelliti /chef d'arrondissement CES /CRDA Kairouan
- Lotfi Khelifi Ingénieur à l'arrondissement CES /CRDA Kairouan
- Photos : site ;almrsl.com, ; l'ASMK ;Wikipedia libre;ma et d'autres prises par mon appareil

Aptitudes agricoles de l'eau du puits du jardin botanique de l'Université Péléforo Gon Coulibaly de Korhogo

Omer Zephir DE LASME¹, Delmas Stéphane KOUADIO², Stephane Avy KOFFI³

¹ Université Peleforo Gon Coulibaly, UFR Sciences Biologiques, Departement Geosciences, drdelasme@gmail.com

² Université Peleforo Gon Coulibaly, UFR Sciences Biologiques, Departement Geosciences, delmasph3@gmail.com

³ Université Peleforo Gon Coulibaly, UFR Sciences Biologiques, Departement Geosciences, koffistephane_1@yahoo.fr

Résumé :

L'eau est incontournable pour la croissance des plantes. Cependant, une eau de mauvaise qualité peut-être la cause d'un retard de croissance d'une plante. Le présent travail de recherche vise à comprendre le flétrissement de certaines plantes en déterminant les aptitudes agricoles de l'eau du puits creusé dans le jardin Botanique de l'Université Péléforo Gon Coulibaly de Korhogo où sont cultivées des plantes vivrières, au Nord de la Côte d'Ivoire dominé par les sols ferrugineux. La méthodologie développée pendant cette étude a consisté à prélever un échantillon de l'eau de puits puis l'analyser en déterminant les paramètres physico-chimiques et enfin, traiter les résultats de l'analyse chimique à l'aide du logiciel d'Hydrochimie "Diagrammes" version 4.2. Les méthodes d'analyses au laboratoire sont principalement la volumétrie, la spectrométrie et la colorimétrie. Au plan chimique, cette eau appartient à la famille des eaux bicarbonatées sodique et potassique. Les risques d'alcalinisation et de salinité sont faibles, donc l'eau est « excellente » pour l'irrigation des plantes cultivées sur un sol pauvre en sodium. Néanmoins, Cette eau a un pH basique qui ne favorise pas l'assimilation des micro-éléments par les racines des plantes. L'étude menée a permis de comprendre les phénomènes inattendus dans la croissance de certaines plantes cultivées dans le jardin botanique de l'Université.

Mots-clés : Aptitude, irrigation, qualité de l'eau, Salinité, Korhogo, jardin.

Abilities of groundwater from well for agricultural practices in botanical garden of Peleforo Gon Coulibaly University

Abstract:

Water is essential for the growth of plants. However, poor water may be the cause of a plant's not growing. The present research aims at understanding the growing of certain plants by determining the agricultural aptitudes of groundwater from well dug in the Botanical garden of the Peleforo Gon Coulibaly University of Korhogo where food crops are cultivated, in the North of the Coast Ivay dominated by ferruginous soils. The methodology developed during this study consisted to take a sample of the well water and then analyzing it by determining the physico-chemical parameters and finally, treating the results of the chemical analysis using the Hydrochemical software. 'Diagrams' version 4.2. The methods used for analysis in the laboratory are mainly nephelometry, volumetry, spectrometry and colorimetry. On chemical view, this water belongs to the Sodium and Potassium bicarbonate family. The risks of alkalization and salinity are low for watering plants with this water. Nevertheless, it is a strongly basic water causing an early wilting of the cultivated plants. The results obtained are very satisfactory. So, they oblige to select the kind of food crops to be seed on the soil types of the garden studied.

