

JOURNAL INTERNATIONAL

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

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688
Open Access

Volume (V) - Numéro 2 – Décembre 2020

Eau-Climat'2020



Gestion Intégrée des Ressources en Eau
et Changement Climatique

Rédacteur en Chef : Pr Nouredine Gaaloul

Publié par:

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

INTERNATIONAL JOURNAL

Water Sciences and Environment Technologies

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688

Open Access

Volume (V) - Issue 2 – December 2020

Water-Climate'2020



Integrated Water Resources Management and Climate Change

Editor-in-Chief: Pr Nouredine Gaaloul

Published by:

Scientific and Technical Association for Water and the
Environment in Tunisia (ASTEETunisie)

"وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ"

سورة الأنبياء آية 30

Et fait de l'eau toute chose vivante

(Al-Anbiya 30)



<http://jistee.org/journal-international-sciences-et-techniques-de-leau-et-de-lenvironnement/>

Appel à contributions : Prochain numéro la revue Scientifique : JISTEE – Mars 2021

Nous coordonnons la rédaction, du numéro mois de **Mars 2021** Eau-Climat”, qui vous est ensuite offert gratuitement en format pdf.

Le thème retenu pour 2021 est “ **Eau- Agriculture – Climat**“, en vous rappelant, si besoin en était, que le changement global couvre à la fois le changement climatique et les changements anthropiques (variations d’occupation des sols et aménagements des bassins versants, prélèvements, etc.).

Nous lançons donc un appel à contributions pour des articles (articles longs, courts, encadrés) qu’il vous paraîtrait intéressant de voir figurer dans ce numéro de la revue Scientifique : Journal International Sciences et Techniques de l’Eau et de l’Environnement (JISTEE).

Les contributions seront attendues pour le courant du mois de Février 2021 afin de pouvoir être révisées par le Comité Scientifique International et que la mise en forme du numéro ait lieu en Mars 2021 au plus tard.

Visiter notre site : <https://jistee.org/journal-international-sciences-et-techniques-de-leau-et-de-lenvironnement/>

Comité Scientifique International (CSI-EC'2020) *International Scientific Committee (ISC-EC'2020)*

Nouredine Gaaloul	Prof. Université de Carthage – IRESA - INRGREF (Tunisie)
Hamadi Habaieb	Prof. Université de Carthage – IRESA - IN-AT (Tunisie)
Zouhaier Nasr	Prof. Université de Carthage -IRESA- INRGREF (Tunisie)
Mohamed Hachicha	Prof. Université de Carthage -IRESA- INRGREF (Tunisie)
Zouhaier Hlaoui	Prof. Université de Tunis - Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis (Tunisie)
Adel Kharroubi	Prof. Université de Gabès – ISSTEG (Tunisie)
Taoufik Hermassi	M.Conf. Université de Carthage – IRESA - INRGREF (Tunisie)
Mohamed Habib Sellami	M.Conf. Université de Jendouba – IRESA- ESIM (Tunisie)
Hechmi Belaid	M. Assistant, Université de Jendouba -IRESA- ESIM (Tunisie)
Rim Katlane	M.Conf. Université de la Manouba - Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités (Tunisie)
Ibrahima Amadou Traoré	Expert Hydrogéologue
Mohamed Meddi	Prof. ENSH, (Algérie)
Azzedine Hani	Prof. Univ. Annaba (Algérie)
Larbi Djabri	Prof. Univ. Annaba (Algérie)
Salah Eddine Ali Rahmani	Prof. Univ. des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Algérie)
Saadane Djorfi	Prof. Université de Annaba (Algérie)
Mohammed Achite	Prof. Université de Chlef (Algérie)
Abdelhalim Yahiaoui	Prof. Université de Bechar (Algérie)
Mohamed Bessenasse	Prof. Université de Saad Dahlab- Blida (Algérie)
Benabadi Noury	Prof. Université de Tlemcen (Algérie)
Abdessamad Merzouk	Prof. Université de Tlemcen (Algérie)
Abdelhalim Yahiaoui	M.Conf. Univ. Bechar (Algérie)
Guegazi Saadia	M.Conf. Université de Biskra (Algérie)
Beloulou Laroussi	M.Conf. Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Guedoug Abdelhamid	M.Conf. Université de Blida1 (Algérie)
Khoualdia Wacila	M.Conf. Université de Souk-Abras (Algérie)
Belkacem Bekkoussa	M.Conf. Université Mustapha Stambouli de Mascara (Algérie)
Ali Essahlaoui	Prof. Université Moulay Ismail Meknes (Maroc)
El Ouali Abdelbadi	Prof. Université Moulay Ismail Meknes (Maroc)
Abdellah El Hmaidi	Prof. Université Moulay Ismail Meknes (Maroc)
Imad Manssouri	Prof. Université Moulay Ismail Meknes (Maroc)
Abdelmajid Moumen	Prof. Université Nadour (Maroc)
Mhamed Anyay	Prof. Université de Fès (Maroc)
Abdelaziz Abdallaoui	Prof. Université Moulay Ismail (Maroc)
Amadou Thierno Gaye	Prof. Université Cheikh Anta Diop, Dakar, (Sénégal)
Sousou Sambou	Prof. Univ. Cheikh Diop UCAD FST (Sénégal)
Diop Ngom Fatou	Prof. Univ. Cheikh Diop UCAD FST (Sénégal)
Soro Nagnin	Prof. UFR STRM (Cote d'Ivoire)
Gnamba Franck Maxime	Prof. UFR STRM (Cote d'Ivoire)
Soro Nagnin	Prof. UFR STRM (Cote d'Ivoire)
Cush Ngongzo Luwesi	Prof. Univ. Dem. Rep. (Congo)
Koussoubou A. Leonard	Prof. FLAC/ UAC (Congo)
Koumassi Dègla Hervé	Prof. LACEEDE/ UAC (Bénin)
Hamma Yacouba	Prof. 2iE (Burkina Faso)
Harouna Karambiri	Prof. 2iE (Burkina Faso)
Lienou Gaston	Prof. Univ. Yaoundé (Cameroun)
Gnandi Kissao	Prof. Univ. Lomé (Togo)
Hamadou Bokar	Prof. Univ. ENI-abt (Mali)
Saeid Eslamian	Prof. Université de Isfahan (Iran)
Amadou Gaye	Prof. CR4D (Ethiopia)
Richard Anyah	Prof. CR4D (Ethiopia)
Benjamin Lamptey	Prof. CR4D (Ethiopia)
Aqeel Al-Adili	Prof. Univ. Technology (Iraq)
Mountaz Razuck	Prof. Université de Poitiers (France)
Lucila Candella	Prof. Univ. Catalonia (Spain)
Fotis K. Pliakas	Prof. Univ. Thrace (Greece)
Andreas Kallioras	Prof. Univ. Athens (Greece)
Christoph Schüth	Prof. Tech.Univ. Darmstadt (Germany)
Jean-François Delège	Prof. Univ. de Liège (Belgique)



<http://jistee.org/journal-international-sciences-et-techniques-de-leau-et-de-lenvironnement/>

Call for contributions: Next issue of the Scientific review: JISTEE – March 2021

International Journal of Water Science and Environment Technologies

We are pleased to inform you that the Vol 5, No 2 of International Journal of Water Science and Environment Technologies is available at <https://jistee.org/volume-v-2020/>

Open access Journal are freely accessible via the internet for immediate worldwide. This Journal is an Open Access International Journal and will accept research and review manuscripts ranging from, Basic research on Water, Climate, Environment, Hydrology; hydrogeology and management of water resources; Agricultural hydraulics (Irrigation, Drainage, etc.), Modeling of Water Resources (Hydraulics, Hydrology, Hydrogeology), Physico-chemical quality of Surface and groundwater; Hydrobiology, microbiology, toxicology and ecotoxicology; the structure and function of aquatic ecosystems; Water quality, wastewater treatment and drinking water; Municipal and industrial wastewater treatment; Management of water resources (quantitative, socio-economic and legal aspects) ,...

The manuscript/ paper can be submitted via email to jistee@iresa.agrinet.tn

or jistee@yahoo.com

to our online direct submission area, located here: <http://www.jistee.org>

Préface



Le changement climatique, qui est aujourd'hui une réalité incontestable, se répercute fortement sur les ressources en eau. Les impacts et les conséquences de ce changement sur le cycle de l'eau concernent essentiellement la modification de la moyenne et de la répartition géographique des précipitations, la modification de l'évapotranspiration, la recrudescence des périodes de sécheresse et de fortes précipitations. Cette recrudescence, dont l'impact socioéconomique commence à peser financièrement sur les pays, interpelle les gouvernements et la communauté internationale pour la mise en œuvre d'actions de résilience, en particulier en Afrique où 25% de la population actuelle subit un stress hydrique et le tiers habite dans des régions qui sont sujettes aux sécheresses et qui sont vulnérables à leurs impacts.

Le dérèglement climatique est une réalité qui s'impose de plus en plus. Les études scientifiques montrent clairement que le développement de l'activité économique s'est traduit par une augmentation des températures de la planète et des perturbations climatiques telles que l'accentuation des phénomènes climatiques extrêmes.

Ce changement climatique a des impacts directs sur les ressources naturelles, les écosystèmes et les sociétés. Le secteur de l'eau est parmi les secteurs les plus affectés, comme le démontrent les observations et les projections des experts scientifiques.

Les impacts du dérèglement climatique sur le cycle de l'eau sont complexes et différenciés selon les régions du monde, avec de fortes répercussions socioéconomiques et environnementales.

L'eau a un rôle à jouer à la fois en termes d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, en limitant la consommation d'énergie à différents niveaux du cycle de l'eau ou en valorisant les potentialités hydroélectriques (atténuation), mais surtout en intégrant la dimension climatique dans la gestion de la ressource (adaptation).

En ce qui concerne l'adaptation aux changements climatiques, la gestion intégrée de la ressource en eau permet de promouvoir des approches durables en vue d'assurer l'optimisation et l'efficacité dans la consommation de la ressource.

La sécurité hydrique est clairement une priorité de développement pour la plupart des parties qui ont intégré différents types d'actions liées à la protection des ressources en eau dans les composantes d'adaptation. Les actions proposées visent généralement : l'économie d'eau, la sécurité d'approvisionnement, l'amélioration de la répartition de l'eau, et l'élargissement de l'offre de ressources.

La **COVID-19** a tiré un signal d'alarme sur l'importance d'assurer l'accès à l'eau potable, l'assainissement et l'hygiène pour tous afin de protéger la santé et le bien-être humain. L'utilisation de l'eau en tant que ressource essentielle pour combattre la COVID-19 à travers les gestes d'hygiène (le lavage des mains avec du savon et de l'eau) est maintenant mondialement perçue comme étant le meilleur moyen de prévention contre la transmission de la COVID-19. Ce qui semble être une simple recommandation de l'OMS, fondée sur des principes d'hygiène de base, devient beaucoup plus compliqué dans la région MENA qui est la plus touchée par la pénurie hydrique frappante surtout que plus de 60 % de la population de cette région vit dans des zones subissant un stress hydrique élevé ou très élevé. Pour la région MENA, il convient de mentionner que plus de 362 millions de personnes vivent avec moins de 1 000 mètres cubes d'eau douce par personne et par an, frôlant les 500 m³/an/hab, et 18 des 22 pays arabes sont considérés comme rares en eau.

Face au « tic-tac de l'horloge climatique », la voie était étroite pour mettre en œuvre des mesures efficaces de lutte contre le changement climatique sans creuser les inégalités sociales. L'horloge climatique a subi un choc inattendu, celui du Covid-19 suivi d'un confinement de grande ampleur des populations dans leur pays, avec des impacts majeurs sur la mobilité, la production, la vie sociale et, par voie de conséquence, sur les émissions de gaz à effet de serre à l'origine du changement climatique.

Nouredine Gaaloul

Professeur de l'Enseignement Supérieur Agricole (INRGREF)

Rédacteur en Chef de la Revue Journal International Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement

Président de l'ASTEE Tunisie



www.jistee.org

jistee@iresa.agrinet.tn

jistee@yahoo.com



Volume (I) : Eau-Climat'2014 (EC-2014) / Water-Climate'2014 (EC-2014)

Numéro 1 – Avril 2014 : Ressources en Eaux de Surface en Région Méditerranéenne
Surface Water Resources in the Mediterranean Region.

Numéro 2 – Août 2014 : Ressources en Eaux Souterraines en Région Méditerranéenne
Ground Water Resources in the Mediterranean Region.

Numéro 3 – Décembre 2014 : Changements Climatiques en Région Méditerranéenne
Climate Change in the Mediterranean Region

Volume (II) : Eau-Société-Climat'2017 (ESC-2017) / Water-Society-Climate'2017 (ESC-2017)

Numéro 1 – Février 2017 : Caractérisation qualitative et quantitative des ressources en eau
Qualitative and quantitative characterization of water resources.

Numéro 2 – Avril 2017 : Évaluation des ressources en eau sous les pressions de l'humanité et des changements climatiques
Assessment of water resources under pressure from humanity and climate change.

Numéro 3 – Juin 2017 : Vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques
Vulnerability of Water Resources to Climate Change.

Numéro 4 – Août 2017 : Modélisation de l'impact des changements anthropiques et climatiques sur les ressources en eau
Modeling the impact of anthropogenic and climatic changes on water resources.

Numéro 5 – Octobre 2017: Modélisation Numérique en Hydraulique, Hydrologie et Hydrogéologie
Numerical Modeling in Hydraulics, Hydrology and Hydrogeology

Volume (III) : Eau-Environnement-Climat'2018 (E²C-2018) / Water-Environnement-Climate'2018 (E²C-2018)

Numéro 1 – Avril 2018 : Gestion des Ressources en Eau
Water Resources Management.

Numéro 2 – Août 2018 : Sciences de l'Environnement
Environmental Earth Sciences.

Numéro 3 – Décembre 2018 : Changement Climatique et Adaptation
Climate Change and Adaptation

Volume (IV) : Eau-Énergie-Climat'2019 (2EC-2019) / Water-Energy-Climate'2019 (E²C-2019)

Numéro 1 – Décembre 2019 : Gestion Intégrée des Ressources en Eaux
Integrated Water Resources Management.

Numéro 2 – Décembre 2019 : Énergies Renouvelables Et changements climatiques
Renewable Energies and climate change

Volume (V) : Eau-Climat'2020 / Water-Climate'2020

Numéro 1 – Septembre 2020 : Ressources en Eaux et Changements Climatiques
Water Resources and Climate Change.

Numéro 2 – Décembre 2020 : Gestion Intégrée des Ressources en Eau et Changement Climatique
Integrated Water Resources Management and Climate Change

Volume (VI) : Eau-Climat'2021 / Water-Climate'2021

Numéro 1 – Mars 2021 à suivre....

Copyright © 2020 – Jistee Tous droits réservés

Sommaire

Acceptabilité sociale d'un système décentralisé d'approvisionnement en eau potable : le cas d'étude des Associations d'Usagers de Réseaux d'Eau Potable (ASUREP) à Kinshasa, République Démocratique du Congo	9
Hippolyte Ditona Tsumbu (<i>Université de Liège, Belgique</i>), David Cammaerts, Ignace Adant, Sambieni Raoul, Francis Lelo Nzuzi, Jean-François Delière	
Caractérisations hydro-pluviométriques des inondations dans le bassin versant de couffo a lanta	20
Koumassi Dègla Hervé (<i>Université d'Abomey-Calavi – Laboratoire Pierre Pagny "Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement" Bénin</i>)	
Aridité et sécheresse : heuristique d'une modélisation parétienne et bayésienne de la tension sur la ressource en eau dans le sud-est de la France	28
Martin Philippe , (<i>Université d'Avignon - France</i>), Hadrien Di Costanzo, Ingrid Canovas	
Utilisation de la modélisation pour l'analyse des données de prospection hydrogéologique en vue du projet de drainage de la mine de fer de Yakovleva – Russie	49
Traoré Ibrahima Amadou (<i>Expert Hydrogéologue</i>), Evguéni Alexeivitch Lomakine, Alexandre Vassilievitch Pospelov	
Approche de modélisation pour l'analyse de l'efficacité de la technique d'irrigation par micro-jets dans les oasis de Nefzawa. Mise en équation et validation	55
Tiba Hedia (<i>Université de Carthage –INAT - Université Tunis- El Manar. Laboratoire de Matière Molle et de Modélisation Electromagnétique, Tunisie</i>) Latifa Dhawadi, Mohamed Habib Sellami	
Oasis de Toudgha : Analyse de l'évolution du couvert végétal et Impacts socioéconomiques sur le paysage environnemental (Sud-est Marocain)	61
Azouggarh Lahcen (<i>Université Ibn Tofail Jlsb Kénitra – Maroc</i>), Mouline Mohyeddine Ahmed	
Contraintes d'approvisionnement en eau potable dans le département des Collines au Bénin	68
Yetongnon Judith Eric Georges (<i>Université d'Abomey Calavi – Bénin</i>)	
Contribution à l'étude anthropique dans une zone du littoral (cas de la région de Honaine, Oranie-Algérie)	78
Benabadji Noury (<i>Université de Tlemcen – Algérie</i>), Ouadah Fatiha	
Détermination et analyse des paramètres de rendement chez deux variétés d'avoine soumises à un stress hydrique dans un contexte de changement climatique	91
Boughdiri Amor (<i>Université de Carthage – Tunisie</i>), Gouider Tibaoui, Hiba Boubaker, Latifa Dhaouadi, Mohamed Habib Sellami	
Le cortège floristique d'une Orobanchacée rare du nord-ouest algérien face aux fluctuations climatiques : Cistanche mauritanica.	98
Aissaoui Mansour (<i>Université Abou-Bekr Belkaïd de Tlemcen – Algérie</i>), Sari-Ali Amel, Babali Brahim	
Etude qualitative et quantitative des ressources en eaux dans la plaine Sidi Bouzid (Tunisie centrale)	109
Jawadi Issam (<i>Université de Tunis El Manar – INRGREF- Tunisie</i>), Gaaloul Noureddine	
Modeling seawater intrusion and groundwater flow pollution	116
Gaaloul Noureddine (<i>University of Carthage – INRGREF - Tunisie</i>), Saeid Eslamian	
Study of sunlight degradation of methyl orange in wastewater using the CuCrO ₂ / TiO ₂ heterosystem	140
Laouici Rima (<i>Université of MSBY Jijel – Algeria</i>), Souaad. Douafer, Hicham. Lahmar, Messaoud. Benamira, Khalid. Telmani, Imen. Bouatam	

Acceptabilité sociale d'un système décentralisé d'approvisionnement en eau potable : le cas d'étude des Associations d'Usagers de Réseaux d'Eau Potable (ASUREP) à Kinshasa, République Démocratique du Congo

Hippolyte Ditona Tsumbu¹, David Cammaerts¹, Ignace Adant², Raoul Sambieni Kouagou³, Francis Lelo Nzuzi⁴, Jean-François Delège¹

¹ Unité PeGire – Aquapôle, UR FOCUS – Université de Liège, 4000 Liège, Belgique,

² Earth & Life Institute. Université Catholique de Louvain, 1348 Louvain-la-Neuve Belgique,

³ -PACODEL –Plateforme Afrique Centrale de l'Université de Liège, ERAIFT-UNIKIN, Kinshasa/Lemba, R.D. Congo,

⁴ École Régionale d'Aménagement et de Gestion Intégrés des Forêts et Territoires Tropicaux- Université de Kinshasa R.D. Congo,

RÉSUMÉ

Dans les grandes agglomérations de la République Démocratique du Congo (RDC), et en particulier à Kinshasa, l'extension du tissu urbain et périurbain ne s'est pas accompagné d'un développement adéquat des infrastructures de distribution d'eau, ce qui se traduit par des contraintes importantes dans l'accès à l'eau potable. Confrontée à des difficultés structurelles majeures, la RDC tente de répondre par différentes approches à ce défi. Parmi ces approches, le modèle ASUREP, constitué par des associations de citoyens gérant de manière autonome des réseaux d'eau potable, apparaît de plus en plus comme l'élément moteur de la mise en œuvre opérationnelle d'une logique de décentralisation de l'approvisionnement en eau potable. Cependant, des interrogations sont nées pour questionner l'efficacité et l'acceptabilité sociale des ASUREP, notamment face à la diversité des contextes socio-économiques dans lesquels ce modèle est implémenté. En 2019, un questionnaire d'enquête a été soumis à 535 ménages dans les quartiers périurbains de Kinshasa afin de récolter des informations sur l'acceptabilité sociale des ASUREP qui desservent des quartiers en eau potable. Nos résultats montrent que le modèle est globalement bien accepté. 85 % des répondants acceptent de payer le tarif pratiqué par les ASUREP. Ils valident ainsi le principe du consommateur-payeur qui fonde le modèle économique des ASUREP. Cette acceptabilité économique est cependant variable d'un quartier à l'autre. Les dépenses pour l'eau potable semblent soutenables même pour les ménages à revenus modestes, ne dépassant pas 10 % des dépenses journalières. Les mini-réseaux gérés par les ASUREP ont considérablement amélioré l'accès à l'eau potable dans les quartiers périurbains, en réduisant la pénibilité de la corvée de l'eau et en incitant de nombreux consommateurs à délaisser les sources d'eau non aménagées. On note cependant des tensions sociales récurrentes aux bornes-fontaines. C'est dans le domaine de la communication vis-à-vis de leurs bénéficiaires que les ASUREP montrent leurs plus grosses lacunes, avec une majorité de consommateurs qui se déclarent mal informés par les structures de gestion des ASUREP. Le sentiment général des bénéficiaires semble être celui d'une opacité de fonctionnement des ASUREP, puisque seulement 55 % des ménages interrogés déclarent avoir eu accès à des informations sur le fonctionnement de l'ASUREP dont ils sont membres. Nos résultats soutiennent l'hypothèse selon laquelle les ASUREP constituent un modèle pertinent, en termes économiques et sociaux, pour favoriser l'accès à l'eau dans les quartiers périurbains de Kinshasa. Des recherches complémentaires sont cependant nécessaires pour mieux comprendre les forces et les faiblesses de ce modèle afin d'en améliorer l'acceptabilité sociale et la légitimité vis-à-vis des bénéficiaires.

Mots clés : ASUREP, Acceptabilité sociale, Systèmes décentralisés, Réseau autonome, Approvisionnement en eau potable

Social acceptability of a decentralized drinking water supply system: the study case of the Associations d'Usagers de Réseaux d'Eau Potable (ASUREP) in Kinshasa, Democratic Republic of Congo

Abstract

In the large conurbations of the Democratic Republic of Congo (DRC), and in particular Kinshasa, the expansion of the urban and periurban areas has not been accompanied by adequate development of water distribution infrastructure, resulting in significant constraints in access to safe drinking water. Facing major structural difficulties, the DRC is trying to respond with different approaches to this challenge. Among these approaches, the ASUREP model, made up of citizens' associations managing in an autonomous way drinking water systems, increasingly appears to be the driving force behind an operational implementation of a decentralized approach to drinking water supply. However, questions have arisen to question the efficiency and social acceptability of the ASUREP, particularly in the face of the diversity of socio-economic contexts in which this model is implemented. In 2019, a survey questionnaire was submitted to 535 households in the periurban neighbourhoods of Kinshasa in order to collect information on the social acceptability of the ASUREP that serve these neighbourhoods with drinking water. Our results show that the model is generally well accepted. 85% of respondents agree to pay the ASUREP rate. They thus validate the consumer-payer principle which underpins the economic model of the ASUREP. However, this economic acceptability varies from one neighbourhood to another. Expenditure on drinking water seems sustainable even for low-income households, not exceeding 10% of daily expenditure. The water networks managed by the ASUREP have significantly improved access to drinking water in periurban neighbourhoods, reducing the burden of drinking water and encouraging many consumers to move away from unprotected water sources. There are, however, recurring social tensions at drinking fountains. It is in the field of communication with their beneficiaries that the ASUREP shows their biggest shortcomings, with a majority of consumers reporting that they are poorly informed by the ASUREP management structures. The general feeling of the beneficiaries seems to be that the ASUREP did not operate in a transparent manner, since only 55% of the households surveyed reported having access to information on the operations of the ASUREP of which they are members. Our results support the hypothesis that the ASUREP are a relevant model, in economic and social terms, for promoting access to water in the periurban neighbourhoods of Kinshasa. However, further research is needed to better understand the strengths and weaknesses of this model in order to improve its social acceptability and legitimacy towards beneficiaries.

Keywords: ASUREP, Social acceptability, Decentralized systems, Autonomous network, Drinking water supply

¹ Corresponding author: hyppoliteditona@gmail.com

INTRODUCTION

La République Démocratique du Congo (RDC) n'échappe pas aux dysfonctionnements observés dans d'autres pays en développement en ce qui concerne à l'accès à l'eau potable, à l'assainissement et à l'hygiène. Bien qu'elle soit traversée par le second fleuve du monde en termes de débit, irriguée par un grand nombre de rivières et soumise à une pluviosité abondante, ses habitants ne disposent pas d'un accès aisé à l'eau potable [1]. Au-delà d'une situation marquée par des années de sous-investissements et par une succession presque ininterrompue de guerres entre plusieurs états sur son territoire entre 1997 et 2006, Trefon et De Putter [2] soutiennent que les difficultés d'accès à l'eau potable en RDC résultent aussi d'une mauvaise gestion étatique et d'un sous-investissement chronique. En outre, l'urbanisation, en raison entre autres d'une croissance démographique très rapide [3, 4], ne s'est pas accompagné systématiquement d'un développement adéquat des infrastructures de base [4, 5]. La situation de l'accès à l'eau potable s'est dramatiquement dégradée au cours de la première décennie du XXI^{ème} siècle dans les quartiers périurbains des grandes agglomérations du pays et notamment dans la capitale, la Ville-province de Kinshasa. En 2016, cette mégapole comptait 12 millions d'habitants. Elle pourrait être, en 2030, la plus grande ville d'Afrique Centrale avec 24 millions d'habitants [3, 4]. Les faibles investissements consentis par le gouvernement central et par le gouvernement provincial pour la création d'infrastructures de distribution d'eau n'ont pas pu suivre l'explosion démographique de la population de la ville. Comme pour d'autres grandes villes africaines, les quartiers périurbains de Kinshasa se sont formés sans planification urbanistique et sans tenir compte des contraintes topographiques pesant sur le développement des infrastructures des réseaux de distribution d'eau potable [6 – 9]. Le risque, comme le souligne une étude récente de la Banque Mondiale [10], est que Kinshasa devienne le plus grand bidonville d'Afrique centrale si rien n'est fait pour améliorer l'accès à l'eau potable et à l'assainissement dans les quartiers périphériques.

Pour répondre au défi considérable que représente l'approvisionnement en eau potable (AEP) dans ces quartiers périurbains, un modèle de gestion communautaire professionnelle a vu le jour à partir de 2005 : les Associations d'Usagers de Réseaux d'Eau Potable (ASUREP), qui sont des associations de quartiers qui gèrent de manière autonome des mini-réseaux d'adduction d'eau (voir la section matériel & méthode pour une description des ASUREP). Eijkelenburg et Vanderstichele [11] estiment que cette formule de gestion communautaire apporte des résultats encourageants dans la plupart des interventions dans les villes africaines. Par ailleurs, Baron et Bonnassieux [12] indiquent que ce type de modèle de gestion communautaire a eu du succès au Burkina Faso comme dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest. Les auteurs suggèrent que ce type de gestion communautaire soit préconisé et diffusé à l'échelle internationale au cours des prochaines décennies, en occurrence dans les grandes agglomérations des pays africains.

Par ailleurs, la gestion de ces réseaux autonomes est détachée de la gestion étatique, mais ils s'inscrivent dans la loi-cadre sur l'eau promulguée en 2015. A ce sujet, une série d'accords a été signée avec les pouvoirs publics, notamment sur la non-concurrence avec le réseau public de distribution d'eau, lequel est mis en œuvre par la régie nationale, la REGIDESO [13, 14], dont l'image n'est pas bonne auprès des populations, qui lui reprochent népotisme et corruption [2, 14]. Ainsi, à Kinshasa, les réseaux autonomes construits lors du projet PILAEP I ou dans le cadre du Programme de la Facilité pour l'Eau de l'Union Européenne (Programme Water Facility) desservent les zones non couvertes par le réseau public [15]. Développées à l'origine par une ONG congolaise (ADIR, Action pour le Développement des Infrastructures en milieu Rural), les ASUREP ont ensuite été soutenues par plusieurs bailleurs de fonds et agences internationales de coopération¹. L'approche ASUREP de l'AEP a été mise en œuvre dans les quartiers périurbains de plusieurs grandes agglomérations de la RDC. Depuis 2014, à Kinshasa, 28 mini-réseaux ASUREP sont en service et desservent plus de 600.000 personnes. D'ici fin 2020, 26 nouveaux mini-réseaux permettront à environ 400.000 personnes d'avoir un accès à l'eau potable [16 - 18]. A cela s'ajouteront 11 mini-réseaux à Mbuji-Mayi, 6 mini-réseaux à Kindu et 8 mini-réseaux au Sud-Kivu. Ensemble, ces réseaux alimenteront 140 000 personnes [19].

Malgré un bilan technique globalement positif [19 – 21], des interrogations subsistent sur l'acceptabilité sociale de la population bénéficiaire vis-à-vis de ces associations, notamment face à la diversité des contextes socio-économiques dans lesquels ces dernières sont implantées [21]. L'acceptabilité sociale d'un projet est la capacité d'une population donnée à intégrer socialement toutes les composantes qui régissent ce projet [22]. Elle traduit un jugement collectif à propos d'une politique ou d'un projet, dont il s'agit de comprendre les fondements et les facteurs d'influence [23, 24]. Dans le cas d'une activité économique, cette acceptabilité sociale se traduit pour l'entreprise (publique ou privée) qui commercialise un bien ou un service par l'exposition à un risque de contestabilité sociale de la part des consommateurs [25, 26]. Cette contestabilité sociale peut prendre la forme d'une contestation vis-à-vis des prix (contestation économique), du fonctionnement de l'entreprise (contestabilité technique) ou encore vis-à-vis de la légitimité et/ou de la gouvernance de l'opérateur économique (contestabilité sociologique ou institutionnelle, selon qu'elle provienne des bénéficiaires ou du contexte institutionnel) [27]. Boutillier et Thomson (2011), cité par Raufflet [28], avancent que

¹. L'Union Européenne (programme Water Facility) ; La Belgique, via l'Agence de Coopération Technique Belge (CTB) ; La France, via l'Agence Française de Développement (AFD) ; l'Allemagne, via la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) et l'Angleterre via le Department for International Development (DfID)

l'acceptabilité sociale comporte quatre niveaux : (i) le rejet, c'est-à-dire que les activités économiques sont perçues comme non légitimes ; (ii) la tolérance, les communautés locales approuvant l'activité, sans plus ; (iii) l'appropriation, la communauté considérant l'entreprise comme un bon voisin et enfin (iv) la co-appropriation. À ce dernier niveau, l'entreprise bénéficie de l'appui complet de la communauté locale. La question de l'acceptabilité sociale, lorsqu'elle s'applique à la thématique de l'approvisionnement en eau potable, est une notion complexe et difficile à appréhender. Elle fait intervenir des aspects liés à la sociologie, à l'économie, à la technique et à la gouvernance.

Dans le cas des ASUREP, et même si ce modèle semble pertinent en théorie pour répondre aux défis de l'approvisionnement en eau potable dans les quartiers périurbains [18, 20, 29], il est important de pouvoir valider scientifiquement sa pertinence socio-économique dans un contexte spécifique et d'identifier les facteurs qui conditionnent son acceptabilité sociale. En effet, si les premiers résultats engrangés par ce système décentralisé d'AEP sont très encourageants [18 – 20, 30], il est important de mieux comprendre les risques de contestabilité sociale auxquels s'exposent les ASUREP afin de renforcer ces structures et d'en faire des auxiliaires efficaces de l'action publique. Parmi les nombreuses questions posées dans le cadre de cette réflexion, on retrouve les interrogations suivantes : les gens acceptent-ils les ASUREP ? Sont-ils d'accord pour payer le prix demandé ? Les ASUREP rencontrent-elles des problèmes d'organisation pratique dans l'approvisionnement aux bornes-fontaines ? La population a-t-elle un accès aux informations relatives au fonctionnement des ASUREP ? Les bénéficiaires sont-ils satisfaits de la communication avec l'équipe de gestion ? La littérature à notre disposition [13 – 15, 17, 1, 21, 31 – 36], surtout constituée de littérature « grise » peu encline à remettre fondamentalement en question la logique qui sous-tend la mise en œuvre des ASUREP, ne répond que très partiellement à ces questions et chaque tentative d'y apporter des réponses soulève de nouvelles questions. Nous avons donc souhaité apporter quelques éléments de réponses aux questions pré-citées en nous basant sur une enquête auprès des ménages bénéficiaires du service délivré par les ASUREP dans les quartiers périphériques de Kinshasa. Nous présentons ici les résultats d'une analyse de l'acceptabilité sociale du modèle ASUREP, considérée principalement sous l'angle de l'acceptabilité économique.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le cadre géographique de l'étude

Les quartiers périphériques de Kinshasa présentent des caractéristiques, en matière d'aménagements, d'infrastructures et d'habitats, qui les classent dans la catégorie des territoires périurbains [37]. Ces quartiers périphériques sont parfois constitués par des zones d'habitation implantées de manière irrégulière et/ou illégale [38]. Ils sont souvent dépourvus des services de base tels que l'accès à l'eau potable, l'éclairage public, l'assainissement et les infrastructures de transport. Et dans la plupart de cas, ce sont les secteurs informels (privés et collectifs) qui sont actifs dans la fourniture des services de base à la population. Ces territoires périurbains ont pendant longtemps été délaissés par les politiques publiques en matière de services de base et d'infrastructures, notamment en eau potable et en électricité [8].

Les ASUREP

Les ASUREP gèrent une infrastructure de distribution d'eau potable, construite sous la forme d'un mini-réseau et alimentée par un forage profond (Figure 1) ou une source captée. Un réservoir d'eau désert par écoulement gravitaire des bornes-fontaines à deux ou quatre robinets.

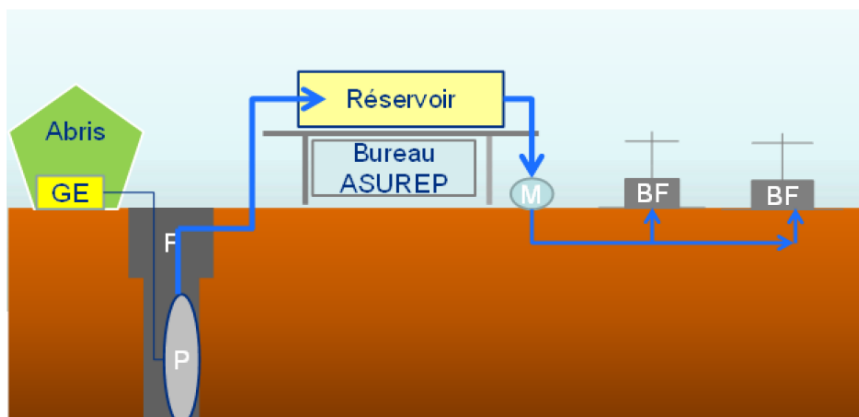


Figure 1 : Schéma de l'organisation technique d'un mini-réseau d'adduction d'eau potable de type ASUREP. Modifié d'après Mac Donald [39]

La gouvernance locale est au cœur du fonctionnement des ASUREP (Figure 2). La population du quartier (= les usagers) choisit en son sein des représentants, lesquels vont constituer une assemblée générale. Ces représentants vont, à leur tour, élire les membres d'un conseil d'administration qui gère l'ASUREP. Le conseil d'administration recrute par contrat les membres de l'unité de gestion, qui sera en charge de la gestion journalière du réseau d'eau. La population s'approvisionne en eau à des bornes-fontaines, en payant pour ce service, à un prix qui est fixé par l'assemblée générale². Les recettes de la vente de l'eau permettent théoriquement d'assurer un recouvrement complet de coûts³ et les bénéfices dégagés par l'exploitation du réseau sont réinvestis dans les activités sociales⁴ du quartier ou dans l'extension du réseau. Le modèle ASUREP constitue ainsi une approche décentralisée du service d'approvisionnement en eau potable, basé sur les modèles économiques du coût-vérité de l'eau et de l'utilisateur-payeur.

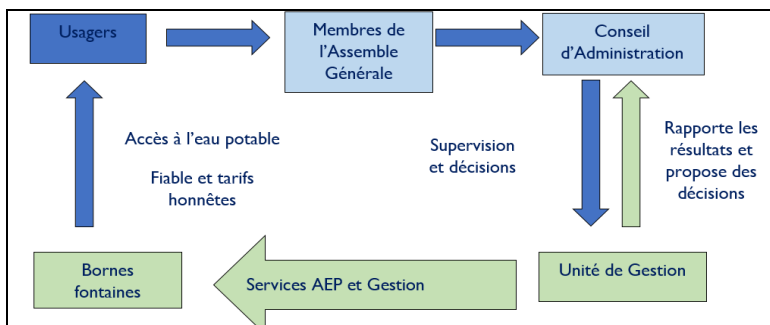


Figure 2 : Gouvernance et structuration organisationnelle d'une ASUREP

Méthode

Pour compléter les éléments de réponse disponibles dans la littérature, nous avons procédé à l'organisation d'une série d'enquêtes et d'entretiens dans les quartiers périphériques de Kinshasa. Ces enquêtes ont, entre autres sujets, abordé les thématiques de la capacité économique réelle des populations à payer le prix demandé par les ASUREP, l'acceptabilité économique du modèle ASUREP et la perception par les bénéficiaires de la qualité du service délivré.

Les données exploitées dans le présent travail ont été collectées au moyen d'une enquête réalisée en juillet 2019, consistant en des entretiens auprès des ménages, à travers un questionnaire subdivisé en plusieurs thématiques : sociologie, économie, technique et gouvernance. Un cadre d'analyse, intégrant la notion d'acceptabilité sociale des ASUREP a été conçu (Figure 3). 535 ménages ont été interrogés. L'effectif de cet échantillon a été déterminé suivant la formule de Bernoulli, en tenant compte d'un effet (f) de grappe variant de 1 à 2 : $n = Z^2 * p * (1-p) * f / d$ [40, 41]. Les ménages enquêtés sont desservis par 13 ASUREP, lesquelles sont situées dans trois communes périphériques de Kinshasa, à savoir Kisenso, Kimbanseke et N'Sele (Figure 4 et tableau I). Ces communes abritent 27 des 28 sites d'ASUREP fonctionnels en 2019. Préférentiellement, les enquêteurs se sont adressés à la cheffe de ménage, parfois en présence de son mari. Dans les ménages où il n'y avait pas de maîtresse de maison - maîtresse absente, célibataire, divorcé ou veuf - c'est l'homme qui a été interrogé. Les enquêteurs ont travaillé en binôme. Pendant que l'un administrait le questionnaire, l'autre enquêteur se chargeait de prendre note des réponses. Ces rôles étaient interchangeables après deux entretiens. Un entretien dure entre 30 et 40 minutes. Chaque équipe séjournait pendant au moins une journée dans chaque quartier pour administrer le questionnaire et effectuer des observations. Le chercheur responsable de la présente étude veillait au bon déroulement de l'enquête et à la résolution de certaines difficultés, notamment les contacts entre les enquêteurs et les responsables du quartier. Une séance de formation des enquêteurs a eu lieu avant le début du travail de terrain.

². Notons qu'à Kinshasa le prix du bidon de 25 litres d'eau a été fixé à 100 francs congolais et ce, pour toutes les ASUREP de la ville-Province, suite au lobbying de la Fédération des ASUREP de Kinshasa, la FEDASU, structure coudoyée qui encadre les ASUREP de Kinshasa.

³. Frais d'entretien du réseau, paiement des fontainiers et des membres de l'unité de gestion.

⁴. Construction de salles polyvalentes, Cyber-Café, toilettes publiques, actions de sensibilisation à l'hygiène.

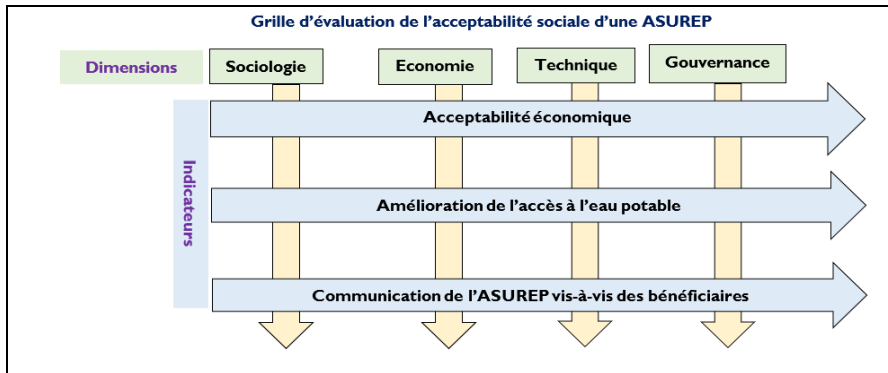


Figure 3 : Cadre d'analyse de l'acceptabilité sociale d'une ASUREP

L'acceptabilité sociale des ASUREP a été étudiée au moyen d'une grille d'analyse structurée sur quatre dimensions et sur la base d'une série d'indicateurs (figure 3). Les données recueillies sur des formulaires papiers ont été saisies dans le logiciel SPSS, puis importée dans le logiciel R (version 3.6.0) pour analyse. Signalons ici que les personnes enquêtées n'ont pas fournies de réponses à toutes les questions posées, d'où un effectif global de l'échantillon de 535 personnes ($n = 535$) mais un sous-échantillon variable par question analysée ($13 \leq n \leq 535$).