Key Words: Ability, Irrigation, Water Quality, Salinity, Korhogo, Garden

Introduction

Dans le monde, l'accès à une eau de bonne qualité pour la boisson et l'irrigation des cultures est un véritable défi pour tous. L'agriculture, de façon générale est une grande consommatrice d'eau et surtout lorsqu'elle est pratiquée en saison sèche. Plusieurs travaux de recherches ont été menés dans certains pays sur le volet de l'aptitude des eaux pour un usage agricole. En Côte d'Ivoire, les travaux de Oga et al., (2015) ont montré que 67% des eaux souterraines échantillonnées dans la région de Katiola sont propices à l'irrigation. Kotchi et al. (2016) ont montré que les eaux souterraines utilisées en irrigation dans le département d'Agboville présentent un faible danger de salinisation et d'alcalinisation des sols. L'approvisionnement en eau d'irrigation constitue un facteur déterminant dans la production agricole, aussi bien en intensification des cultures qu'en extension des surfaces irriguées (Benziane et al, 2012). Cette eau qui a une importance capitale dans la vie des plantes, constitue parfois la source des problèmes de croissance des plantes dans certaines régions du monde. C'est dans cette vision que s'inscrit ce travail dont l'objectif est la détermination des aptitudes agricoles de l'eau du puits du jardin botanique de l'Université Péléforo Gon Coulibaly de Korhogo.

I. Matériels et méthodes

I.1. Présentation de la zone d'étude

Le site d'étude se situe au sein de l'université Péléforo Gon Coulibaly dans la sous-préfecture de Korhogo. La Sous-préfecture de Korhogo est située dans une zone semi-aride avec un climat à deux saisons, une végétation de savane arborée en majeure partie posé sur un socle granitique de type migmatique (Soro, 2014). Le jardin botanique a une superficie de 25 hectares (voir Fig.1), et constitue un site de préservation des plantes et d'expérimentation pour les recherches scientifiques de l'Université. Le puits étudié est situé dans la partie nord-ouest du jardin. Il a pour coordonnées exactes : 9°25'59,6" N / 5°38'5,21" W. L'eau de ce puits est utilisée pour l'arrosage des plantes (courgettes, arthémisia, etc.) cultivées sur les parcelles expérimentales.



Figure 1 : Localisation du Jardin Botanique de l'Université et son puits d'irrigation des cultures

1.2. Matériels et méthodologie

1.2.1. Matériels

La liste du matériel utilisé pour mener cette étude se résume en les éléments suivants : le Conductimètre HANNANA DiST 4 de tolérance 10 %, un pH-mètre HI 8010 de résolution 0.01 (marge de tolérance est ± 0.01), la Thermomètre et le turbidimètre. Le prélèvement des échantillons d'eau a été fait à l'aide de plusieurs bouteilles en plastique propres d'une capacité de 1,5 litre dont le bouchon de fermeture est vissé afin d'éviter toute réaction avec l'atmosphère. Le traitement des résultats d'analyses physico-chimiques a nécessité l'utilisation d'un ordinateur équipé du logiciel Diagramme version 4.2, conçu par le laboratoire d'Hydrochimie de l'Université d'Avignon (France). Ce logiciel d'hydrochimie compile en son sein plusieurs diagrammes dont ceux de Piper, de Schöeller-Berkaloff pour la détermination des hydrofaciès ; ceux de Riverside et Wilcox pour classer les eaux suivant leur alcalinité et salinité.

1.2.2. Méthodologie

Les échantillons d'eau prélevée ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques au laboratoire de Chimie de l'Université Péleforo Gon Coulibaly de Korhogo, situé à environ 200 m du puits. Les paramètres mesurés à l'aide de plusieurs bouteilles en plastique propres d'une capacité de 1,5 litre dont le bouchon de fermeture est vissé afin d'éviter toute réaction avec l'atmosphère. Les paramètres mesurés sont principalement les anions majeurs et les indicateurs physiques dont le pH, la conductivité et la température sans oublier la turbidité. Certains échantillons de l'eau du puits ont été convoyés dans une glacière vers d'autres laboratoires mieux équipés, afin de mesurer dans les brefs délais les teneurs des cations et

les éléments en traces dont la détermination fût impossible à Korhogo. Les méthodes d'analyses chimiques mises en œuvre dans ces laboratoires sont les suivantes : la méthode colorimétrique, la méthode volumétrique, et la méthode d'analyse par spectrométrie d'émission atomique (ICP-AES)