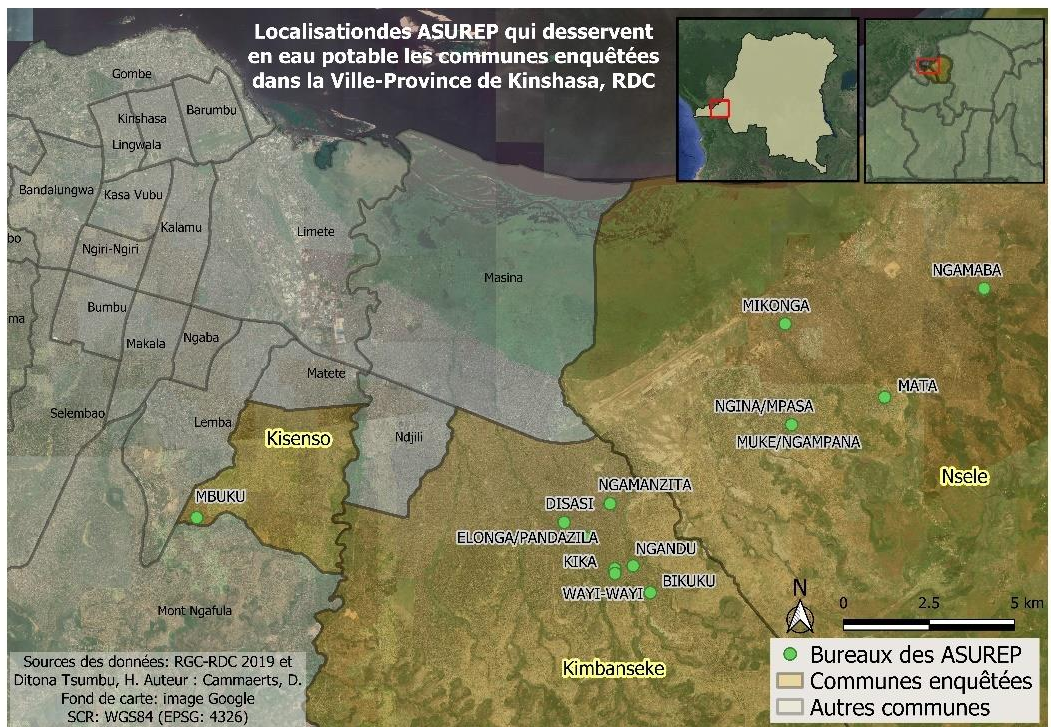


Figure 4 : Carte de la situation géographique des trois communes périphériques concernées par la présente étude (Kinshasa/RDC)

Tableau 1 : Position géographique des 13 ASUREP visitées dans l'Est de Kinshasa

Commune	Nom du/des quartier (s) desservis	Nom de l'ASUREP	Position géographique du bureau de l'ASUREP		Nombre de bénéficiaire	Nombre de bornes-fontaines	Année de mise en service
			Latitude	Longitude			
Kisenso	Mbuku	Mbuku	-4,42551	15,323283	26.000	18	2012
Kimbanseke	Disasi	Disasi	-4,42677	15,42406	27.670	11	2010
Kimbanseke	Bikuku	Bikuku	- 4,44523	15,44081	20.069	12	2012
Kimbanseke	Elonga	Elonga	- 4,43093	15,42406	16.885	11	2012
Kimbanseke	Kika	Kika	- 4,43896	15,43145	18.702	18	2012
Kimbanseke	Ngamanzita	Ngamanzita	- 4,25307	15,25787	30.000	21	2012
Kimbanseke	Ngandu	Ngandu	- 4,43818	15,43628	20.069	8	2012
Kimbanseke	Way-Way	Way-Way	- 4,4402	15,4315	13.438	16	2012
N'Sele	Mata	Mata	- 4,3938	15,25787	50.000	33	2013
N'Sele	Mikonga	Mikonga	- 4,37451	15,4763	34.000	50	2010
N'Sele	Muke	Muke	- 4,40107	15,47798	45.950	41	2010
N'Sele	Ngamaba	Ngamaba	- 4,3652	15,52865	9.700	9	2018
N'Sele	Ngina et Mpasa	Ngina et Mpasa	- 4,40107	15,25787	40.000	41	2009

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Acceptabilité économique

L'enquête réalisée auprès des ménages fait état de l'acceptabilité globale par les répondants du principe de consommateur-payeur qui constitue le fondement du modèle économique des ASUREP. 85% des répondants ($n = 498$, $p < 10^{-12}$, IC : 76,5% - 91,3%) sont d'accord de payer le prix demandé par l'ASUREP pour un bidon d'eau de 25 litres (100 Francs congolais), quelle que soit leur relation avec l'équipe de gestion. En cas de refus de paiement, les déclarants mettent surtout en avant une raison liée au manque de revenus journaliers (94,6 % des répondants ; $n = 74$), et non la légitimité des ASUREP en tant que structure alternative du service de l'eau potable (5,4 % des répondants). Malgré le fait que ce service s'adresse à des populations à revenus modestes, le prix de l'eau (100 francs congolais pour un bidon de 25 litres) ne semble donc pas constituer un facteur majeur de la contestabilité sociale de ces ASUREP. Nos résultats suggèrent également que les dépenses journalières familiales pour l'eau potable sont inférieures à 10 % des revenus journaliers ($n = 188$, moyenne et médiane des dépenses journalières relatives à l'eau potable respectivement égales à 8,3 % et 7,5 % des dépenses journalières). Les données tirées des études du rapport des Nations Unies [42] portant sur la volonté de payer soulignent que les ménages sont souvent disposés à payer beaucoup plus cher que les tarifs en vigueur s'ils se voient garantir un niveau d'approvisionnement adapté à leurs attentes : « Certains ménages sont prêts à payer plus de 3 à 5 % de leur revenu mensuel pour un service public, tandis que d'autres refuseraient de payer autant ». Dans le cas des ménages enquêtés, cette charge économique semble soutenable selon les déclarants. Notons cependant que cette acceptabilité économique, considérée sous l'angle de l'acceptation des bénéficiaires à payer les montants exigés par les ASUREP, est variable d'un quartier à l'autre ($\chi^2 = 54.545$, $df = 12$, $p = 2.183^{*07}$). L'analyse de cette variabilité dépasse les ambitions de la présente étude, car de nombreux facteurs peuvent influencer cette acceptabilité économique. Entre autres, l'acceptabilité sociale étant lié à un processus de construction sociale, on peut s'attendre à des situations différentes dans une ASUREP venant d'être créée et dans une ASUREP de près de 10 ans d'âge. Cette variabilité se traduit aussi dans les dépenses journalières des ménages. À la question des dépenses effectuées la veille de l'application du questionnaire, les ménages interrogés ont mentionnés des montants très variables d'une famille à l'autre ($n = 527$; moyenne = 8803 francs congolais (FC) ; médiane = 8000 FC ; écart-type = 4801,5 FC). Notons également qu'aucune relation statistiquement significative n'a été détectée entre un proxy du revenu familial, à savoir le type d'habitation occupé par le ménage, et le montant maximum théorique considéré comme acceptable pour le paiement d'un bidon de 25 litres (test χ^2 non significatif). Ces résultats conduisent à une interprétation proche de ceux de l'étude réalisée à Conakry (Guinée), Mopti (Mali), Bangui (République Centrafricaine) et Port au Prince (Haïti) dans des quartiers défavorisés [43]. Cette étude a montré que les populations de ces quartiers sont disposées à payer des sommes proportionnellement élevées par rapport à leur niveau de revenu pour obtenir la garantie d'un service de qualité ou plus fiable. Barrau (2007), cité par Koukougnon [44], suggère que, dans les quartiers défavorisés, des arrangements institutionnels permettent aux habitants d'accéder à l'eau moyennant un abandon de la revendication pour la gratuité de l'eau. Barrau illustre cela avec le système de distribution d'eau potable par des bornes-fontaines publiques payantes, tel qu'il est pratiqué en Afrique du Sud, en Haïti, en Colombie (Carthagène), en Chili et en Argentine [43, 45].

Amélioration de l'accès à l'eau potable

Au-delà de l'acceptabilité économique des ASUREP, et donc de la validation du modèle économique de l'utilisateur-payeur dans le contexte socio-économique spécifique des quartiers périphériques de Kinshasa, que peut-on dire des changements induits dans les habitudes des consommateurs par l'introduction de ces structures ? Notre enquête montre que l'introduction du concept technique des mini-réseaux dans le cadre géographique des quartiers périurbains de Kinshasa a conduit à un changement d'habitude dans les choix des points d'eau pour les divers usages de l'eau de la part des consommateurs. Ainsi, 77 % ($n = 535$, IC : 73,4 % - 80,6%) des consommateurs déclarent avoir abandonné les sources non aménagées au profit des bornes-fontaines des différents types de mini-réseaux, dont celles des ASUREP (55 % des déclarants) pour subvenir à leur consommation en eau de boisson et de cuisine. Il est donc indéniable que les ASUREP ont permis de sécuriser l'approvisionnement en eau de boisson et de cuisine des habitants de ces quartiers périphériques. Ce succès est à rapprocher des résultats engrangés par les structures dénommées ASUFOR (Associations d'Usagers de Forages) au Sénégal, qui s'apparentent aux ASUREP dans leur terminologie et leur fonctionnement. Ces associations ont fait preuve de réussite en matière d'amélioration de l'accès à l'eau : 64% d'accès à l'eau potable ont été enregistrés en 2004 contre 84,1% en 2013 [46].

Concernant la pénibilité de la corvée de l'eau, les ASUREP ont atteint, au moins en partie, l'objectif de desservir la population par un service de proximité (temps d'approvisionnement réduit) puisque notre enquête a montré que le temps consacré à la corvée de l'eau est inférieur à 15 minutes pour 70 % des déclarants. Cette durée correspond aux recommandations formulées par l'OMS en matière d'amélioration de l'accès à l'eau potable [47]. Cependant, l'organisation pratique de l'approvisionnement aux bornes-fontaines semble constituer un sujet de tension importante avec les comités de gestion des ASUREP, puisque 55 % ($n = 435$, IC : 50,8 % - 59,2%) des déclarants signalent une « mauvaise ambiance » aux bornes-fontaines, ce qui est un euphémisme pour signaler des agressions verbales, voire physiques. Cette « tension » sociale lors de la corvée de l'eau serait davantage liée à l'organisation du service qu'à un défaut de livraison, car toutes les ASUREP étudiées sont en mesure de fournir plus de 25 litres d'eau/jour*personne (n

= 13), volume qui est supérieur à celui prévu dans le dimensionnement initial de ces systèmes (20 litres d'eau/jour*personne). Enfin, le modèle économique des ASUREP est tributaire des variations des volumes d'achats de la part des consommateurs, volumes qui semblent dépendre fortement de la saisonnalité des pluies. Une analyse portant sur les achats d'eau en saison sèche et en saison des pluies, durant laquelle les ménages stockent l'eau de pluie pour certains usages domestiques, montre une baisse significative des achats en saison des pluies (test T bivarié, $df = 942$, $p < 2.2 \cdot 10^{-16}$), ce qui affecte d'autant les recettes des ASUREP.

Communication de l'ASUREP vis-à-vis des bénéficiaires

Enfin, un autre élément important que l'étude a pu approcher concerne la perception que les bénéficiaires ont de la communication avec l'équipe de gestion ou les organes de gouvernance de l'ASUREP. Cette thématique a été abordée sous le prisme de l'accès à l'information et de la perception de la qualité de cette information. Le principal enseignement de notre enquête est la perception par les bénéficiaires d'une opacité de fonctionnement des ASUREP. En effet, seulement 55,5 % des personnes interrogées déclarent avoir accès à des informations relatives au fonctionnement de l'ASUREP dont elles dépendent ($n = 535$, test binomial, $p = 0.012$, IC : 51.2% - 59.8%). Parmi les personnes interrogées, 24,7 % ($n = 470$) déclarent par ailleurs n'avoir aucune idée de l'utilisation que le comité de gestion de l'ASUREP fait des recettes provenant de la vente de l'eau. La perception générale que les bénéficiaires ont de la qualité de l'information reçue de la part des gestionnaires des ASUREP est plutôt négative, puisque seul 37 % ($n = 428$) des répondants se déclarent « assez bien ou très bien informés » sur la gestion du mini-réseau. Enfin, il convient de souligner que l'enquête n'a pas porté sur les connaissances précises des bénéficiaires quant à la gestion du mini-réseau par le comité de gestion. Des sujets comme la connaissance chez les personnes interrogées des détails du calcul du coût-vérité de l'eau ou de la marge bénéficiaire n'ont donc pas été abordés au cours de l'enquête.

Discussion générale

De façon assez étonnante, la perception, plutôt négative, des bénéficiaires vis-à-vis de l'accès à l'information relative au fonctionnement des ASUREP et vis-à-vis de la qualité de cette information, ne reflète donc pas l'acceptabilité économique des ASUREP, globalement élevée (85%). Cela conduit à un constat interpellant. L'entreprise publique de distribution d'eau, la REGIDESO, étant dans l'incapacité de délivrer ses services dans les quartiers périurbains de Kinshasa et l'eau potable étant une ressource de première nécessité dont l'utilisateur ne peut décider de se passer, les ASUREP de Kinshasa se retrouvent, de fait, en situation de monopole dans les quartiers qu'elles desservent. Les ASUREP ont peu ou pas de concurrence directe dans leur zone de chalandise, et ne sont pas en concurrence économique entre elles du fait de l'imposition par la FEDASU d'un tarif unique. Par conséquent, les ASUREP de Kinshasa sont susceptibles de maintenir certains usagers qui n'ont qu'un seul fournisseur en eau de boisson et de cuisine captif d'un marché de l'eau dont l'échelle spatiale est celle de la commune ou du quartier. On observe donc une situation paradoxale dans laquelle des structures, nées en réaction au monopole d'état de la REGIDESO et à l'incapacité technique de cette dernière d'assurer un service minimum dans les quartiers périurbains, constituent à leur tour des structures monopolistiques locales, d'ailleurs parfois confrontées à des difficultés techniques telles que la qualité de leurs services en est fortement réduite. Ce paradoxe s'explique en partie par l'étalement urbain dans ces quartiers périphériques, qui limite la compétition spatiale entre les réseaux de distribution des ASUREP, et par la nature non substituable de l'eau potable. Un fournisseur de service ou de biens de première nécessité, quelle que soit sa véritable légitimité sociale ou économique et son efficacité technique, se trouve en effet légitimé dans son action dès lors qu'une communauté considère que ce bien ou ce service possède une valeur d'usage si élevée que les usagers ne peuvent réellement choisir d'y renoncer [48]. Ce type de justifications trouve pleinement son sens pour les services d'approvisionnement en eau et pour les ASUREP. D'après Mayaux [48], pour les biens ou ressources non substituables, la valeur d'usage ne peut être adéquatement reflétée par une valeur d'échange. Appliquée aux ASUREP, cette logique entraîne de facto une diminution de l'exposition à un risque de contestabilité sociale et une acceptabilité économique accrue. Cette situation de monopole pose la question de la véritable appropriation du modèle ASUREP par les bénéficiaires, au-delà d'une acceptabilité sociale et économique conditionnée par la nature même du service fourni et par la situation de monopole local des ASUREP dans les quartiers desservis.

La fixation d'un prix fixe pour la vente de l'eau au volume par un acteur extérieur à la communauté (la Fédération des ASUREP de Kinshasa, FEDASU) et l'opacité de décision des ASUREP pourraient constituer des freins importants à l'appropriation du modèle par les bénéficiaires et, partant, fragiliser ce modèle. En effet, l'acceptabilité sociale décrit une situation susceptible d'être modifiée suivant les circonstances socio-économiques, tandis que l'appropriation relève davantage du sentiment personnel et est peut-être moins susceptible de disparaître en cas de difficultés économiques. En outre, pour améliorer la qualité de leur service, c'est-à-dire améliorer la disponibilité spatiale de l'eau (proximité des bornes-fontaines vis-à-vis des ménages) et la disponibilité temporelle (accès toute la journée à la borne-fontaine), les ASUREP doivent, de façon concertée, adapter la technologie de mobilisation de l'eau à la taille de la population desservie. Sans cela, les tensions sociales récurrentes observées aux bornes-fontaines pourraient dégénérer en conflits ouverts et remettre en question non seulement l'acceptabilité sociale du modèle mais peut-être même sa légitimité.

L'introduction d'un tel système dans un contexte socio-économique donné et son acceptabilité sociale, préalable nécessaire à son appropriation par les bénéficiaires, ne vont pas de soi. En effet, la mise en place d'un réseau d'eau à

gestion autonome basé sur le principe du consommateur-payeur (paiement au service) implique de convaincre la population de la nécessité de faire évoluer sa perception des services d'eau d'un droit socio-politique inconditionnel vers un service économique conditionné à une certaine solvabilité. Il est donc important pour les ASUREP que leur image, et le service qu'elles apportent, soient appréciés par les usagers de façon positive. Le contraire mettrait à mal la légitimité de cette approche décentralisée du service de l'eau potable. Dans le cas étudié ici, l'acceptabilité sociale des ASUREP n'a pas été obtenue par des stratégies délibérées de légitimation. Ce constat n'implique pas que les ASUREP n'auraient jamais pu acquérir une telle légitimité par elles-mêmes. Elles ont au contraire montré leur capacité à s'ajuster aux contraintes socio-économiques et techniques locales (nombre de consommateurs très élevé à certaines bornes-fontaines, pressions sociales sur les gestionnaires du mini-réseau). Elles ont aussi fait la preuve, pour certaines, de leur efficacité technique, parfois tout à fait remarquable, même si la mesure de cette efficacité doit prendre en compte la croissance démographique des quartiers périurbains et se marque par une variabilité très élevée entre ASUREP [21]. Au final, même si l'acceptabilité économique à payer l'eau auprès des ASUREP de Kinshasa est globalement soutenue par la population bénéficiaire, et si l'on tient compte du caractère de monopole local des ASUREP, les facteurs principaux de contestabilité de ces structures semblent se situer dans la perception par les bénéficiaires de la qualité du service proposé par l'ASUREP et dans la perception de la légitimité de l'équipe de gestion de l'ASUREP. Une telle réflexion conduit ainsi à privilégier l'analyse de la notion de légitimité par rapport à celle de l'acceptabilité.

CONCLUSION

Dans un contexte national marqué par la faiblesse structurelle du service public de l'eau, le modèle ASUREP contribue à la promotion d'une approche décentralisée, en cohérence avec les orientations politiques nationales, et à la promotion d'un service de l'eau autonome, à même de compléter les services de l'État fournis par la REGIDESO. La présente étude nous a permis d'aborder sous un angle quantitatif certains éléments-clés de l'acceptabilité sociale de ces ASUREP. Dans les quartiers périurbains de Kinshasa, ce modèle ASUREP est perçu comme (globalement) acceptable, fiable et intéressant d'un point de vue technique et organisationnel (corvée de l'eau réduite). Notre étude incite à penser que les conditions nécessaires à l'acceptabilité sociale des ASUREP dans les quartiers périurbains de Kinshasa sont donc en partie rencontrées et, par conséquent, que ce modèle d'AEP bénéficie d'un très fort potentiel pour son développement et son perfectionnement. Correctement soutenu et adapté aux spécificités socio-économiques locales, le modèle ASUREP pourrait être en mesure d'assurer une couverture satisfaisante en matière d'approvisionnement en eau potable dans les quartiers périurbains des grandes agglomérations congolaises. Dans ces quartiers caractérisés par une forte irrégularité des revenus familiaux, les ASUREP pourraient constituer des alternatives pertinentes et efficaces à la régie nationale de distribution d'eau, de par leur modèle économique basé sur le principe du consommateur-payeur au puitsage et non sur celui de la facturation mensuelle et de par leur modèle de gouvernance basé sur la représentativité locale, favorisant l'appropriation par les bénéficiaires. Les résultats présentés dans le présent travail éclairent quelque peu les enjeux liés à cette question du fonctionnement des systèmes décentralisés et autonomes d'approvisionnement en eau potable dans le contexte des quartiers périurbains d'une grande métropole de l'Afrique centrale. Des futurs travaux devront compléter cette analyse, en s'intéressant, entre autres, aux bilans comptables des ASUREP et aux structures sociales existantes dans les quartiers (associations confessionnelles, associations politiques, clans familiaux, ethniques, rôle des chefs de quartiers, des notables locaux, etc.) dont le rôle dans la construction de l'acceptabilité sociale pourrait être important. À Kinshasa, il conviendrait de se pencher sur la place tenue par la FEDASU et l'ONG ADIR dans la construction sociale des ASUREP ainsi que dans le maintien de leur pérennité. En outre, les processus d'élections locales visant à désigner les gestionnaires des ASUREP sont un facteur supplémentaire susceptible d'affecter, positivement ou négativement, la légitimité de l'équipe de gestion et, partant, de l'ASUREP. Enfin, la grille d'analyse développée pour le présent travail est potentiellement applicable dans d'autres contextes, tant dans d'autres villes de la RDC, où sont actives des ASUREP, que dans d'autres contextes péri-urbains en Afrique centrale.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les professeurs Soleil Wamuini et Grégoire Ngalumulume, ainsi que monsieur Martin Lemenager pour leurs judicieux conseils dans la préparation du manuscrit. Nous tenons également à remercier les enquêteurs pour leur travail dans l'application du questionnaire d'enquête auprès des ménages, ainsi que Martin Mathoul pour avoir soutenu notre recherche et alimenté nos réflexions quant à la place des ASUREP dans l'amélioration du bien-être des populations des quartiers périurbains de Kinshasa. Enfin, notre plus grande reconnaissance va à Jean-Luc Mouzon, qui est à l'origine de notre intérêt pour les ASUREP – oserions-nous dire notre passion ? – et dont le soutien ne s'est jamais démenti.

REFERENCES

- [1] Partow, H., 2011. Problématique de l'Eau en République Démocratique du Congo Défis et Opportunités, p 90.
- [2] Trefon Th., De Putter, T., 2017. L'eau : flux et reflux incertains, Cahiers Africains, Musée royal de l'Afrique centrale et L'Harmattan, pp 93-118.
- [3] Banque Mondiale., 2017. Democratic Republic of Congo Urbanization Review : Productive and Inclusive Cities for an Emerging Democratic Republic of Congo, In Democratic Republic of Congo Urbanization Review : Productive and Inclusive Cities for an Emerging Democratic Republic of Congo, p 97.

- [4] Commission économique pour l'Afrique, N. U., 2017. Profil de pays, République démocratique du Congo, Commission économique pour l'Afrique, Addis-Abeba, Éthiopie, p 43.
- [5] Kibayu, M., 2008. La typologie des quartiers dans l'histoire du développement de Léopoldville-Kinshasa en République Démocratique du Congo, p 70.
- [6] Lelo Nzuzi, F., 2008. Kinshasa Ville et Environnement, L'Harmattan, p 283.
- [7] I. Wagemakers, Les défis de l'intervention Programme d'aide internationale et dynamiques de gouvernance locale dans le Kinshasa périurbain, Editions Karthala, Politique africaine, 2013, N°129, pp 113-133.
- [8] J.-P. M. Tshitenge, 2015. Entre faillite de l'Etat et pauvreté périurbaine : la privatisation par le bas du réseau électrique de la SNEL dans la périphérie de la ville de Kinshasa. Territoires périurbains : développement, enjeux et perspectives dans les pays du Sud, Les Presses Agronomiques de Gembloux (ASBL), pp 205-219.
- [9] K. R. Sambieni., 2019. Dynamique du paysage de la ville province de Kinshasa sous la pression de la périurbanisation : l'infrastructure verte comme moteur d'aménagement. Thèse de doctorat, p. 295.
- [10] Banque Mondiale, Banque internationale pour la reconstruction et le développement., 2018. Revue de l'urbanisation en République Démocratique du Congo Des villes productives et inclusives pour l'émergence de la République démocratique du Congo, 1818 H Street NW, Washington, p 97.
- [11] Eijkelenburg, An., Vanderstichele, G., 2009. Enjeux et perspectives de la gestion de l'eau potable en milieu rural, Agence Technique de Coopération Belge (CTB), p 54.
- [12] Baron, C., Bonnassieux, A., 2013. Gouvernance hybride, participation et accès à l'eau potable : Le cas des associations d'usagers de l'eau (AUE) au Burkina Faso. Annales de Géographie, 123(693), pp 525-548.
- [13] AFD., 2014. République Démocratique du Congo, Un système novateur d'accès à l'eau potable à Kinshasa, AFD, Paris, p 2.
- [14] CTB., 2010. Alimentation en eau potable et assainissement des quartiers périphériques urbains et des zones rurales, p 117.
- [15] Hydroconseil., 2017. Evaluation finale Projet PILAEP I Rapport Projet d'Amélioration de l'accès à l'eau potable pour les populations des quartiers périphériques de Kinshasa et de trois communes du Bas Congo, p 104.
- [16] Comité Technique de Réformes (CTR)/RDC, Institut de Recherche pour le Développement France (IRD), Développement Institutions, Mondiale (dial), Institut National de Statistiques (INS/RDC), A. F. de D. (AFD)., 2019. Rapport d'analyse de l'enquête Eau Assainissement et Conditions de Vies I Enquête de référence pour l'évaluation d'impact du projet PILAEP 2 (Avril-Mai 2018), p 73.
- [17] Mingiedi Boaz Flore Gubert, Makabu, T., Jeba Munandi Munkunda, François Roubaud, Camille Saint-Macary, Claire Zanuso, L. M., 2020. Papier de recherche Eau, assainissement, conditions de vie au Congo Rapport d'analyse de l'enquête de référence pour l'évaluation d'impact du projet PILAEP 2, Septembre 2020, N°135, p 81.
- [18] Lemenager, M., 2014. Note de Communication sur Opération, République Démocratique du Congo. Projet de Promotion de modalités Innovantes pour L'Accès à l'Eau Potable, à l'assainissement et à l'hygiène dans certains quartiers périphériques de Kinshasa Est et Sud (PILAEP 2), AFD, Paris, pp 1-22.
- [19] Enabel., 2018. République Démocratique du Congo, Programme Eau PROGEAU Marché de services pour la réalisation d'une étude Baseline, Rapport enquête socio-économique ASUREP Mbuji-Mayi, p 141.
- [20] Bedecarrats, F., Lafuente-Sampietro, O., Lemenager, M., Sowa Lokono, D., 2016. Building commons to cope with chaotic urbanization ? Performance and sustainability of decentralized water services in the outskirts of Kinshasa. Journal of hydrology, pp 1-13.
- [21] Cammaerts, D., Ditona Tsumbu, H., Mouzon, J.-L., 2019. Le rôle des associations d'usagers de réseaux d'eau potable (modèle ASUREP) dans le contexte de la GIRE congolaise, Geo-Eco-Trop : Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales, 43(3), pp 405-409.
- [22] Gendron, C., 2014. Penser l'acceptabilité sociale : au-delà de l'intérêt, les valeurs, Ethique et relations publiques : pratiques, tensions et perspectives, pp 117-129.
- [23] Bonnotte, C., 2016. De la qualité de la justice administrative ? Ecole nationale d'administration "Revue française d'administration publique", N°159, pp 689-700.
- [24] Moreau, C., Rinaudo, J., Garin, P., 2015. La justice sociale dans la construction du jugement d'acceptabilité Analyse des réactions d'agriculteurs face à différentes règles de partage de l'eau souterraine, Société Française d'Economie Rurale (SFER), pp 31-48.
- [25] Ballet, J., Bazin, D., 2008. Le management responsable comme modèle de gestion de l'obsolescence morale : responsabilité, identité et capital symbolique, Revue Des Sciences de Gestion, N°232, pp 131-135.
- [26] Hommel, T., 2004. Stratégies des firmes industrielles et contestation sociale, Edition Cemagref-Cirad-Ifremer-Inra, collections Indisciplines, p 33.
- [27] Adant, I., Godard, O., Hommel, T. (2005). Expertise scientifique et gestion de la contestabilité sociale en présence d'acteurs à visées stratégiques, Cahiers du Laboratoire d'économétrie. Ecole Polytechnique, p 22.
- [28] Raufflet, E., 2014. De l'acceptabilité sociale au développement local résilient, vertigo/15139, Volume 14, N°2, pp 1-12.
- [29] Lemenager, M., 2013. Soutenir des projets AEP dans les quartiers périphériques d'un pays en crise, Gestion

- communautaire AEP à Kinshasa, développement durable, AFD, Paris, p 20.
- [30] Bedecarrats, F., Lafuente-sampietro, O., Lemenager, M., Bedecarrats, F., Lafuente-sampietro, O., Lemenager, M., & Exploiter, T. M., 2016. Exploiter les données d'enquête ménage pour la recherche ou la décision publique : guide et étude de cas sur l'accès à l'eau à Kinshasa, pp 1-20.
- [31] Mouzon, J.-L., V. E., E. W., 2010. Alimentation en eau potable et assainissement des quartiers périphériques urbains et des zones rurales, CTB, Kinshasa, p 12.
- [32] Mouzon, J.-L., 2012. Étude de faisabilité pour l'amélioration de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement sur le plateau de l'Université de Kinshasa/ RD Congo, ERAIFT, Kinshasa, p 20.
- [33] Lothe, P., Luamba, J.-J., 2013. Programme Pilote de Réhabilitation et de Développement des Systèmes d'Approvisionnement en Eau Potable et d'Assainissement en RD Congo CTB AEP Sud-Kivu, Maniema/Kindu, Kinshasa Est et Lemba & Patu Rapport Evaluation finale Rapport, p 81.
- [34] Naulet, F., Biteete, L., 2014. Cahier n°6 Quelle régulation pour les réseaux autonomes ? Promouvoir l'extension des mini-réseaux et des bornes fontaines en RDC- Phase I, p 72.
- [35] Geolys - CTB., 2015. Étude comparative pour alimenter en eau potable les réseaux d'eau de Mbuji-Mayi (RDC), p 112.
- [36] CTB., 2016. Projet d'extension et de consolidation des systèmes d'approvisionnement en eau potable et d'assainissement dans la province du Sud-Kivu Dossier Technique, p 93.
- [37] Bogaert, J., Halleux, J.-M., 2015. Territoires périurbains : développement, enjeux et perspectives dans les pays du Sud, Les Presses Agronomiques de Gembloux, p 304.
- [38] N'kongon, Y. J., 2018. Extension du réseau de distribution d'eau potable dans le District d'Abidjan, European Scientific Journal, ESJ, 14(8), pp 227-253.
- [39] Mott Mac Donald., 2016. PILAEP II, Diagnostic Organisationnel et Economique, AFD, Paris, p 22.
- [40] Denker, M., 2013. Tercentennial anniversary of bernoulli's law of large numbers, 50(3), pp 373-390.
- [41] Ferrand, H., 2020. Une démonstration élémentaire du théorème de Jacques Bernoulli par Charles de La Vallée Poussin, FMSH-Fondation Maison des sciences de l'homme, p 15.
- [42] UNESCO, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture., 2019. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau : Ne laisser personne pour compte, Paris, UNESCO, p 214.
- [43] Vincent, I., 2003. Le prix de l'eau pour les pauvres : Comment concilier droit d'accès et paiement d'un service ? Afrique Contemporaine, 205(1), pp 118-134.
- [44] Koukougnon, W., 2015. Revue Canadienne de Géographie Tropical Canadian Journal of Tropical Geography Stratégies d'accès à l'eau potable dans un quartier défavorisé : cas de Gobelet dans la commune de Cocody (Abidjan-Côte d'Ivoire), 2(2), pp 60-72.
- [45] González, F. Sémioud, H. Herman., 2006. Action Contre la Faim, Eau-Assainissement-Hygiène pour les populations à risques, Herman, p 744.
- [46] Maiga, T. A., 2015. La gestion du Service Public de l'Eau (SPE) dans les villes moyennes, Le Programme eau et assainissement de la Banque mondiale, p 16.
- [47] Organisation Mondiale de la Santé (OMS), 2015. Progrès en matière d'assainissement et d'eau potable Mise à jour 2015 et évaluation des OMD, p 90.
- [48] Mayaux, P.-L., 2015. La production de l'acceptabilité, Revue Française de Science Politique, 65(2), pp 237-259.

Caractérisations hydro-pluviométriques des inondations dans le bassin versant de Couffo à Lanta

Koumassi Dègla Hervé¹

¹ Laboratoire Pierre Pagney "Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement" (LACEEDE/UAC, Abomey-calavi, Bénin

RÉSUMÉ

Les inondations constituent l'un des risques majeurs de ces dernières décennies. L'objectif de la présente étude est d'analyser les caractéristiques hydro pluviométriques des inondations dans le bassin versant du Couffo à Lanta.

L'approche méthodologique utilisée a consisté en l'analyse fréquentielle des données génératrices des inondations.

De l'analyse des données il ressort que les aléas de crue de forte probabilité (événement fréquent période de retour entre 2 et 5 ans) c'est-à-dire les événements provoquant les premiers dommages conséquents ont un débit qui se situe entre 65 et 141 m³/s par an.

De même, les inondations pluviales fréquentes dans le bassin sont causées par les aléas (pluies maximales) de forte probabilité (période de retour entre 2 et 5 ans) situés entre 36 et 141 mm par jour. Les inondations pluviale moyennes dans le bassin versant de Couffo (période de retour 10 à 20 ans) sont causées par les pluies maximales dont les valeurs sont comprises entre 99 et 259 mm.

Mots clés : Inondations ; hydro-pluviométriques, bassin versant, caractérisations ; Couffo à Lanta

Hydro-pluviometric characterizations of flooding from Couffo watershed to Lanta

Abstract

Floods are one of the major risks of recent decades. The purpose of this study is to analyze the hydro-rainfall features of floods from Couffo watershed to Lanta.

The methodological approach consisted in generating data for flood frequency analysis.

It appears from the results that the high probability floods events (frequent event return period between 2 and 5 years) i.e the events causing the first damages have a flow between 65 and 141 m³ / s per year.

Similarly, frequent flooding in the basin is caused by high probability (high rainfall) hazards (return period between 2 and 5 years) between 36 and 141 mm per day. The medium-sized rain flooding in Couffo watershed (10 to 20 years return period) is caused by maximum rainfall with values between 99 and 259 mm.

Keywords: flood, hydro-pluviometric, watershed, characterizations, Couffo in Lanta

¹ Corresponding author: kharidad1@gmail.com

INTRODUCTION

Les inondations proviennent en général des phénomènes hydro climatiques extrêmes qui ont marqué toutes les époques et partout dans le monde [1]. Dans le contexte actuel de changements climatiques, il est vraisemblable que les fortes précipitations, les inondations dévastatrices et les vagues de chaleur continueront à devenir plus intense et plus fréquentes dans le monde [2]. Les inondations ont à leur origine des événements météorologiques-hydrologiques qui, à cause de leur nature stochastique, sont très difficiles à prévoir quant à leur période de retour et leur intensité. Les catastrophes naturelles ont toujours posé de graves problèmes à travers le monde parce qu'elles touchent un grand nombre de personnes, les inondations figurent parmi les catastrophes naturelles ayant chaque année l'impact le plus significatif. À l'échelle mondiale, le nombre de personnes touchées et les pertes économiques liées aux inondations sont en augmentation. De 1981 à 1990, 147 millions de personnes ont été touchées en moyenne chaque année par des catastrophes naturelles. Ce nombre a augmenté à 211 millions de personnes par an entre 1991 et 2000 et plus de 30% de ces personnes ont été touchées par les inondations [3]. Entre 2004 et 2005, environ 200 millions de personnes ont été affectées par les inondations et plus de 13 000 en sont mortes [4].

L'Afrique de l'ouest, considérée comme l'une des régions la plus vulnérable au changement climatique où une hausse exponentielle des inondations consécutives à des fortes pluies [5] entraîne des pertes en vies humaines alors que les sécheresses des années 70 et 80 continuent de se faire sentir dans le Sahel [6]. Ces événements climatiques ont exacerbé les inégalités entre les populations et accentué le degré de la pauvreté. La vulnérabilité des communautés locales face à ces risques climatiques devient de plus en plus élevée. Les inondations font partie de ces risques dits "naturels" que l'homme ne peut pas entièrement contrôler, mais qu'il peut analyser rétrospectivement et que des mesures préventives peuvent atténuer. La compréhension et la gestion des inondations sont des problématiques récurrentes dans les sociétés actuelles. La détermination des caractéristiques des phénomènes hydro pluviométriques responsables des inondations est un préalable dans la gestion des risques d'inondation.

Milieu d'étude

Le bassin versant de Couffo est situé entre 6°30' et 7° 35' de latitude nord et 1°38' et 1° 07' de longitude est (fig 1). Il est limité au nord par les bassins versants de Mono et du Zou ; à l'est par les bassins versants du Zou, de Hlan et la rivière des cinq doigts ; à l'ouest et au sud par le bassin versant de Mono. Le bassin versant du Couffo est caractérisé par un climat de type subéquatorial avec deux saisons de cultures dont une principale allant d'Avril à Juillet et une petite allant d'Octobre à Novembre. Ce climat a mis en place un réseau hydrographique assez dense dominé par le fleuve Couffo long de 190 km. Il prend sa source au Togo à 240 m d'altitude, à proximité de la frontière, près du village de Tchetti. Il suit d'abord une direction NW-SE. Après 100 km de parcours, il entaille les formations du Continental Terminal et prend progressivement une direction N-S. 54 km plus loin, il se jette dans le Lac Ahémé long de 24 km et dont l'exutoire est le complexe lagunaire de la "Bouche du Roi". Ce cours d'eau alimente plusieurs types de sols que sont : - Les vertisols sont des sols noirs montmorillonitiques, très fertiles, sur les formations marneuses ou calcaires du Paléocène et de l'Eocène de la dépression médiane de Tchi-Ahomandégbé. Avec une profondeur de 1 m, ces sols sont médiocres du point de vue perméabilité et quantité d'eau réellement disponible pour les plantes. Ils subissent un engorgement en période pluvieuse et deviennent plus ou moins asphyxiants aux cultures. Ils sont formés sur les alluvions des basses vallées et le taux d'argile varie de 60 à 75% tandis que les taux en limons et en sable sont faibles, entre 7 et 16% [7].

- Les sols hydromorphes sont des sols dont l'évolution et la classification sont liées à la présence et à l'action de l'eau : eau pluviale, eau de débordement des fleuves, eau de remontée de la nappe phréatique très superficielle qui créent des situations d'engorgement périodique de durée variable. Ils sont très fertiles mais inondés de façon saisonnière par les crues du fleuve Couffo.

- les sols peu évolués ou sols minéraux bruts, caractérisés par un minimum de différenciation des horizons de surface et profonds. On les rencontre dans les cordons littoraux. Ce sont des sols très perméables avec une capacité de rétention en eau très faible

- les sols faiblement ferralitiques, ils se développent sur n'importe quelle roche suffisamment riche en fer et constituent un milieu bien drainé. Ce sont des formations argilo-sableuses du Continental terminal à structure bien nette dans les horizons profonds et à structure assez poreuse dans les horizons supérieurs, en liaison avec une intense activité biologique. Ils doivent leur perméabilité et drainage aux sables mais surtout à la bonne répartition des sables à l'intérieur de l'ensemble.

Ils sont fertiles mais très sensibles à la dégradation anthropique, au feu et à l'érosion. Parmi les sols exondés, les sols ferralitiques apparaissent sur le plan physique comme d'excellents supports des formations forestières denses humides.

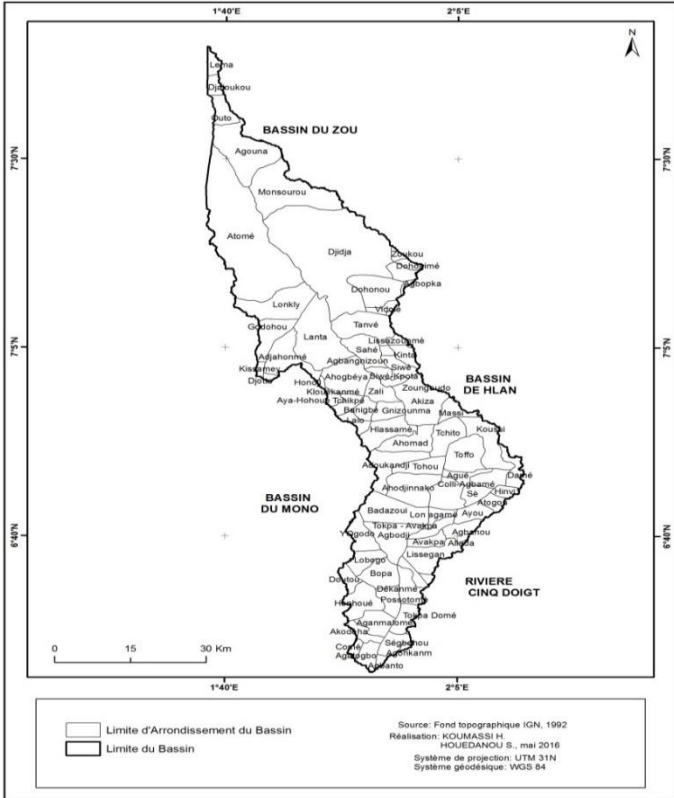


Figure 1 : Situation du bassin versant du Couffo

METHODE D'ETUDE

Les données utilisées dans la présente étude concernent les données pluviométriques issues des stations pluviométriques du Bassin de Couffo sur la période 1965 - 2015; les données hygrométriques extraites du fichier de la DG-Eau sur la période 1965-2015 les données pédologiques, planimétriques, hydrographique; les données socio-agricoles relatives aux systèmes et techniques de culturales de la maïsiculture dans le bassin versant du Couffo. Ces informations ont été obtenues respectivement à l'ASCENA, auprès des agriculteurs et des agents du développement rural.

Méthode d'analyse fréquentielle des séries hydro-pluviométriques

L'évaluation des caractéristiques des hydro pluviométriques des inondations à consister en détermination des paramètres comme la période de retour de crues (fréquentes, moyennes, exceptionnelles et maximale vraisemblable) ; la hauteur et la durée de crue ; la vitesse d'écoulement [8]; [9]. Dans la présente étude, la période de retour des crues et des hauteurs de pluies maximales ont été estimées. En effet, l'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future. L'analyse fréquentielle a pour but d'estimer les probabilités d'occurrence d'un phénomène donné à partir de relevés hydrologiques. Les données utilisées dans cette analyse doivent être évaluées en tenant compte des objectifs, de la durée et de l'exhaustivité des relevés disponibles. Elles doivent aussi satisfaire à certains critères statistiques, notamment en ce qui concerne leur caractère aléatoire, leur indépendance, leur homogénéité et leur stationnarité. C'est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future. L'analyse fréquentielle est utilisée, en particulier, pour estimer l'ampleur de l'événement temporel T_x auquel est associé une période de retour T (quantile de période de retour T ou de probabilité au dépassement $p = 1/T$).

L'analyse fréquentielle des séries pluvio hydrologiques journalière permet d'estimer le temps de retour d'une valeur maximale annuelle journalière. Cette prédiction repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel qui

est une équation décrivant (modélisant) le comportement statistique d'un processus. Ces modèles décrivent la probabilité d'apparition d'un événement de valeur donnée. C'est du choix du modèle fréquentiel (et plus particulièrement de son type) que dépendra la validité des résultats de l'analyse fréquentielle. La figure 2 résume les différentes étapes de l'analyse fréquentielle.

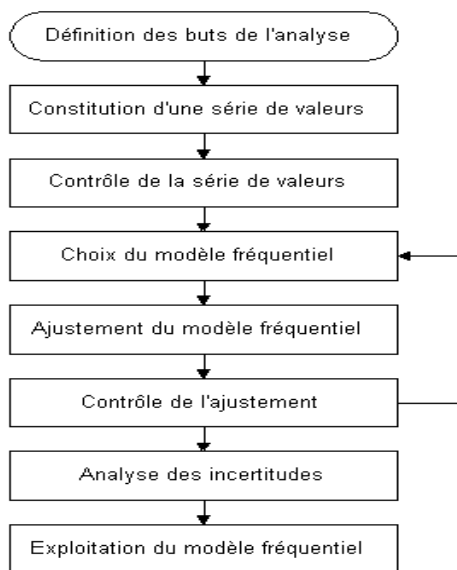


Figure 2: Principales étapes de l'analyse fréquentielle Source : [10]

RESULTATS

Caractérisation hydrologique des crues d'inondation

La caractéristique hydrologique des crues consiste à estimer les débits de pointe responsables des crues dans le bassin. Pour parvenir, il faut s'assurer l'indépendance, la stationnarité et l'homogénéité des données. Le tableau 1, présente les résultats des tests statistiques d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité appliqués aux débits maximaux dans le bassin de Couffo à Lanta.

Table 1: Statistiques des tests d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité des données de débit dans le Couffo à Lanta.

Stations	Paramètres	d'homogénéité de Wilcoxon	d'indépendance de Wald-Wolfowitz
		Valeurs	Valeurs
Lanta	K	0,197	0,645
	Sigma	36	-0,459

Ajustement aux lois des débits maximaux

La figure 3 traduit un ajustement des séries hydrologiques par la loi de normale sur la période 1965-2007.

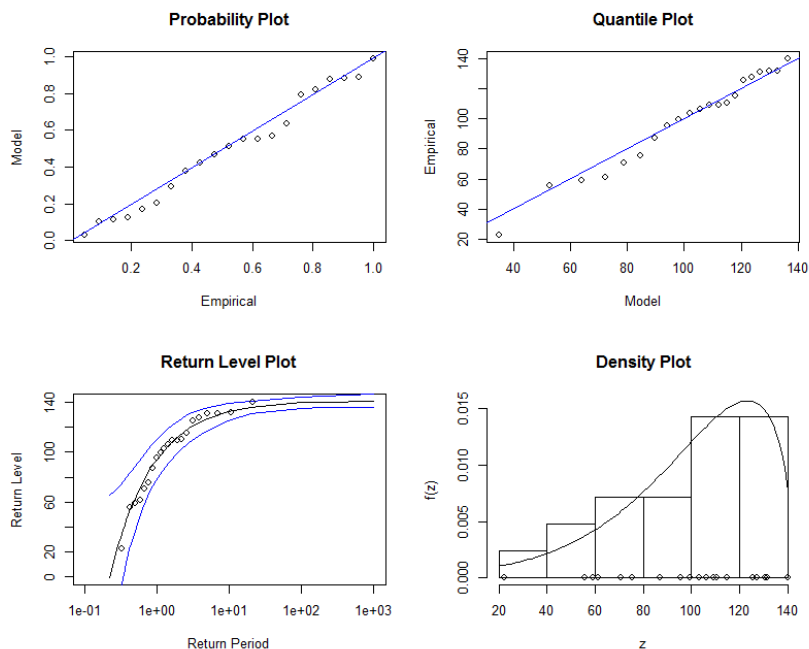


Figure 3: Ajustement de la loi GEV aux débits maximaux à Lanta Source: traitement des données, 2016

La figure 3 montre les graphiques sortis du traitement des débits de pointe par la loi GEV. Les diagrammes probability-plot et quantile plot sont des outils graphiques permettant d'évaluer la pertinence de l'ajustement d'une distribution donnée à un modèle théorique. Ceci permet une appréciation graphique de la concordance entre une distribution observée et un modèle théorique.

A partir de l'équation de la droite de la loi GEV, les quantiles des débits maximaux ont été calculés pour différentes périodes de retour et leurs intervalles de confiance (Tableau 2)

Table 2: Quantile de débits de pointe et leurs périodes de retour à Lanta

2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
85	120	140	157	176	189
[65-98]	[99-141]	[116 -165]	[129-185]	[144-208]	[154-224]

De l'analyse du tableau, il ressort que les aléas de crue de forte probabilité (événement fréquent période de retour entre 2 et 5 ans) c'est-à-dire les événements provoquant les premiers dommages conséquents ont un débit qui se situe entre 65 et 141 m³/s par an. Les crues moyennes (période de retour de 10 à 20 ans) responsables des inondations fluviales sont causées par les débits dont les valeurs sont situées entre 116 et 185 m³/s par an et plus loin les événements rares c'est-à-dire les événements de faible probabilité (période de retour de 50 à 100 ans) sont causés par les aléas de crue dont les valeurs se situent entre 144 et 224 m³/s par an. Dans le cadre de l'élaboration des politiques de gestion des risques d'inondation, les aléas de probabilité moyenne correspondent dans la plupart des cas à l'aléa de référence choisi.

Caractérisation pluviométrique d'inondation

Le tableau 3, présente les résultats des tests statistiques d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité appliqués aux pluies maximaux dans le bassin de Couffo à Lanta.

Table 3: Statistiques des tests d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité des données des pluies maximales dans le Couffo à Lanta.

Stations	aramètres	d'homogénéité de wilcoxon	d'indépendance Wald-Wolfowitz
		Valeurs	Valeurs
Aplahoué	K	0,042	0,169
	Sigma	257	-1,373
Pobè	K	0,986	0,027
	Sigma	379,5	-2,198
Athiéme	K	0,623	0,71
	Sigma	125	-0,371
Grand_Popo	K	0,948	0,575
	Sigma	342	-560
Lokossa	K	0,874	1
	Sigma	167,5	0
Abomey	K	0,036	0,169
	Sigma	253	-1,373
Djakotomey	K	0,519	0,073
	Sigma	245	-1,789
Tchètti	K	0,903	0,748
	Sigma	225,5	-0,32

Ajustement aux lois des pluies maximales

Les figures 4 et 5 présentent un ajustement des séries hydrologiques par la loi de distribution GEV sur la période 1965-2008. Les ajustements sont faits sur l'ensemble des stations du bassin. Mais pour des raisons de représentativité, deux sont présentées ici c'est-à-dire une station au sud et une au nord du bassin.

Les graphiques Probabilité (P-plot) ou Quantile – Quantile (Q-plot) sont utilisés pour tester l'adéquation des modèles des valeurs extrêmes. Ces outils graphiques simples permettent de comparer la fonction de répartition empirique (pour un P-plot) ou les quantiles (pour un Q-plot) d'un échantillon de données à ceux d'un échantillon issu d'une loi théorique (ici GEV). Si la loi observée est la même la loi que la loi théorique, les points sur ces graphiques doivent être confondus avec la première bissectrice du plan. En théorie, si les observations sont issues de la loi théorique, alors les points du graphique doivent se situer le long de la première bissectrice. En pratique, à l'exception de quelques points extrêmes, la plupart des autres points doivent se situer autour de cette droite. Un tel graphique peut nous aider à choisir une loi pour ajuster à nos observations.

A partir de l'équation de droite, les quantiles de pluie maximales ont été estimés pour différentes périodes de retour. Le tableau 4, présente les quantiles de pluies estimés sur plusieurs périodes de retour dans les stations de Couffo à Lanta.

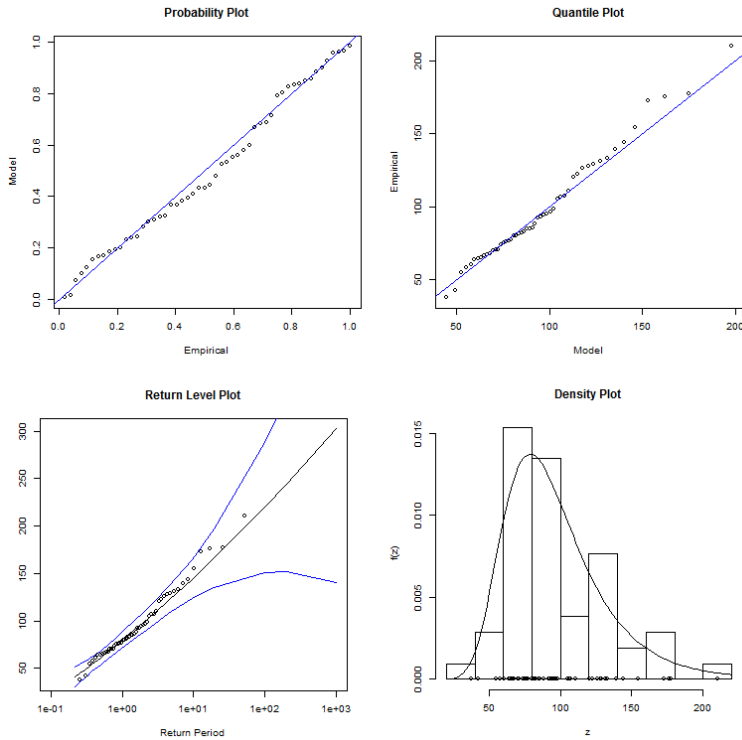


Figure 4 : Ajustement des pluies max par la loi GEV à Bopa

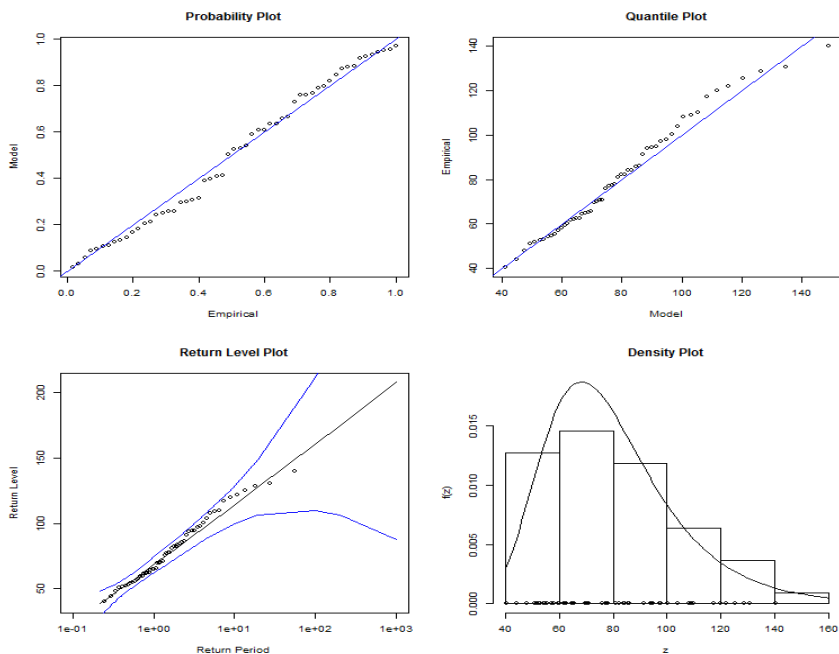


Figure 5 : Ajustement des pluies max par la loi GEV à Tcheti

Table 4: Quantile de débits et leurs périodes de retour à Lanta

Période de retour (ans)	Aplahoué	Athiémié	Bopa	Grand-Popo	Lokossa	Abomey	Djakotomey	Tchetti
	78	48	82	89	77	77	94	76
2	[72-84]	[36-60]	[74-89]	[78-100]	[69-85]	[72 -83]	[85 -103]	[63 -88]
	100	82	109	131	101	97	107	122
5	[91-110]	[71-93]	[97-120]	[113-149]	[88-113]	[89 -106]	[96 -118]	[102 -141]
	115	97	127	159	116	111	124	153
10	[103-127]	[86-108]	[112-141]	[136-181]	[100-132]	[100-122]	[109 -138]	[127 -178]
	129	108	144	185	131	124	140	182
720	[115-144]	[99-119]	[126-162]	[157-213]	[112-151]	[110 -137]	[121 -158]	[151 -213]
	148	118	166	220	151	140	160	220
50	[129-166]	[108-129]	[144-189]	[185-257]	[126-175]	[123-157]	[138 -183]	[182 -259]
	162	124	183	245	165	153	176	249
100	[140-183]	[113-135]	[157-209]	[206-285]	[137-193]	[133-172]	[150 -202]	[205 -293]

De l'analyse de ce tableau, il ressort que les inondations pluviales fréquentes dans le bassin sont causées par les aléas (pluies maximales) de forte probabilité (période de retour entre 2 et 5 ans) situés entre 36 et 141 mm par jour. Les inondations pluviales moyennes dans le bassin versant de Couffo (période de retour 10 à 20 ans) sont causées par les pluies maximales dont les valeurs sont comprises entre 99 et 259 mm. De même, les inondations pluviales rares ou exceptionnelle sont quant à elles causées par les pluies journalières dont les hauteurs sont situées entre 108 et 293 mm par an.

CONCLUSION

Il ressort de cette étude que deux types d'inondation sévissaient dans le bassin de Couffo à Lanta. Il s'agit des inondations pluviales et fluviales. Les crues responsables des inondations fluviales fréquentes varient entre 65 et 141 m³/s par an alors celles exceptionnelles se situent entre 116 et 185 m³/s par an. Dans le même ordre d'idée les inondations pluviales responsables des inondations fréquentes varient entre 36 et 141 mm par jour alors celles exceptionnelles se situent entre 108 et 293 mm par an. Les inondations sont aggravées par d'autres facteurs dont notamment les actions anthropiques. Une connaissance des caractéristiques des inondations dans bassin constitue un outil d'aide à décision. Les différentes mesures de réduction des risques d'inondation se baseront sur ces caractéristiques pour la prise de décision.

Références

- [1] OMM. 2006. Temps-Climat-Eau : la prévention des catastrophes naturelles et l'atténuation de leurs effets. OMM-N°993, Genève, 34 p
- [2] GIEC. 2007. Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Résumé à l'intention des décideurs, 12 p
- [3] Pilon, P. J. 2001. Guidelines for Reducing flood losses. International Strategy for Disaster Reduction, United Nations.
- [4] Luong A. T. 2012. Flood risks evaluation for Huong river basin, ThuaThien Hue province, Centre of Vietnam; Doctorat en science de l'environnement; 325p
- [5] Sarr M.A. 2011. Variabilité pluviométrique en Afrique de l'ouest : dynamique des espaces végétaux à partir des images satellitales. Exemple du bassin versant du Ferlo (Sénégal), Journées de climatologie, Nantes, 13-14 mars 2008, Climat et sociétés. Climat et végétation, pp 57-76
- [6] Sircoulon J. 1994. Impact possible des changements climatiques à venir sur les ressources en eau des régions arides et semi-arides. WMO/TD-n°380, 87 p.
- [7] Boko M. 1988. Climats et communautés rurales au Bénin: rythmes climatiques et rythmes du développement. Thèse de Doctorat d'Etat. 2 tonnes, CRC, URA 909 CNRS, Université de Bourgogne, Dijon 601 p.
- [8] Dauphine, A. 2001. Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer, Armand Colin, coll. «U », 288 p.
- [9] Tacnet, J.M , et Burnet, R. 2007. Risques naturels Organisation de la gestion et de la prévention en France : Eléments pour une comparaison transfrontalière Version 1.3. PRINAT-Action n°2-Panorama de l'organisation de la gestion des risques naturels en France, 55 p.
- [10] Benyahya L, Anik D, Daniel C, Dan B, Andre ST- H. 2009. Caractérisation du régime naturel du débit des bassins versants de l'Est du Canada. Rapport de recherche. 67p

Aridité et sécheresse : heuristique d'une modélisation parétienne et bayésienne de la tension sur la ressource en eau dans le sud-est de la France

Martin Philippe¹ ; Hadrien Di Costanzo¹ ; Ingrid Canovas²

¹ Université d'Avignon, UMR ESPACE 7300 du CNRS, 74 Rue L. Pasteur, 84029 Avignon cedex

² Université Gustave Eiffel, LATTS (Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés), École des Ponts ParisTech – LATTS, 6 et 8, avenue Blaise Pascal, Cité Descartes, F-77455 Marne-la-Vallée cedex,

Résumé : La sécheresse est un phénomène récurrent, en particulier, en milieu méditerranéen. Nous proposons dans cet article de la définir comme un phénomène sociétal conjoncturel dépendant localement tant de l'activité anthropique que de la variabilité climatique. En raison du réchauffement climatique, il semble nécessaire de développer une méthodologie adaptée à l'estimation de la tension sur la ressource en eau (écart entre l'offre naturelle et la demande sociétale). Le paradigme bayésien pourrait répondre à un tel besoin et permettre de dépasser les bilans de masse classiques, imprécis et concernant de vastes territoires. Nous proposons donc une réflexion discursive sur la façon dont le théorème de Bayes peut-être mis en œuvre, dans le cadre d'une modélisation de la sécheresse, pour un secteur géographique français, régulièrement affecté. Cette solution présente l'avantage de pouvoir être incrémentale et d'être valide tant pour la sécheresse comme phénomène sociophysique que pour la perception que les populations et les gestionnaires ou décideurs en ont, dans la mesure où le mode de raisonnement du cerveau serait bayésien (S. Dehaenne). La prise en compte des différents volets de la sécheresse (physique, productif et psychologique) se ferait ainsi avec une même base conceptuelle. Pour engager de tels calculs, nous devons d'abord disposer de distributions de probabilité décrivant différentes variables naturelles et anthropiques. Le choix de ces variables ainsi que leur mise en forme, puis le calcul des distributions s'avèrent être une première étape déterminante. Un travail sur les phases de récession de plusieurs stations a ainsi été réalisé à titre illustratif, en mettant en œuvre un modèle parétien discret. À partir de chroniques longues (45 récessions à Génomargues ; Gardon d'Anduze) publiques (Banque Hydro) de débits moyens journaliers et de chroniques plus courtes (6 récessions à l'Aube morte ; Galeizon, Gardon d'Alès), mais de haute qualité, des distributions de probabilité discrètes ont été établies. Les effectifs par classe s'ajustent à une loi de Pareto (modèle de puissance). La distribution des paramètres (Constante : C ; et Pente : P) peut être ramenée à une forme gaussienne. Trois types d'information : les valeurs des variables, les effectifs par classe ou les paramètres des modèles parétiens peuvent être introduits dans le réseau bayésien. Un travail en cours permettra de savoir, selon différents points de vue (ergodicité, calculabilité, effectivité, praticité et rapidité de mise en œuvre...), quelle peut être la meilleure information à utiliser.

Mots clés : Sécheresse – Ressource en eau – Climat méditerranéen – Modélisation bayésienne – Bassin versant du Gardon – Modélisation parétienne – Approche probabiliste

Aridity and drought: heuristics of a Paretian and Bayesian modeling of the stress on water resources in the south-east of France

Abstract: Drought is a recurrent phenomenon, particularly in the Mediterranean area. In this paper, we propose to define it as a conjectured societal phenomenon locally dependent both on anthropogenic activity and on climate variability. In view of global warming, it seems necessary to develop a methodology adapted to the estimation of the stress on water resources (gap between natural supply and societal demand). The Bayesian paradigm could respond to such a need and make it possible to go beyond the classical mass balances, which are imprecise and concern vast territories. We thus propose a reflection on how the Bayes theorem can be implemented, in the framework of drought modelling, for a French geographical area, regularly affected. This solution has the advantage of being incremental and valid both for drought as a socio-physical phenomenon and for the perception that populations and managers or decision makers have of it, insofar as the brain's mode of reasoning would be Bayesian (S. Dehaenne). Taking into account the different aspects of drought (physical, productive and psychological) would therefore be done with the same conceptual basis. To perform such calculations, we must first have probability distributions describing different natural and anthropogenic variables. The choice of these variables as well as their formatting, and then the calculation of the distributions proves to be a decisive first step. A work on the recession phases of several stations was thus carried out as an illustration. From long chronicles (45 recessions at Génomargues; Gardon d'Anduze) public (Hydro Bank) of average daily flows and shorter chronicles (6 recessions at dead dawn; Galeizon, Gardon d'Alès), but of high quality, discrete probability distributions were established. Class sizes fit Pareto's law (power model). The distribution of the parameters (Constant: C; and Slope: P) can be reduced to a Gaussian distribution. Three types of information: the values of the variables, the class sizes or the parameters of the Paretian models can thus be introduced into the Bayesian network. Work in progress will make it possible to know, from different points of view (ergodicity, computability, effectiveness, practicality and speed of implementation...), which information is the best to use.

Key words: Drought – Water resources – Mediterranean climate – Bayesian modelisation – Gardon watershed – Paretian modelisation – Probabilistic approach

¹ Corresponding author: philippe.martin@univ-avignon.fr

Le sud-est de la France, comme bon nombre de territoires, est affecté par un manque d'eau à certains moments de l'année. Vernaculairement, on parle alors de sécheresse. Ce point demande à être précisé afin de mieux gérer les situations de tension actuelles et à venir, probablement dans la cadre du changement climatique et de l'évolution de la société.

I. IMPLUVIOSITE, ARIDITE ET SECHERESSE

En ces domaines, il faut distinguer entre trois notions :

i — l'absence de pluie, ce que nous nommons : impluviosité (Martin Ph., 2016 ; 2019). Plus communément appelé sécheresse atmosphérique, elle est généralement liée à la persistance de systèmes à haute pression conduisant à des situations de subsidences qui limitent l'ascendance et la condensation de la vapeur d'eau (Şenaut Z., p. 25) ; le concept de sécheresse atmosphérique, abordé scientifiquement pour la première fois par les travaux de Palmer en 1965, connaît de nombreuses variantes au sein même de la communauté scientifique ; elle est souvent considérée dans la littérature comme une période (1) de jours consécutifs sans précipitations (2) de jours consécutifs avec de faibles pluies ou encore (3) peu de précipitations sur un intervalle de temps restreint (Byun H.-R et Wilhite D.-A, 1998) ; l'absence de pluie est initiatrice de l'aridité dans le milieu naturel ; elle implique une situation déficitaire en eau dans un bassin versant ; en milieu méditerranéen français, les situations d'impluviosités sont bien marquées durant la période estivale contrairement au reste de la France (Galloy E. et al., 1982) ; les premiers travaux scientifiques sur l'impluviosité dans le sud-est de la France ont été réalisés par Douguédroit (1980) ; il a été montré une augmentation au cours du XX^e siècle des situations d'impluviosité en particulier pendant la période estivale (Douguédroit A., 1980 ; 1983 ; 1987 ; 1990) qui pourrait être liée au changement climatique actuel ; de plus, une diminution probable des précipitations serait attendue sur le secteur méditerranéen d'ici la fin du siècle (Mariotti A. et al., 2015 ; Philandras C.-M et al., 2011) ; ainsi, on pourrait probablement retrouver une augmentation de la fréquence des situations d'impluviosité dans le sud-est de la France à l'avenir ;

ii — une situation d'aridité qui correspond à une absence d'eau (Trzpit J.-P., 1994), à la suite d'une impluviosité et d'un retour à l'atmosphère de pluies sous l'effet de la température, du vent et dans une certaine mesure de la végétation (évapotranspiration) ; au-delà d'un certain niveau d'aridité la vie végétale devenant impossible (Rambal S., 1984), mais pas certaines formes animales de vie ; on trouve ainsi quelques rares animaux dans les déserts les plus arides, mais sans que ceux-ci ne soient marqués par une quelconque sécheresse ; l'aridité sera définie comme un fait de nature correspondant à une faible présence ou une absence d'eau liquide à la surface ou subsurface (sol, etc.) de la Terre ; elle peut être évaluée par des indices (cf. celui historique de De Martonne par exemple) qui associent des variables physiques (précipitation, température...) ; elle se définit comme une présence limitée de disponibilités en eau que peuvent, dans une certaine mesure, corriger les techniques hydrauliques (transformation de réserves en ressources) ;

iii — et la sécheresse qui est une construction sociale. La sécheresse sera définie, dans cette recherche, comme un construit sociétal fortement dépendant de la demande anthropique. L'intensité d'une sécheresse sera ainsi caractérisée par la tension observée entre la disponibilité en eau et les besoins hydriques de la société. Parmi ces besoins en eau se trouvent ceux indispensables à un bon état écologique des hydrosystèmes. Le maintien d'un bon état hydrologique en situation de basses eaux relève d'un choix politique assumé (en particulier européen), mais après satisfaction des besoins humains vitaux (AEP, etc.).

I.1 La sécheresse : une construction sociétale dépendante d'une variabilité naturelle

Généralement, une sécheresse s'initie au cours d'une phase climatique plus aride (Najac J., et al, 2010), mais peut simplement être le fait, toutes choses étant égales par ailleurs, d'un accroissement local des besoins anthropiques en eau (agriculture, tourisme...). Le niveau de la sécheresse correspond donc à un niveau de tension sur la ressource en eau, laquelle croît avec l'aridité, mais ne s'y résume pas.

Le climat méditerranéen se caractérise par une saison sèche d'été récurrente (Levine J., 1922 ; Pardé M., 1946 ; Samson J., 1950) et par une variabilité interannuelle naturelle — comme le montre la chronique des débits de la Fontaine de Vaucluse depuis 1877 (Martin Ph., Kabo R., 2015) — et/ou forcée par le changement climatique (Li L., 2003 ; Gaume E., 2004 ; Vidal J. Ph. et al. 2008).

En partie en raison de leur climat, les Cévennes, et plus largement le sud-est de la France, reçoivent de nombreux touristes (tourisme de plein air, etc.) et bénéficient de soldes démographiques parfois positifs, en particulier dans les plus grandes villes (Martin Ph. et al., 2019). Tout cela conduit, localement, à des tensions dues à des pics de demande en eau auxquels les ressources disponibles ne permettent pas toujours de répondre. La question de la sécheresse est donc une question locale (tel village vs telle source ou telle rivière) même si elle peut avoir, et a souvent, une dimension zonale.

Certaines années, suivant les lieux (amont-aval) et suivant les moments (début-fin du tarissement), au cours de l'été, diverses communes cévenoles ou non, gardoises ou non, connaissent des états de sécheresse plus ou moins intenses. Le niveau le plus élevé correspondrait à l'alimentation en eau potable des populations par camions-citernes, la ressource locale étant alors proche de zéro.

Pour réguler un tel système, il convient d'une part de bien connaître la ressource mobilisable (aspect hydrométrique) et d'autre part, de tenter de responsabiliser la population, afin de limiter les gaspillages [Hydrologie participative (Ayrat P.-A., 2019; Martin Ph. et al., 2019); programme HydroPop Agence RMC, EPTB Gardons et AB-Cèze]. Divers aménagements sont aussi envisageables (forage...), mais à condition d'avoir peu d'effets sur d'autres composantes de l'hydrosystème. Il semble effectivement vain de pomper très fortement un aquifère pour, *in fine*, assécher telle ou telle rivière ! Tout doit être sérieusement proportionné et évalué afin d'éviter que des aménagements nouveaux débouchent sur une mal-adaptation, sur plus de problèmes que ceux que l'on se propose de résoudre.

La sécheresse nécessite la présence d'un groupe humain, d'une société qui a besoin, quel que soit son mode d'existence (rural ou pré industriel, industriel ou post industriel, tertiarié, etc.), d'une quantité d'eau, laquelle varie en fonction de son mode d'existence et de son niveau de technicité (irrigation à la raie, irrigation par goutte, type de spéculations agricoles, etc.) et en fonction de son effectif. Plus la population est importante, plus les besoins en eau, tous besoins confondus, sont importants. Les gains obtenus par une technicité accrue, par exemple sur les réseaux d'AEP, lorsqu'ils peuvent être financés, ayant beaucoup de mal à compenser les accroissements de consommation que génèrent par exemple les jardins d'agrément, ou les piscines.

Si tous les besoins en eau d'un peuplement local sont assurés, il n'y a pas de sécheresse, quel que soit le niveau absolu des besoins (faible ou fort) et celui de l'aridité et/ou de l'impluviosité. C'est le cas par exemple dans le sud-est de la France de l'automne au printemps. La fenêtre temporelle de la tension sur la ressource en eau est donc limitée, mais l'évolution de sa taille, avec le changement climatique, est évidemment posée. Dès lors une société qui a des besoins importants peut ne pas connaître de sécheresse alors même qu'une société qui a des besoins faibles peut connaître un état de sécheresse catastrophique (Dubus N., Dubus J., 2011).

L'eau étant vitale, en particulier pour l'agriculture, les sociétés se sont toujours positionnées au maximum de ce qui pouvait être fait pour produire, quitte à se trouver en difficulté (Jacob-Rousseau N., Astrade L., 2010) lors de certaines phases de la variabilité des apports et des réserves (variation piézométrique).

Ces choix ont entraîné une créativité assez exceptionnelle dès au moins la plus haute antiquité à Babylone, mais aussi dans tout l'Empire romain (Pont du Gard...). De même, une des solutions a toujours été de disposer le peuplement humain au plus près des ressources en eau, ce dont l'établissement anthropique en zone karstique témoigne particulièrement (village construit au plus près de quelques grosses sources), mais ce dont témoigne aussi l'armature urbaine de la France et de l'Europe. Combien de villes et de capitales sont traversées ou sont à proximité de rivières importantes ou de fleuves ? Si la Seine a pu s'assécher en été, ce n'est plus le cas depuis des dizaines d'années en raison d'aménagements hydrauliques (barrage, réservoir...) majeurs qui y ont fait localement disparaître, pour des raisons esthétiques, et économiques (tourisme...), etc. la sécheresse limnologique.

1.2 La sécheresse : un phénomène sociétal territorialisé hautement conjoncturel

La sécheresse est liée au niveau de développement d'une société de deux façons. D'une part, plus la société est développée, plus elle consomme d'eau, et cela malgré toute la technicité qu'elle peut mettre en œuvre (économie d'eau...) et, d'autre part, plus une société est développée plus elle peut, par différentes techniques (transfert, pompage, barrage, etc.), accroître à tout moment la quantité d'eau à sa disposition, à condition de disposer de l'énergie pour le faire, pour couler de l'acier ou du béton ! La sécheresse est donc un état hautement conjoncturel et toutes les évolutions sont possibles : apports de technicités qui augmentent la disponibilité en eau, réduction de la population et/ou du niveau de vie qui diminue les besoins, etc. La sécheresse est ainsi toujours relative, jamais absolue, dans le temps et dans l'espace. Elle correspond à un phénomène multifactoriel de société.

Cet état de tension entre les besoins et les volumes mobilisables doit ainsi, surtout, s'apprécier localement. C'est à l'échelle du lieu de vie que la tension doit être évaluée et, par exemple, une ville comme Avignon située au bord du Rhône, quelle que puisse être la situation climatique qui affecte ce flux, ne connaîtra vraisemblablement jamais de sécheresse sur une échelle de temps historique. Le Rhône (et la Durance) permettra toujours d'assurer ses besoins en eau. Inversement, loin des fleuves et des rivières pérennes, dans les espaces drainés temporairement seulement en saison humide (rivière intermittente), la tension sur la ressource en eau peut être récurrente et très forte selon les années. C'est en particulier le cas dans les têtes de bassin en raison de la faible surface qui y est drainée, nonobstant tous les autres facteurs.

Avec comme ordre de grandeur 1 l/s/km² à l'étiage ss en Cévennes, il apparaît très clairement qu'il faut quelques kilomètres carrés pour avoir la possibilité d'observer un petit écoulement d'eau, et cela encore en fonction des lithologies, des niveaux d'altération, des sols, etc. Ceci concerne toutes les têtes de bassin quelles que soient leur localisation ou altitude, et, en particulier aux altitudes moyennes en Cévennes (450 – 550 m) où se déploie la densité maximale de réseau hydrographique, dont les segments de rang 1 (au sens de la classification de Horton) constituent autant de têtes de bassins. Bien évidemment, la lithologie joue un rôle important, et ici pourra être captée une source karstique importante comme pour Montpellier (source du Lez), alors que là, en Cévennes schisteuses, seuls des sourcins à la productivité très limitée pourront être recueillis, souvent grâce à une galerie drainante.

La sécheresse est un phénomène territorialisé mal décrit à petite échelle, au sens géographique, c'est-à-dire pour de vastes territoires comme la France métropolitaine, mais guère mieux décrite à des niveaux communaux, cantonaux ou d'arrondissement. À une échelle médiane, par exemple celle des bassins versants de rivières, la connaissance est peut-être plus avancée (cf. par exemple les bassins versants en tension définis par l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse). Il faut donc penser une géographie très fine de la sécheresse.

Il conviendrait ainsi d'arriver, pour chaque dizaine de kilomètres carrés, à une appréciation de la tension entre l'offre et la demande en eau, et cela pour chaque jour (ou semaine) de l'année, et en tenant compte de tous les correctifs qui peuvent moduler la tension. Ce niveau local de tension, s'il est haut et récurrent, pouvant déboucher sur la recherche et la mise en œuvre d'un équipement local spécifique et limité (ici un forage, là une retenue d'eau...) afin, en outre, de perturber le moins possible le milieu naturel, tout en assurant une sécurité maximale aux populations et aux activités.

Tout cela ne peut être envisagé sans une modélisation qui devra concaténer toutes les informations disponibles, toutes les variables dont les corrélations construisent la sécheresse elle-même. Il sera alors possible d'envisager de caractériser la montée vers un état critique de basses eaux préalable à la sécheresse dont la durée pourrait être longue et les étendues territoriales affectées, importantes, alors même que le phénomène se mettrait en place très progressivement (crise lente).

1.3 Développer une modélisation géographique et incrémentale de la sécheresse

Si les buts sont clairs, la question des moyens d'une telle modélisation se pose donc. Le présent texte se propose de développer une approche heuristique de cette modélisation en cherchant à mettre en œuvre une approche bayésienne et des caractérisations statistiques paréliennes, mais aussi gaussiennes. Autrement dit, il s'agit d'envisager une modélisation à deux niveaux. Le premier serait celui de la recherche de variables à mettre en forme de telle façon que l'information qu'elles portent soit sous une forme optimale pour le but recherché et en fonction des spécificités de l'approche bayésienne (réseau, calculabilité...).

De nombreux travaux (Martin Ph., 2019, à paraître) nous ont montré que l'approche parélienne de diverses chroniques était une bonne solution pour résumer l'information disponible et la rendre sous la forme de probabilités. Nous proposerons ci-dessous des exemples de modélisations paréliennes discrètes visant d'une part à caractériser des distributions à la fois statistiques et spatialisées, et permettant, d'autre part, une réflexion sur les variables à considérer en priorité. Celles-ci étant identifiées, formalisées il conviendra de les articuler, de les mettre en résonances afin d'évaluer statistiquement le niveau de la tension. Il semble que pour se faire les réseaux bayésiens soient de bons outils, ce qui constituerait le second niveau et une description structurelle du phénomène. Nous présenterons ici une première modélisation heuristique, préalable aux calculs nécessaires, ainsi que les fondements épistémologiques, voire ontologiques, de ce type d'approche.

Toutefois, avant d'en arriver à ces modèles travaillant sur les distributions de variables, il nous faut envisager l'autre possibilité, très classique, qui est fondée sur l'idée de bilan de masse.

2. LES BILANS DE MASSE

La première idée pour rendre compte de cette tension renvoie à celle de bilan, à un bilan de masse avec des entrées (pluie, neige, etc.) et des sorties (évaporation, évapotranspiration, débit, AEP, etc.). Base sur laquelle on ajoute les stockages (aquifère, barrage) en plus ou en moins. On retrouve ainsi une équation classique des bassins versants : $Q + ETR = P + R$; avec Q les débits, ETR l'évapotranspiration réelle ; P les précipitations et R les réserves, soit l'eau contenue dans les différents stockages des bassins versants. Q et P pour des raisons différentes (problèmes de mesure et de spatialisation) sont connus avec une précision relative. C'est encore plus vrai de l' ETR qui fait intervenir tout autant le couvert végétal (densité, diversité) que la réserve utile du sol (RU) dans laquelle la végétation herbacée, arbustive, arborée, puise. L'hétérogénéité des sols, la diversité des fronts d'altération et de l'épaisseur des altérites rendent la connaissance de la RU particulièrement difficile. Souvent une valeur un peu totémique de 100 mm est retenue.

2.1 Un bilan très difficile à « boucler »

Vu les inconnues qu'un tel bilan intègre (erreurs de mesure sur chacune des variables, problèmes de spatialisation des mesures, méconnaissances des stockages, etc.), il ne peut être « bouclé », c'est-à-dire plus ou moins réaliste et équilibré, que si la durée prise en compte est assez longue pour moyenner et ramener à zéro la variation des stockages et que si la surface considérée est vaste (bassin versant de fleuve, territoire national, etc.) afin de moyenner les différences locales et de s'affranchir, dans une certaine mesure, des insuffisances du réseau de mesure. Il existe par exemple assez peu de stations hydrométriques sur un territoire comme la France métropolitaine qui, en outre, ont une précision, en toutes eaux, qui n'est pas connue. Celle des basses eaux étant comme nous le verrons ci-dessous parfois assez problématique.

Cette équation pourrait ainsi permettre en théorie de connaître Q connaissant les autres facteurs et de voir dans quelle mesure, jour après jour, ces disponibilités en eau sont compatibles avec le bon état écologique des rivières, ce qui relève d'une logique naturaliste et réglementaire, et avec la demande sociétale, que celle-ci soit agricole, urbaine, ludique ou

autre. Les volumes prélevables correspondent en théorie aux flux disponibles pour des activités anthropiques une fois assuré le bon état écologique de la rivière. En pratique, il apparaît clairement que toutes les imprécisions de ce bilan vont se retrouver dans la barre d'erreur des volumes prélevables à un tel niveau que la notion en devient inapplicable par exemple en Cévennes. Aller dans ce sens n'est certainement pas une mauvaise chose, mais faire croire que cela représente, actuellement, une solution technique efficiente en est une autre, en particulier sur certains territoires méditerranéens soumis à des types de temps très différents (épisode cévenol d'automne vs impluviosité durable en été).

2.2 Ontologie du bilan

Au-delà de ces aspects techniques, il y a dans cette notion de bilan, fondée sur l'idée de bilan de masse, une dimension ontologique. Tout bassin versant conçu, comme un ensemble de facettes, de versants, qui permettent l'acheminement des flux entrés vers un point de sortie implique nécessairement que, mis à part les stockages toujours temporaires, le bilan entrée – sortie, soit équilibré : rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme.

C'est bien le sens de la notion, en hydrologie, de déficit d'écoulement qui pointe du doigt l'eau que nous aurions aimé voir passer à telle ou telle station hydrométrique, mais qui ne s'est pas écoulée. Le modèle (le bilan) doit être implicitement équilibré, pas en déficit ! Et par suite, la rivière doit au moins potentiellement toujours pouvoir satisfaire aux besoins anthropiques quitte, comme cela a été parfois le cas, de l'assécher ou à en rendre le cours tout à fait indigent. En d'autres termes, si la demande n'est pas totalement satisfaite, il faut trouver les moyens d'augmenter le terme productif, par des pompes, par des barrages, par des apports extérieurs (comme pour l'Ardèche par exemple), etc.

Dans cette perspective, la notion d'équilibre joue le rôle de point de référence. Si le bilan est très déséquilibré entre l'offre naturelle et la demande sociétale, alors nous sommes en situation de sécheresse. Tout écart est alors un accident (climatique, etc.) qui vient perturber la manifestation de l'ordre attendu, comme normalité. Ne parle-t-on pas ainsi de débit « normal », de « normale climatique », de température « normale » pour tel ou tel jour, mais aussi d'écart à la « normale » (définie comme la moyenne) comme quelque chose de « pathologique » ?

Ce fondement, largement métaphysique, ancre la sécheresse dans cette idée matériellement impraticable en fait de bilan hydrologique. On voit dès lors que la logique du bilan, pour des raisons d'échelle (besoin d'informations locales) et pour des raisons méthodologiques, pratiques voire ontologiques (la normalité fait le lit de la variabilité qui elle est bien réelle et documentée) n'est pas très satisfaisante. Ne peut-on imaginer autre chose ?