La méthode colorimétrique a été mise en œuvre pour déterminer la teneur des chlorures (Cl⁻), des nitrates(NO₃⁻) et nitrites (NO₂⁻), puis les sulfates (SO₄²⁻)dans l'échantillon. Les chlorures réagissent avec le thiocyanate mercurique pour former du chlorure de mercure et libérer les ions thiocyanates. Ces derniers réagissent avec les ions ferriques pour former un complexe de thiocyanate ferrique orange. La quantité de ce complexe est proportionnelle à la concentration en chlorure.. Le cadmium métallique réduit les nitrates dans l'échantillon en nitrites. L'ion nitrite réagit dans un milieu acide avec de l'acide sulfanilique pour former un sel de diazonium intermédiaire. Le sel se couple à l'acide gentisique pour former une solution de couleur ambrée.. Les ions sulfates dans l'échantillon réagissent avec le baryum et forment un précipité de sulfate de baryum. La quantité de turbidité formée est proportionnelle à la concentration en sulfate. Les résultats des tests sont mesurés à une longueur d'onde de 430 à 450 nm.

La méthode volumétrique fut mise en œuvre pour déterminer uniquement les teneurs en bicarbonates, à partir de la mesure du titre alcalimétrique complet (TAC) puisque le titre alcalimétrique (alcalins libres et ions carbonates) est nul quand le pH est inférieur à 8,3. Le dosage est fondé sur la neutralisation d'un volume d'eau (100 mL) par ajout d'un acide minéral (acide sulfurique dilué, (H₂SO₄ à 0,16N ou à 1,6N) en utilisant le vert méthyl rouge de bromocrésol comme indicateur coloré. La mesure s'exprime en mg.L⁻¹ de chaux (CaCO₃). La détermination des ions HCO₃⁻ s'est faite par la relation suivante :

$$HCO_3^- (mg.L^{-1})=1,219 \times TAC$$

(1)

Avec TAC : taux d'alcalinité totale en mg/L de CaCO₃.

Les métaux et les cations ont été mesurés dans un laboratoire partenaire par la méthode d'analyse par spectrométrie d'émission atomique (ICP-AES) dont la source est du plasma généré par couplage inductif. Les valeurs des teneurs des ions sont renseignées convenablement dans le fichier numérique Excel approprié, et une classification chimique s'effectue automatiquement par le logiciel d'hydrochimie avec les données renseignées. Les résultats proposés par l'outil informatique ne sont retenus que si et seulement si la valeur de la balance ionique est comprise entre 0 et 5%, comme le recommande les travaux antérieurs (Biémi, 1992; Oga, 1998 ; Soro, 2002).

2. Résultats et Discussions

2.1. Les valeurs des paramètres physico-chimiques de l'eau du puits

Les valeurs des paramètres physico-chimiques mesurés *in situ* sont consignés dans le tableau I.

Tableau I. Valeurs des paramètres physico-chimiques de l'eau des puits

pH (puits étudié PI)		Cond. Electr. (µS/cm)	Dureté (°F)	Oxygène dissous (mg/L)	Turbidité (NTU)	Temp. (°C)
Terrain	Labo					
9	8,2	190	4	16,4	16,4	24

Le pH de l'eau servant à l'arrosage est basique, ce qui peut rendre difficile voire impossible l'assimilation du phosphore dans le sol par les racines des plantes. L'eau est dotée d'une dureté faible, une température relativement peu élevée et une concentration en oxygène dissous favorable au développement des matières organiques.

2.2. Les teneurs des ions dans l'eau du puits

La chimie de l'eau du puits est présentée dans le tableau II. L'analyse des teneurs révèle la prédominance du trio Bicarbonate-Potassium-Sodium, et aussi l'absence des ions nuisibles à la santé humaine tels que l'Arsenic et le Plomb. Cette composition chimique traduit que l'eau du puits est propice pour la consommation humaine car les teneurs de certains ions

(Co < 0.05 mg/l ; Pb < 5.0 mg/l ; As, Mo et Cd < 0.01 mg/l, Se < 0.02 mg/l, Zn < 2.0 mg/l, V < 0.10 mg/l ; Ni < 0.20 mg/l) sont inférieurs aux concentrations inscrites dans les normes de potabilité des eaux définies par l'Organisation Mondiale de la Santé.

Tableau II. Valeurs des teneurs en ions chimiques mesurés dans l'eau du puits

IONS	Al	A	Ba	Ca	Cd	Co	Cu	Fe	K	Mg	NO ₃	NO ₂	PO ₄
Concentration (mg/L)	0,481	< 0	0,28	6,04.10 ⁻³	7,53.10 ⁻³	3,31.10 ⁻³	1,65.10 ⁻³	0,54	26,4	3,73	4,4	0,21	9,1
IONS	Mn	M	N	Ni	Pb	Sb	Se	V	Y	Zn	SO ₄	NH ₄	HCO ₃
Concentration (mg/L)	7,02.10 ⁻³	< 0	19,9	6,72.10 ⁻³	< 0	7,32.10 ⁻⁴	1,8.10 ⁻³	< 0	< 0,001	1,63.10 ⁻³	1	< 0,01	51,11

La classification chimique à l'aide des diagrammes de Piper (figure 2) et Schoeller-Berkloff (figure 3) montre que l'eau du puits étudiée appartient à l'hydrofaciès bicarbonatée sodique et potassique.

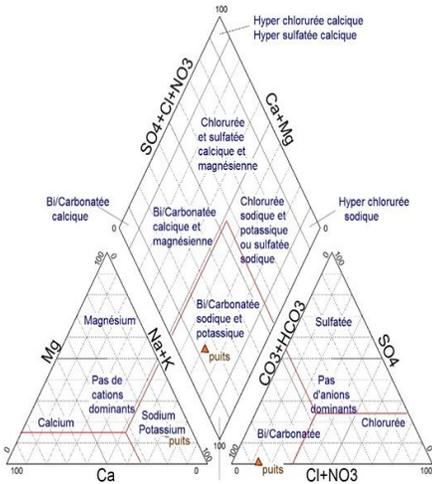


Figure 2 : Classification dans Diagramme de Piper

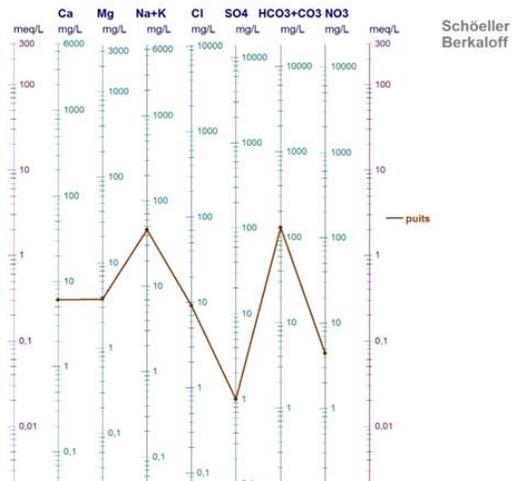


Figure 3 : Classification suivant Schöeller-Berkloff

La classification dans les diagrammes de Riverside (figure 4) et de Wilcox (figure 5) révèle que le pouvoir alcalinisant (SAR) de l'eau et sa conductivité électrique (CE) sont faibles, réduisant ainsi le risque de salinité, ce qui fait que

cette eau peut-être qualifiée <<excellente >> pour l'irrigation des plantes cultivés sur des sols pauvres en sodium. Toutefois, il faudra être vigilant car un excès de sodium entraine un risque de dégradation de la structure des sols, suivie d'une croissance perturbée des végétaux.