Nous ferons l'hypothèse qu'il est possible de déterminer le niveau local de sécheresse par des calculs de probabilité dans le cadre du paradigme bayésien et en mettant en œuvre des réseaux bayésiens. Cette solution certes ne permettra pas, dans un premier temps, de calculer des volumes prélevables, mais devrait offrir une évaluation du niveau de la tension entre la ressource et la demande en eau sur laquelle les décideurs politiques devraient pouvoir faire fond et prendre des décisions au plus près du phénomène.

3. APPROCHE PROBABILISTE

Fort de ce constat, nous proposons d'abandonner l'approche bilancielle afin de développer une appréciation de la sécheresse au travers d'une logique probabiliste. Il est ainsi possible d'attribuer une probabilité à chaque valeur de chaque variable. Cette probabilité peut être comprise comme une proportion au sein d'un ensemble ou d'une population, soit la proportion des éléments d'un ensemble possédant un attribut donné, ou une valeur d'un attribut donné. Cette valeur pouvant être définie comme étant entre deux bornes. Ceci conduit à la notion de classe. La répartition des effectifs par classe permettant de construire un histogramme qui est une représentation graphique d'une distribution de probabilité.

Nous cherchons donc à définir, pour chaque variable constitutive de la construction des niveaux de la sécheresse, une distribution de probabilité qui va receler toute l'information dont on dispose et qui permettra de différencier un état proche de la moyenne, d'un état rare ; cette rareté pouvant être un très fort excès, comme un très important manque d'eau. La distribution intègre toute la variabilité du phénomène.

Cet ensemble de variables devra ensuite être organisé dans un réseau bayésien constitué d'arcs (relations) et de sommets (variables décrites par des distributions de probabilité) constituant un graphe acyclique. Les arcs peuvent se lire comme des corrélations entre une variable A et une variable D et parfois comme des causalités entre une variable B et la variable D. À partir d'une telle structure il est techniquement possible de remonter de la conséquence (la variable D) à la cause A et d'en apprécier l'importance ; les causes pouvant être multiples (A, B, C...) et indépendantes entre elles, ou pas. Aucune restriction dans le champ d'application du théorème de Bayes ne semble limiter cette approche.

3.1 Variables pertinentes

Il convient, dans un premier temps, de définir les variables pertinentes qui ne sont probablement pas accessibles directement au travers des données collectées (pluie, débit, etc.). Nous proposerons ainsi un travail d'inventaire et une réflexion sur les types de distributions (gaussiennes ou non) que l'on peut avoir à traiter. Ce qui conduit à une réflexion

sur les anamorphoses possibles, les transformations de variables afin de rendre ces distributions les plus comparables possible, gaussiennes si possible, pour, par exemple, travailler à partir de leurs corrélations. Il semble toutefois clair, comme nous le verrons ci-dessous avec l'exemple des récessions du Gardon et de ses affluents, que certaines variables peuvent être non gaussiennes, paréliennes dans certains cas lorsque la hiérarchie des valeurs est très importante. Il ne semble toutefois pas que ces différences statistiques structurelles soient rédhibitoires pour un modèle bayésien reposant, pour la calculabilité, sur un réseau bayésien. Les règles d'inférence bayésiennes appliquées même approximativement (cf. la calculabilité sous MCMC) semblent suffire à apprendre de, et sur notre monde.

De ce point de vue, l'approche proposée est intrinsèquement probabiliste et vise à être relative à un moment et à un lieu. Il s'agit de partir de la propension des phénomènes eux-mêmes. Ces probabilités dépendent des conditions climatiques, de surface (dans les bassins versants), mais aussi anthropiques... de leur réalisation. Plus les mesures de chaque variable seront nombreuses, plus les distributions seront stables et moins la variance — si elle existe, ce qui n'est pas le cas dans certaines distributions paréliennes — sera connue. C'est alors une stabilité qui est observable au niveau des populations et pas des individus. L'évolution de la variance en fonction des effectifs devra aussi être étudiée. Lorsque celle-ci n'est pas calculable (cas des distributions fortement hiérarchiques, paréliennes) l'exposant de Pareto pourra être pris comme indicateur synthétique.

La différence entre la quantité de données disponibles (et leur qualité), pour différentes variables, est très importante. Les données de pluie sont bien plus nombreuses et s'étendent sur une durée bien plus longue que les données de débit. Les données sur les consommations sont très limitées sauf pour l'adduction d'eau potable (AEP), mais les valeurs disponibles existent avec des pas de temps longs (parfois l'année). Dans certains cas, comme pour les prélèvements dans les forages plus ou moins privés, seuls des dires d'experts pourraient être retenus. La diversité du niveau d'information disponible entre les variables est extrême. Il faut donc disposer d'une modélisation qui puisse accepter ce type de structuration très particulière de l'information, ce que peut faire l'approche bayésienne.

Le climat ou le régime (hydrologique) renvoie à une norme, à un état normal, en moyenne observée de façon répétitive ce qui permet de réaliser une classification. Ainsi, le climat méditerranéen est-il un climat à quatre saisons dont une est très aride, ce qui crée des situations de tension lorsque la demande en eau est forte en été. Pour des précipitations identiques, si l'aridité était hivernale, période où la demande en eau est faible, personne ne parlerait de sécheresse.

Les écarts à ces situations attendues sont conçus comme des accidents « climatiques », d'une certaine façon anormaux, ce qu'ils ne sont pas. Or le développement économique se fonde sur la normalité sur ce qui est habituel, bien plus que sur les situations rares. Mais la survenance de situations rares peut faire dévier ou basculer, par exemple, un système productif, qui ne reviendra jamais à la situation antérieure (effet mémoire). Les conséquences peuvent être très durables. Par exemple les jours de très grand froid de l'hiver 56 ont détruit, dans le sud de la France, de nombreuses oliveraies qui n'ont jamais été replantées. De même la bactérie *Xylella fastidiosa* qui a ravagé les oliveraies du sud de l'Italie, et qui progresse, pourrait aussi être un évènement de cet ordre, comme le phyloxera en son temps, etc. On peut imaginer que le changement climatique aboutisse à un cygne noir au sens de N. N. Taleb (2008). Dans ces conditions l'objectif est bien de pouvoir comprendre et modéliser les situations rares. Cela étant dans notre perspective appliquée, la question essentielle est celle de l'utilité par exemple prédictive, mais pas seulement (intelligibilité des causalités...) des modèles et pas particulièrement leur véracité.

3.2 Variables et loi de probabilité

Chaque variable doit correspondre à une loi de probabilité. Ces probabilités peuvent être conçues comme des fréquences d'apparition ou comme des niveaux d'incertitude sur notre connaissance de tel ou tel phénomène. Dans la plupart des cas, la probabilité en question est une probabilité conditionnelle : sachant que... quelle est la probabilité de... ? Sachant que le niveau d'impluviosité observé est de fréquence très rare, quelle est la probabilité que le niveau de tension de la sécheresse soit important ? Etc. Dans cette perspective bayésienne, il devient aussi possible de postuler une distribution pour une variable non mesurée à partir de dires d'experts qui évaluent notre connaissance empirique, intuitive de tel ou tel phénomène. Ce faisant il faut rendre nos croyances conformes aux lois de probabilité autant que possible.

Ces distributions peuvent ensuite être comparées, croisées, combinées dans un modèle bayésien — au travers de réseaux bayésiens — qui permettra de caractériser le niveau de la tension. La probabilité ainsi obtenue à partir d'un modèle est subjective, car c'est au fond l'opinion du modèle et il semble que nous soyons toujours conduits à raisonner avec des modèles. Les modalités de combinaison des distributions se font aujourd'hui avec des logiciels qui intègrent des outils de calcul sophistiqués de type MCMC (Markov Chain Monte Carlo), etc., et avec des réseaux bayésiens rendus accessibles aux thématiciens (Robert Ch., 1992 ; Naïm P. et al, 2008 ; Boreux J.J. et al., 2010 ; Albert I. et al. 2015 ; Drouet I., 2017.a). Ainsi, « au lieu de calculer exactement les intégrales [...] les méthodes de Monte Carlo effectuent un échantillonnage qui permet le calcul d'approximations des intégrales » (Hoang L. N., 2018, p. 105), ce qui peut être fait avec le programme BUGs (Bayesian inference Using Gibbs Sampling).

Dans la mesure, par exemple, où les variables peuvent être actualisées et donc les distributions de probabilité recalculées jour après jour (au pas de temps de la mesure) et dans la mesure où, même des distributions de probabilité inconnues, peuvent être, dans une modélisation bayésienne, dans un premier temps (*a priori*), établies à partir de dires d'experts, il apparaît qu'il devient théoriquement possible de caractériser le niveau de tension de la sécheresse dans un bassin versant. Selon cette mécanique, il peut être attendu, qu'au fur et à mesure que les informations seront collectées, le modèle s'affine et se précise, quitte à ajouter des données, voire de nouvelles variables, ou des variables différemment transformées ou d'en supprimer (variables finalement non causales).

On peut envisager ainsi, après la collecte et la mise en forme de toutes les variables disponibles concaténées dans un modèle, de produire un nouveau plan d'acquisition d'informations pour les variables mal connues et peu renseignées. Ces résultats venant s'agréger à ceux déjà entrés dans le modèle dans la mesure où la réflexion se fonde sur des distributions qui sont intemporelles. Il n'est donc pas nécessaire, comme dans un modèle de bilan, d'avoir des informations synchrones, mais seulement de faire l'hypothèse d'une stationnarité relativement raisonnable (peu de modifications structurelles sur les déterminants des variables) des variables mises en jeu ou tout le moins que les évolutions structurelles restent très en-deçà de la variabilité extérieure observée. On peut pour cela, pour des variables évolutives comme la consommation d'eau potable, qui varie avec le nombre de personnes, introduire, d'un côté, non le volume mesuré, mais une consommation par personne, ou par compteur, par habitation, et d'un autre côté la distribution de la population.

Il est d'ailleurs possible d'envisager que certaines de ces variables soient le résultat de calculs ou de modélisations particulières permettant de dégager des informations essentielles pour déterminer le niveau de tension, donc de la sécheresse. L'analyse proposée se développe ainsi à un autre niveau que celui d'une ou de *n* valeurs de variables (par exemple mensuelles ou annuelles) entrées dans un bilan. Elle saisit, à plus petite échelle, celle de la distribution, l'ensemble de l'information disponible. Il ne s'agit plus de travailler sur des moments (sur des périodes), mais sur une information bien plus large, et bien plus intégrative.

Ceci implique de donner toute sa place à la variabilité observable dans les variables entrant dans la définition de la tension pouvant exister entre les besoins en eau et l'offre naturelle.

3.3 Perception et construction psychologique de la sécheresse

Nous avons indiqué que la sécheresse est un construit sociétal. Cela implique que la perception que nous en avons entre en jeu dans la conception même, dans l'évaluation de son niveau. Ceci a évidemment une grande influence sur les décisions prises ou à prendre. Il existe donc une esthétique de la sécheresse (capacité d'éprouver) qui se fonde, en partie, sur une psychologie de la sécheresse et sur des mécanismes neuropsychologiques, cognitifs qui peuvent être, eux aussi, décrits de façon bayésienne, comme nous allons le voir. « Il nous faut absolument diminuer nos croyances [ce en quoi nous croyons, ce en quoi nous avons foi] en nos intuitions et en nos raisonnements non bayésiens » note Hoang L. N., (2018, p.31); plus exactement il faut rendre bayésiennes nos croyances. « Le bayésianisme concernant les hypothèses et le raisonnement scientifique implique que les hypothèses scientifiques peuvent se voir attribuer des probabilités et que le raisonnement scientifique consiste à réviser ces probabilités par conditionnalisation bayésienne à mesure que de nouvelles informations deviennent disponibles. Ainsi, le bayésianisme n'introduit pas de différence entre les hypothèses scientifiques et celles qui ne le sont pas, ou entre raisonnement scientifique et raisonnement ordinaire, mais au contraire les unifie » (Drouet I., 2017.b, p.10).

3.3.1 Rationalisation probabiliste du phénomène

Cette hypothèse de la sécheresse comme construit sociétal permet de sortir de la vision classique qui la réduit à une aridité affrontée à des besoins bien plus fantasmés que rationalisés. Dans un tel cadre très limité, on se trouve confronté à toute une série d'affirmations plus ou moins fondées sur l'absence de pluie, sur le rôle de la température, sur celui de la végétation, sur la nécessité de couper les ripisylves ou pas, etc., et sur la déclinaison de besoins en rapport avec des choix potentiels de productions végétales, de possibilités de développements, de réflexions environnementalistes, de recherche de plaisirs (baignade...), etc. qui sont extrêmement flous.

La gestion des milieux naturels et la régulation de l'offre et de la demande en eau deviennent alors impossibles, et les discussions dans les différentes assemblées parfois, ubuesques. On voit bien par exemple que l'idée, qui n'était peut-être pas mauvaise, d'établir des volumes prélevables (débits disponibles pour des activités humaines, car au-delà des débits nécessaires au bon état écologique des rivières), en climat méditerranéen en particulier, devient presque inapplicable et donc est inappliquée. Comment faire autrement ? Cela se heurte à une difficulté structurelle de la pensée humaine.

Si « on gagne à rendre nos croyances conformes aux lois des probabilités comme l'impose le bayésianisme » (Hoang L. N., 2018, p.18), être rationnel c'est accepter ces lois de probabilité. Ainsi « Une probabilité épistémique considère que le phénomène peut être déterministe, mais que l'influence des facteurs qui le détermine est trop mal connue (même si leur identité est connue) et que seule une vision probabiliste peut en rendre compte (Cozic M., Walliser B., 2017, p.92).

Or nous avons une faible capacité à évaluer intuitivement les résultats de calculs de probabilité. Il faut dès lors bien mieux passer par un outil dédié et une méthode bien définie qui auraient le rôle d'une sorte de prothèse comme la calculatrice a pu l'être pour le calcul mental. Les réseaux bayésiens peuvent aujourd'hui, en théorie, assurer le traitement probabiliste nécessaire de cette information.

Un des gros avantages du théorème de Bayes est qu'il permet d'actualiser une probabilité à partir d'informations. Cette actualisation peut être faite, et doit être faite, dans un modèle (réseau bayésien) décrivant de façon probabiliste les niveaux de la sécheresse, mais elle se fait aussi dans la tête des personnes qui sont conduites à l'observer (pour des raisons professionnelles : gestionnaires de bassin, agriculteurs...) ou pour des raisons régaliennes (autorités préfectorales, nationales...), mais dans toutes ces situations les informations disponibles sont incertaines.

Il s'agit donc tout autant de mettre en place une modélisation formelle que de comprendre les mécanismes qui conduisent à une compréhension de la situation, ce qui conduira, ou non, à une prise de décision, mais tant le choix de l'action ou celui de l'inaction, suivant les cas, devant être le meilleur. Cela étant, plus les informations dont on dispose sont sophistiquées, plus on aura besoin de données pour en déterminer la structure cachée. Il s'agit au final de découvrir une heuristique qui permette d'avoir une mesure du niveau de la tension, vite et la meilleure possible.

3.3.2 Modèle bayésien du cerveau ?

La recherche poursuivie ici, dans la mesure où ce qui est recherché doit aussi être une aide à la décision, doit tenir compte de ces deux volets : le volet technique construit à partir d'indicateurs plus ou moins incertains (pluie, température, AEP, etc. ; cf. ci-dessous) et le volet humain encore plus mystérieux qui renvoie à notre capacité d'éprouver, à notre capacité de convertir des perceptions sensorielles (la terre sèche et poussiéreuse, les feuilles brûlées et racornies, les végétaux jaunes et flétris, les animaux apathiques et somnolents, etc. sans parler des sourcins qui ont toujours coulé, mais qui ne coulent plus cette année, des choses que l'on a jamais vues, etc.) en informations, supports de décisions, de revendications, de projets et donc d'actions. Tout ceci avec une mémoire des phénomènes plus ou moins défaillante ou impossible (qui se souvient de la grande sécheresse de 1920 – 21 dans le sud-est de la France ?) et une variabilité spatiale qui peut être énorme.

« Dès 1983, le psychologue informaticien Geoffrey Hinton, l'un des pères fondateurs du *deep learning*, suggéra, avec ses co-auteurs, que le cerveau se comportait comme une machine à prendre des décisions à partir d'observations faites par les sens. En 1988, Edwin Jaynes suggéra que la manière dont le cerveau y parvient repose sur la formule de Bayes. Dans les années 1990, Hinton et Friston développèrent alors un modèle où une couverture de Markov [c'est un nœud et les arcs et nœuds qui lui sont liés qui comprennent ses parents, ses enfants et les parents de ses enfants ; c'est un lieu structurel d'un réseau bayésien déployé à plus petite échelle lié à un mini réseau] séparait le cerveau du monde extérieur et où le cerveau parvenait malgré tout à reconstruire un modèle de tout le monde extérieur, en utilisant notamment l'inférence bayésienne variationnelle que Friston généralisa à la vie en 2013. L'hypothèse de Friston, Hinton et Jaynes, c'est que nos cerveaux reconstituent tout un modèle du monde extérieur à partir uniquement des données sensorielles » (Hoang L.N., 2018, p.356). Ceci va plus loin que la « simple » la prise en compte de rapports esthétiques liés à la capacité d'éprouver dans la mesure où le cerveau bayésien serait à même de définir la structure causale du monde, ou du moins de l'inférer à partir des ressentis, puis de la faire évoluer en fonction des erreurs de prévisions constatées.

Cela étant, on peut simplifier la situation en faisant, nous aussi, l'hypothèse que notre cerveau soit un générateur d'inférences qui prédirait à chaque instant les informations que ses sens lui rapporteraient plus ou moins, car le niveau de culture intervient ici grandement, certaines perceptions pouvant être, en outre, inconscientes. Autrement dit, le cerveau élaborerait des croyances (je pense que cette journée va être très chaude, je pense que la sécheresse va être sévère cette année, il n'y aura pas de champignon cet automne, etc.), lesquelles seraient ensuite confrontées aux observations, aux informations rapportées par les sens.

Dans le cas des feux, ce type de structure de pensée a même été reconnu si ce n'est investigué. Ainsi, lors de brûlages dirigés (essais de mises à feu) tel pompier très expérimenté pouvait dire : « aujourd'hui ça ne brûlera pas » et effectivement cela ne brûlait pas ! (communication personnelle de S. Sauvagnargues – IMT Mines Alès). Que percevait ce pompier expérimenté et quelle inférence bâtissait-il ? De toute évidence, il avait grand mal à verbaliser ce qu'il pensait, à exprimer rationnellement ce qui le conduisait à cette hypothèse qui se révélait juste.

Il y a ce qui est attendu, considéré comme probable, et le reste. Ceci conduit à mieux formaliser la dimension esthétique du problème. Comprendre ce qui se passe c'est construire puis sélectionner un modèle, fort abstrait, pour partie seulement conscient, qui soit compatible avec les informations reçues au travers d'une perception. Ceci est toutefois d'autant plus aisé à faire que le système modélisé est linéaire, avec peu de variables et non chaotique (au sens du chaos déterministe, mais qui peut apparaître dans des systèmes avec très peu de degrés de liberté). Même si la sécheresse est un phénomène fortement multidimensionnel, il reste fortement chaotique et sa prévisibilité à moyen et long terme est très spéculative.

Le cerveau « s'attend » à quelque chose qui se vérifiera ou non, souvent ou pas. Si la croyance se trouve contredite, l'erreur de prédiction sera utilisée pour modifier les croyances, c'est-à-dire ce à quoi l'on doit s'attendre, enrichissant ainsi la base de connaissance, l'expérience. C'est d'ailleurs ainsi qu'une expertise se constitue, expertises d'experts qui peuvent être sollicitées pour la modélisation formelle de variables non évaluées ou mal évaluées. Nous avons ici une justification à l'introduction des dires d'experts, sous la forme de probabilités, dans une modélisation bayésienne.

Dans cette perspective, il faut que le cerveau « internalise » la structure causale du monde tout comme peut le faire, comme nous le verrons, un réseau bayésien articulant un ensemble de distributions de probabilité décrivant des variables porteuses chacune d'une part de la causalité de ce qui peut advenir. Tout le travail est, dans un cas (le cerveau) comme dans l'autre (le modèle bayésien), de réduire l'erreur de prédiction, donc d'avoir suffisamment décrit les causalités essentielles pour en déduire la situation à observer ou observée, conjoncturelle. Cela étant, ces modèles dépendent de nombreux paramètres libres qu'il convient d'imaginer et d'évaluer.

3.3.3 Modèle bayésien formel (réseau)

La recherche du niveau de la sécheresse consiste ainsi à utiliser les signaux du monde extérieur, les mesures, etc. afin de contraindre ces paramètres libres, et à les ramener à des valeurs correspondant à la situation. Cet apport d'information va retentir sur les modèles internes, sur les *a priori* humains, sur le modèle bayésien formel, lesquels vont se trouver modifiés.

Un réseau bayésien est un modèle graphique probabiliste de la forme d'un graphe acyclique qui organise structurellement des objets probabilistes, des distributions de probabilité logées dans les nœuds. Les arcs représentent les dépendances entre variables aléatoires. Ainsi émerge une structure de causalité. C'est donc la base d'un modèle bayésien dont les nouvelles informations, expérimentations et observations viendront tester la validité.

Faisant cela, l'inférence bayésienne devient une façon de déterminer la meilleure hypothèse (rôle, poids et enchaînement des causes) explicative de ce qui est observé. Quelle est donc la probabilité que le modèle construit soit valide au regard des nouvelles acquisitions d'information ? C'est une question de plausibilité du modèle qui peut être tranchée par un écart de prévision.

Sur cette base, il peut être fait une relation entre les observations conjoncturelles et les causes, plus ou moins importantes, qui les explicitent. On pourrait ainsi arriver à montrer que ce n'est pas tant l'impluviosité qui est la cause principale d'un niveau de sécheresse observé, mais le retour massif de l'eau à l'atmosphère en raison d'une évapotranspiration majeure liée à une couverture végétale climacique, la présence de vent et une forte chaleur, par exemple. Ceci permettrait de faire le tri entre plusieurs types de causalités majeures et donc d'adapter les réponses, tout en tranchant les débats, qui tournent en rond, de différentes assemblées locales.

Si on accepte cette conception du cerveau comme outil bayésien (Daunizeau J., 2017 ; Dehaene, S., 2018), ce dernier devient comme un « miroir de la nature » (Hohwy J., 2013), ce qui permet de comprendre pourquoi et comment le cerveau comprend la nature. Ce qui reste tout de même un grand mystère, tout comme de savoir pourquoi cette nature nous est compréhensible ? Le cerveau du Pompier bayésien dispose, semble-t-il, d'un bon modèle. Reste à le formaliser pour qu'il puisse être disponible partout et pour tous.

Cette hypothèse forte, dans la perspective qui est la nôtre, simplifie la mise en place d'une modélisation bayésienne des niveaux de sécheresse à partir de connaissances très bien établies. La base statistique formelle serait donc la même, que ce soit pour les décideurs ou les gestionnaires, ou pour les scientifiques construisant une modélisation bayésienne de la sécheresse. Dans les deux cas, le théorème de Bayes permet de faire des projections inverses. Il permet de déterminer la probabilité qu'un modèle interne (dans le cerveau ou dans un ordinateur) soit correct, à partir de l'observation de ses conséquences (Dehaene S., 2018).

En d'autres termes, il permet de dire si la modélisation réalisée est bonne en fonction des observations acquises postérieurement — qui jouent un rôle de test —, donc des situations conjoncturelles nouvelles. Il y a ainsi une comparaison formalisée possible entre ce qui est su et ce qui est nouveau ; le nouveau étant toutefois, en partie, fonction de ce qui est su (cf. le problème de l'expérience). Si l'adéquation n'est pas bonne, les nouvelles informations devront aller modifier le modèle interne. Ce mécanisme de « calage » incrémental doit fonctionner en boucle jusqu'à un état du modèle interne où l'erreur de prévision devient négligeable ou acceptable.

Dès lors, on voit toute la complexité de la sécheresse si elle n'est pas comprise comme une « simple » question d'aridité et de manque d'eau à combler avec un moyen technique adapté.

3.3.4 Forme du modèle bayésien

La base de la réflexion et de la compréhension est fondée sur la capacité d'éprouver, c'est-à-dire sur la capacité de recevoir une information, un stimulus qui est reçu, parce qu'il peut être perçu en raison des *a priori* existant, lesquels sont

en partie liés à l'apprentissage. Cette information va ensuite provoquer une modification des *a priori* eux-mêmes. On est clairement là dans une perspective bayésienne d'incrémentation, d'amélioration des conceptions à partir d'informations pouvant être reconnues comme telles au regard de la question posée et de la connaissance acquise. Comment ceci pourrait être rendu plus formel d'un point de vue général ? La possibilité de faire reposer l'approche de la sécheresse (offre naturelle vs besoins anthropiques vs perceptions des acteurs) sur une même logique, sur le seul théorème de Bayes est conforme au rasoir d'Ockham, à une recherche de simplicité.

Soit deux distributions de probabilité de variables naturelles notées : $d(A)$ et $d(B)$. Il peut être recherché un écart entre ces deux distributions. Plus exactement, les variables que ces distributions peuvent être, ou non, liées, donc dépendantes ou indépendantes ce que mesure un coefficient de corrélation. La combinaison de ces deux distributions permet de générer une troisième distribution dite $d(C)$. Celle-ci exprime par exemple les probabilités des niveaux d'aridité. Cette structure en Y (réseau) peut être considérée comme un modèle interne générique. Il peut être dupliqué pour des variables anthropiques (AEP, etc.) : $d(a)$, $d(b)$ et donc $d(c)$ qui caractérisent le niveau des besoins. Les distributions $d(C)$ et $d(c)$ peuvent être combinées. On arrive ainsi à la caractérisation des niveaux de probabilité de la sécheresse. Imaginons que la situation observable, vécue, après calculs d'actualisation corresponde à un niveau important de l'aridité et, de même, à un niveau important de besoins en eau. Dans ce cas, il est clair que le niveau de sécheresse sera très élevé et ainsi formalisé, si ce n'est quantifié, dans une distribution $d(Cc)$.

De même, il peut être établi un écart entre, ce qui est connu [$d(Cc)$], et ce qui est logiquement attendu, prévu dans le futur (F) à partir des distributions A, B, a et b, avant actualisation. Si l'écart entre les distributions $d(C)$ et $d(c)$ et F est faible cela signifie que l'information contenue dans les distributions A, B, a et b est déjà très bonne et suffit à inférer ce qui peut arriver (prédiction). On aurait ainsi une description probabiliste qui permettrait de calculer, par exemple, des niveaux de probabilité de bas débits hydrologiques.

Si l'écart est fort, cela implique que le modèle interne est encore très imparfait et bénéficiera grandement des nouvelles informations acquises sur les variables A, B, a et b.

Il est donc possible d'avoir un test sur la connaissance suffisante d'un phénomène, résumé par sa distribution, en fixant un écart maximal entre $d(Cc)$ et F. De même, il est possible d'avoir un test sur la qualité de la corrélation entre $d(A)$ et $d(B)$ et entre $d(A)$ et $d(C)$ et entre $d(B)$ et $d(C)$. Entre $d(A)$ et $d(B)$ cela revient à caractériser l'indépendance des variables et dans un tel cas, cela simplifie le réseau bayésien. Entre $d(A)$ et $d(C)$ cela revient à mesurer le poids de $d(A)$ dans $d(C)$ [pareillement avec $d(B)$]. Si le réseau n'a pas deux variables, mais six ou huit, on peut faire un graphe des corrélations entre toutes ces variables et ainsi caractériser un élément de la causalité du niveau de tension de la sécheresse. Ceci sous exigence de calculabilité rapide.

De même, il est possible de voir le poids respectif de chaque variable dans la formation de $d(C)$ et donc de déterminer si le paramètre essentiel c'est l'absence de pluie ou l'importance de l'évapotranspiration réelle. Il devient possible, théoriquement, de grader les causes. Dans le cas où une variable serait très faiblement liée aux autres et peu causale dans la définition de $d(C)$, ou de $d(c)$, cette variable pourrait être supprimée. On peut même ainsi envisager un modèle « noyau » regroupant seulement les variables essentielles, qui serait le cœur d'une modélisation plus large, mais bien plus rapide à mettre en œuvre pour une première approximation. Ce modèle interne pouvant ensuite être étendu, complexifié, etc. afin d'accéder à la part d'information, de prévision qui manque.

En fonction de n boucles de rétroactions, d'expérience, d'années de mesures et d'observations la caractérisation du niveau de tension [$d(C,c)$] devrait s'améliorer. La question étant alors de savoir quels nombres d'épreuves recouvrent n . Est-ce un nombre de l'ordre de 3, 7, 10, 30 ? Plus ? Moins ? En d'autres termes, en combien de temps une base suffisante, c'est-à-dire produisant des résultats satisfaisants peut être constituée ? Ceci conduit à définir un seuil minimal à partir duquel le système de traitement de données commence à être opérationnel, et gérable en routine par des services. On peut même imaginer que ce temps ne soit pas le même pour toutes les variables. Les variables d'essence parétienne surtout sans moyenne et écart type doivent certainement être décrites par des séries longues d'épreuves. Il faut garder à l'esprit dans leur cas qu'un événement exceptionnel est toujours possible (cygne noir de N.N. Taleb, 2008). L'absence de pluies est probablement de cet ordre. Mais inversement, à un pas de temps relativement large (valeurs journalières) la température doit être bien plus décrite par une distribution de forme subgaussienne. Il en est probablement de même pour l'ETR, etc. Dans ces cas de phénomènes relativement réguliers et bornés, une information plus limitée est probablement suffisante. Ainsi des variables anthropiques comme la consommation d'eau potable (AEP) semblent très stables et quelques années de données devraient suffire.

« L'approche bayésienne ne laisse pas l'expression d'un résultat à la fantaisie de l'expérimentateur, mais vise à ce qu'il exploite de la meilleure façon possible l'ensemble des informations dont il dispose en lui permettant de toutes les intégrer à une évaluation probabiliste de son état de connaissance » (Grégy F., Courtenay N. de, 2017, 368).

3.3.5 Modélisation, prévision, actualisation et décision

La sécheresse est un phénomène complexe qu'il convient d'aborder, tant du côté physique que du côté humain, par un ensemble et une cascade de distributions. Chaque apport d'information, général ou parcellaire, conduisant à préciser la statistique du système de variables décrivant le niveau de sécheresse. Par cascade, nous entendons une suite de distributions qui structurellement ne s'organiseraient pas seulement comme un Y, mais comme un arbre depuis ses feuilles (les distributions des variables) jusqu'au pied du tronc qui représenterait la distribution des probabilités des niveaux de sécheresse ; chaque nœud (sommet) étant une distribution combinée, soit de distributions combinées de variables sus-jacentes, soit intégrant en plus la distribution d'une variable originelle pensée comme n'intervenant qu'à un niveau particulier du modèle.

Cette structure interne, que l'on peut imaginer fractale (organisée en échelle) renvoie aussi à une logique d'emboîtement de certaines variables tant dans l'étendue, que dans les échelles. Tel phénomène zonal (un aquifère par exemple) sera connu par une variable de portée zonale (la piézométrie) alors que telle variable (la couverture végétale par exemple) sera très différente ici ou là, au-dessus de l'aquifère, donc à bien plus grande échelle. De même, la relation entre les distributions de stations amont et aval, sur une même rivière, sera forte et très redondante.

Une des questions pratiques est donc de savoir comment construire cet arbre, ce réseau bayésien afin qu'il rende compte du mieux possible des niveaux de sécheresse ? Il y a là un vrai chantier qui doit s'initier avec la caractérisation d'un premier noyau sur la base de la littérature et des perceptions ou expertises disponibles. Celui-ci devra ensuite évoluer, se déployer, se transformer afin de saisir le plus possible les causalités internes des niveaux de sécheresse.

Dans la mesure où il serait possible d'arriver à une modélisation des niveaux de la sécheresse, il devient possible de comparer ce qui est attendu par ce qui est éprouvé par tel ou tel expert, mais aussi de tester les décisions régaliennes transcrites dans des arrêtés de sécheresse. Ces décisions sont-elles, comme les prédictions faites et tel ou tel « cerveau », proches ou non de la réalité modélisée ? Si oui, le système régalién de gestion correspond à une réelle prise en compte et en charge du phénomène. Sinon cela signifie que ce processus de décision doit être amélioré par apport de nouvelles informations, ou d'informations traitées de façon nouvelle dans un modèle bayésien.

Tous ces éléments conduisent à penser que l'approche bayésienne se développe et/ou peut être envisagée à deux niveaux, ce qui est satisfaisant du point de vue de la compréhension du phénomène et de sa possible gestion. Elle peut être utilisée pour décrire les modalités de fonctionnement du cerveau lui-même et, au-delà, en faisant l'hypothèse que l'agrégation des cerveaux (donc d'un groupe) suit le même type de fonctionnement, elle peut être utilisée pour rendre compte des perceptions et des modifications potentielles des conceptions ou des connaissances d'une population locale citoyennes ou d'acteurs administratifs ou politiques. D'une certaine façon, le travail sous le mode participatif cherche, dans un échange fondant la science impliquée, à débattre sur des crédences bayésiennes.

Par ailleurs, sur un autre plan, l'approche bayésienne peut être utilisée pour modéliser la caractérisation d'un état de tension relatif à la sécheresse en permettant l'intégration progressive d'informations qui vont venir modifier, puis préciser les descripteurs de cet état de tension. « Le bayésianisme se présente [alors] comme la meilleure façon de représenter l'incertitude dans un contexte décisionnel » (Drouet I., 2017.b, p.16).

Mais dans les deux cas, la question initiale est celle du choix des variables, de leur mise en forme, de leur caractérisation statistique (parétienne, gaussienne, etc.) et, au final, de leur articulation dans un réseau bayésien, dont la structure est globalement celle d'un arbre.

3.4 Heuristique du modèle bayésien de la sécheresse

L'approche bayésienne se fonde sur des probabilités *a priori* subjectives puis utilise les retours d'expérience pour les actualiser. À l'issue de chaque cycle, ou de *n* cycles d'actualisation qui précisent la distribution *a posteriori*, une décision peut être prise sur cette base probabiliste en relation avec les perceptions du phénomène. Dans cette optique, les fréquences d'occurrences peuvent être comprises comme un degré de croyance.

Cela étant l'approche bayésienne est basée sur des probabilités conditionnelles qui permettent de déterminer quelle est la probabilité d'une situation, d'une valeur... sachant, connaissant une information qui est liée à la probabilité recherchée. Si la connaissance disponible évolue, la probabilité recherchée se transformera selon le théorème de Bayes. La probabilité est ici un état de connaissance. La probabilité pouvant être considérée comme une mesure particulière d'un phénomène, de *x* phénomènes dont les distributions de probabilité peuvent être comparées et croisées.

Au final, un processus de décision consiste à estimer un état qui est par nature incertain. Le choix qui est fait doit s'appuyer sur une information (une distribution) qui résume au mieux l'état observé et qui précise le niveau d'incertitude que porte cette information.

3.4.1 Types d'approches

Classiquement, l'approche fréquentielle nécessite beaucoup d'informations afin d'assurer une approximation valable d'une loi de probabilité (mais laquelle ?) et donc le calcul de temps de retour ou le niveau de rareté d'un phénomène. Ceci n'est pas un problème important si on considère les variables rendant compte d'un ou de phénomènes naturels. Ainsi la pluie, ou son absence, est bien connue, au moins en France, depuis la fin de la Seconde guerre mondiale au pas journalier. Il en est de même globalement pour les débits, pour les niveaux piézométriques, la température de l'air, la vitesse du vent, etc.

Par contre, curieusement, les variables anthropiques qui structurent la demande en eau d'un territoire, ce qui co-définit (avec les variables naturelles) la tension sur la ressource en eau, sont bien moins connues. Il est par exemple très difficile de savoir quels sont les prélèvements, les besoins des agriculteurs, etc. Ceux-ci sont « déterminés », plus ou moins localement, à partir des surfaces de productions identifiées lors du recensement général agricole, mais pas chaque année. De même, tous les prélèvements faits grâce à des forages par de nombreux acteurs agricoles ou non (piscine...) ne sont guère comptabilisés. Les consommations d'eau potable sont certes mieux connues en volume pour des raisons évidentes de facturation, mais avec des pas de temps souvent très lâches (mois, année). Enfin la végétation, pour partie anthropique (produits de bouche, matières premières, etc.), pour partie choisie comme composante essentielle du paysage (reboisement, absence de coupes...) et pour partie naturelle (remontée biologique dans des friches agricoles...) est par définition un gros consommateur peu connu d'eau.

Dans tous ces cas, il est presque impossible d'avoir des séries statistiques conséquentes et qui correspondraient aux nécessités d'une approche fréquentiste. Or l'approche bayésienne peut se déployer et garder sa validité lorsque les informations issues de mesures sont limitées, voire nulles et, dans ce cas, il peut être fait appel, en première approximation (prior), à des dires d'experts.

Cela étant dans une approche bayésienne toute quantité inconnue est considérée comme une variable aléatoire et il faut autant que possible préciser une distribution de probabilité, fut-elle seulement représentée par un histogramme, fondée sur toutes les valeurs possibles de cette variable (Procaccia H., 2008). Ceci conduit à l'idée de variabilité des observations successives (par exemple chaque été...) qui peut être grande, mais qui aboutit progressivement, par agrégation successive d'informations, à une distribution dont la forme devient robuste. En d'autres termes, l'apport d'informations conduit progressivement à une distribution dont la forme, et donc les paramètres, s'ils sont déterminables, sont de plus en plus stables.

Inversement, cette distribution stable étant établie au bout de 10, 20 30 ans par exemple pour la sécheresse, toute nouvelle collection d'informations pourra lui être opposée. L'écart entre les deux distributions montre alors la particularité (ou non) de la situation conjoncturelle.

3.4.2 Quelles variables, quelles distributions ?

Dans les développements numériques proposés ci-dessous, nous chercherons d'abord à établir de telles distributions robustes (dans ces cas parétiennes) et envisagerons en écart des situations observationnelles particulières (annuelles). Il est donc possible de quantifier de cette façon le degré d'étrangeté, ou de normalité, d'une situation conjoncturelle avant que cette information ne soit jointe à l'*apriori* disponible — c'est-à-dire à la connaissance antérieure du phénomène — pour définir le nouveau niveau de croyance caractérisé par la distribution *a posteriori*. Ceci est une première façon d'évaluer une situation perçue comme indésirable ou problématique. Mais l'accumulation de l'information nous fait progressivement passer de l'incertitude la plus forte, et dans ce cas la probabilité est égale à 0, à la certitude la plus assurée, et dans ce cas la probabilité, est égale à 1. Tout écart à 1 mesure l'incertitude qui est la nôtre et la probabilité l'information dont nous disposons.

Cela étant, lorsqu'un phénomène, comme un niveau de sécheresse, doit être quantifié à partir de plusieurs variables aléatoires, il est nécessaire de pouvoir les joindre afin de caractériser un phénomène complexe en usant de lois de probabilités déterminées à partir de phénomènes concourants. Cela peut rarement être fait par le calcul direct, ce qui handicapait beaucoup l'approche bayésienne. Cela peut être envisagé aujourd'hui, et depuis quelques années, grâce à des algorithmes de type MCMC, ce qui lève un frein majeur.

Il faut en outre ajouter qu'une information venant compléter une connaissance *a priori* sera d'autant plus disruptive (ou non) en fonction de la connaissance, de l'expertise dont dispose le praticien, le décideur, voire l'expert, en fonction de sa culture et de son expérience. C'est en cela que ces probabilités sont aussi subjectives. Certes il y a la rareté de l'information qui en fait son prix, mais il y a aussi la compréhension que l'on peut en avoir. Globalement, on sait implicitement qu'il y aura toujours une personne qui percevra l'intérêt majeur d'une information. À l'échelle planétaire, la chose est peut-être vraie si on considère les sept milliards d'humains. Localement, dans un cadre restreint, cela est bien moins évident. Seule l'expérience, année après année, apportera alors une certaine sécurité d'interprétation aux autres acteurs. Ceux-ci ont donc tout intérêt à être épaulés par un modèle.

Soulignons aussi que deux événements indépendants ne sont pas en mesure d'apporter de l'information l'un par rapport à l'autre. Inversement, si deux événements sont dépendants cela implique que l'un renseigne, en partie, sur l'autre. En d'autres termes, si on fait l'hypothèse de l'existence d'une distribution de probabilité qui rendrait compte des niveaux de sécheresses, les distributions des variables qui auront permis de l'établir montreront nécessairement un certain degré de dépendance ; lesquelles corrélations contribueront pour partie à construire la distribution des niveaux de sécheresse.

On voit réapparaître ici une structure arborescente de relations, de corrélations, en capacité de définir, dans un cadre bayésien, la distribution recherchée des niveaux de sécheresse. Ces niveaux de corrélation dont peut rendre compte un coefficient de détermination mesurant le poids de tel ou tel phénomène dans la définition de la distribution des niveaux de sécheresse.

Inversement toute variable qui se trouverait, après calcul, en situation d'indépendance statistique n'apporterait rien à la caractérisation recherchée et pourrait être ignorée, comme indiqué ci-dessus. Il y a là la possibilité de faire un tri objectif entre les variables indispensables, celles qui sont nécessaires, celles qui pourraient être importantes et celles qui n'ont aucune conséquence.

Dans la mesure où nous ne savons exactement quelles sont les variables qui sont déterminantes et encore moins sous quelle forme elles doivent être introduites (distribution des pluies journalières, hebdomadaires... ; distribution des périodes sans pluies avec un seuil à 1 mm, 3 mm, 6 mm, etc. [Martin Ph. 2016, 2019] ; etc.), il y a là un vrai terrain de recherche, de construction de l'arbre portant les distributions unitaires de variables plus ou moins brutes. Mesurer ce degré de dépendance reviendra à établir le niveau d'information d'une distribution par rapport à une autre. Cette structure de niveaux d'information pourra ensuite être étudiée en elle-même et comparée à d'autres, obtenues sous des climats différents (plus humide, plus sec, avec un effet orographique ou non, etc.) dans d'autres situations.

Ce processus d'estimation pourra ainsi être considéré comme un cheminement particulier vers une prise de décision en régime « contrôlé » d'incertitude, en ayant les moyens de quantifier l'information disponible et donc d'avoir conscience de ce qui n'est pas connu et des risques pris lors de la décision qui restera un pari plus ou moins risqué. Il sera alors intéressant de comparer la décision qui aurait dû être prise après un tel cheminement à celle qui a été prise, par exemple année après année, par la promulgation d'arrêtés de sécheresse. On pourra alors voir s'il y a un écart significatif entre une évaluation inductive telle que pratiquée actuellement et un choix qui serait fait après la mise en œuvre d'un processus bayésien et si, d'année en année, les deux évaluations convergent ou divergent.

La construction de ce modèle bayésien vise ainsi à optimiser la décision sur une base rationnelle afin de minimiser les pertes possibles (être trop précautionneux alors que ce n'est pas nécessaire ou au contraire décider des restrictions trop limitées alors que cela aurait été indispensable).

3.4.3 Combinaison des distributions

Il faut ajouter encore un point. Nous avons vu ci-dessus qu'une absence d'incertitude correspond à une probabilité de 1. Ceci peut se réaliser quasiment sous la forme d'un histogramme possédant une seule classe aussi étroite que l'on veut, c'est-à-dire sous la forme d'une densité de probabilité très « piquée », très étroite, élancée comme une pointe de sagaie. La variable correspondant à une telle forme serait très bien connue et décrite, et la distribution de probabilité très informative. *A contrario*, une distribution de probabilité ressemblant au profil de sommets arrondis de « vieilles » montagnes serait bien moins informative. En d'autres termes, si la distribution est gaussienne, ou peut y être ramenée, son écart type sera important dans ce second cas, donc la connaissance de la variable plus faible.

Cette différence de niveau d'information aura pour conséquence que l'influence de la distribution « piquée » sera majeure dans la définition de la distribution recherchée des niveaux de la sécheresse. Une distribution avec un faible écart type (si celui-ci existe) sera déterminante dans la définition de la distribution recherchée, ce qui se traduira par une corrélation forte. La quantité d'information apportée par une distribution peut être mesurée en calculant l'inverse de la variance (information de Fischer ; Procaccia H., 2008). Si l'écart type est très faible, l'information de Fischer sera importante et inversement. Au fur et à mesure que l'on ajoute de l'information, il est alors possible de mettre en évidence l'enrichissement de la connaissance que l'on obtient. La variation de cet enrichissement au fil du temps peut être étudiée et il sera peut-être possible de montrer que cette information de Fischer tend vers une limite à partir de laquelle les ajouts ne seront plus informatifs ou de façon extrêmement limitée. Cela devrait permettre de définir un moment où toutes les distributions de base sont robustes, ou la distribution cible l'est aussi et donc l'état d'information du modèle à partir duquel une évaluation la plus assurée de tel ou tel niveau de sécheresse peut être faite.

4. VARIABLES DESCRIPTEURS DU PHENOMENE

Il faut arriver à une liste de variables descriptrices de différents aspects logiquement emboîtés du phénomène de la sécheresse. La première question est de savoir si ces variables sont celles correspondant à des mesures (volume de pluie, débit...) ou si ce sont des variables construites dans la perspective de mieux caractériser le phénomène à partir des mesures faites.

Nous retiendrons plutôt la seconde idée dans la mesure où, n'ayant pas le besoin de boucler des bilans, nous pouvons nous éloigner de variables massiques et rechercher l'extraction et la quantification d'informations spécifiques plus déterminantes, dans la construction de la sécheresse.

On peut envisager de retenir comme variables construites dans le domaine physique :

- ✓ $V(\phi_1)$ — L'impluviosité sous un seuil x et la loi reliant les paramètres des distributions (une par seuil) et le seuil (Martin Ph., 2019) ; et/ou
- ✓ $V(\phi_2)$ — L'impluviosité, mais pondérée en fonction du temps ; et la loi reliant les paramètres des distributions (une par seuil) et le seuil ; et/ou
- ✓ $V(\phi_3)$ — L'impluviosité pondérée maximisée par l'ETR ; soit la distribution des durées maximisées après soustraction de l'ETR et en fonction d'un moment, donc pondérées ;
- ✓ $V(\phi_4)$ — Les niveaux piézométriques abordés soit par une statistique discrète (Pareto discrète), soit par une statistique des indices de remplissage (I_v) calculés sur le cycle, sur la récession de fin de cycle ou sur le tarissement (Martin Ph., 2020, soumis) ;
- ✓ $V(\phi_5)$ — Les niveaux de débit abordés soit par la statistique discrète (Pareto discrète ; cf. ci-dessous), soit par la statistique d'indices de débit (I_v) calculés sur le cycle, sur la récession de fin de cycle ou sur le tarissement (Canovas I., 2016) ;
- ✓ $V(\phi_6)$ — Les niveaux dits GraviSec (de gravité de la sécheresse) qui intègrent le temps très probablement par un écart à la loi générale GraviSec définie sur le plus possible de phases finales de cycles (Martin Ph. et al., 2019) ;
- ✓ $V(\phi_7)$ — La statistique des coefficients de tarissement (α de Maillet ; paramètres d'un modèle de Horton — Gompertz ; etc.) ;
- ✓ $V(\phi_8)$ — La statistique de la température de l'air ; de l'eau ;
- ✓ $V(\phi_n)$ — Etc.

Cette liste n'est évidemment pas exhaustive. D'autres variables peuvent être retenues. Il convient d'abord d'en proposer un maximum, puis de les mettre en forme, pour *in fine* retenir celles qui sont les plus utiles pour le but recherché.

De même on peut retenir comme variables construites dans le domaine humain :

- ✓ $V(\eta_1)$ — La statistique des AEP ;
- ✓ $V(\eta_2)$ — La consommation d'eau agricole ;
- ✓ $V(\eta_3)$ — Les débits réservés nécessaires au bon état écologique des rivières ;
- ✓ $V(\eta_4)$ — Les indicateurs de canicule, dont la température nocturne ;
- ✓ $V(\eta_5)$ — L'importance de la population et/ou des entreprises en un lieu ;
- ✓ $V(\eta_n)$ — Etc.

On voit très clairement que la liste des variables humaines est bien plus difficile à établir et probablement bien plus limitée. Quand on essayera de mettre des chiffres sur ces variables, cela s'avèrera vraisemblablement problématique. On débouchera ainsi d'une part, sur un recours possible à des dires d'experts et sur, d'autre part, une recommandation de nouvelles collectes des données anthropiques. De plus, il conviendra de définir l'aire géographique permettant d'établir ces données ou sur laquelle il serait intéressant de mesurer chacune des variables.

Il faut ensuite mettre en place une combinaison bayésienne (structure du réseau) de ces variables physiques $V(\phi_x)$ vs $V(\phi_{x+1})$; etc.] et humaines $V(\eta_y)$ vs $V(\eta_{y+1})$; etc.], puis entre la distribution résultante physique et la distribution résultante humaine. On a probablement une structure arborescente avec deux branches qui devraient pouvoir se rejoindre.

- Soit on évalue la probabilité de la situation observée du côté physique et celle observée du côté humain et de cet écart on déduit le niveau de tension, lequel sera d'autant plus fort que les deux probabilités seront faibles ; en cas de différences notables, c'est la probabilité physique qui primera, soit celle de l'offre.
- Soit on calcule une distribution combinée des distributions résultantes physique et humaine afin d'obtenir une distribution des niveaux de sécheresse ; la situation sera alors évaluée par rapport à la probabilité conjoncturellement observée de cette distribution. C'est à cette information qu'en termes de probabilité les décisions prises pourraient être rapportées. De même, en fonction du niveau de faiblesse de la probabilité synthétique, des recommandations pourraient être faites, selon des seuils à établir.

Il convient maintenant d'essayer de montrer comment à partir d'une variable x , une distribution de probabilité peut être établie et quelle est la variabilité du phénomène d'année en année. Pour ce faire nous avons choisi, dans ce texte prospectif, d'aborder les phases de fin de cycles (récession) qui semblent les plus significatives dans la perspective qui est la nôtre.

5. APPROCHE PARETIENNE DISCRETE DES RECESSIONS DE FIN DE CYCLE

Nous avons ainsi choisi non pas de rechercher particulièrement une quantification du tarissement (souvent une ou des décroissances exponentielles), ni de nous fonder sur les valeurs de l'étiage au sens strict (dernier jour du cycle défini comme le débit le plus bas du dit cycle), ni encore d'envisager le calcul de quelques paramètres statistiques descriptifs (moyenne des débits...), mais d'étudier la chronique des cent vingt-neuf débits moyens journaliers observés avant l'étiage. Pour cela nous nous sommes fondés sur des chroniques issues de la Banque Hydro qui offrent quasiment un demi-siècle de données, mais qui sont peu précises en fin de cycle et des chroniques que nous avons construites à haute résolution (5 min) à partir de l'un de nos sites expérimentaux, mais avec une profondeur historique bien plus faible. Seulement six périodes de fin de cycle sont alors disponibles. L'idée est de voir si la qualité des données a une importance majeure ou si c'est au contraire le nombre de cycles qui est déterminant.

5.1 Choix statistiques et méthodologie

Les chroniques disponibles dans la Banque Hydro présentant une incertitude forte pour les basses eaux (ces stations sont surtout exploitées pour prévoir et gérer les phénomènes de crues éclair faisant suite à des épisodes cévenols), nous avons préféré développer d'abord une approche discrète de cette information (par classe de débits). Cette solution conduit à une appréciation statistique des données et non à une évaluation fonctionnelle de la vidange des aquifères (régime non influencé) comme avec l'étude des phases de tarissement (modèle de Maillet, etc.), car les ajustements auraient été très spéculatifs. Toutefois la fréquence de ces classes de débits renseigne sur la probabilité d'occurrence de ces basses eaux.

De même rechercher la phase de tarissement stricte (décroissance exponentielle en situation non influencée) aurait conduit à des difficultés en raison de perturbations de ce phénomène par des apports d'eau (orage...). On peut envisager de reconstruire un tarissement générique (Lang C., 2007, 2011) à partir de n phases et donc de n cycles, mais cela ne nous apporterait pas grand-chose dans la mesure où notre objectif n'est pas fonctionnel, mais statistique. Nous ne cherchons pas à reconstruire une loi moyenne de vidange de l'ensemble des aquifères drainés vers une station de mesure.

Empiriquement, à dire d'expert, la période des basses eaux en Cévennes, en gros, se termine vers le 15 août et débute environ cent à cent-vingt jours avant, soit vers le 1^{er} mai. Cela étant l'étiage peut se placer entre le 15 juillet (cas de précocité marquée) et le 30 septembre (cas de tardiveté remarquable). Cette fluctuation qui fait varier la longueur des cycles, ne permet pas de fixer une période étudiée à partir de deux dates toujours les mêmes. En conséquence, nous avons retenu l'étiage ss comme point de départ et sélectionné les cent vingt-neuf jours qui sont avant, dans une première approche. Ce qui correspond à presque un tiers d'année hydrologique. Très souvent cette période correspond à une phase de récession (décrue puis tarissement) qui se développe après les pluies relativement fréquentes et parfois marquées du printemps qui est la seconde saison humide en climat méditerranéen.

Dans un second temps (travaux en cours) il sera possible, à partir d'une détermination automatique de la phase de tarissement (décroissance exponentielle du débit en régime non influencé) de déterminer expressément la date de début du tarissement (et le Q_0 des hydrologues) et donc de réviser ce premier calcul en nous fondant sur cette phase correspondant à la vidange des aquifères. Ceci pourrait avoir un double avantage : d'abord aboutir à des distributions moins hiérarchisées et d'autre part de ne concerner que la vidange du volume dynamique des aquifères qui déterminent le flux passant, et donc fournir un indicateur sur l'état global ou moyen d'imbibition de ces réserves d'eau.

5.2 Méthode discrète suivie

Les bases de données étant constituées dans un cas (Généragues) de 45 fois 130 valeurs de débits et dans l'autre (Aube morte – Galeizon) de 6 fois 130 valeurs de débits, nous avons procédé à un ajustement parétien discret.

L'ajustement d'un modèle de puissance sur les effectifs des classes (E_c) est réalisé de la façon suivante :

- En déterminant un point de référence (P_R) pour chaque classe (avec B_i la valeur de la borne inférieure et B_s la valeur de la borne supérieure) en posant :
 - ▶ $B = (B_i \times B_s)^{0.5}$
- et en calculant ($B_{\max}$ étant la valeur maximale de la série des B) :
 - ▶ $P_R = B / B_{\max}$
- puis en normant l'effectif (E_c) de chaque classe par P_R :
 - ▶ $E_{cn} = E_c / P_R$
- et en calculant le logarithme de E_{cn} :
 - ▶ $Y_{cn} = \ln(E_{cn})$
- pour enfin déterminer des densités de rang (avec R le rang : 1, 2, 3, etc. de chaque classe ordonnée de façon croissant) avec :
 - ▶ $DR_{cn} = R / E_{cn}$
- dont on prend le logarithme :
 - ▶ $X_{cn} = \ln(DR_{cn})$

Cette solution revient à normer les informations de façon à ne comparer que leurs variations relatives. Le point de référence (centre géométrique des classes) est ainsi la racine carrée du produit des bornes des classes rapporté à la valeur maximale obtenue avec la classe aux bornes les plus élevées. Mais c'est ensuite l'effectif de chaque classe qui est rapporté à P_R . C'est un effectif exprimé en fonction de la valeur normée de référence (P_R) de chaque classe. Ceci définit la série expérimentale relative à tester.

De même, la série de référence qui permet de tester, est-elle définie comme des fractions de rangs en fonction de l'effectif normé (E_{cn}). C'est fondamentalement une série de densités, mais de rangs.

Nous avons deux informations : l'effectif normé en proportion de l'étendue des classes et de l'étendue de la série des classes, et la proportion de rang par unité d'effectif normé. Il n'y a plus de valeurs brutes (borne, rang, effectif), mais deux proportions qui sont mises en regard. On teste en fait la relation pouvant exister entre une hiérarchie de référence basée sur les rangs et une hiérarchie expérimentale basée sur la fréquence des débits.

Ces couples de valeurs dans un graphique bi logarithmique donnent un alignement de points (Fig.1 et 4). Cet alignement de points correspond à une fonction de puissance qu'il est alors possible d'estimer par régression. La droite ainsi tracée à une pente (P), une constante (C) et un coefficient de détermination très élevé généralement, mais calculé sur peu de points. Tout écart fort à un alignement traduit un problème de biais, de mesure, ou de situation très spéciale. Le nombre de points a été choisi afin d'avoir la meilleure linéarité. La multiplication des points, donc des classes, conduit souvent à faire apparaître une légère courbure dans l'alignement. Ceci indique que la pente n'est pas totalement unitaire, mais varie en fonction des bornes des classes, donc des échelles (covariance d'échelle). Dans cette première approche, nous négligerons la possibilité de prendre en compte un P variable.

La première application de la méthode ci-dessus décrite a été faite sur la chronique extraite de la Banque Hydro de la station de Généragues située sur le Gardon un peu en amont de la ville d'Anduze. Cette station a été choisie comme test, car c'est une des plus longues chroniques disponibles. La meilleure station est actuellement celle de Ners qui dispose d'un seuil en béton adapté à tous les débits (Martin Ph., 2019), mais qui est récent. Cette chronique de bonne qualité est courte (8 années). Elle sera toutefois très utile lors d'études plus générales à l'échelle du bassin versant.

5.3 Les récessions à la station de Générargues

Certaines récessions de fin de cycle à Générargues ont dû être supprimées en raison de données manifestement trop problématiques (hydrogrammes plus que curieux !). Il s'agit des années 2006, 2012, 2017. À cela s'ajoutent les années pour lesquelles il n'y a pas de données : 1965, 1983, 1990, 1995, 2008, 2009, 2014, 2016. Au total, la base statistique comporte 45 récessions de cent trente jours, soit 5850 valeurs de débits moyens journaliers.

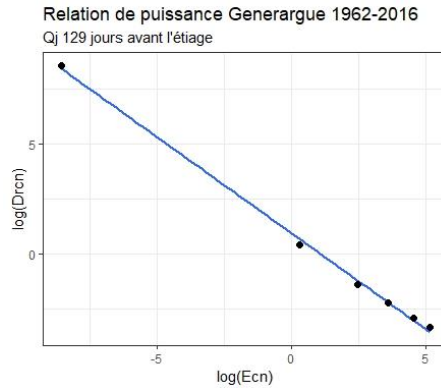


Fig. 1 Relation entre l'effectif des classes de débit et la valeur du centre de ces classes (moyenne géométrique) à la station de Générargues (Gardon)

Ces valeurs de débits moyens journaliers ayant été réparties en 5 classes d'amplitude égale, leurs effectifs permettent *in fine* de construire une relation de puissance (Fig. 1). De toute évidence, celle-ci est de très grande qualité, ce qui valide ce type d'approche ($r^2 = 0,997$). L'exposant P de cette relation puissance traduit la hiérarchie des données.

Cette première analyse statistique nous donne une relation de puissance traduisant une structuration hiérarchique moyenne des débits moyens journaliers de récessions à la station de Générargues.

Sur cette base méthodologique, il est possible de réitérer l'analyse, mais cette fois pour chaque récession sélectionnée pour la statistique générale, donc sur 130 valeurs. Nous obtenons ainsi 45 modèles de puissance, dont les valeurs de P° constituent en eux même une statistique qui décrit la variabilité des situations à partir de la valeur centrale fournie par l'ajustement sur l'ensemble des données.

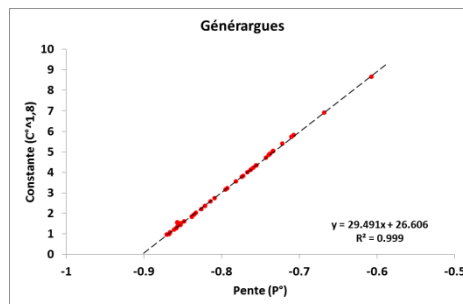


Fig. 2 Relation entre l'exposant P° du modèle de puissance et la constante C° du même modèle pour la station de Générargues (Gardon)

L'exposant P° peut être combiné avec la constante du modèle (C°) dans la mesure où il existe une relation fonctionnelle entre P° et C° de type linéaire après avoir élevé les valeurs de la constante à la puissance 1,8 ($r^2 = 0,999$) (Fig. 2). Soit : $C^\circ = (30,23 P^\circ + 27,24)^{\frac{1}{1,8}}$. P° et C° sont au final très redondants. Considérer l'un revient assez largement à considérer l'autre.

Comme on pouvait s'y attendre, cette série de valeurs de P° est globalement gaussienne (Fig.3). Cela étant, il apparaît 2 situations hydrologiques différentes. Dans un cas (points rouges), la valeur de la pente est presque quasiment constante (proche de -0,85). Cela correspond aux valeurs très faibles de la constante C° qui est proche de 1 ($1,27 > C^\circ > 0,98$).

Dans le reste de la statistique (carrés jaunes), la pente et la constante évoluent ensemble. Dans le premier cas, on a une hiérarchie des effectifs des débits qui est relativement faible, alors qu'elle est plus forte dans le second et croissante avec la diminution de P° (de -0,85 à -0,60).

Il est ainsi possible de partitionner l'ensemble de la distribution en deux et de chercher pour chacune de ces parties sa moyenne et son écart type. Dans le premier cas nous obtenons : moy = -0,861 et $\sigma = 0,0065$. Et dans le second : moy = 0,769 et $\sigma = 0,0538$.

Le fait de trouver que les valeurs de P° s'ajustent à deux lois normales indique que les situations très extrêmes (dans un sens comme dans l'autre) sont relativement rares. En d'autres termes, les situations hydrologiques qui sont observées sont très souvent assez semblables. Il y a donc une certaine variabilité, mais limitée. Ceci est très certainement à mettre en rapport avec la taille du bassin versant drainé.

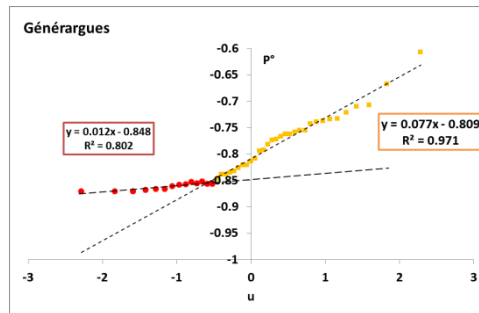


Fig. 3 Statistiques gaussiennes des exposants de Pareto discret (P°) calculés sur les récessions de la station de Générargues

Pour que la hiérarchie soit faible, il faut que les débits aient peu changé au cours de la récession, donc par exemple qu'il y ait eu peu d'orages et/ou que les valeurs aient été déjà basses 129 jours avant l'étiage. Si la récession intègre une forte décrue, la hiérarchie des débits sera plus importante. Avec une faible valeur de P° et une forte valeur de C° nous avons des situations inverses. Les cas où les valeurs de P° sont relativement basses ($\approx -0,85$) sont donc, du point de vue de la sécheresse, des situations à plus grand risque. Elles semblent assez peu nombreuses.

5.4 Les récessions à la station de l'Aube morte sur le Galeizon (Gardon d'Alès)

Il devient dès lors possible d'appliquer cette méthode sur d'autres stations dont la qualité des mesures est très largement supérieure. Nous avons choisi pour ce faire l'une de nos stations de référence sur un affluent du Gardon d'Alès qui draine un bassin versant de taille limitée (61 km²).

Le calcul fait, avec six classes, sur les six récessions disponibles conduit à la figure 4 qui est très semblable à la figure 1. Le coefficient de détermination est d'ailleurs meilleur ($r^2 = 0,999$), mais l'effectif des débits utilisé est bien plus faible, ce qui limite sa significativité.

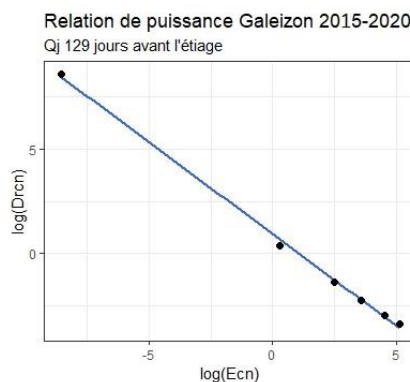


Fig. 4 Relation entre l'effectif des classes de débit et la valeur centrale de ces classes à la station de l'Aube morte (Galeizon, Gardon d'Alès).

Dans ce cas, il sera possible (travail en cours ; Di Costanzo H.) de faire le même traitement avec des pas de temps plus courts que la journée, puisque l'information de base est à 5 min. Cela étant fait, il deviendra alors possible de voir comment les paramètres du modèle évoluent en fonction des échelles de temps. Il est possible que l'on retrouve alors une structure fractale comme avec les accroissements de débit (Martin Ph., à paraître).

De même, nous retrouvons le même type de structuration pour la statistique des P° (Fig.5). L'échantillon est certes limité, mais on retrouve globalement ce que nous avons pu identifier sur le Gardon à la station de Générargues. Sur aussi peu de points, il est toutefois difficile de juger de leur dispersion autour de la droite de Henri et de la possibilité d'avoir une distribution duale.

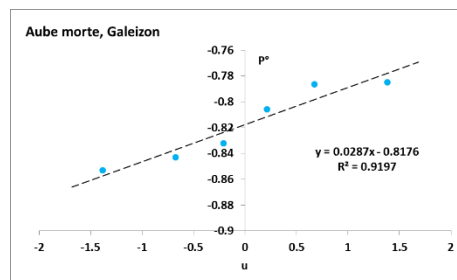


Fig. 5 Statistique gaussienne des exposants de Pareto discret (P°) calculés sur les récessions de la station de l'Aube morte (Galeizon, Gardon d'Alès).

Cet exemple, au-delà de la question de la qualité minimale des données, pose la question de l'effectif minimal de récessions nécessaires pour avoir une mesure suffisante de la variabilité des situations. En d'autres termes, quel est l'effectif indispensable pour avoir, dans ce cas, une bonne appréciation de la variabilité hydrologique sachant que les situations qui nous intéressent sont certaines situations relativement extrêmes ? D'autres travaux avec des chroniques de différentes longueurs permettront de répondre à cette question.

CONCLUSION

Considérer la sécheresse non plus uniquement comme une situation physique, mais comme un phénomène sociophysique, sociétal, ouvre de nombreuses possibilités. La difficulté est alors de formaliser le niveau de tension entre l'offre du milieu et la demande anthropique. Cette dernière, pour différentes raisons (disponibilité des données, aires concernées, etc.) ne peut guère entrer dans une logique de bilan de masse. Ainsi, observe-t-on de grandes difficultés dans le sud-est de la France, et en particulier en Cévennes, à mettre en œuvre la philosophie des volumes prélevables.

Ceci conduit à proposer une approche probabiliste de la sécheresse. Dans cette logique, l'outil le plus général et le plus profond est le théorème de Bayle, mais sa mise en œuvre formelle (résolution des équations) est très complexe et souvent infaisable. Toutefois, le développement de réseaux bayésiens fondés sur des algorithmes de type MCMC et de logiciels ergonomiques permettent aujourd'hui d'accéder à une détermination relativement aisée des distributions ; lesquelles peuvent évoluer incrémentalement au fur et à mesure que des informations sont acquises. De plus, les réseaux bayésiens permettent de croiser des variables concourant à la définition des niveaux de la sécheresse. Il est donc possible de définir l'arbre (la structure) des causalités qui conduisent à une distribution synthétique des niveaux d'aridité d'une part et d'autre part à une distribution des niveaux de demande.

En croisant ces deux distributions, il devrait être possible (travail en cours : Di Costanzo H.) d'arriver à une caractérisation probabiliste des niveaux de la sécheresse. Par ailleurs, le cerveau étant de plus en plus décrit comme fonctionnant sur un mode bayésien, il vient que l'ensemble des perceptions et décisions peut être décrit en usant de la même logique statistique. Il devient ainsi théoriquement possible, non seulement d'aider à la décision, mais aussi d'évaluer les décisions prises.

Bibliographie

1. Albert I., Ancelet S., David O., Denis J.B., Makowski D., Parent E., Rau A., Soubeyrand S., 2015, Initiation à la statistique bayésienne. Ellipse éditeur, Paris, coll. BioBayes, 333 p.
2. Ayrat P.-A., Pottier B., Sauvagnargues S., Martin Ph., Brachet N., Cicille P., Didon-Lescot J.-F., Domergue J.-M., Douguédroit A., Grard N., Lopez C., Mvoula S., Spinelli R., 2019, Mise en œuvre d'une plateforme cartographique participative pour le suivi des basses eaux dans les Cévennes (France). Geo-Eco-Trop., Volume 43, n° 4, p.489–502.
3. Bernier J., Parent E., Boreux J.-J., 2000, Statistique pour l'environnement. Traitement bayésien de l'incertitude. Editions Tec & Doc Lavoisier, Paris, 363 p.

4. Boreux J.-J., Parent E., Bernier J., 2010, Pratique du calcul bayésien. Springer, Berlin, 333 p.
5. Byun H.R., Wilhite D.-A., 1999, Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *Journal of climate*, Volume 12, p.2747-2756.
6. Canovas I., 2016. Modélisation de la montée vers un état critique de la situation de basses eaux sous forçages naturel et anthropique en région méditerranéenne. Thèse de doctorat, Avignon, 387 p.
7. Canovas I., Martin Ph, Sauvagnargues S., 2016, Modélisation heuristique de la criticité des basses eaux en régions méditerranéennes, *Physio-Géo*, Volume 10, p.191-210. <https://physio-geo.revues.org/4994>
8. Cozic M., Walliser B., 2017, Les probabilités en théorie des jeux. In : *Le bayésianisme aujourd'hui ; Fondements et pratiques*, sous la direction de I. Drouet, Éditions Matériologiques, p. 89-114.
9. Daunizeau J., 2017, Le cerveau bayésien : une approche évolutionniste de la cognition. In : *Le bayésianisme aujourd'hui ; Fondements et pratiques*, sous la direction de I. Drouet, Éditions Matériologiques, p. 419-467.
10. Dehaene S., 2018, Apprendre ! Les talents du cerveau, le défi des machines. Odile Jacob éditeur, Paris, 380 p.
11. Di Costanzo H., en préparation. De l'impluviosité à la sécheresse dans le sud-est de la France : entre aridité et tension sur la ressource en eau. Thèse de doctorat, Avignon université.
12. Dougédroit A., 1980, La sécheresse estivale dans la région Provence — Alpes — Côte d'Azur. *Méditerranée*, Volume 39, n° 39, p.13-21.
13. Dougédroit A., 1983, Un siècle de sécheresse estivale à Marseille. *Hommes et Terres du Nord*, Volume 3, n° 1, p.34-38.
14. Dougédroit A., 1990, The variations of dry spells in Marseille from 1865 to 1984. *Journal of Climatology*, Volume 7, n°6, p.541-551.
15. Drouet I., 2017.a (sous la direction de), *Le bayésianisme aujourd'hui. Fondements et pratiques*. Coll. Sciences & Philosophie, Éditions Matériologiques, Paris, 498 p.
16. Drouet I., 2017.b, *Le bayésianisme : éléments de définition et mutations récentes*. In : *Le bayésianisme aujourd'hui. Fondements et pratiques* (sous la direction d'I. Drouet), Coll. Sciences & Philosophie, Éditions Matériologiques, Paris, 5-27.
17. Dubus N., Dubus J., 2011, La sécheresse au Sahel. Vers une gestion concertée. Coll. Territoire, Hermes — Lavoisier éditeur, Paris, 318 p.
18. Galloy E., Lebreton M., 1982, Analyse des séquences de jours secs consécutifs. Application à 31 postes du réseau météorologique français. *La Météorologie Paris*, Volume 6, n° 28, p.5-24
19. Gaume É., 2004, Sécheresse et étiages : quelques réflexions. *La houille blanche. Revue internationale de l'eau*, n° 4, p.77-83.
20. Grégis F. Courtenay N. de, 2017, Incertitude de mesure et probabilités : la confrontation des approches fréquentiste et bayésienne en métrologie. In : *Le bayésianisme aujourd'hui ; Fondements et pratiques*, sous la direction de I. Drouet, Éditions Matériologiques, p. 319-391.
21. Hoang Lê N., 2018, La formule du savoir. Une philosophie unifiée du savoir fondée sur le théorème de Bayes. EDP Sciences éditeur, Paris, 400 p.
22. Hohwy J., 2013, *The predictive mind*. Oxford university press, Oxford, 292 p.
23. Jacob-Rousseau N., Astrade L., 2010, Sécheresse et pénurie d'eau dans la France méridionale entre 1815 et 1840. *La houille blanche*, n° 4, p.43-50.
24. Lang C., 2007, Étiages et tarissements : vers quelle modélisation ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage de cours d'eau de l'Est de la France. Thèse, J. Corbonnois directeur, Université de Metz, 292 p.
25. Lang C., 2011, Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *Cybergéo*, en ligne : environnement, nature, paysage, article 571, mis en ligne le 30 novembre 2011, consulté le 24 février 2012, <http://cybergeo.revues.org/24827> ; DOI : 10.4000/cybergeo.24827
26. Levine J., 1922, la sécheresse de 1921. *La Nature*, n° 2492, p.20-22.
27. Li L., 2003, Évolution future du climat en Méditerranée : vers un état de sécheresse accru ? Rapport quadriennal du CNFGG, 3 p.
28. Mariotti A., Pan Y., Zeng N., Alessandri A., 2015, Long-term climate change in the Mediterranean region in the midst of decadal variability. *Climate Dynamics*, Volume 44, n°5-6, p.1437-1456.
29. Martin Ph., Kabo R., 2015, Variations du débit de la Fontaine de Vaucluse entre 1877 et 2014. Évolutions tendanciennes. *Karstologia* n° 66, p.37-47.
30. Martin Ph., 2016, Modélisation des longueurs des périodes sans pluies supérieures à différents seuils de la chronique de Marseille (1864-2008), *Physio-Géo*, Volume 10, 1, 81-104. <https://physio-geo.revues.org/4805>
31. Martin Ph., à paraître, Analyse statistique, multiscalaire et fractale des débits des phases de montée de crue d'épisodes cévenols (Gardon, France). *Geo-Eco-Trop*.
32. Martin Ph, Ayrat P.-A., Canovas I., Cicille P., Didon-Lescot J.-F., Domergue J.-M., Dougédroit A., Grard N., Kamara S., Lopez Ch., Morardet S., Sauvagnargues S., 2017, HydroPop : une nouvelle façon d'aborder la question du partage de l'eau en situation de basses eaux en France métropolitaine méridionale. *Journal International Sciences et*

- Technique de l'Eau et de l'Environnement, n° 2, p.29-32. <http://jistee.org/wp-content/uploads/2019/01/Journal-ISTEE-Volume-2-Numéro-1—Février-2017-3.pdf>
33. Martin Ph., 2018, Esthétique des phénomènes extrêmes et construction sociale de la sécheresse. Communication sous forme de poster et de résumé étendu, 3 p, ISRiver 2018, Lyon 4-8 juin. <http://www.graie.org/ISRivers/docs/papers/2018/2P249-366MAR.pdf>
 34. Martin Ph., 2019, Modélisations parétiennes des longueurs des périodes sans pluies. Mise en œuvre avec des chroniques méditerranéennes. XXXIe Colloque international de l'AIC : Le changement climatique, la variabilité et les risques climatiques. Thessalonique, Grèce, Université Aristote, Département de météorologie et climatologie éditeurs, p. 499-504.
 35. Martin Ph., Ayrat P.-A., Cicille P., Didon-Lescot J.-F., Douguédroit A., Sauvagnargues S., 2019, « HydroPop : De l'hydrologie populaire et participative ? », ZABR, Agence de l'eau, action B28, rapport final, 152 p. DOI : 10.13140/RG.2.2.10035.58400
https://www.researchgate.net/publication/339200485_HydroPopI_De_l%27hydrologie_populaire_et_participative_Responsible_scientifique_Ont_contribue_a_la_redaction_de_ce_rapport?showFulltext=1&linkId=5e43a792458515072d933e68
 36. Martin Ph., soumis, Le Modèle Hydrologique Différentiel (MHD). Application d'une nouvelle méthode d'analyse aux cycles et récessions : exemple de ceux de la Fontaine de Vaucluse mesurés entre 1966 et 2014. Physio Géo.
 37. Naïm P., Wullemmin P.-H., Leray P., Pourret O., Becker A., 2008, Réseaux bayésiens, Eyrolles, Paris, 423 p.
 38. Najac J., Kitowa N., Vidal J.-P., Soubeyroux J.M., Martin E., 2010, Caractérisation des sécheresses en France au cours du XXIe siècle. 23^e colloque de l'association internationale de climatologie, Risques et changements climatiques, sept 2010, Rennes, France, association internationale de climatologie éditeur, p. 433-438, <hal-00536859>
 39. Pardé M., 1946, La sécheresse des années 1941 – 1946 [résumé de la conférence de M. Pardé]. Annales de l'université de Grenoble, t.22, p.99-103.
 40. Philandras C.M., Nastos P.T., Kapsomenakis J., Douvis K.-C., Tselioudis G., Zerefos C.-S., 2011, Long term precipitation trends and variability within the Mediterranean region. Natural Hazards and Earth System Sciences, Volume 11, n° 12, p.3235-3250.
 41. Procaccia H., 2008, Les fondements des approches fréquentielle et bayésienne. Application à la maîtrise du risque industriel. Lavoisier éditeur, 248 p.
 42. Rambal S., 1984, Sécheresse réelle et sécheresse calculée. Bulletin de la société botanique de France. Actualités botaniques, 131, 2-4, p.295-301. DOI : 10.1080/01811789.1984.10826669
 43. Robert Ch., 1992, L'analyse statistique bayésienne. Economica éditeur, Paris, 393 p.
 44. Sanson J., 1950, La sécheresse remarquable de la période 1941 – 1950 en France. *La Nature*, n° 3183, p.216-220.
 45. Şenaut Z., 2015, Applied drought modeling, prediction, and mitigation. Elsevier, Amsterdam, 472 p.
 46. Spagnou P., 2012, Raisonnez probabilités sans vous faire piéger ! Editions Ellipse, Paris, 206 p.
 47. Taleb N.N., 2008, Le cygne noir. La puissance de l'imprévisible. Les belles lettres éditeur, Paris, 496 p.
 48. Trzpit J.-P., 1994, Désert... vous avez dit aride ? De la nécessité de se fonder sur le principe de la balance hydrique pour raisonner le concept d'aridité. Géographie physique et environnement, n° 2, p.9-32.
 49. Vidal J.-Ph., Moisselin J.-M., 2008, Impact du changement climatique sur les sécheresses en France. XXIe colloque de l'association Internationale de Climatologie, Montpellier, P.655-660.

Utilisation de la modélisation pour l'analyse des données de prospection hydrogéologique en vue du projet de drainage de la mine de fer de Yakovleva – Russie

Traoré Ibrahima Amadou¹, Evguéni Alexeivitch Lomakine², Alexandre Vassilievitch Pospelov³

¹Expert Hydrogéologue

²Maître de Conférences, Université des Mines de Saint Pétersbourg, Russie

³Maître-assistant, Université des Mines de Saint Pétersbourg, Russie

Résumé

La mine de fer de Yakovleva, située en Russie, fait partie d'une région minière parmi les plus riches et les plus étendues au monde, l'Anomalie Magnétique de Kursk. Cette mine se trouve dans des conditions hydrogéologiques très complexes mais sa richesse exceptionnelle en fer a permis de mobiliser les financements nécessaires pour sa prospection très détaillée en vue de son drainage. Une information abondante sur la structure hydrogéologique de la région a été obtenue durant les différentes étapes de cette prospection, y compris grâce à la géophysique, aux essais de pompage sans piézomètre, aux essais de pompage avec piézomètres et aux essais de drainage de la mine grandeur nature, sur une durée de plus de deux ans. Les impacts de ces essais ont été suivis sur 86 piézomètres répartis entre toutes les nappes existantes. Il a été établi une forte incidence de l'échelle de l'expérimentation sur la valeur des transmissivités déterminées. Les modèles numériques conçus sur la base des informations recueillies ont permis la correction du schéma de drainage initialement prévu. Les simulations réalisées ont également permis d'analyser l'incidence de l'hétérogénéité des nappes sur les résultats des essais de pompage, notamment ceux obtenus à partir des courbes de Jacob -Theis. Il a été illustré que dans l'hypothèse d'une distribution en fonction aléatoire stationnaire des transmissivités efficaces, les résultats des essais de pompage donnent des valeurs en relation inverse du coefficient de variation.

Mots clé : hydrogéologie, essais de pompage, modélisation, hétérogénéité.

Use of modeling for hydrogeological survey data analysis for the Yakovleva iron mine drainage project – Russia

Abstract:

The Yakovleva iron mine, in Russia, is part of one of the richest and most extensive mining regions in the world, the Kursk Magnetic Anomaly in Russia. This mine is located among very complex hydrogeological conditions but the density of its exceptional iron resources allowed to raise the necessary funds for its very detailed prospection with the perspective of its drainage. During the various stages of this prospecting abundant data on the hydrogeological structure of the region was procured, as well through geophysics, pumping tests without piezometer, pumping tests with piezometers as by large, real size, mine drainage tests over a period of two years. The impacts of these tests were monitored on 86 piezometers distributed among all the existing aquifers. A strong impact of the scale of the experiment on the value of the defined transmissivities has been established. Numerical models designed on the basis of the collected data allowed us to correct the drainage scheme initially planned. The simulations allowed us as well to analyze the impact of the heterogeneity of the aquifers on the results of the pumping tests, in particular those obtained from the Jacob-Theis curves. It has been illustrated that, in the hypothesis of a random stationary distribution of the effective transmissivities, the results of the pumping tests give values inversely related to the coefficient of variation.

Key words: hydrogeology, pumping tests, modeling, heterogeneity.