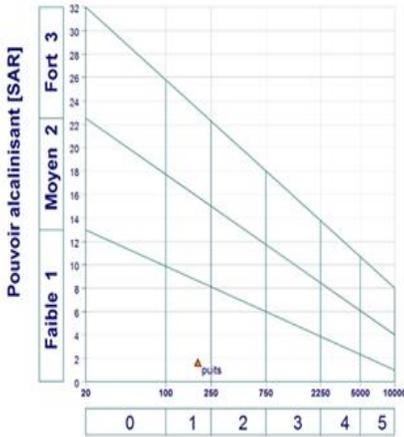


Figure 4 : Diagramme de Riverside du puits

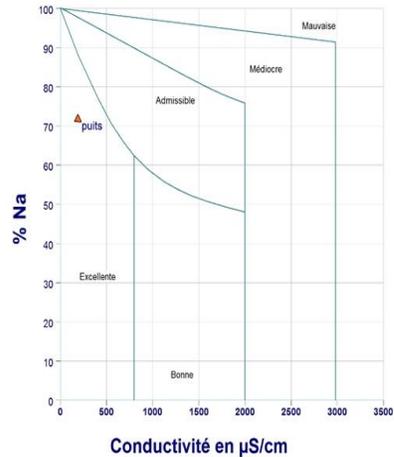


Figure 5 : Diagramme de Wilcox du puits

3. Discussions

3.1. Les valeurs des paramètres physico-chimiques de l'eau du puits

Dans la plupart des eaux naturelles, le pH est compris habituellement entre 6 et 8,5 (Biémi, 1992). Dans notre cas, Le pH de l'eau du puits est très basique (pH = 9), alors que les travaux antérieurs (Soro, 2013) ont révélé un ph acide (ph=5.4) des eaux de puits dans la zone rurale de Korhogo. Cette différence peut s'expliquer par la température de l'eau échantillonnée (24 contre 29°C). le pH basique de l'eau du puits étudié ne permet pas une bonne activité microbienne dans le sol et réduit la croissance des végétaux cultivés dans la mesure où la solubilité des micro-éléments est quasi-impossible (agri-vision, 2004). La conductivité électrique est faible, ce qui est en accord avec les résultats de l'étude régionale entreprise par Soro (2013) à Korhogo. En effet, la conductivité électrique dépend des charges de matière organique endogène et exogène, génératrice de sels après décomposition et minéralisation et également avec le phénomène d'évaporation qui concentre ces sels dans l'eau, elle varie aussi suivant le substrat géologique traversé (Belghiti et al, 2013). L'activité organique et minérale n'a pas subi de changement majeur dans la région de Korhogo, il est donc évident que la valeur de la conductivité demeure faible (inférieure à 250 µS/cm), ce qui témoigne de la faible teneur en sels dissous.

3.2. Les teneurs des ions chimiques de l'eau du puits

L'eau du puits est caractérisée par un faciès bicarbonaté sodique et potassique. La prédominance du bicarbonate dans les eaux souterraines ivoiriennes évoquée dans les travaux précédents (Biémi, 1992 ; Oga, 1998 ; Soro, 2002, De Lasme, 2013) est donc confirmée par cette étude. Toutefois, le caractère sodique et potassique fait la particularité de l'eau de puits du jardin botanique, alors que les eaux échantillonnées ailleurs à Korhogo sont généralement calciques ou calciques-magnésiennes (Soro, 2014). Cela s'explique par le

chimisme de l'eau qui s'acquiert par l'action conjuguée de plusieurs facteurs dont : la minéralisation due au temps de séjour, la dégradation de la matière organique, le lessivage des sols et le phénomène d'oxydo-réduction (Kouassi et al.,2012)

3.3. Aptitude à l'irrigation agricole de l'eau du puits

A l'exception du pH, le potassium et le Calcium, les valeurs du SAR et de CE de l'eau du puits s'inscrivent dans les normes de salinité et d'alcanité admises pour une eau « excellente » et « bonne avec risque » pour l'irrigation agricole selon respectivement les travaux du département de l'Agriculture des Etats Unis (Laboratory Staff, 1954), et ceux de Petterson et al., 1999.