¹ Corresponding author: poulo.sinde@gmail.com

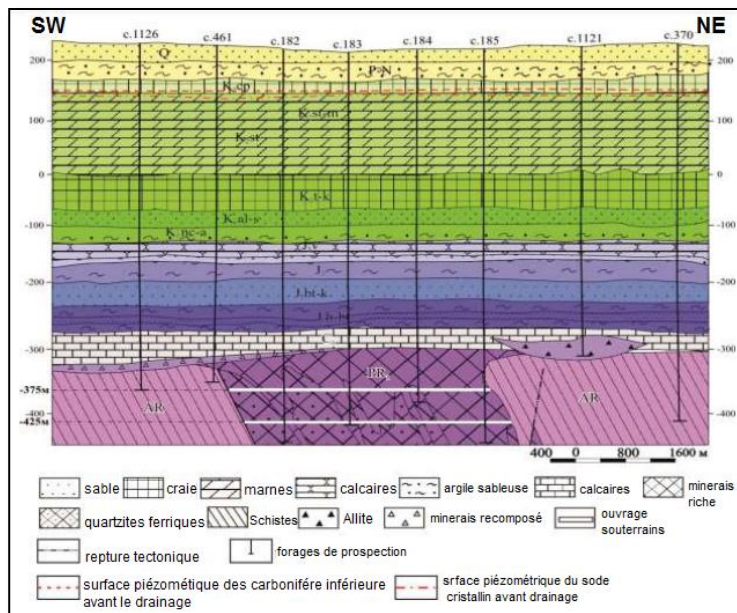
INTRODUCTION

L'augmentation constante des besoins de l'industrie en minerais de fer pousse vers l'exploitation de nouveaux gisements, notamment ceux qui se trouvent dans des conditions géologiques et hydrogéologiques de plus en plus complexes. La prospection de ces gisements englobe d'importants moyens matériels et financiers. Parmi les principaux facteurs de difficulté d'exploitation de ces mines, on note la profondeur et la submersion d'eau du minerai et des roches encaissantes. La conception d'un schéma de drainage approprié nécessite une étude hydrogéologique détaillée, permettant d'assurer la sécurité des travaux préparatoires et des travaux d'exploitation de ces mines. Cela est difficile à atteindre sans l'aide de la modélisation. En effet, les multiples facteurs, parmi lesquels l'hétérogénéité des nappes, leurs grands débits ainsi que le cloisonnement entre les hydrogéologues et les miniers, conduisent souvent à des travaux de prospection insuffisants ou inappropriés. Le recours à la modélisation permet de corriger les erreurs commises et d'orienter les futurs travaux de prospection. En outre, cet outil permet de mieux appréhender l'incidence de chaque facteur de complexité, notamment l'hétérogénéité des nappes sur la méthodologie de la prospection hydrogéologique et le choix du schéma de drainage optimal.

DONNEES ET METHODE

Contexte

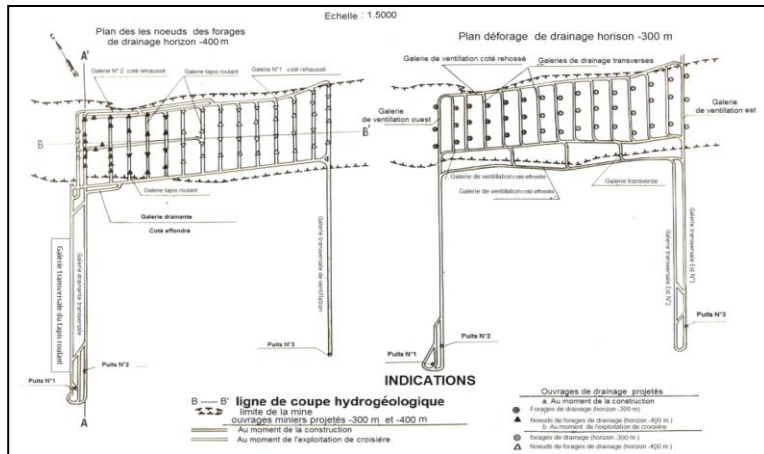
La Russie occupe la première place au monde pour les gisements de fer confirmés. L'Anomalie Magnétique de Kursk (KMA), qui s'étend sur environ 120 000 km², est le principal bastion de ces gisements. Elle s'étend sur les Régions de Kursk, Belgorod et Voronej. La mine de fer de Yakovleva est située au Nord de KMA. C'est une structure synclinale de direction NW 320°, de 70 km de longueur et de 1200 m à 1600 m de largeur. Sa structure géologique comprend deux étages géologiques : le socle cristallin du précambrien (AR – PR) recouvert par le complexe sédimentaire (C, J, K, P-N et Q).



Les gisements sont constitués de quartzites magnétiques, disséminés entre des roches métamorphiques et des granitoïdes du Précambrien sur les flancs (25% à 37% de concentration en fer) et les minerais riches issus de l'altération des granitoïdes (52% à 66% de concentration en fer), situés à une profondeur d'environ 600 m au cœur des granitoïdes altérés.

Les conditions hydrogéologiques sont complexes : six nappes superposées contribuent à divers degrés à la submersion du gisement. Ces nappes sont les suivantes : (i) la nappe du socle cristallin ; (ii) celle du carbonifère inférieur ; (iii) celle du kimméridgien-oxfordien ; (iv) celle du Cénomaniens-albien ; (v) celle des calcaires du crétacé supérieur ; et (vi) celle du paléogène – néogène et quaternaire. Les paramètres de filtration des différentes nappes sont très variables et la plupart d'entre elles sont caractérisées par une hétérogénéité très marquée.

Le projet de drainage de la mine de fer de Yakovleva prévoyait un système mixte, à savoir : (i) le drainage provisoire de la nappe calcaire du carbonifère inférieur pour en rabattre les charges hydrostatiques grâce à un système superficiel de forages centraux ; et (ii) le drainage permanent de la mine grâce à un système souterrain autour de deux galeries drainantes aux horizons – 300 m et – 400 m. Cela permettra de sécuriser la construction de la mine et son exploitation à un rythme de 40 millions de tonnes de minerai de fer riche pendant au moins 60 ans.



Travaux De Terrain

Du fait de la complexité des conditions de gisement, la prospection hydrogéologique de la mine de fer de Yakovleva s'est déroulée en trois principales phases : (i) la prospection préliminaire de l'ensemble des six nappes ; (ii) la prospection détaillée des nappes du socle cristallin, du carbonifère inférieur et du kimméridgien-oxfordien ; et (iii) des essais de drainage superficiel de la nappe du carbonifère inférieur et du Kimméridgien-oxfordien en grandeur nature.

Lors de la prospection préliminaire, outre les travaux de géologie et de géophysique réalisés, 43 pompages d'essai sans piézomètre répartis sur l'ensemble des nappes, ont été effectués et suivis pour estimer les paramètres hydrodynamiques de chacune de ces nappes. La durée de ces essais de pompage a varié entre 2 jours et 5 jours. La prospection détaillée s'est concentrée sur les nappes ayant le plus d'impact sur la submersion du gisement, en l'occurrence les trois nappes inférieures. Une dizaine de pompages d'essai avec des piézomètres répartis entre les trois nappes ont été réalisés. Leur durée a varié entre 15 jours et 2 mois. Un premier essai de drainage, d'une durée de 20 jours a été effectué dans la nappe du Kimméridgien-oxfordien à partir d'un forage avec un débit de 690 m³/j. Un second essai de drainage, d'une durée de 11 mois, a été effectué dans la nappe du carbonifère inférieur à partir de deux forages centraux, d'un débit cumulé de 5 000 m³/j.

Enfin, pour tester le comportement des nappes face aux rabattements prévus par l'exploitation de la mine, un troisième essai de drainage de la mine d'une durée de 28 mois, a été effectué. Ainsi, 12 forages à grand diamètre (1 m) ont été réalisés, dont dix (10) équipés dans la nappe du carbonifère inférieur, un (01) dans la nappe du socle cristallin et un (01) autre dans la nappe du kimméridgien-oxfordien, sur une parcelle de 1000 m x 550 m, où les transmissivités du carbonifère inférieur sont les plus importantes. Le débit cumulé des forages est de 168 000 m³/j ; les rabattements ont été suivis à partir de 86 piézomètres, répartis entre toutes les nappes.

Modélisation

Un paquet de programmes basés sur les différences finies, STIMUL, conçu au laboratoire d'hydrogéologie de l'Université des Mines de St Pétersbourg, a été utilisé pour la modélisation. L'utilisation de STIMUL permet de faire appel, selon les besoins, à différents schémas de résolution parmi lesquels : (i) un schéma implicite localement unidimensionnel, caractérisé par sa fiabilité ; et (ii) un schéma implicite aux directions alternées, caractérisé par sa rapidité de calcul et sa précision. En outre, STIMUL comporte différents autres sous-programmes, parmi lesquels celui permettant de générer le champ d'une fonction aléatoire stationnaire dont l'espérance mathématique et la dispersion sont connues.

Le paquet de programmes STIMUL a été utilisé pour le traitement et l'analyse des données de terrain recueillies avec deux principaux objectifs : (i) la conception d'un modèle hydrodynamique permettant de vérifier l'efficacité et l'optimalité du système de drainage projeté ; et (ii) l'étude de l'impact du degré d'hétérogénéité de la nappe du carbonifère inférieur sur les résultats des essais de pompage simulés sur cette nappe. La réalisation de ce second objectif a nécessité la définition d'un maillage espace-temps particulier, permettant une meilleure simulation des essais de pompage.

RESULTATS ET DISCUSSION

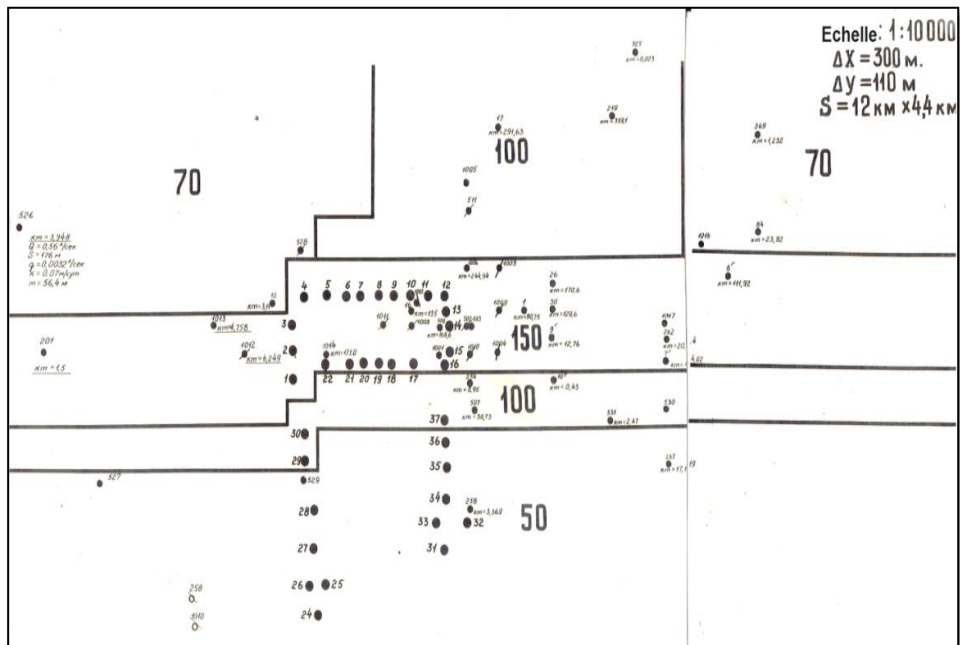
Analyse Manuelle Des Données De Terrain

Le traitement des essais de pompage et de drainage de la mine ainsi que les cartes piézométriques réalisées sur la base des mesures de terrains ont conduit aux constats suivants :

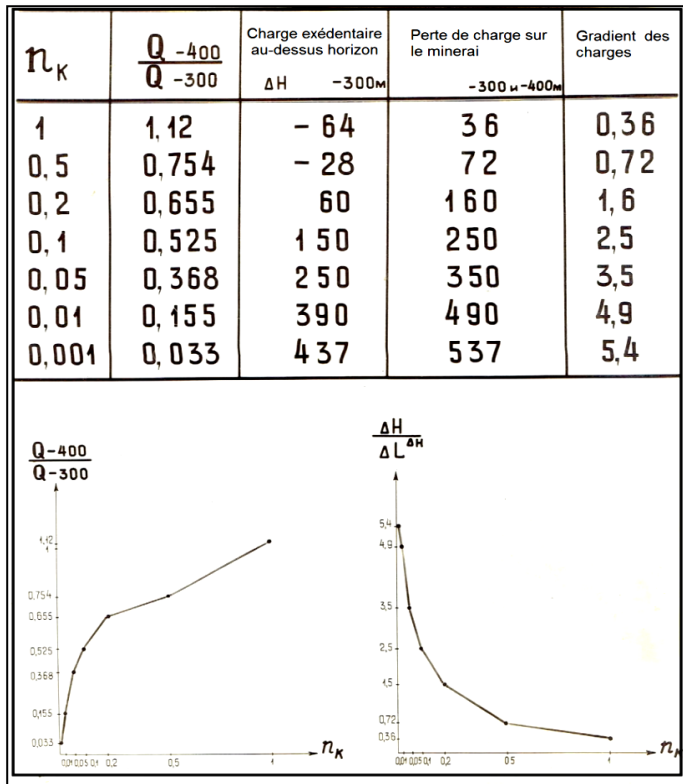
- (i) La nappe du kimméridgien-oxfordien ainsi que toutes celles disposées au-dessus de cette nappe, ont un rôle très limité dans la submersion de la mine de fer de Yakovleva. On estime à environ 8% du débit total des pompages, celui dû à l'écoulement piézo-sensible de toutes ces nappes superficielles vers la mine ;
- (ii) Les nappes du socle cristallin et du carbonifère inférieur ont réagi de façon synchrone aux sollicitations des essais de drainage et ont fonctionné comme un seul et même système aquifère ;
- (iii) La surface de dépression du carbonifère inférieur est une ellipse allongée suivant l'axe de la structure synclinale, preuve d'une anisotropie marquée pour cette nappe ; cette anisotropie est moins marquée pour la nappe du socle cristallin. Néanmoins, les deux nappes, parfaitement liées, peuvent être assimilées à un et seul système aquifère, avec une grande transmissivité et une hétérogénéité spatiale forte. Ainsi, quatre différentes zones de transmissivité ont été dégagées au niveau de ce système.

Modelisation Du Drainage De La Mine

La modélisation concerne uniquement le système aquifère inférieur, à savoir celui constitué par la nappe du carbonifère inférieur et du socle cristallin. Le traitement des données de terrain avec le programme STIMUL a permis de préciser les principaux paramètres hydrodynamiques de ce système, notamment les transmissivités et le coefficient d'emmagasinement.



Malgré tous les essais in situ, l'optimalité du système de drainage permanent projeté, à savoir des ouvrages de drainage aux horizons – 300 m et – 400 m, n'a pu être confirmée. En effet, après le drainage superficiel, le système de drainage souterrain fonctionnerait, au niveau de la zone assainie, tel un système d'écoulement monodimensionnel, conditionné par les surfaces piézométriques des deux nappes (carbonifère inférieur et socle cristallin) et la perméabilité verticale de la partie minière séparant les deux galeries drainantes. Ce dernier paramètre n'a pas été déterminé lors des travaux de terrain. Cette erreur est due au cloisonnement des services de prospection hydrogéologique et des exploitants miniers. Pour pallier cette insuffisance l'on a eu recours aux tests de sensibilité de l'efficacité du système de drainage projeté, par rapport aux valeurs du coefficient de perméabilité verticale de la couche minière. Les différents scénarii considèrent différents rapports n_k entre la perméabilité verticale et horizontale de cette couche. Ces rapports n_k ont varié comme suit : 1 ; 0,5 ; 0,1 ; 0,01 ; et 0,001, ce qui permet d'embrasser les différents cas réalistes allant du milieu isotrope à un milieu fortement anisotrope.



Les résultats de la modélisation montrent que pour des valeurs de $n_k > 0,1 - 0,2$ il est possible d'assurer le drainage du système aquifère considéré uniquement grâce aux ouvrages situés à l'horizon - 400 m. Au vu des essais de perméabilité de laboratoire, ce scénario a été jugé réaliste. Il a été conclu que le système de drainage souterrain à l'horizon - 300 m n'était pas nécessaire.

Simulation Des Pompages D'essai D'une Nappe Heterogene

La grande quantité de données de terrain disponibles a encouragé les auteurs à chercher à mieux comprendre l'incidence du degré d'hétérogénéité d'une nappe assimilable à celle des calcaires fissurés et karstifiés du carbonifère inférieur, sur les résultats d'essais de pompage sur cette nappe. Les résultats de l'analyse bibliographique préliminaire et des simulations réalisées grâce au programme STIMUL sont décrits ci-dessous.

Une large analyse bibliographique montre que plusieurs auteurs (hydrogéologues, pétroliers, géotechniciens, etc.) penchent pour une distribution log normale des transmissivités et que certains pensent que cette distribution devient plus symétrique et tend vers une distribution normale, lorsque les essais de pompage réalisés sont de plus longue durée et à débits suffisants. Dans le cadre des simulations réalisées, il a été considéré une fonction aléatoire stationnaire, de distribution log-normale, avec une espérance mathématique de $100 \text{ m}^2/\text{J}$ et un coefficient de variation prenant différentes valeurs suivant les tests, de 0 à 1,5. Les résultats des tests sont les suivants :

- (i) Les transmissivités calculées par la méthode de Jacob-Theis ont les mêmes valeurs au niveau de tous les piézomètres situés dans la zone quasi-stationnaire. Ces valeurs ne dépendent pas des valeurs des transmissivités des mailles sur lesquelles les différents piézomètres sont situés ;
- (ii) Les tests de sensibilité ont montré que les transmissivités déterminées par les courbes du temps et celles de l'espace par la méthode de Jacob-Theis, correspondent respectivement aux paramètres des zones externes et internes de la limite de la zone quasi-stationnaire. En conséquence un écart entre ces valeurs est une preuve d'hétérogénéité spatiale dans le plan;
- (iii) Le traitement des essais de pompage de longue durée dans une nappe hétérogène dans le plan donne des résultats presque identiques à ceux de la relation analytique suivante :

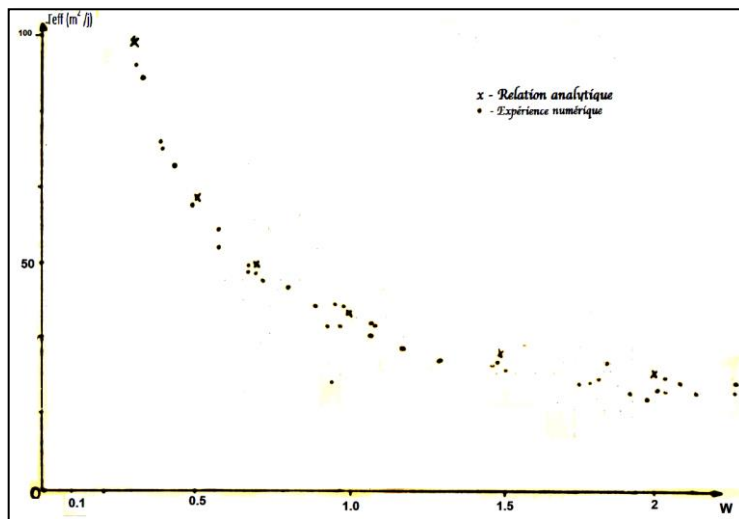
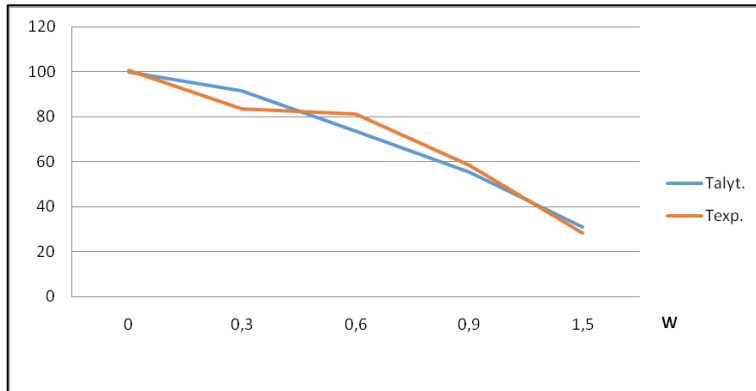
$$T_{eff} = \frac{T_{moy}}{1 + \frac{W^2}{2}}$$

Où : T_{eff} - valeur de la transmissivité efficace de la nappe

T_{moy} - moyenne géométrique des résultats des essais de pompage pour les simulations et espérance mathématique pour la courbe analytique

W - coefficient de variation.

T_{eff} (m^2/j)



CONCLUSION

L'étude réalisée a permis d'illustrer ce qui suit :

- (i) Le cloisonnement des services de prospection hydrogéologique et d'aménagement liés aux eaux souterraines peut conduire à des erreurs dans la conception des projets d'eau ;
- (ii) La souplesse de l'outil de modélisation permet de prendre des décisions même dans certains cas où l'information n'est pas suffisante ;
- (iii) La disponibilité d'une riche information de terrain a permis, grâce à la modélisation, de mieux comprendre l'impact du degré d'hétérogénéité d'une nappe sur la valeur de sa transmissivité efficace.

Approche de modélisation pour l'analyse de l'efficacité de la technique d'irrigation par micro-jets dans les oasis de Nefzawa. Mise en équation et validation

Tiba Hedia ^{1,2}, Dhawadi Latifa ⁴, Sellami Mohamed Habib ^{2,3}

1. Institut Nationale Agronomique de Tunis, Université de Carthage

2. Laboratoire de Matière Molle et de Modélisation Electromagnétique, FST, Université Tunis- El Manar,

3. Département Hydraulique, Ecole Supérieure des Ingénieurs de Medjez El Bab, IRESA, Université de Jendouba

4. Centre Régional de Recherche Agriculture Oasienne, Dégèche, Tozeur, IRESA, Université de Gafsa

Résumé :

Les oasis tunisiennes en générale et celles de Nefzawa en particulier sont sous l'influence des stress hydriques suite aux effets combinés du changement climatique et de la pression urbaine sur les ressources d'eau. Afin de protéger ces oasis un appel à l'introduction des techniques d'économie d'eau d'irrigation est en progression. Dans ce travail nous nous intéressons à développer un modèle permettant d'analyser l'efficacité et l'impact de l'irrigation par les micro-jets à l'intérieur des oasis. Une validation de ce modèle a été réalisée pour deux cites pilotes dans les oasis de Nefzawa et ceci dans le cadre du projet « Développement Durable des Oasis ».

Mots-clés : oasis de Nefzawa, microjet, efficacité, économie d'eau, modélisation

A modeling approach to analyze the efficiency of micro-jet irrigation technique inside Nefzawa oasis. Equations developments and experimental validation.

Abstract:

The Tunisian oasis in general and those of Nefzawa in particular are under hydraulic stress because of the combined effects of climate change and urban pressure on water resources. In order to protect the oasis a call to introduce water irrigation saving techniques is in progress. In this work we are interested to develop a model to analyze the efficiency and the impact of micro-jet irrigation technique inside the oasis. A validation of this model was done for two pilot stations in Nefzawa oasis. Pilot stations were realized for the Oasis Sustainable Development Project.

Key Words: Nefzawa oasis, microjet, efficiency, water saving, Modeling

¹ Corresponding author: sellami.fac@gmail.com

INTRODUCTION

Connues par leur existence très ancienne, les oasis semblent jouer un rôle socio-économique prépondérant dans le développement des zones arides dans le monde ainsi que dans le maintien de l'équilibre écologique dans le milieu environnant [1, 2]. Généralement, le mot oasis est lié à l'existence du palmier dattier, élément essentiel pour la création du microclimat oasien [8, 9]. Cette écologie extrêmement particulière conditionne l'installation des autres espèces végétales, en particulier les arbres fruitiers qui forment l'étage moyen et les cultures herbacées qui constituent l'étage inférieur, de la naît l'appellation oasis à trois étages [3, 4].

Les oasis de Nefzawa, qui sont en majorité considérées comme des oasis aménagées à l'intérieur des qu'elles cohabitent les trois étages mais avec une densité des espèces moyenne. Le problème d'économie d'eau d'irrigation et d'amélioration des techniques d'apport d'eau aux plantes à l'intérieur de ces oasis sont des défis posés par aussi bien les décideurs, les chercheurs que les agriculteurs. Nous allons dans ce travail présenter les équations nécessaires pour la conception et le dimensionnement des systèmes d'irrigation par micro-jet. Une première validation et les résultats d'un suivi expérimental de ces systèmes installés dans deux parcelles pilotes (Jemna et Réjim Maatoug) dans le cadre du projet « Développement Durable des Oasis » seront présentés.

MATERIELS ET METHODES

Mise en équation : Le système d'irrigation, en générale et celui en micro jet en particulier, est défini comme le schéma suivi par l'eau de la source jusqu'au pied de la plante. L'irrigation par micro jet consiste à apporter l'eau au pied de la plante sous forme de pluie artificielle via des asperseurs de petites tailles en rotation. Le nombre des micro-j le débit de chacun dépend du besoin en eau des espèces et des paramètres de l'irrigation à programmer. Ce système est généralement, formé par des conduites sous pression en plus des accessoires hydrauliques facilitant le passage de l'eau et minimisant les pertes en pression en cours de route. Nous citons le système de pompage, le système de réservoir, le système de déversoir, les partiteurs, le système de traitement des eaux. De même, dans la conception du système d'irrigation nous distinguons entre le système d'adduction des eaux, entre la source d'eau et l'entrée de la parcelle, et le système de distribution de l'eau entre les plantes. La différenciation entre l'adduction et la distribution est arbitraire. L'introduction de ces notions sont importantes lors de la conception du système d'irrigation, la fixation des installations nécessaires et le calcul des coûts. Une fois nous avons conceptualisé ce système nous devons passer à son dimensionnement de façon optimale. C'est-à-dire calculer la longueur des conduites, leurs diamètres, la nature du matériau de leurs constructions, capacité du système de réservoir-déversoir (surface, volume, hauteur, matériau de construction), station de traitement (capacité, charge, dimensions, la station de pompage (capacité, puissance). Et finalement le calcul du coût.

Donc dimensionner ces systèmes revient en fait à déterminer le besoin en eau des plantes à irriguer ce qui nous permet de fixer le débit à faire transiter à travers le réseau, nombre de distributeur par rampe, nombre et diamètres des rampes, nombre et diamètres des portes rampe, diamètre de la conduite d'amenée principale, puissance du système motopompe, capacité du système de réservoir-déversoir (surface, volume, hauteur, matériau de construction), station de traitement (capacité, charge, dimensions, la station de pompage (capacité, puissance), la nature du matériau de leurs constructions, et finalement le calcul du coût [5, 6].

Si nous considérons la parcelle répartie en un nombre de secteur (Nsecteurs) et chaque secteur est formé d'un nombre d'unité d'irrigation (Nunité) nous appelons canalisation tertiaire (séguia ou conduite enterrée) celle qui distribue l'eau entre les unités. Le débit dans l'unité d'irrigation s'exprime grossièrement comme suit [5, 6]:

$$q_{uni-irri} = \frac{Be_{culture} + E_{vap} + I_{inf}}{T_{arrosage}} \quad 1$$

q_{uni-irri} : Débit nécessaire à l'unité d'irrigation, Be_{culture} : Besoin en eau de la culture, Evap : Taux d'évaporation, I_{inf} : Taux d'infiltration

Le débit dans la canalisation tertiaire (séguia ou conduite enterrée) qui apporte directement l'eau aux unités d'irrigation est calculé par

$$q_{cana-tertiaire} = N_{unité} \times q_{uni-irri} \quad 2$$

q_{cana-tertiaire} : Débit dans la canalisation tertiaire, N_{unité} : Nombre d'unité

Nous appelons canalisation secondaire celle qui distribue l'eau entre les secteurs. Le débit correspondant est donné par :

$$q_{cana-seconadaire} = N_{secteur} \times q_{cana-tertiaire} \quad 3$$

q_{cana-seconadaire} : Débit dans la canalisation secondaire, N_{secteur} : Nombre des secteurs

Nous appelons canalisation primaire ou d'amenée celle qui apporte l'eau en tête de toute la terre agricole formée par un nombre de parcelle (Nparcelle). Nous écrivons :

$$q_{cana-primaire} = N_{parcelle} \times q_{cana-seconadaire} \quad 4$$

q_{cana-primaire} : Débit dans la canalisation primaire, N_{pùparcelle} : Nombre des parcelles

La quantité d'eau à faire transiter à travers une rampe du système n'est autre que le besoin en eau de la culture à irriguer par cette rampe tout en considérant les pertes par évaporation et infiltration. En unité de débit nous écrivons :

$$q_{rampe} = \frac{Be_{culture/rampe} + E_{vap} + I_{inf}}{T_{arrosage}} \quad 4$$

qrampe : Débit en tête de la rampe, Be,culture/rampe : Besoin en eau de la culture irriguée par la rampe , Eevap : Perte par évaporation, linf : Perte par infiltration

Sachant que le débit d'un distributeur d'eau est exprimé en général par :

$$q_{distributeur} = k Hx \quad 5$$

K : Coefficient de forme et de dimension, H : Pression en tête , x : Coefficient d'écoulement

Donc le nombre d'arroseur par rampe est exprimé par

$$N_{arroseur/rampe} = \frac{q_{rampe}}{q_{arroseur}} \quad 6$$

Narroseur/rampe : Nombre arroseur par rampe

Le débit en tête d'une porte rampe est celui nécessaire pour satisfaire les cultures appartenant au secteur alimenté par l'édit porte rampe. Soit :

$$q_{p-rampe} = \frac{Be,culture/p-rampe + E_{evap} + l_{inf}}{T_{arrosage}} \quad 7$$

qp-rampe : Débit en tête de la porte rampe, Be,culture/p-rampe : Besoin en eau de la culture irriguée par porte rampe

Le nombre de rampe par porte rampe est ainsi donné par :

$$N_{rampe/p-rampe} = \frac{q_{p-rampe}}{q_{rampe}} \quad 8$$

Nrampe/p-rampe : Nombre rampe par porte rampe

A l'échelle de toute la parcelle qui est répartie en des secteurs alimentés chacun par une porte rampe, le débit en tête de la parcelle représente le débit à faire transiter à travers la conduite d'aménée principale ou secondaire selon l'aménagement de toute la terre agricole. On écrit :

$$q_{c-amenée} = \frac{Be,culture/c-amenée + E_{evap} + l_{inf}}{T_{arrosage}} \quad 9$$

qc-amenée : Débit dans la conduite d'aménée, Be,culture/c-amenée : Besoin en eau de la culture irriguée par la conduite d'aménée

Le nombre de porte rampe par conduite d'aménée est évalué à :

$$N_{p-rampe/c-amenée} = \frac{q_{c-amenée}}{q_{p-rampe}} \quad 10$$

Np-rampe/c-amenée : Nombre de porte rampe par conduite d'aménée

Le calcul des diamètres de chaque conduite peut ainsi être réalisé en fonction du débit transitant et de la perte de charge en utilisant les formulations sur l'écoulement en charge. Rappelons la forme générale des pertes de charge :

$$J_{tot} = \sum_i J_{sing,i} + \sum L_{i-i+1} J_{lin,i-i+1} \quad 11$$

Jtot : Perte de charge totale dans les conduites du système d'irrigation, Jsing,i : Perte de charge singulière dans le point particulier i du réseau (vanne, coude, rétrécissement de conduite...), Jlin,i-i+1 : Perte de charge linéaire pour le tronçon de conduite entre les deux points particuliers successifs i et i+1, Li,i+1 : Longueur du tronçon de conduite entre les points particuliers i et i+1

La perte de charge singulière s'exprime sous la forme générale suivante (voire chapitre 4 pour les coefficients de singularité Csing,i) :

$$J_{sing,i} = C_{sing,i} \frac{V_i^2}{2g} \quad 12$$

Csing,i : Coefficient caractérisant le frottement dans le point particulier i, Vi : Vitesse de l'écoulement dans le point particulier i, g : Accélération de pesanteur

La perte de charge linéaire s'exprime sous la forme générale suivante

$$J_{lin,i-i+1} = C_{lin,i-i+1} q_{i-i+1}^n D_{i-i+1}^m \quad 13$$

Clin,i-i+1 : Coefficient caractérisant le frottement dans le tronçon de conduite i-i+1, qi-i+1 : Débit de l'écoulement dans le tronçon i-i+1 du réseau d'irrigation, Dm i-i+1 : Diamètre du tronçon de conduite i-i+1 du réseau d'irrigation, n,m : Des entiers de puissance

Il y a plusieurs formules empiriques qui expriment la perte de charge linéaire comme fonction du diamètre de la conduite et du débit transitant que nous pouvons utiliser(il y a aussi des abaques) Nous donnons les formules suivantes :

Formule de Scimemi :

$$Q = 48.8 D^{2.68} j^{0.56} \quad 14$$

j perte de charge en m/m ; Q débit en m3/s ; D diamètre en m

Formule de Colebrook :

$$V = 61.5 D^{0.68} j^{0.56} \quad 15$$

j perte de charge en m/m ; V vitesse de l'écoulement en m/s ; D diamètre en mm

Formule de Hazen-William :

$$V = 0.355 C D^{0.65} j^{0.54} \quad 16$$

j perte de charge en m/m ; V débit en m/s ; D diamètre en m ; C coefficient de rugosité

Donc il suffit de fixer le débit à transiter qui est fonction du besoin en eau de la plante, de proposer la nature du matériau des conduites qui doit résister à l'effet combiner de la pression, du débit et de l'agressivité des particules dans l'eau donc

la perte de charge linéaire correspondante pour que nous puissions calculer les diamètres optimaux des différents tronçons des conduites du réseau.

La puissance du système de pompage doit compenser la perte de charge totale dans tout le réseau d'irrigation et la différence d'altitude entre la source d'eau et la plante se trouvant dans la position la plus défavorable de point de vue distance et altitude dans la parcelle. Nous rappelons la formule suivante :

$$P_{\text{pomp-res-irrig}} = \frac{M_{\text{vol-eau}} g q H_{\text{MT}}}{R_{\text{mp}}} \quad 17$$

Ppomp-res-irrig : Puissance du système pompage pour le réseau d'irrigation, Mvol-eau: Masse volumique de l'eau d'irrigation, g : Accélération de la pesanteur, q : Débit dans la canalisation d'irrigation (rampe, porte rampe, canalisation d'amené...), HMT : Hauteur manométrique totale, Rmp : Rendement motopompe

La hauteur manométrique totale est donnée par :

$$HMT = H_{\text{g-asp}} + H_{\text{g-ref}} + J_{\text{tot}} \quad 18$$

Hg-asp: Hauteur géométrique d'aspersion, Hg-ref: Hauteur géométrique de refoulement

Contexte du projet : Dans le cadre du projet « Développement Durable des Oasis » financé par la Coopération italienne et en collaboration entre l'AVFA et l'ODRM, Tunisie, deux parcelles pilotes ont été choisies pour être équipées par le matériel suivant : station agro-météorologique, bassin de stockage d'eau, station de pompage, unité de production d'énergie solaire, systèmes micro-jet.

Les parcelles choisies sont les suivantes :

Parcelle JEMNA-Kébili. Les essais ont été conduits dans une parcelle qui appartient au centre de formation agricole Jemna (CFAJ) qui est située à Jemna (délégation Kébili Sud),

Parcelle de ODRM-Kébili : Le deuxième site c'est une parcelle gérée par l'office de développement de Rjim Maâtoug ODRM.

Le positionnement géographique des sites pilotes est dans la figure suivante :

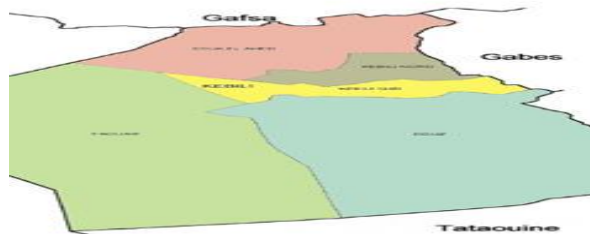


Fig. 1. ; Positionnement géographique des sites pilotes

Dans chaque parcelle nous avons équipé quatre palmiers échantillonnés par quatre micro-jets chacun

De même ; dans le cadre du même projet, 58 agriculteurs ayant des parcelles de superficie moyenne de 1,5 ha ont bénéficié du projet par l'installation du système d'irrigation de leurs palmiers avec des micro-jets.

Nous avons procédé à des mesures répétitifs d'uniformité, des mesures morphologiques pour les palmiers, des mesures quantitatives des dattes (dimensions, nombre, masse), des mesures biochimiques et des mesures physiques pour la qualité des dattes, des mesures des paramètres hydriques et pédologiques du sol, des mesures des paramètres climatiques.

De même une synthèse des résultats expérimentaux établis pour l'oasis de Tozeur seront récapitulés afin de faire une comparaison. Ces résultats concernent des mesures de la transpiration par différentes méthodes et des mesures des paramètres climatiques à différents niveaux à l'intérieur de l'oasis. Nous avons essayé d'établir des relations empiriques entre les différents paramètres.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'analyse des profils du rayonnement global intercepté, du rayonnement net et du flux de sève nous a permis d'établir les relations suivantes entre les paramètres [3, 4, 6]:

- Le rayonnement solaire intercepté journalièrement par l'étage des palmiers dattiers représente 14% du rayonnement solaire global incident reçu au dessus de l'oasis (à 12 m). Il est de l'ordre de 640 w/m² par jour et celui réservé à la photosynthèse est de l'ordre de 307 w/m²
- The rayonnement solaire global journalier intercepté par l'étage des arbres fruitiers est équivalent à 19 % du rayonnement global reçu au dessus des oasis. Soit l'équivalent de 853 w/m² par jour dont 409 w/m² sont utilisés pour la photosynthèse
- The rayonnement solaire global journalier intercepté par l'étage des cultures maraîchères est équivalent à 30 % du rayonnement global reçu au dessus des oasis. Soit l'équivalent de 1380 w/m² par jour dont 662 w/m² sont utilisés pour la photosynthèse 1380 w/m²

- Le rayonnement net journalier intercepté par l'étage des palmiers dattiers est égale à 19 % du rayonnement net reçu au dessus de l'oasis. En unité d'évapotranspiration c'est l'équivalent de 0.77 mm par jour
 - Le rayonnement net journalier intercepté par l'étage des arbres fruitiers est égale à 20 % du rayonnement net reçu au dessus de l'oasis. En unité d'évapotranspiration c'est l'équivalent de 0.81 mm par jour
 - Le rayonnement net journalier intercepté par l'étage de la culture maraîchère est égale à 42 % du rayonnement net reçu au dessus de l'oasis. En unité d'évapotranspiration c'est l'équivalent de 1.66 mm par jour
 - Le rayonnement net journalier intercepté par toute l'oasis est égale à 81 % du rayonnement net reçu au dessus de l'oasis. En unité d'évapotranspiration c'est l'équivalent de 3.24 mm par jour
 - La transpiration journalière mesurée à partir du flux de sève représente 32% du rayonnement global mesuré au dessus des oasis pour l'étage du palmier dattier, 21 % pour les arbres fruitiers et 53 % pour l'étage de la culture maraîchère
- Nous avons aussi essayé d'établir des relations de proportionnalité entre la transpiration estimée à partir de la méthode du flux de sève et le rayonnement net intercepté. Les principales relations sont [3, 4, 6];
- La transpiration journalière déduite de la mesure du flux de sève pour l'étage de palmier dattier représente 59 % du rayonnement net total intercepté à l'intérieur de l'oasis et 59 % de celui mesuré au dessus de l'oasis
 - La transpiration journalière déduite de la mesure du flux de sève pour l'étage des arbres fruitiers représente 37 % du rayonnement net total intercepté à l'intérieur de l'oasis et 33 % de celui mesuré au dessus de l'oasis
 - La transpiration journalière déduite de la mesure du flux de sève pour l'étage de la culture maraîchère représente 96 % du rayonnement net total intercepté à l'intérieur de l'oasis et 86 % de celui mesuré au dessus de l'oasis

Pour l'évolution horaire de la transpiration nous avons constaté qu'elle représente pour l'étage de palmier 43 % du rayonnement net horaire intercepté, 21% pour l'étage des arbres fruitiers et 64 % pour toute l'oasis

Les figures n° 1 (a et b) présente l'évolution comparée de l'évapotranspiration mensuelle moyenne et du besoin en eau d'irrigation calculés par différentes méthodes pour les deux sites pilotes [7].

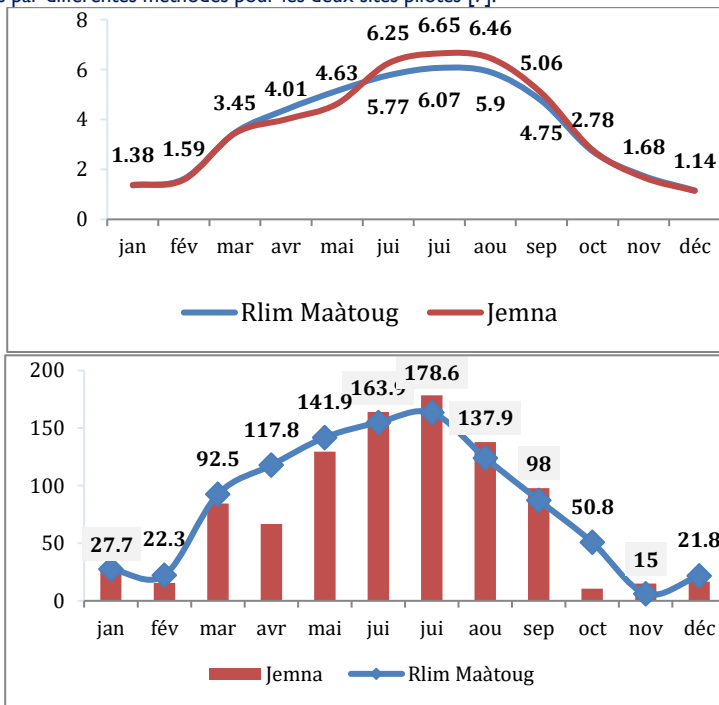


Fig. 2. Evolution comparée de l'évapotranspiration mm/j (a) et du besoin en eau d'irrigation (b) pour les deux stations Jemna et Rjim Maâtoug Kébili

Nous remarquons que le besoin en eau d'irrigation pour les deux parcelles pilotes est en maximum durant la période de production. Ce besoin en moyenne sur cette période est le même pour les palmiers des deux parcelles pilotes. Sur la base de la variation du besoin en eau d'irrigation nous avons pu dimensionner le système d'irrigation que nous avons généralisé pour les 58 parcelles.