Conclusion

Dans l'étude de la caractérisation hydrochimique du puits servant à l'arrosage les plantes cultivées dans le jardin botanique de l'Université Péléforo Gon Coulibaly (UPGC) de Korhogo, nous avons eu une eau dont la composition physicochimique lui donnait une qualité excellente pour faire de l'irrigation. Cette eau se place dans le domaine des eaux basiques avec un pH = 9. L'eau du puits est faiblement minéralisée. La chimie de l'eau est dominée par le trio Bicarbonate-Potassium-Sodium, qui a donné à l'eau du puits un faciès bicarbonaté sodique et potassique. Il s'agit d'une eau qui peut-être « bonne à excellente » pour l'irrigation agricole si le pH, le potassium et le Calcium font l'objet d'une correction conduisant à une baisse de leurs teneurs respectives. La perspective envisageable à cette étude est la caractérisation hydrogéochimique de l'eau accompagnée d'une identification pédologique du jardin.

Références

- [1] S. Oga M., F. Gnamba M., B. Adiaffi, T. Soro, K. Oulai, J. Biemi. Aptitude of Groundwaters for Irrigation in Katiola Area. Asian Review of Environmental and Earth, Vol. 2, N° 3, (2015) 54-60.
- [2] R. Kotchi O., G. Soro, D. Tanina S., A. Traoré, N. Fossou R. M., N. Soro. Aptitudes À L'agriculture Des Eaux Souterraines Du Departement d'Agboville (Sud-Est De La Côte d'Ivoire). European Scientific Journal edition vol.12, No.21, (2016) 1857 – 7881.
- [3] D. SORO T., Evolution des ressources en eau du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité et de changement climatiques impacts hydrologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques. Thèse de Doctorat d'état d'Hydrogéologie, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody en Sciences de la Terre, côte d'Ivoire (2014).
- [4] Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Directives OMS pour l'utilisation des eaux en agriculture, volume 2, annexe 1, 2013.
- [5] Y. Oga M.-S. (1998). Ressources en eaux souterraines dans la région du Grand Abidjan (Côte d'Ivoire) : Approches hydrochimique et isotopique. Thèse Unique de Doctorat, Université Paris XI, Orsay, France, 241 p.
- [6] M. Belghiti L. , A. Chahlaoui, D. Bengoumi, R. EL Moustaine. Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe plio-quadernaire dans la région de meknès (maroc). Larhyss Journal, n° 14, (2013), 21-36.
- [7] F. Bouchemal, S. Achour. Qualite physico-chimique et parametres de pollution des eaux souterraines de la region de biskra. Larhyss Journal, n°22 (2015) 197-212.

[8] J. Biemi (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants sub-sahéliens du socle précambrien de l'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Etat ès- Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 493 p.

[9] N. Soro (2002). Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand Lahou et ses environs (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Implications hydrologiques et hydrogéologiques. Doctorat d'Etat ès sciences Naturelles, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 256 p.

[10] **M. Kouassi A., K.A.Yao, A. Y Ake., J.Biemi (2012)** Application of statistical and Hydrochemical methods to the analysis of the groundwater in the Guiglo - Duekoué area (Western area of Ivory Coast) *International Journal Of Geomatics And Geosciences*, Vol.2, No 4, pp. 939 – 952.

[11] H.G. Peterson 1999. Water quality and Micro-irrigation for horticulture. Agriculture et Agroalimentaire Canada. http://www.agr.gc.ca/pfra/water/microirr_e.htm
CRAAQ, 2003. Guide de production des annuelles en caissettes 313p.