Une enquête auprès des 58 agriculteurs bénéficiant du projet pour déterminer la consommation en eau après l'installation des micro-jets a montré une nette amélioration. Les principaux résultats sont récapitulés dans le tableau suivant [7] :

Tableau 1.. Matrice des moyennes des composantes des classes

	Classe		
	1	2	3
Nombre de Type	6	38	12
Niveau d'étude	3	2	2
Superficie	2,43	1,42	1,31
Densité de plantation	329	152	118
Tarification D. T	1014	684	690
Rendement en T	9	7	6
Rendement des cultures D. T	16071	12071	9737
Apport de fumier par an	16,79	10,92	10,88
Consommation Totale en eau	42423,43	30284,94	21415,25

Suite à cette enquête nous disons que 70 % de ces agriculteurs ont un âge entre 40 et 60 ans avec 20 % uniquement ont un niveau universitaire, 40 % niveau primaire et 40 % niveau secondaire. La majorité des parcelles ne dépassent pas le 1.5 ha. Pour les problèmes liés à l'eau 60 % des agriculteurs déclarent que l'eau n'est disponible selon les besoins des plantes sur toute l'année agricole. 16 % uniquement signalent qu'ils n'ont pas enregistré des problèmes liés à l'eau alors que vers 34 % ont noté des problèmes liés au même temps à la pression, au tour d'eau et à la salinité. Le reste il y a une répartition homogène des mono-problèmes

CONCLUSION

Pour les oasis, plusieurs questions sont soulevées par les spécialistes : Quel est le besoin exacte à apporter à cette architecture végétale aussi hétérogène et spécifique et qu'elle méthode d'estimation de ce besoin à proposer ? Quel est le système d'irrigation le plus efficace à dimensionner et comment calculer ses performances ? Quels sont les problèmes liés à l'eau à l'intérieur de ces oasis ? Ce à ces questions que nous avons essayé de répondre en installant deux parcelles pilotes et en introduisant le système d'irrigation localisée par microjet au près de 58 exploitations. Ceci dans le cadre du projet « Développement Durable des Oasis » en coopération avec l'AVFA, l'ODRM et l'ICU.

De même une synthèse des résultats expérimentaux établis pour les oasis de Tozeur a été présentée et des relations empiriques entre les paramètres climatiques et la transpiration pour aussi bien les palmiers dattiers que les arbres fruitiers ont été établies. Ces relation sont d'importance particulier pour le pilotage de l'eau d'irrigation à l'intérieur des oasis.

Remerciements : Les auteurs expriment leurs reconnaissances aux partenaires du projet « Développement Durable des Oasis » à savoir AVFA, ODRM, CRAO et l'ICU.(Institut pour la Coopération Universitaire Italienne

Références :

1. Amrani R et Senoussi A 2019 'Autour de la gestion actuelle de l'irrigation et proposition d'amélioration en termes de développement dans le Sahara septentrional algérien : cas de l'oasis Ngoussa » Revue des BioRessources Vol 9 N°1 Juin 2019 pp.1-10
2. Dhaoudi L., Ben Maachia S, Mkademi C, Oussama M et Daghari H 2015 « Etude Comparative des techniques d'irrigations sous palmier dattier dans les oasis de Deguache du Sud Tunisien » Journal of New Sciences Volume 18(3). www.jnsciences.org ISSN 2286-5314
3. Sellami M.H et Sifaoui M.S. 2003 "Estimating transpiration in an intercropping system: measuring sap flow inside the oasis " Agricultural Water Management 59 (2003) 191-204
4. Sellami M;H. 2008 « A scientific guide for agricultural water management and biodiversity conservation inside the North African Oasis » Chapter in the book "Agricultural Water Management Research Trends" ISBN 987-1-60456-159-3. Editor: Magnus L. Sorensen Nova Science Publishers
5. Sellami MH 2020 " Automatisation de l'irrigation : Mise en équation, méthodes et notions" Edition universitaire européenne ISBN 9786202533262, - -98 pages
6. Sellami M.H 2020 « Analyse quantitative et qualitative des interactions sol-plante-atmosphère à l'intérieur des oasis » Edition Universitaire Européenne ISBN 978-620-2-53578-6, 135 pages
7. Tiba H, Sellami M.H, Dhaoudi L, Boughdiri A 2019 « Analyse quantitative des impacts environnementaux et socio-économiques de l'introduction de l'irrigation localisée dans les oasis de Nefzawa » International Conference organized by the National Research Institute for Rural Engineering, Water and Forests (INRGREF) from 10 to 12 April 2019 in Hammamet (Tunisia)
8. Xifeng Zhang , Yifan Zhang , Jinghui Qi and Qiang Wang 2020 "Evaluation of the Stability and Suitable Scale of an Oasis Irrigation District in Northwest China" Water 2020, 12, 2837; doi:10.3390/w12102837
9. Xiuliang Yuan, Jie Bai, Longhui Li, Alishir Kurban et Philippe De Maeyer 2019 « Modeling the effects of drip irrigation under plastic mulch on vapor and energy fluxes in oasis agroecosystems, Xinjiang, China " " [Agricultural and Forest Meteorology](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.028) 265, DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.11.028

Oasis de Toudgha : Analyse de l'évolution du couvert végétal et Impacts socioéconomiques sur le paysage environnemental (Sud-est Marocain)

Azougargh Lahcen¹, MoulineMohyeddine Ahmed²

¹Chercheur au Laboratoire : Environnement, Développement et Gestion de l'espace (EDGE), Université Ibn Tofail flsh Kénitra,

²Docteur en Géographie, Flsh Université Ibn Tofail Kénitra

Résumé :

Durant ces dernières décennies, la zone oasienne au sud est marocaine ; le Toudgha ; connaît une détérioration de ses ressources environnementales. Les composantes paysagères, végétales et socio-économiques de l'oasis sont aujourd'hui en péril, le cadre de vie et les moyens de subsistance des populations, qui en dépendent, sont sérieusement affectés. Et puisque la végétation naturelle est essentielle dans l'équilibre environnemental en raison de ses rôles importants dans la protection des équilibres entre les composantes humaines et naturelles des oasis; alors il est utile d'appréhender et d'analyser la dynamique du couvert végétal de Toudgha pendant ces années passées en fonction de la pression anthropique et de la variabilité climatique. Cette recherche consiste à l'interprétation des images satellitaires en utilisant l'outil SIG, cette méthode permet de suivre la densité de la végétation sur une période de trente ans et puis analyser les données collectées à l'aide des questionnaires pour avoir une image exhaustive sur l'évolution et la dynamique du paysage végétal et le fonctionnement socio-économique du paysage oasien. Enfin, Les différents impacts qui ont touché le territoire oasien de Toudgha, sont continuellement accélérés et la vitesse de la dynamique végétale demeure agressive face à la vulnérabilité des ressources naturelles. La gestion de ces impacts d'ordre économique, écologique et social exige ainsi une réflexion participative et prospective avec l'ensemble des acteurs du territoire, pour instaurer les jalons d'une planification harmonieuse qui tient compte des ressources fragiles du système oasien d'une part et leur préservation comme patrimoine écologique et identité territoriale de l'autre.

Mots clés : Couvert végétal ; déséquilibre ; impact ; Oasis ; SIG.

Oasis de Toudgha : Analysis of the evolution of the plant cover and socio-economic impacts on the environmental landscape (South-East Morocco)

Abstract

During these last decades, the oasis zone in the south is Moroccan; the Toudgha; is experiencing a deterioration of its environmental resources. The landscape, plant and socio-economic components of the oasis are now in danger, the living environment and the means of subsistence of the populations, who depend on it, are seriously affected. And since natural vegetation is essential in the environmental balance because of its important roles in protecting the balance between the human and natural components of the oases; then it is useful to understand and analyze the dynamics of the vegetation cover of Toudgha during these past years as a function of anthropogenic pressure and climatic variability. This research consists of the interpretation of satellite images using the GIS tool, this method makes it possible to follow the density of the vegetation over a period of thirty years and then analyze the data collected using questionnaires to have an exhaustive picture, on the evolution and dynamics of the plant landscape and the socio-economic functioning of the oasis landscape. Finally, the various impacts that have affected the oasis territory of Toudgha are continuously accelerated and the speed of plant dynamics remains aggressive in the face of the vulnerability of natural resources. The management of these economic, ecological and social impacts thus requires a participatory and prospective reflection with all the actors of the territory, to establish the milestones of a harmonious planning which takes into account the fragile resources of the oasis system of an area. share and their preservation as ecological heritage and territorial identity of the other.

Key Words: Vegetable cover; imbalance; impact; Oasis; SIG.

¹ Corresponding author: lahcen.azougargh@uit.ca.ma

INTRODUCTION

Au Maroc, les problématiques de l'environnement ne cessent de prendre de l'ampleur à diverses échelles territoriales et les études développées autour de l'évaluation de l'état de l'environnement soulignent la gravité de cet état. Cette situation est marquée par une dégradation intense du couvert végétal et de la désertification du sol et du cadre de vie des populations due à la vulnérabilité des ressources. La fragilité des milieux est fortement corrélée à l'activité anthropique et la variabilité climatique [1], car ces facteurs sont susceptibles d'amplifier les effets de la sécheresse et provoquer une désertification prononcée et une dégradation des parcours et des sols, ce qui pèse lourdement sur le paysage environnemental et ses composantes. Dans ce même sens, l'état de l'environnement a des incidences négatives sur le processus du développement économique et donc sur les populations en raison de l'épuisement de certaines ressources naturelles nécessaires pour assurer ce développement. En effet, le couvert végétal marocain est soumis à des pressions fortes, des prédatations et pertes sans précédent, sans que les programmes engagés par l'état n'atteignent pas leurs objectifs. La dynamique de la pression sur le paysage végétal s'est accentuée affectant la résilience du secteur agricole (économique) et environnemental (écosystème) à cause notamment de la raréfaction des ressources hydriques ; ces ressources dont la disponibilité est passée de 2560 m³/hab/an en 1960 à 560 m³/hab/an aujourd'hui, un indicateur qui marque un besoin accru en eau. Ces besoins en eau diminueront davantage avec le temps, ce qui ne se conçoit pas sans impacts, négatifs bien sûr, sur le couvert végétal, les populations humaines et leurs diverses activités. Aujourd'hui ; avec les sécheresses répétées et la baisse des précipitations ; l'agriculture comme activité de base a subi des régressions au niveau de la production, c'est pour cette raison que d'autres activités alternatives assurent les besoins en termes de revenus. La rareté des produits agricoles locaux est ainsi enregistrée dans la plupart du territoire et l'exploitation de la végétation (coupe et pâturage) a atteint des seuils intolérables dans la plupart des zones constituant l'oasis. Outre le risque imminent de la baisse de la diversité végétale et, par conséquent, écologique signifie la disparition (partielle ou totale) de types d'habitats et il en résulte forcément un décroissement, sinon la disparition, de populations animales vivant dans l'environnement de l'oasis. De même, les pressions anthropiques et les transformations spatiales qui prétendent la satisfaction des besoins en développement socio-économique, provoquent cependant des dégradations plus ou moins prononcées des ressources paysagères et écologiques de l'oasis. Ces effets négatifs sont souvent aggravés par des phénomènes naturels défavorables tels que les sécheresses prolongées et récurrentes, l'ensablement des oasis notamment en aval etc.

Les changements climatiques ont aggravé la situation des ressources en eau du pays déjà critique, ce risque alors devient un problème entravant tout effort de conservation du couvert végétal et de son développement. Cette variabilité climatique attendue pour la zone selon les scénarii, auraient des conséquences néfastes directes et indirectes sur le potentiel en ressources, tant du point de vue quantité, que milieu écologique. Les écosystèmes auront, en effet, à faire face à des étés plus chauds et des précipitations qui ne dépassent pas les 150 mm en moyenne. Les changements futurs des conditions climatiques conjugués à l'anthropisation du milieu modifieront la disponibilité de l'eau et influenceront fortement le paysage environnemental et socioéconomique de certaines zones arides du pays, y compris les oasis [2]. Ces changements affecteront éventuellement les composantes de l'oasis comme la végétation, le mode de vie et l'économie de l'habitant oasien. Appartenant aux régions désertiques, les oasis du sud est du pays présentent des spécificités originales sur le plan naturel et humain. Elles se caractérisent par des températures élevées, une rareté relative des précipitations et une population en accroissement continu. Une population qui a réussi à mettre en place un système agropastoral traditionnellement fondé sur l'agriculture oasienne, et qui repose sur une irrigation presque pérenne dans les amonts et un élevage dans sa majorité établi. Ces pratiques sont caractéristiques d'une société rurale qui a su s'adapter au milieu et à ses contraintes, elles témoignent d'une civilisation agraire et pastorale bien enracinée dont les paysages constituent un patrimoine culturel riche et varié [3]. Le passage une semi sédentarisation respectueuse de l'oasis à une sédentarisation basée sur une agriculture de subsistance, puis à une agriculture de la motopompe a eu un effet sur l'espace aval de l'oasis, un espace transformé d'un territoire anciennement semi peuplé à une zone densément peuplée, et les techniques agricoles ont été modernisé qu'auparavant ce qui a crée une pression accrue sur l'hydro système naturel. De part sa nature géographique, sa structure topographique et son climat subaride, l'espace oasien de Toudgha est un territoire fragile, son écosystème a subi des changements répétitifs d'ordre structurel, à caractère socio-économique et environnemental. La pression démographique et l'activité anthropique couplées avec les grands changements de la société oasienne plus attachée à l'esprit de consommation et la migration nationale et internationale sont autant de facteurs qui ont contribué à la mutation du paysage oasien et influencé ainsi sa couverture végétale. D'après ces constats sur l'environnement oasien de Toudgha, les composantes paysagères, végétales et socio-économiques de l'oasis sont aujourd'hui en péril. Le cadre de vie et les moyens de subsistance des populations, qui en dépendent, sont sérieusement affectés, voire détériorés. Et puisque la végétation naturelle est essentielle dans l'équilibre environnemental de chaque zone géographique, en raison de ses rôles importants dans la protection des équilibres entre les composantes de cet oasis (humaines et naturelles) ; alors comment la dynamique du couvert végétal de Toudgha-t-il évolué pendant ces dernières décennies en fonction de la pression anthropique et du changement climatique? Et quels sont les impacts de ces facteurs sur ce paysage oasien ?

Cet article vise donc à appréhender la dynamique du couvert végétal dans une oasis subaride au sud est marocain et d'en déceler les impacts climatiques et anthropiques sur les domaines environnemental, socioéconomique et spatial. La prise en compte de ces effets pourrait enfin aider les décideurs à mettre en lumière les actions de bonne gestion territoriale pour rétablir le déséquilibre constaté au cours de ces années passées.

MÉTHODES ET APPROCHES :

Pour appréhender la dynamique du couvert végétal, il est indispensable de mener des investigations dans le terrain afin de mettre en relief les différents indicateurs de ce changement perpétuel qui touche un paysage oasien fragile. Dans un premier temps, et pour bien illustrer le l'impact sur l'environnement végétal de Toudgha, nous avons téléchargé les images satellites à partir de l'USGS Land-SAT archives. Ensuite, nous avons analysé les images des années (1984-1995-2015) en utilisant l'outil du Système d'Information Géographique (SIG), ces images significatives portent sur la période d'été (mois 6-7-8) , elles ont été choisi d'une part pour avoir une idée compatible et homogène du terrain et d'autres part pour une bonne visibilité de la lecture des images grâce à l'absence quasi-totale des nuages dans cette période.

L'indice NDVI ; Normalized Difference Vegetation Index ; est utilisé dans le monde entier pour surveiller la sécheresse, contrôler et prévoir la production végétale, aider à la prévention des incendies et cartographier la désertification [4]. Il a été créé par Rouse (1973), puis repris à de nombreuses reprises. Il s'agit de l'indice le plus couramment utilisé dans la recherche environnementale. L'indice permet de suivre l'activité chlorophyllienne des végétaux, par le biais de la réflectance dans le rouge et dans le proche infrarouge. Concrètement, il est calculé de la manière suivante :

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$$

Où PIR est la réflectance dans le proche infrarouge, et R celle dans le rouge [5].

Dans notre cas d'étude nous essayons de suivre l'évolution de la végétation sur une période de trente ans. En utilisant l'outil SIG, cet indice génère des valeurs comprises entre -1.0 et 1.0, représentant principalement la couverture végétale, où les valeurs négatives sont essentiellement générées par les nuages, l'eau et la neige et les valeurs proches de zéro essentiellement générées par la roche et le sol nu.

Dans un deuxième temps, les investigations ont été élaborées dans le terrain sous forme d'enquêtes et d'interviews avec une majorité d'agriculteurs en âge avancé (157 chefs de ménage). Ceux qui ont un historique de la zone depuis les temps passés pour avoir une image exhaustive sur l'évolution et la dynamique du paysage végétal et le fonctionnement socio-économique de l'oasis.

Description de la zone d'étude :

Notre espace d'investigation fait partie de la ceinture sud-atlasique ; appelée historiquement : Oasis de Toudgha ; elle est située au sud est du Royaume du Maroc, dans la zone présaharienne. Elle s'étend sur une superficie estimée à 2800 km² (découpage selon la méthode de séparation des eaux). Elle est limitée au Nord et à l'Est par le grand bassin Gheris et Ziz, à l'ouest par les bassins d'Oum R'bia et Draa (Dades), enfin au Sud on trouve le bassin Maider (figure 1).

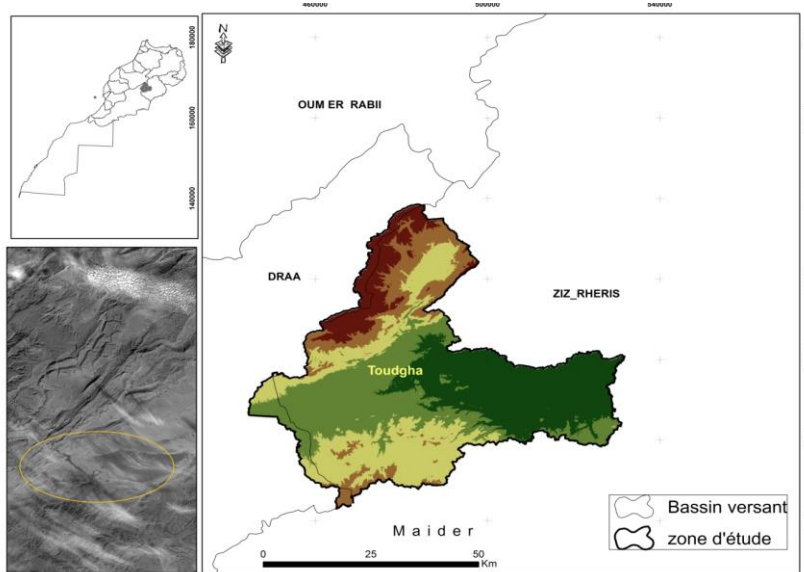


Figure 1 : localisation administrative et géographique de l'oasis Toudgha

Le bassin constitue avec son arrière espace Ziz-Gheris une entité relativement homogène du point de vue géologique, morphologique, climatologique et végétale. Le sous bassin Toudgha se trouve enveloppé par deux structures montagneuses, au nord le Haut-Atlas ; chaîne montagneuse plus élevée (environ 3000 m d'altitude) de formation calcaire, elle représente la réserve de ressources en eau en cas de neige. Au sud, l'extrémité orientale de l'Anti-Atlas connu sous le nom de Jbel Saghro et Ougnat, plus ancien géologiquement et moins favorable à l'activité humaine. Entre les deux chaînes s'allonge la

dépression sud-atlasique avec la plaine alluviale qui abrite l'espace oasien de Toudgha où se pratiquent la plupart des activités anthropiques. Administrativement, l'oasis couvre un centre urbain (ville de Tinghir) et 05 communes rurales.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dynamique et évolution du couvert végétal :

L'indice NDVI est privilégié pour l'observation globale de la végétation car il permet de suivre l'évolution du couvert végétal et d'avoir une idée sur les extensions agricoles et zones atteintes par la sécheresse. Pour l'oasis de Toudgha, l'indice varie entre -0.4468 pour et 0.5772, les palmeraies et les rives de l'oued Toudgha a toujours des valeurs positives indiquées en vert (Figure2).

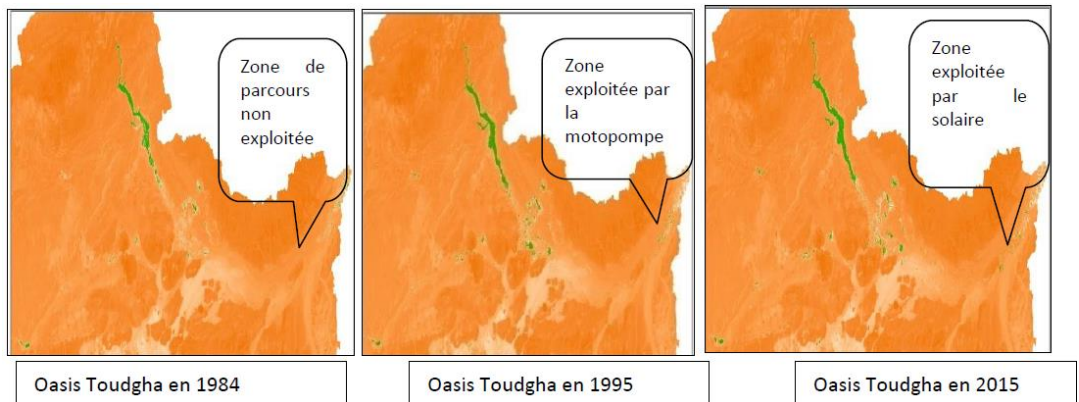


Figure 2 : L'évolution de la végétation dans l'oasis Toudgha durant trois périodes (1984 - 1995 – 2015).

Sources : images satellites usgs

Les illustrations de la figure (2) expriment l'évolution de la couverture végétale suivant trois périodes :

* En 1984, il se voit que la végétation était moins dense et la zone agricole était sèche, ceci s'explique par le manque de précipitations. En effet, l'année agricole 1983-1984 est connue comme année de sécheresse accentuée où le pluviomètre a enregistré 40 mm, selon les données météorologiques du bassin Toudgha. Ce qui a impacté le développement de la végétation dans l'oasis et son activité agricole en particulier.

* En 1995, l'expansion des terres agricoles s'est élevée avec un taux de croissance de 109 hectares, au détriment des zones de parcours et des espaces incultes [6]. Cet accroissement est dû premièrement à la pluviosité de cette année. Un enregistrement de 283 mm de précipitations a poussé les habitants de l'oasis à exploiter d'autres terrains notamment pour les céréales dont l'objectif d'assurer un minimum d'autosuffisance en matière de produits agricoles principaux et de compenser les besoins des années sèches. Deuxièmement, l'introduction de la motopompe a eu un effet destructeur car l'extraction mécanique de l'eau déclenche le processus d'une transformation paysagère ou d'une crise irréversible de l'écosystème oasien.

* En 2015 Une diminution significative des précipitations est enregistrée et face à la variabilité climatique, cette année est jugée une année à sécheresse modérée. L'environnement végétal accuse un taux de changement de 10%, soit une diminution annuelle de 2 hectares de terres agricoles malgré les incitations de la politique du Plan Maroc Vert (PMV 2008-2020). Ce déclin va en faveur soit de l'urbanisation soit l'abandon de la terre pour la création des unités d'accueil touristique. Enfin ces derniers temps, le recours aux énergies renouvelables comme le solaire a été la solution pour la cherté du carburant sauf que les exploitants agricoles introduisent d'autres cultures non adaptées au contexte oasien. Une manière de défigurer le paysage puisque la ressource eau/sol se dégrade continuellement.

Impacts économiques :

Sur le volet économique, on constate que la pluriactivité est la caractéristique de ces impacts, une oasis basée sur l'agriculture et l'artisanat se trouve incapable de se promouvoir chose qui pousse le tissu à entamer d'autres activités caractérisées à la fois par la complémentarité et concurrence.

Pour l'agriculture activité principale d'hier, il est clair que la sécheresse des années 80 a eu un réel impact dans la transition de la zone en passant de l'agriculture d'autosuffisance où les produits agricoles maintiennent l'équilibre des besoins, alors qu'aujourd'hui tous les produits sont importés y compris les céréales. Dans l'année 2008, la politique PMV (Plan Maroc

Vert) a encouragé les agriculteurs à exploiter plusieurs terres malgré la complexité de leur statut même si ces terres peuvent se trouver parfois en dehors du périmètre agricole. L'objectif était d'utiliser des techniques moins coûteuses et en même temps économes en eau, cette politique a donné fruit au début de son inauguration mais il s'avère enfin que le manque de la ressource hydrique a fait évaporer les ambitions de plusieurs exploitants agricoles du fait que le retour de l'investissement était faible et insuffisant. Le résultat de ce fait a poussé environ 40% des agriculteurs à envisager d'autres activités alternatives loin de l'agriculture, selon nos investigations du terrain.

Avec la variabilité climatique et les changements sociodémographiques ; que connaît l'oasis ; le paysage économique commence à se basculer et alterner des activités avec d'autres telle que l'agriculture, l'activité principale en d'autres telle que le bâtiment et le tourisme. L'activité agricole devient très coûteuse et son rendement reste faible et ne couvre plus les attentes des oasiens, ceci s'explique par la cherté du carburant des motopompes et la raréfaction des ressources hydriques et le changement du mode de vie des oasiens.

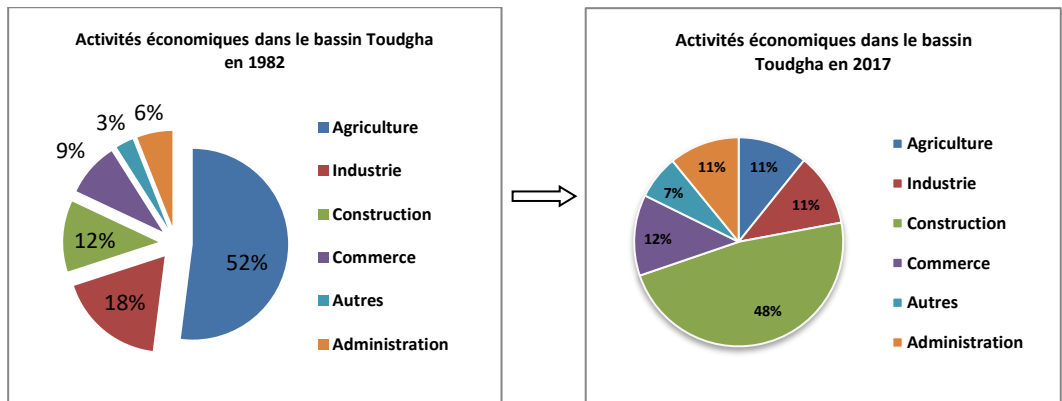


Figure 3 : Activités économiques dans l'oasis Toudgha 1982 – 2017 sources : Hcp* et Enquête terrain.

*HCP : Haut commissariat au plan.

Le potentiel paysager de l'oasis de Toudgha se concentre en amont du bassin, il est axé essentiellement sur le milieu naturel avec sa diversité riche. Cette dernière regroupe la montagne, la vallée et les gorges dans un paysage attractif très connu. Cependant, l'amont de l'oasis est largement traversé par des chemins, des sentiers de randonnées qui nuisent parfois aux champs et aux cultures par des gestes irresponsables des visiteurs.

Certes, cette activité touristique consomme moins de ressources en eau que l'agriculture mais il se trouve qu'il prend le second rang surtout dans les espaces arides où la goutte d'eau est véritablement cher. D'après nos investigations sur le terrain, environ trois quart des établissements touristiques possèdent des piscines à différentes tailles et arrosent leurs espaces verts par des pompes en exploitant les eaux de la nappe. Dans ce cas l'activité touristique ne joue plus la complémentarité avec l'agriculture, mais une concurrence inexorable face à l'exploitation irrationnelle du foncier (sol) et de la ressource (eau).

Cette activité ; qui n'a débuté qu'en 1980 avec l'arrivée de l'argent des migrants ; impacte fortement le paysage oasien et les installations s'infiltrant parfois à l'intérieur des agglomérations oasiennes et les terres agricoles pour plus d'attractivité. Il est certain que le tourisme oasien va tenter d'être une alternative pour compenser l'agriculture. Toutefois, ses structures d'accueil restent à but lucratif et moins engagées envers l'environnement fragile de l'oasis.

Impacts urbanistiques et sociaux :

Un second impact qui touche l'aspect social, réside dans le changement de la structure des familles. Des familles élargies commencent à se désintégrer à cause des mariages de la nouvelle génération, ceci a poussé les nouveaux ménages à chercher des logements autonomes. Cette manière de vivre avait des incidences sur le travail mutuel et groupé dans l'espace oasien, l'homme et la femme d'aujourd'hui considèrent l'oasis non comme un écosystème productif mais un jardin ou un espace vert de pique-nique. « Comment voulez-vous faire revivre la vallée et préserver la végétation avec une génération qui s'approvisionne de l'épicier toutes les denrées y compris les légumes et fruits » c'était une citation d'un homme âgé qui atteste qu'il y avait un changement énorme dans la structure sociale et il rajoute : « Dans notre époque, chaque membre de la grande famille assure une tâche soit dans le foyer soit dans les champs et il demande de l'aide lorsque la tâche demeure pénible » une sorte de mutualisation qui assure la cohésion sociale à l'intérieur de l'oasis. L'oasis pour cette nouvelle génération, ne joue plus son rôle de fédérateur de toutes les couches et fractions tribales mais un espace

d'individualisme et de conflits quotidiens, ce comportement social empêche et contrarie enfin la durabilité de l'oasis et la pérennité de sa végétation.

Sur le plan urbanistique, et avec l'attachement des migrants de l'oasis au territoire d'origine ; après leur retour : ils ont déserté leurs douars (Anciens ksours) pour bâtir de nouvelles demeures en béton armé et avec des architectures modernes. Les douars et la ville s'étendent vers toutes les directions même à l'ouest (voir la photo n°2), et les nouvelles constructions font pression sur le couvert végétal et les ressources hydro-agricoles.



Photo n°1 : photo aérienne de Tinghir juillet 1949
(Archives de Vincennes-Paris).



photo n°2 : photo satellite 2018

Les analyses menées par de nombreux chercheurs (géographes, architectes, historiens...) sur les mutations de l'espace (zone d'étude) ont montré que l'oasis présente une richesse non négligeable sur le plan urbanistique et architectural. Des ksours sont témoins de cette richesse, ils reflètent un mode d'appropriation communautaire de l'espace ; ces derniers temps ce mode d'habitat est en péril et l'appropriation individuelle change la donne. Selon notre enquête sur terrain plus d'un tiers des ménages enquêtés ont des propriétés individuelles en béton équipée avec tous les moyens d'une maison marocaine. Le rythme de l'urbanisation le plus accéléré est enregistré depuis les années 80 jusqu'à nos jours est de 67% (SDAU) [7] ; ceci sans distinction entre les sites aptes recevoir le bâti et ceux à capacité d'accueil restreinte ou non aedificandi (non constructible). En aval de l'oasis, les établissements touristiques implantés sur le paysage des gorges de Toudgha a donné naissance à une urbanisation étrange. Avec l'exiguïté des terrains de construction, les installations et leurs équipements de loisirs s'empilent souvent sur les zones de culture ou de l'ancien habitat, en procédant à leur réhabilitation dans des cas rares. Cet impact manifeste l'apparition d'un habitat non adapté au cachet local, étalé le long des routes goudronnées sur plusieurs kilomètres. Cette linéarité des constructions en béton armé dissout l'identité culturelle et architecturale locale, principal élément d'attractivité oasienne.

Enfin, sur le plan urbanistique, nous remarquons que l'usage des matériaux de construction locaux (pierre sèche, terre, bois, ...) se disparaît petit à petit en faveur des matériaux importés comme le ciment, le fer, le verre et l'aluminium d'où la prolifération de petites unités industrielles de fabrication de briques à l'intérieur de l'oasis sans compter leur effet pollueur sur l'environnement naturel et par conséquent l'objectif visant la préservation du couvert végétal se voue à l'échec.

CONCLUSION :

Cet article confirme que les impacts sur la couverture végétale de l'oasis est le produit d'un changement principalement anthropogène en premier lieu, accompagné d'une variabilité climatique et d'une dégradation continue du savoir faire local des oasiens. Cependant, il est important de souligner que, dans ce cas, c'est plutôt l'homme qui doit revoir son comportement, sa manière de gestion de la ressource naturelle et construire l'idée que seule son intervention réfléchie peut mener à bien ce territoire nettement fragile. Pour la protection du couvert végétal, il s'agit de penser à une irrigation des plantations sous un régime pluvial et assurée dans le cadre de projets d'agriculture solidaire et écologique, tout en facilitant le partenariat public-privé avec une vision prospective de développement durable.

Les différents impacts qui ont touché le territoire oasien de Toudgha, sont continuellement accélérés et la vitesse de la dynamique végétale demeure agressive face à la vulnérabilité des ressources naturelles et la grande faiblesse de leur réhabilitation. Un développement harmonieux, respectueux de l'environnement, de la culture et du patrimoine ancestral peut préserver ces ressources oasiennes, seules qui bâtissent l'une des piliers de la durabilité. Pour assurer ce développement tant souhaité, acceptable sur le plan social, rentable sur le plan économique ; la gestion devrait se concevoir d'une manière collective et participative. L'une des clés importantes de cette gestion territoriale est d'intégrer l'adaptation aux impacts climatiques dans les plans de développement communaux à travers des études poussées basées et axées sur

l'environnement comme finalité de développement. Ceci dans le but de faciliter la mise en œuvre des actions réfléchies avec et pour la population locale. Enfin, les approches basées sur le climat s'avèrent ; à ce jour ; importantes car la culture d'adaptabilité au milieu demeurera finalement une pratique de résilience face aux différents aléas climatiques et aux interventions engagées par l'homme au fil du temps.

Références

- [1] Ministère de l'Environnement, Janvier 2020 : Préparation d'un plan national en matière de sécheresse: État des lieux de la gestion de la sécheresse au Maroc. 30p, 124 pages.
- [2] Département de l'Environnement, mars 2009 : Quatrième Rapport National sur la Biodiversité Secrétariat d'État chargé de l'Eau et de l'Environnement. 33p, 112pages.
- [3] Ait khandouch.M, 2017 ; les migrants vecteurs de changement dans leur territoire d'origine : vallée de Toudgha dans le sud-est marocain.Thèse de doctorat,Université BRETAGNE LOIRE. 232p, 340 pages.
- [4] Rouse J.W. 1973.Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, in Third ERTS Symp, pp. 309–317, NASA SP-3511.
- [5] Abdelkrim. B. 2013: Vulnérabilité Et Adaptation Aux Changements Climatiques Dans Les Oasis De La Région De Tafilalet- Maroc.thèse de doctorat. Université Cadi Ayyad Faculté Des Sciences Semlalia – Marrakech).63 p. 205 pages
- [6] Ministère de l'Agriculture. RGA : Recensements généraux de l'agriculture 1982-1995.
- [7] Ministère de l'habitat et l'Urbanisme et l'Aménagement de l'Espace SDAU, 2010 : Schéma Directeur D'aménagement Urbain Des Vallées Toudgha Et Dades Rédigé par le Ministère de l'habitat et l'Urbanisme et l'Aménagement de l'Espace, Direction de l'Urbanisme- Horizon 2030.

Contraintes d'approvisionnement en eau potable dans le département des Collines au Bénin

Yetongnon Judith Eric Georges¹

Laboratoire Pierre Pagny, Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE)

Université d'Abomey Calavi (UAC), République du Bénin

Résumé

L'eau est l'une des ressources naturelles les plus indispensables à la vie et au développement économique des populations humaines. Elle est l'un des biens communs qui se retrouvent au cœur de la fondation de la vie communautaire. Malgré le fait que l'accès à l'eau potable et à l'assainissement soit reconnu comme un droit de l'Homme depuis 2010, nombre de population de par le monde éprouvent des difficultés à accéder à une eau de bonne qualité. L'objectif de la présente recherche est d'analyser les contraintes liées à l'accès à l'eau potable dans le département des Collines au Bénin.

Pour y arriver, une approche méthodologique axée sur la collecte, le traitement et l'analyse des résultats a été adoptée. Les protocoles statistiques ont été mis à contribution pour estimer les paramètres d'accès à l'eau potable.

De l'analyse, il ressort que les puits modernes, les AEV et les FPM sont les principaux ouvrages d'accès aux ressources en eau souterraine. Plusieurs contraintes limitent les populations à un accès durable à l'eau. Le comportement du faciès géologique constitué du socle cristallin, les épaisseurs d'altération des couches, les débits de fin de forage, la lithologie des couches géologiques sont autant de contraintes géographiques qui entravent l'accès à l'eau potable dans le département. A ces contraintes s'ajoutent celles géographiques et financières. Une approche plus intégrée et transdisciplinaire s'avère indispensable pour un accès durable aux ressources en eau.

Mots clés : Contraintes, accès à l'eau, Département, collines, Bénin

Drinking water supply constraints in Benin Hills Department

Abstract

Water is one of the most essential natural resources for the life and economic development of human populations. It is one of the common goods which are found at the heart of the foundation of community life. Despite the fact that access to drinking water and sanitation has been recognized as a human right since 2010, many people around the world find it difficult to access good quality water. The objective of this research is to analyze the constraints related to access to drinking water in the Collines department in Benin.

To achieve this, a methodological approach focused on the collection, processing and analysis of the results was adopted. Statistical protocols were used to estimate the parameters of access to drinking water

From us analysis it appears that modern wells, AEVs; FPMs are the main access structures to groundwater resources. Several constraints limit populations to sustainable access to water. The behavior of the geological facies made up of the crystalline bedrock, the thicknesses of alteration of the layers, the end-of-drilling flow rates, the lithology of the geological layers are all geographic constraints which hinder access to drinking water in the department. In addition to these constraints, there are geographic and financial ones.

A more integrated and transdisciplinary approach is essential for sustainable access to water resources

Keywords: constraints, access to water, Department, hills, Bénin

¹ Corresponding author: eyetongnon@yahoo.fr

INTRODUCTION

L'eau est d'une importance biologique et économique capitale. L'hydrosphère est le fondement de la vie et des équilibres écologiques. L'eau est à la fois un aliment, éventuellement un médicament, une matière première industrielle, énergétique et agricole et un moyen de transport [1]. La maîtrise humaine des ressources en eau, comprise ici comme la capacité des sociétés à mobiliser et contrôler l'eau (douce) à travers l'espace et le temps, représente un formidable outil de développement socioéconomique durable [2].

La problématique de la gestion de l'eau se pose aujourd'hui en termes d'adaptation des techniques et approches d'exploitation et de la promotion du développement durable. En même temps que l'accès à l'eau potable et à l'assainissement est indispensable à la santé de l'homme, l'eau constitue un élément de l'amélioration de la santé et du développement économique.

L'accès à l'eau potable et à l'assainissement représente un combat quotidien pour des centaines de milliers de citoyens qui vivent principalement dans les pays en développement [3]. Selon le rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé [4], 1,1 milliards de personnes soit 17% de la population mondiale n'ont pas accès à de l'eau potable et 2,6 milliards soit 42% de la population mondiale n'ont pas accès à un assainissement adéquat.

L'eau douce est une denrée qui devient de plus en plus rare dans beaucoup de régions du monde, notamment en Afrique subsaharienne [5] [6],[7]. Cette denrée qui ne représente que 2.5% du volume total de l'eau de la planète (97.5% pour l'eau salée) subit une forte pression pour la satisfaction des besoins de la population [8], [7]. La pression sur les ressources en eau douce va encore augmenter avec la forte croissance démographique, la nécessaire croissance de la production agro-alimentaire, le développement industriel et l'amélioration des conditions de vie. Malheureusement, tout ceci se passe dans un contexte climatique où la pluviométrie, principale pourvoyeuse de l'eau douce, présente de forte variabilité spatio-temporelle et une tendance à la baisse sur une grande partie de l'Afrique [9]

Malgré les efforts fournis par des acteurs impliqués dans le secteur de l'eau depuis la décennie 1990, le département des Collines est l'un des départements du pays où la question de l'eau potable se pose avec beaucoup d'acuité en raison de la configuration hydrogéologique qualifiée de zone hydrogéologique. Le département des Collines est sur le socle cristallin. L'existence de ce socle cristallin fait que la construction des forages n'est possible qu'au niveau des discontinuités (fractures, fissures) de la roche. C'est pourquoi la probabilité d'échec lors de construction des points d'eau modernes est très élevée, elle est supérieure à 40% .

MILIEU D'ETUDE

Le département des Collines fait partie des douze (12) Départements de la République du Bénin. Il est situé entre 2° 10' et 2° 24' de longitude est et 7° 27' et 8° 46' de latitude nord. Il couvre une superficie de 13 931 km² soit 12,37% de la superficie du territoire national et compte six communes que sont Bantè, Dassa-Zoumè, Glazoué, Ouèssè, Savalou et Savè. Il est limité au nord par les Départements de Borgou et de la Donga, au sud par les Départements du Zou, du Plateau et de l'Ouémè, à l'Est par la République Fédérale du Nigeria et à l'ouest par la République du Togo (fig 1).

Le département des collines est caractérisé par un climat intermédiaire entre le climat subéquatorial à deux saisons humides du sud et le soudano-sahélien du nord Bénin à une seule saison humide. Il présente des caractéristiques intermédiaires à ces deux faciès climatiques [10].

La température mensuelle moyenne (figure 2) varie suivant les mois dont les plus chauds sont février et mars où elle atteint 29°C. Juillet et août sont les plus frais avec une valeur moyenne de 24°C.