Colloque – Formation Internationale



Eau-Environnement-Climat' 2018 (E²C-2018)

Ressources en Eau, Environnement et Changement Climatique

Hammamet, le 22 au 27 Octobre 2018

Sommaire :

Application des cartes SOM pour la classification des paramètres géochimiques des sédiments de la Mer Rouge
Salinity study under a wheat crop at the irrigated perimeter of Lakhmess
Evaluation des écosystèmes d'eau douce de Tunisie
Vulnérabilité des populations face aux risques d'inondations dans les grandes villes d'Afrique de l'ouest : Cas de Cotonou au Bénin et d'Abidjan en Côte d'Ivoire.
Évaluation des facteurs physiographiques et leurs impacts sur les ressources en eau dans les bassins versants d'Essaouira (Essaouira, Maroc)
Apport de la télédétection et des SIG dans la cartographie des zones favorables à l'implantation de forages d'eau à gros débits dans la région de Dalaou.
Qualité de l'eau de robinet dans la ville de Biskra en Algérie- étude de cas
La qualité physico-chimique des eaux du Complexe Terminal (CT) dans la région d'Oued Righ (Sud-Est d'Algérie)
Simulation numérique des écoulements turbulents à surface libre : Application aux coursiers d'évacuateurs de crues
Contribution de la télédétection à l'étude de la fracturation, et de la mise en place du système hydrogéologique de la zone des sources, Haut Bassin de l'Oum Er Rabiaa (Moyen-Atlas, Maroc).
Cartographie de la susceptibilité aux inondations par la méthode de l'analyse multicritère et SIG : Cas de la wilaya d'Oran Nord-Ouest de l'Algérie
Caractérisation géochimique de l'aquifère de Complexe Terminal de El-Oued (SE Algérie)
Effets de l'érosion hydrique dans la commune d'Attécoubé, Abidjan Côte d'Ivoire
Modélisation du transport solide et étude analytique de quantification de l'envasement dans le barrage de l'oued Siliana
Devenir des sources hydriques dans les villages kabyles
Hydrogeological Modelling using Gardenia Model in the Koda catchment, Mali.
Apport de la modélisation pour l'aide à la décision sur la stratégie d'irrigation des cultures-résultats préliminaires
Évaluation de la contamination mercurielle des eaux de surface Cas du barrage de Zit-Emba, wilaya de Skikda, nord-est algérien.
État de la ressource en eau superficielle au Nord-Ouest de l'Algérie
Aléa inondation et cartographie des zones inondables dans la région d'Ain Temouchent - Algérie
Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur l'évolution des paramètres physico-chimiques des eaux du système aquifère de la plaine de Ghriiss (Nord-Ouest Algérien)
Evaluation des flux souterrains par l'utilisation des isotopes du carbone, application aux aquifères karstiques des Monts de Tlemcen (Nord-Ouest Algérien)
Prediction of monthly stream flow using the hybrid discrete wavelet transform with support vector machine based on particle swarm optimization.
Modélisation hydrologique des tributaires de la lagune aghien à la périphérie de la ville d'abidjan en Côte d'Ivoire
Approche à l'étude physico chimique des eaux de surface dans une région aride (Nord-est Algérien)
Modélisation du phénomène de cavitation dans les conduites fermées
Surveillance des caractéristiques physico-chimiques et sédimentologiques de trois sources d'eau de la nappe Metline-Ras Jebel-Rafraf.
Evaluation de la qualité des eaux souterraines, Cas de la source Tahabort (Tamanrasset, Algérie)
Cartographie et étude de l'évolution de la qualité physicochimique des eaux de sources. Cas de la région de Taher (wilaya de Jijel, Nord-Est algérien)
Modélisation du transport du cadmium et du plomb au niveau des sédiments confinés du lac sud de Tunis à l'aide du code HydroGéoSphere
Application des méthodes statistiques à l'étude hydrochimique des eaux de la Haute et Moyenne Soummam (Algérie)
Caractérisation de la sécheresse: cas du bassin versant Seybouse
Approches multicritères pour l'étude de l'intrusion marine: Cas de la nappe de Collo, Nord Est Algérien
Accuracy evaluation of direct runoff estimate using HEC-HMS model within a semi-arid watershed: a case study of Bouregreg River, Morocco
Quelques aspects de la propagation des crues de références dans le bassin de Derna : cas de la crue d'hiver de 1987 (Bassin d'Oum Er-Rbia, Maroc)
Gestion irrationnelle des ressources en eau dans le Sud algérien (Cas de la vallée de M'Zab)
Les palmeraies périurbaines de Biskra face à la problématique de l'eau agricole
Apport combiné de la télédétection et de la géophysique à l'identification des réserves en eau souterraine de la localité de Belle ville (Centre-ouest Côte d'Ivoire).
Effets anthropiques et contamination du littoral de la région de Gabes : approche géochimique et effet de l'hydrodynamisme
L'analyse Des Caracteristiques De La Secheresse Utilisant Les Copules Archimediennes
L'importance d'utilisation des jardins filtrants avec des plantes ornementales dans les pays en développements
Evolution quantitative et qualitative de la nappe phréatique de la ville de M'bahiakro (Centre-Est, Côte d'Ivoire)
Identification des processus d'intrusion marine dans les aquifères côtiers par l'usage des rapports Br/Cl et Br/Na
Les enjeux environnementaux et économiques des projets de dessalement de l'eau de mer en Algérie
Erosivité des pluies et érosion spécifique et envasement des barrages en milieu semi-aride Tunisie.
Les courbes Débit-Durée-Fréquence - Un outil d'aide à la décision. Application à quelques cours d'eau du Nord-est algérien.
Dynamique et cartographie des formations à Tamaricacées dans l'Ouest algérien
Modélisation pluie-débit journalier par l'approche des réseaux de neurones artificiels et un modèle conceptuel le GR4j en zone semi-aride
Modélisation géostatistique de la salinité en environnement 3D à partir de levés de résistivité électrique et de la géomodélisation (Cas de l'aquifère de Hammam Bouhadjar – Nord-Ouest Algérien)
Étude de la fracturation dans les forages carottés dans la région d'Oumé (Côte d'Ivoire)
Evolution Quantitative Et Qualitative Des Eaux De La Source De Ain Khrouf, El Bouni, An naba
Apport de la piézométrie et de la température à la détermination de l'origine des eaux souterraines de la nappe alluviale de Oued Biskra (Algérie)
Analyse de la fracturation extraite des images satellitaires de la région de katiala : contribution à la caractérisation des réserves souterraines
Calcul des infiltrations à travers les digues en terre
Evaluation de la performance du service d'eau potable en utilisant deux méthodes de pondérations
Prévision des crues d'un bassin non jaugé : cas du bassin versant de Tessa au Nord de la Tunisie
Évaluation de l'érosion des sols par le modèle RUSLE à l'aide de la télédétection et du SIG - Étude de cas du bassin de Boussalem Algérie
Scaling potential of the continental intercalaire geothermal waters in the grand erg oriental basin (Algeria and south Tunisia)
Calcul et Cartographie de l'infiltration en zone semi-aride
Caractérisation physico-chimique et biologique des eaux du barrage de Béni-Haroun dans l'est Algérien
Experimental study of the effect of the compactness on the sequent depths ratio of the hydraulic jump controlled by thin sill in a rectangular channel
Les pertes karstiques du Gardon (Gard, France) : évaluation à partir de chroniques de débit à haute résolution .
Fonctionnements karstiques et mesures de températures à haute résolution : quelques résultats obtenus dans le sud de la France
Computation of normal depth in an open channel with horizontal bottom and circular walls using the rough model method diagnostic de la qualité des eaux des barrages algériens: étude de six cas régionaux.
Diagnostic De La Qualité Des Eaux Des Barrages Algériens: Étude De Six Cas Régionaux.
Les Ouvrages Hydrauliques au long de l'histoire
Aptitudes agricoles de l'eau du puits du jardin botanique de l'Université Péléforo Gon Coulibaly de Korhogo