Sur le plan géologique, le département des Collines installé sur le socle précambrien, dahoméen composé du gneiss et du granite avec des formations du Continental terminal (sablo-argileux) à l'aval du bassin. Il présente un relief dont la structure du socle influence fortement l'écoulement. Les cours d'eau sont fortement encaissés, avec une pente faible qui témoigne du comblement du lit du cours d'eau. Installé sur une pénéplaine modelée sur un socle précambrien, dahoméen composé du gneiss et de granite et dominée par des collines de 300 m en moyenne d'altitude. Les sols ferrugineux tropicaux, les sols hydromorphes à pseudo- gley sur sable, les sols minéraux bruts sur cuirasse et sur roche. Ces sols sont drainés par de nombreux cours d'eau permanents et temporaires dont les plus importants sont : le fleuve ouémè et la rivière Zou et l'okpara (Fig 3)

Le couvert végétal est dominé par une savane boisée ou arborée dominée par *Parkia biglobosa* (néré), *Vitellaria paradoxa* (le karité), *Khaya senegalensis* (le caïlcédraat : Zunzatin en fon), *Vigna guiculata*, *Adansonia digitata* et *Bombax costatum* (le kapokier). Le long des cours d'eau, se développent des forêts galeries qui sont constituées d'espèces comme *Raphia huqeri* (palmier raphia), *Berlinia grandiflora*, *Anogeisus leiocarpa*.

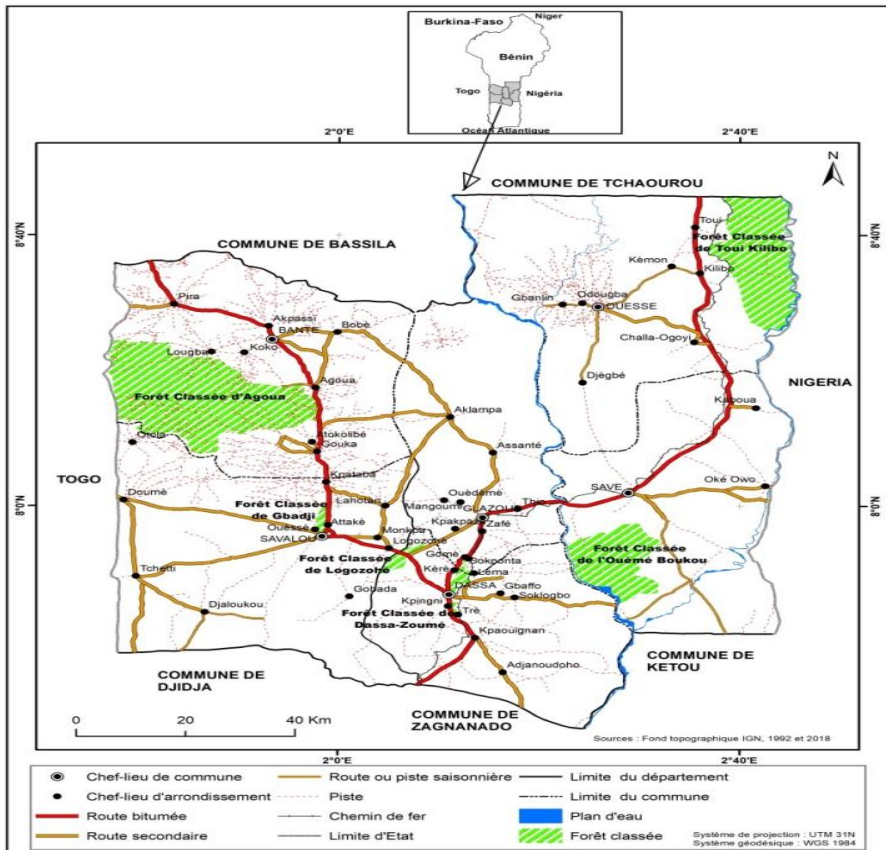


Fig1: Situation géographique du département des Collines

Le régime pluviométrique moyen mensuel de la période (1975-2003) présente un aspect unimodal dans la station de Savalou (fig 2)

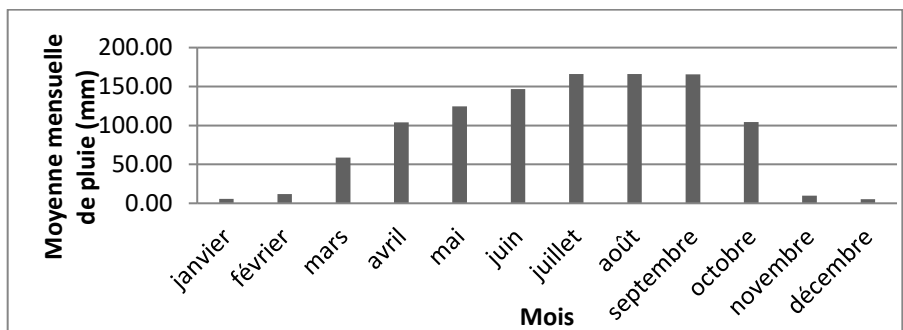


Fig2: Regime pluviométrique mensuel à Savalou de 1965 – 2008
Source: ASCENA 2008

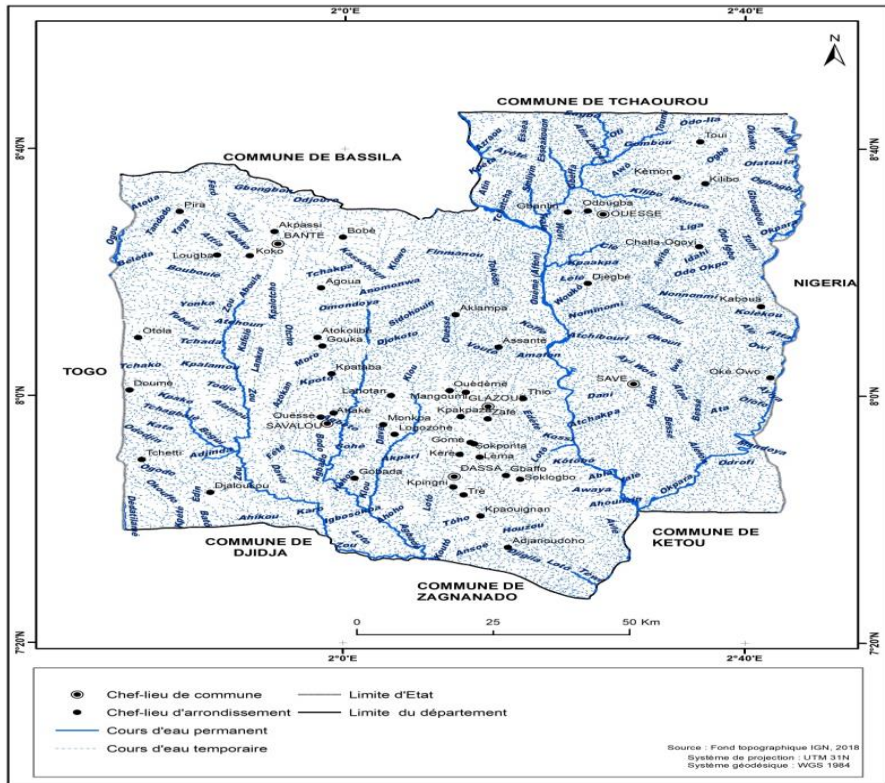


Fig 3: Réseau hydrographique du département des collines

Approche méthodologique

Données de l'étude

Les données climatologiques utilisées dans cette étude sont :

- Les données pluviométriques constituées des hauteurs de pluies journalières, mensuelles et annuelles des stations de Savè ; Dassa-Zoumè, Savalou, Bantè, Glazoué, Oussè de la période de 1965 à 2008
- les températures maximales, minimales de l'air de la station de Savè de 1965-2008;
- Les données d'ETP décadaire couvrant la période de (1965 -2008) de la station synoptique de Savè ;
- Les rapports d'exécution des forages.

Ces différentes données ont été collectées à l'ASCENA, au LACEEDE et au service Eau-collines.

L'analyse des données pluviométriques et thermométriques a été faite à l'aide des outils statistiques appropriés.

Les différents problèmes d'accès à l'eau ont été abordés auprès des populations à l'aide des questionnaires élaborés à cet effet. Ainsi les enquêtes ont été menées auprès des populations et des personnes ressources. L'échantillon est déterminé à partir de la technique de choix raisonnée. La taille de l'échantillon est obtenue à partir de la formule de [11];

Au total 284 ménages ont été enquêtés sur l'ensemble des six communes du département des Collines. Cinq (5) personnes ressources par Commune ont été questionnées pour recueillir leurs avis sur les facteurs qui contribuent aux problèmes d'accès à l'eau.

Méthodes de traitement des données

Les données collectées ont été traitées à l'aide des protocoles statistiques. Ainsi, la moyenne arithmétique est employée pour étudier les régimes pluviométrique et hydrologique. Elle est le paramètre fondamental de tendance centrale. Elle s'exprime de la façon suivante :

$$\overline{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

La moyenne $\overline{X}$ a permis de caractériser l'état hydroclimatique moyen et de mettre au point quelques indices de dispersion.

Les paramètres de dispersion

Ils sont calculés à partir de la moyenne.

Le calcul de l'écart type permet d'évaluer la dispersion des valeurs autour de la moyenne « normale ». Il se détermine par le calcul de la racine carré de la variance :

$$\sigma(x) = \sqrt{V}$$

où V est la variance

L'écart type est l'indicateur de la variabilité par excellence.

A partir du calcul de l'écart type, l'étude des anomalies centrées réduites pluviométriques et hydrométriques mensuelles et interannuelles a été entreprise en standardisant les données. Les anomalies sur chaque station et sur les différents bassins se calculent par la formule suivante :

$$x'_i = \frac{x_i - \overline{X}}{\sigma(x)}$$

où : x'_i = anomalie centrée réduite pour l'année i
 x_i = la valeur de la variable,

$\overline{X}$ = la moyenne de la série.

$\sigma(x)$ = l'écart type de la série

Résultats

Situation de l'approvisionnement en eau potable dans le département des Collines

L'essentiel de la ressource en eau potable des populations rurales du Département des Collines est issu des eaux souterraines contenues dans les aquifères du socle fracturé. Ces eaux sont captées à l'aide des forages et des puits à grands diamètres. Le recensement de tous les points d'eau potable du Département des Collines révèle qu'il y a 2143 points d'eau dont 1295 forages équipés de pompes à motricité humaine, 55 adductions d'eau villageoises avec 226 bornes fontaines, 356 puits modernes et 10 postes d'eau autonome soit un taux de desserte de 61 %. Ce taux de desserte en dessous du taux de desserte en eau potable en milieu rural qui est de 67 %. Ce faible taux d'accès à l'eau potable est dû à plusieurs facteurs dans le département.

Facteurs hydrogéologiques

Le département des collines est recouvert par le socle cristallin et cristallophyllien. Ce substratum géologique est composé de roches métamorphiques et magmatiques. Ce sont des formations dures massives et donc imperméables à l'eau à l'état sain. Ces des roches volcano-sédimentaires et plutoniques anciennes du Cambrien et du Précambrien qui ont été soumises à un intense métamorphisme. Des granitoïdes, concordants ou discordants sont intercalés localement dans ces formations. Les roches les plus représentées du département sont les gneiss (migmatitiques, à biotite, ocellés). Les autres roches sont des granites, des quartzites, les mylonites liées à l'accident de Kandi et enfin les séries volcano-sédimentaires de Daho-Mahou composées essentiellement de rhyolites, microsyénites, microgranites et basaltes. La disponibilité des eaux souterraines dépend des caractéristiques hydrogéologiques du substratum géologiques. La figure 4 présente la facette géologique du département des Collines.

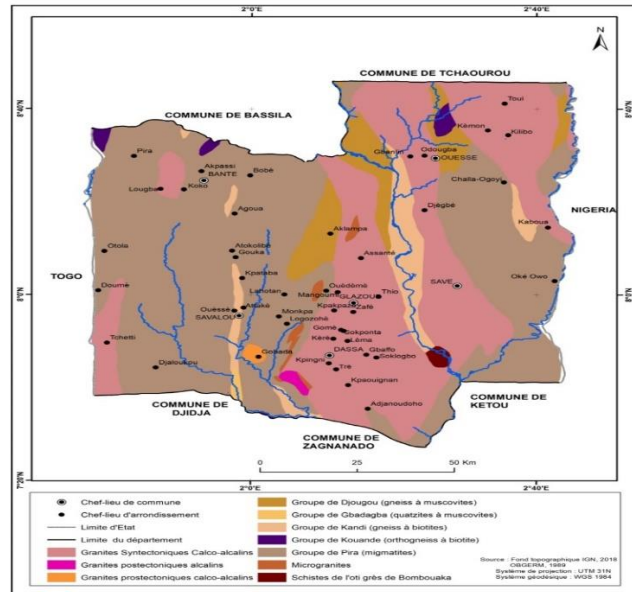


Fig 4 : Géologie des Collines

Typologie des aquifères

Les aquifères de socle sont représentés par trois types de réservoirs : le réservoir d'altérites qui correspond aux arènes sablo-argileuses, le réservoir de fissures situé au-dessus de la roche saine qui traduit une zone partiellement altérée comportant de nombreuses fissures et diaclases généralement remplies de produits d'altération, et le réseau de fractures majeures qui affectent la roche mère [12]. Deux types de réservoirs d'aquifères sont identifiés dans les zones de socle.

Les aquifères dits « discontinus » peu perméables et très peu poreux sont nés des contraintes tectoniques qui ont développé au sein des roches résistantes des réseaux de fractures pour stocker et conduire les eaux d'infiltration. C'est la ressource en eau contenue dans ces aquifères discontinus qui est exploitée pour les forages hydrauliques.

Le deuxième réservoir aquifère, en continuité hydraulique avec le socle est issu des altérations des roches et formations meubles à prédominance argilo-sableuse. Ce réservoir supérieur est continu, très peu perméable, mais fortement capacitif ; il renferme plus de 95 % des ressources en eau stockées dans le système. Elles sont peu exploitées pour les forages hydrauliques mais assez sollicitées pour les puits à grand diamètre. La figure 5 présente la structure type d'un aquifère de socle cristallin.

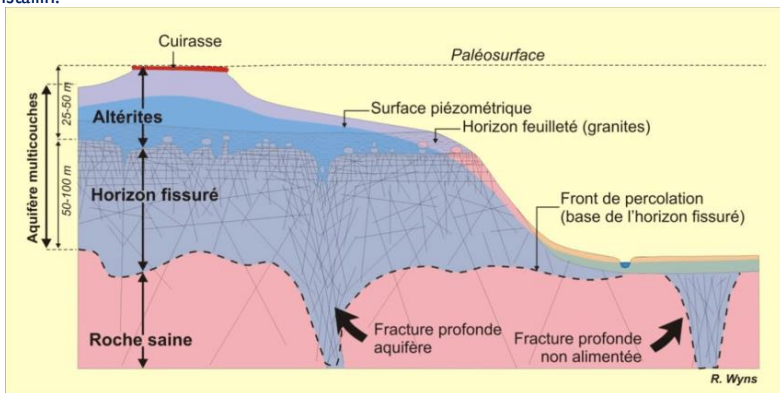


Fig 5: Structure type d'un aquifère du socle Source: Documentaire BRGM; 2005

Epaisseur d'altération

Les épaisseurs d'altération des roches déterminent la disponibilité de l'eau dans les forages. En effet, dans les régions de socle, les fissures sont d'autant plus prononcées et productifs que l'épaisseur des altérites qui surmontent le substratum sain est plus importante. La figure 6 présente la proportion des puits qui tarissent en fonction de leurs épaisseurs d'altération.

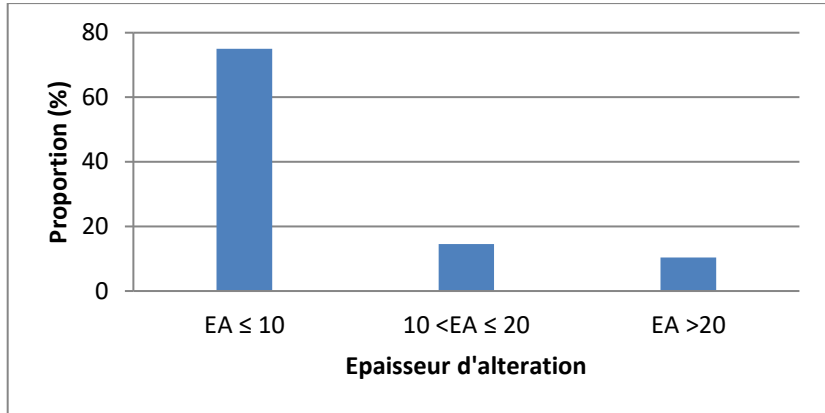


Fig 6: Influence de l'épaisseur d'altération sur le tarissement des forages

De l'analyse de la figure 6, il ressort que le taux de succès augmente en fonction de l'épaisseur de recouvrement pour toutes les formations géologiques dans le Département des Collines. Les forages qui tarissent vite soit (75 %) ont une épaisseur d'altération inférieure ou égale à 10 m. ce taux est 16 % pour les épaisseurs d'altération inférieures ou égale 20 m et de 10 % pour les recouvrements supérieurs à 20 m. Le problème de tarissement des forages est plus observé sur les forages dont l'épaisseur d'altération est faible.

Débit des forages

Le document de stratégie d'approvisionnement en eau potable en milieu rural élaboré par la Direction Générale de l'Eau, stipule qu' un forage est déclaré positif si son débit à la fin du forage est supérieur ou égal à 0.7m³/h. Partant de cette norme, le problème de tarissement en fonction du débit de fin de forage. La figure 7 présente les résultats du tarissement en fonction des débits de fin de forage.

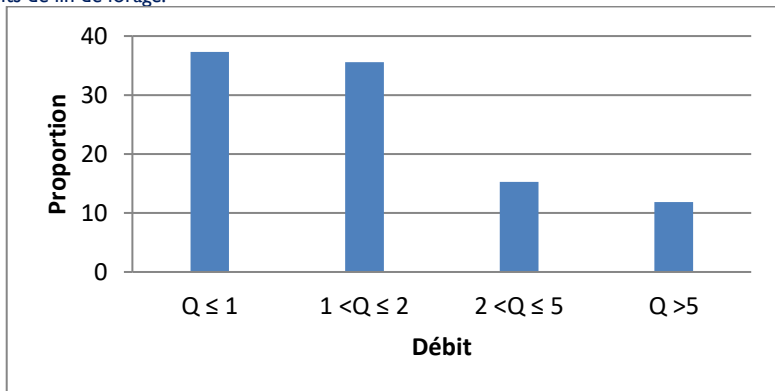


Fig 7: Influence du débit des forages sur le tarissement des forages

Les forages dont les débits sont inférieurs ou égal à 2m³/h sont plus affectés par les problèmes de tarissement soit 72,88 des forages contre 27 m³/h ne sont pas concernés par les problèmes de tarissement. Le risque de tarissement est plus grand quand le débit de fin de forage est faible. Cela pose ici le problème des débits énoncé à la fin des forages car le débit d'exploitation des forages est déterminé après les essais de pompage qui est à 90% inférieur au débit à la foration.

Lithologie des sites des forages

Les facteurs lithologiques des formations du socle déterminent aussi la disponibilité de l'eau dans les forages. Ainsi une analyse de l'influence de la composition lithologique des formations sur le problème de tarissement a été faite tant au niveau des forages qui tarissent que sur ceux qui ne connaissent pas ce phénomène. Des résultats, il ressort que :

- Pour les formations des séries volcano sédimentaires, respectivement 80 et 75 % des forages réalisés dans les microgranites et les basaltes en coussins tarissent,
 - Dans les autres formations, la plupart des forages qui tarissent sont dans les granites à biotite de Gobada pour les granitoïdes soit 33,33 % ; les Charnockites et les Gneiss oeilés à biotite soient respectivement 33,33 % et 25,22 % pour les complexes métamorphiques.
- Les forages réalisés dans les microgranites, les basaltes en coussins, les granites à biotite de Gobada, les charnockites et les gneiss oeilés à biotite sont les plus touchés par le phénomène.

Accessibilité géographique des points d'eau

L'accessibilité est une notion qui rend compte de la plus ou moins grande facilité avec laquelle on peut accéder à un service. Dans le contexte de la présente recherche, elle se décline en terme de disponibilité de la ressource, de permanence, de distance qui sépare le ménage de son point d'eau et de qualité.

Contraintes liées à la distance

L'accessibilité ici se traduit en termes de la distance moyenne entre les ménages et leur point d'approvisionnement en eau potable. La figure 8 permet d'évaluer le temps moyen journalier consacré au transport de l'eau potable à domicile.

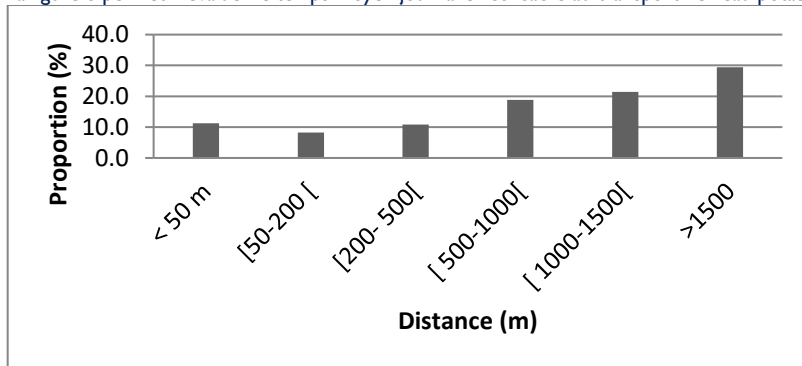


Fig 8: Distance séparant la point d'eau de la maison Source : Résultats d'enquête

Environ 30 % des ménages s'approvisionnent au niveau des point d'eau potables situés à une distance inférieure à 500 m. La distance moyenne entre les ménages et leur point d'approvisionnement en eau potable est de 420 m. Près de 40 % des ménages font entre 500 et 1500 m pour s'approvisionner en eau. De même que 30 % des ménages s'approvisionnent à un point d'eau situé à plus de 1,5Km de leurs maisons. En comparant cette distance moyenne avec la norme OMS (200 mètres), on peut dire que l'accessibilité des ménages du département des Collines aux points d'approvisionnement en eau potable est peu aisée. Ainsi, l'une des difficultés rencontrées par les populations est la distance non négligeable qu'elles parcourent pour s'approvisionner en eau potable. Elles perdent assez de temps surtout les femmes car elles font la corvée d'eau. Cette situation les rend vulnérables car elles disposeront de peu de temps pour s'occuper de leurs activités génératrices de revenu.

Accessibilité financière

Le paiement de l'eau de consommation pèse lourdement sur le budget des ménages qui sont obligés souvent de consommer l'eau non potable ou s'approvisionner au niveau des ouvrages hydrauliques villageois quelle que soit la distance qui sépare le ménage du point d'eau pour les différents usages domestiques.

Le prix de vente varie selon l'unité de mesure, la source et le village. Mais le prix de la bassine de 25 litres varie entre 15 et 125 F au niveau des FPM, 25 F au niveau des BF contre 25 F voire 50 F pour l'eau des robinets SONEB.

D'un autre côté, un constat est que des ménages, malgré qu'ils soient abonnés et donc qu'ils aient l'eau potable à proximité, préfèrent utiliser l'eau de la SONEB juste pour la boisson. C'est l'eau de puits traditionnels qui sert aux autres usages domestiques.

Pour faire face à ce problème de manque d'eau et surtout de la distance, pendant la grande saison sèche, la plupart des hommes viennent en aide à leurs femmes en achetant des bidons (photo 1,2,3) et cherchent des pousse-pousse, charrettes, vélos, moto pour faciliter l'accès à une quantité considérable d'eau en un bref temps.



Photo 1: Approvisionnement en eau au niveau d'un forage à Banté



Photo 2: Chariot de transport l'eau à Glazoué



Photo 3: Transport de l'eau à vélo à Savé

Prise de vue : Yetongnon, 2008

Discussions

Les aquifères d'altération jouent une fonction majeure dans le stockage de l'eau dans les régions de socle. En effet, comme l'affirme [13]. Les réserves d'eau souterraines sont emmagasinées dans la partie supérieure altérée, mais sont drainées par les fissures et les fractures sous-jacentes, ouvertes parfois sur de grandes profondeurs. De même, de nombreuses études montrent les réservoirs constituent un aquifère unique dont la fonction de stockage est assurée par les altérites et la fonction conductrice par les zones fissurées et fracturées [14] ;[15] ;[16]. Les aquifères les plus productifs correspondent ainsi généralement aux ensembles dans lesquels un horizon d'altération suffisamment épais formé de matériaux grossiers est drainé par une zone de fissuration et/ou de fracturation.

Le taux de tarissement précoce des forages est plus élevé que la couche de l'épaisseur d'altération des couches est faible. C'est dire que l'épaisseur des couches altération est fonction de la productivité des forages. Cette logique d'hydrogéologie des zones de socle a été vérifiée par d'autres auteurs tel que [13] et [17] qui affirme que la productivité des forages augmente avec l'épaisseur des altérites sur les roches cristallines et cristallophylliennes où les débits d'exploitation moyen et fort ($Q > 2\text{ m}^3/\text{h}$) se rencontrent généralement dans les zones dont les épaisseurs altérites sont comprises entre 10 et 40 m dans la région de Agboville en Côte d'Ivoire. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus au Burkina Faso [18].

Les contraintes d'accès à l'eau sont multiformes et dépendent aussi bien des conditions anthropiques que naturelles. En effet, dans le département des Collines, les ressources en eau sont confrontées non seulement à la pression démographique mais aussi aux effets des changements climatiques et aux conditions géomorphologiques. Ces différents facteurs rendent difficiles et pénibles l'accès aux eaux souterraines. Ces facteurs ont été abordés par [17] en Côte d'Ivoire, avec la croissance rapide de la population, les effets du réchauffement climatique et la pollution des eaux de surface, l'on est confronté à de véritables problèmes d'approvisionnement en eau potable dans les zones de socle, qui occupent 97,5 % de la superficie du territoire.

La distance parcourue pour accéder à un point d'eau est un indicateur d'accès à l'eau potable car plus la distance est longue plus les populations consacrent le temps à la corvée de l'eau ce qui réduit le temps à consacrer à d'autres activités. 70 % des ménages dans le département parcourent plus de 500 m avant de s'approvisionner en eau potable. A titre de comparaison, l'étude réalisée à Ouagadougou par [19] a révélé que les ménages parcouraient en moyenne 350 mètres pour s'approvisionner directement au point d'eau collectif. Si l'on se réfère à la typologie de [20], selon laquelle une accessibilité raisonnable ou relativement bonne à l'eau se définit comme le fait de disposer d'un point d'eau potable à 100 mètres, on trouve alors qu'environ deux ménages sur 10 (15 %) seulement accèdent facilement à l'eau potable.

Conclusion

La présente recherche a permis d'analyser les différentes contraintes qu'éprouvent les ménages du département des Collines dans l'accès à l'eau potable. Les conditions d'accès à l'eau restent marquées par plusieurs contraintes notamment les facteurs hydrogéologiques à travers les caractéristiques des aquifères du socle. Le taux de tarissement des ouvrages varie ainsi à travers l'épaisseur d'altération des couches, les débits de fin de forage, la lithologie des couches. L'accessibilité géographique a abordé les contraintes liées à la distance et les contraintes financières qui conditionnent les modalités d'accès aux ressources en eau. Les recherches multidisciplinaires doivent donc être effectuées afin de déterminer les zones de grande faille où les couches d'altération sont importantes.

Références bibliographiques

- [1] Festy, B., Hartemann, P., Ledrans, M., Levallois, P., Payment, P., & Tricard, D. (2003). Qualité de l'eau. Environnement et santé publique-Fondements et pratiques, 333-368.
- [2] Grey, D. et C.W. Sadoff, (2006), Water for Growth and Development, document thématique présenté au IVe Forum mondial de l'eau (Mexico, Mexique, 16-22 mars 2006), Mexico, CONAGUA, 44 p.
- [3] Grelle, M. H., Kabeyne, K., Kenmogne, K., Tatiése, T., & Ekodeck, G. E. (2006). L'accès à l'eau potable et à l'assainissement dans les villes des pays en développement: cas de Basoussam (Cameroun). VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement, 7(2).
- [4] UN-WATER/WWAP., (2006). L'eau, une responsabilité partagée. Résumé du 2ème Rapport Mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau. Un water. 52 P.
- [5] PAQUEROT S (2005). Eau douce : la nécessaire refondation du droit international, Puq.
- [6] AMISIGO B (2006). Modellingriverflow in the Volta Basin of West Africa: a data-drivenframework, number 34, Cuvillier Verlag.
- [7] BARON C (2009). L'eau en Afrique : disponibilité et accès, Futuribles 359, 33–56.
- [8] OMM and UNESCO (1997). Y aura-t-il de l'eau sur la terre, OMM Nr 857.
- [9] PATUREL J, BOUBACAR I, L'AOUR A et MAHÉ G (2010a). Analyses de grilles pluviométriques et principales traits des changements survenus au 20 ème siècle en Afrique de l'Ouest et Centrale, Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques 55(8), 1281–1288.
- [10] BOKO M., (2004). Gestion des risques hydro-climatiques et développement économique durable dans le bassin du Zou. Université d'Abomey-calavi/Laboratoire de Climatologie. 51p
- [11] Schwartz D. (1995) : Méthodes statistique à l'usage des médecins et des biologistes. 4è édition, Editions médicales, Flammarion, Paris, 314 p.
- [12] Ouedraogo M. (2019) Caractérisation des aquifères de socle pour l'amélioration de la productivité des forages d'hydraulique villageoise dans le bassin versant du Bandama blanc amont (Nord de la Côte d'Ivoire). Géophysique [physics.geo-ph]. Université Paris Saclay (COMUE), 2016. Français. ffnnt : 2016SACLS442ff. ffile-02100659v2f
- [13] Boukari, M., Akiti, T. T., & Assoma, D. (1984). L'hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest. Synthèse des connaissances Socle cristallin et cristallophylien et sédimentaire ancien, 2e édition, 147pp.
- [14] Savadogo, N. (1984). Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta: Etude régionale du bassin versant de la Sissili (Doctoral dissertation).
- [15] Nakolendousse, S. (1991). Méthode d'évaluation de la productivité des sites aquifères au Burkina Faso: géologie, géophysique, télédétection (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).
- [16] Koussoubé, Y. (2010). Hydrogéologie des séries sédimentaires de la dépression piézométrique du Gondo (bassin du Sourou): Burkina Faso/Mali (Doctoral dissertation).
- [17] N'GO, D. Goné, I. Savané. M. Goblé. (2005). Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud Ouest de la Côte d'Ivoire) : Caractérisation hydroclimatique et physique
- [18] Sourisseau, B. (1981). Hydraulique villageoise dans le département du Sahel (Haute Volta). Rapport final, Rép. de Haute Volta, BRGM.

Contribution à l'étude anthropique dans une zone du littoral (cas de la région de Honaine, Oranie-Algérie)

Benabadji Noury¹, Ouadah Fatiha²

¹Professeur Université de Tlemcen Faculté SNV/STU, BP 119, Imama,

²: Doctorante Faculté SNV/STU, BP 119, Imama,

Résumé

A travers une approche anthropique nous avons visé l'étude de la dynamique des écosystèmes naturels dans la commune de Honaine qui a subi d'énormes modifications dues principalement à l'action de l'homme, de l'animal et du climat.

Du point de vue bioclimatique la période récente (1970-2001) varie nettement par rapport à l'ancienne période (1913-1938) avec une diminution des précipitations et une augmentation des températures, donc les stations météorologiques évoluent vers des étages plus secs.

L'étude du couvert végétal montre une évolution avec l'installation de certaines espèces épineuses et/ou toxiques qui dominent le territoire de ces steppes et de ces matorrals souvent dégradés [1]

D'un autre côté, l'analyse socio-économique nous a permis une meilleure connaissance de notre périmètre d'étude, ceci a consisté à effectuer une analyse de la répartition et de l'évolution de la population ainsi que l'exploitation de ces milieux agro-pastoraux. Ces derniers ont fait l'objet d'une analyse relativement soignée.

Mots clés : aspect anthropique. Couvert végétal, occupation du sol, surpâturage, Honaine (Monts Traras -Algérie).

Contribution to the anthropic study in a coastal area (case of the Honaine region, Oran-Algeria)

Abstract

Through an anthropic approach we aimed to study the dynamics of natural ecosystems in in the town of Honaine which has undergone enormous changes, mainly due to the action of man, animal and climate.

From a bioclimatic point of view, the recent period (1970-2001) varies noticeably from the old period (1913-1938) with decreased precipitation and increased temperatures, therefore weather stations are moving to drier floors.

The study of the plant cover shows an evolution with the installation of certain thorny species and / or toxic which dominate the territory of these steppes and these often degraded matorrals (1)

On the other hand, the socio-economic analysis allowed us a better knowledge of our study perimeter, this consisted in carrying out an analysis of the distribution and evolution of the population as well as the exploitation of these agro-pastoral environments. These have been the subject of a relatively detailed analysis.

Key words: anthropogenic aspect. vegetable cover. land use, overgrazing, Honaine (Trara Mountains – Algeria)

¹ Corresponding author: benabadji.n@gmail.com

INTRODUCTION

La région de Honaine et celle des Traras ou monts des Traras ont été toujours considérées comme un foyer privilégié des grandes migrations depuis la fin du XIX^{ème} siècle. D'après certaines informations recueillies la colonisation a déstructuré les structures foncières par diverses procédures notamment les lois, parmi elles celle du « Sénatus Consult (1863) » qui se sont traduites par l'effritement des rapports ancestraux qui existaient entre l'homme et son espace en repoussant souvent les populations vers les terres marginales.

Cette situation a généré par conséquent des problèmes d'érosion et les terres en s'appauvrissant, ne pouvaient plus procurer des revenus capables de maintenir les populations sur place. Elle s'est traduite également par d'importants flux migratoires qui étaient dirigés principalement vers la France (immigration).

Dans ce contexte et pour expliquer certains phénomènes les ressources humaines au même titre que les autres ressources doivent être croisées et confrontées avec les différentes contraintes et potentialités de cet espace. Pour ce faire, il est indispensable de connaître le peuplement des monts des Traras notamment son évolution et sa répartition.

Les données de bases qui ont servi pour l'analyse du peuplement sont les différents recensements généraux de la population et de l'habitat de 1966, 1977, 1987, 1998 ainsi que les monographies communales disponibles au niveau de la Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire (D.P.A.T, 2003) de la wilaya de Tlemcen.

Il importe enfin de mentionner que pour les recensements de 1966 et 1977 des redressements ont été effectués selon les nouvelles limites administratives des communes du dernier découpage administratif de 1984. L'objectif étant d'obtenir des populations comparables à travers les différents recensements.

Depuis les temps historiques, l'homme est-il devenu le principal facteur de dégradation de divers écosystèmes dans l'ensemble du globe terrestre en général et dans notre région en particulier ? Les populations ont-elles été amené à utiliser les zones forestières pour des activités traditionnelles telles que: Agriculture, élevage (pâturage), extraction du bois...etc ?

Despois [2] a signalé: « Les principales causes du déboisements ont toujours été les besoins du combustible et l'extension des cultures ».

La plupart des problèmes de dégradation constatés dans les zones méditerranéennes proviennent des conséquences de la pression des activités humaines qui s'exercent avec une haute intensité sur la forêt sur les bassins versants ...etc. cela sans tenir compte des capacités de charge de ces milieux naturels.

Ces activités et leur échelle d'action étaient compatibles avec la reproduction du milieu naturel, cependant depuis la moitié de ce siècle, tous les scientifiques constatent que la dégradation et la perte de certains milieux naturels ont dramatiquement augmentés dans la plupart des pays méditerranéens, toujours et essentiellement du fait du manque de gestion et surtout de tous les conflits d'intérêt entre les mesures de conservation et les pratiques de développement.

Les études sur la dégradation de la végétation dans ces régions méditerranéennes en général et dans l'Oranie (région des Traras comprise) ont été particulièrement bien étudiées au cours des dernières années : Benabadi et al. [3], Harry [4], Barbero et Loisel [5], Ganisans et Guber [6], Barbero et Quezel [7], Benabadi et al. [8], Bouazza [9], Merzouk [10], Bensene [11] ont tous insisté sur l'effet de dégradation et ses conséquences sur la végétation naturelle.

Pour étayer ces différents aspects dans la région liée à l'anthropisation, cette étude traitera successivement :

- Sites et méthodologie,
- Résultats et interprétations comprenant les données de la population des monts des Traras avec sa répartition et son évolution, et les Causes de la dégradation de la végétation.

Sites et Méthodologie

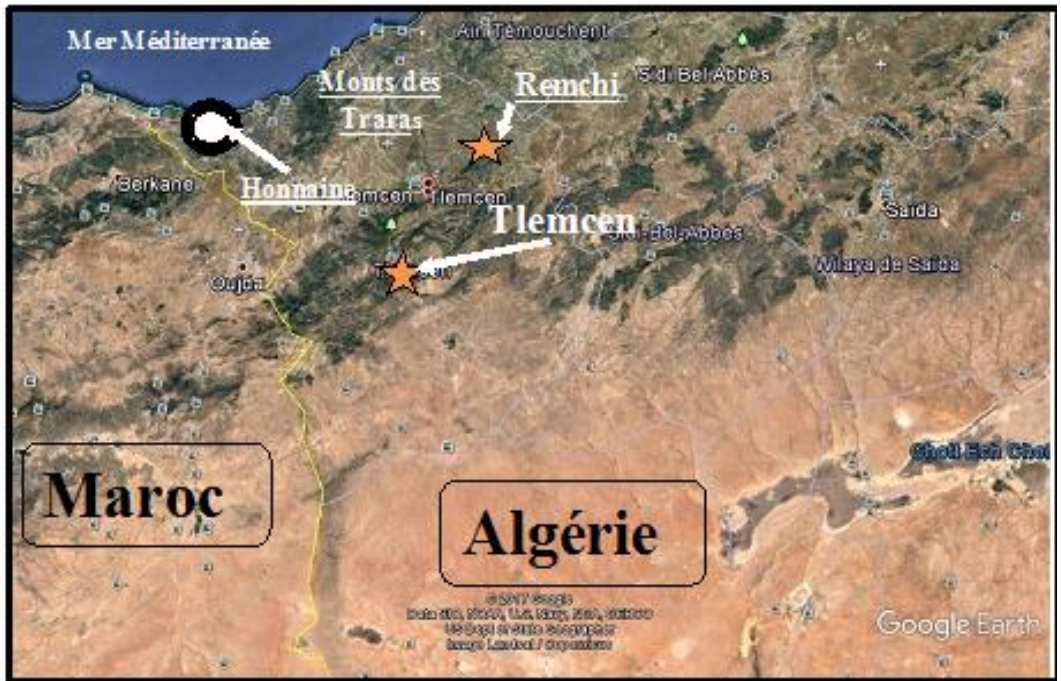
Situation géographique des Traras : Appartenant à la wilaya de Tlemcen, la région se situe entre 34°44' de latitude Nord et 1°18' de longitude Ouest. Localisées à l'extrême ouest de l'Atlas tellien, les Traras s'étalent de la frontière marocaine au Nord Ouest à la limite de la wilaya d'Ain Témouchent au Nord Est, sur une superficie de 128000 Ha.

Le massif des Traras est une chaîne côtière où le relief est plus ou moins accidenté appartenant à l'Atlas tellien qui se caractérise en premier lieu par son morcellement issu d'une mauvaise juxtaposition de ses plaines encadrées par des montagnes inégalement réparties.

Situation géomorphologique et topographique : Les ¾ de la superficie des Traras, correspondent à des terrains à plus de 25% de pente. On peut distinguer deux formations lithologiques :

Au niveau des reliefs abrupts, des grès bruns intercalés de calcaire datant du Jurassique constituent les crêtes.

Au niveau des collines, des formations jeunes, formées de marnes et d'argile (terrain datant du Miocène) sont très sensibles à l'érosion et sont en perpétuel mouvement, provoquant par endroits des glissements courants surtout dans la région de Souk Tleta et Bab El Assa qui doit sa réputation de haute montagne aux ravins profonds et aux précipices qui l'éventrent, au contraste avec la ceinture de vallées et de plaines qui l'enserrent, et enfin à l'origine berbère de ses habitants sédentaires.



Agglomérations ★

Région d'étude ○

20km



Carte : Situation géographique

Le point culminant se situe au Djebel Fillaoucène (1136 m) à l'Est de Nedroma. D'autres points culminent aux environs de 1000 m, à Djebel El Mahassar, Djarf El Ahmar. Les reliefs se terminent par des glacis d'érosion, donnant des pentes adoucies jusqu'aux vallées et aux plaines.

Appartenant au Tell Oranais, ce relief est un véritable bloc montagneux, où non seulement l'accessibilité est difficile, mais aussi et pour des raisons de sécurité, les voies de communication sont rares.

Les Traras n'excluent pas la présence de certains bassins intra-montagnards, (plaine de Mezzaourou). On peut évoquer aussi les bassins de l'oued Kiss, de l'oued El-Marsa (Ghozouanah), de l'Oued Kouarda et enfin celui de la Tafna.

Le littoral des Traras, l'un des plus inhospitalier de l'Oranie, dispose d'une façade maritime d'une longueur de 73 Km, et offre une frange côtière de 5Km.

D'après Tinhoï [12], l'aspect de l'arrière pays change un peu tous les 20Km selon la nature des roches qui affleurent successivement dans les 3 massifs de Béni Mengouch, de M'Cirda et Souahlia.

Population : Suivi sur deux décennies et recensées (données démographiques) les populations de tout l'espace de la région des Traras ont fait l'objet d'un examen en matière de croissance démographique aux niveaux des zones agglomérées et au niveau des zones éparées.

Causes de la dégradation : Les processus de dégradation ont un facteur qui reste lié directement à l'homme. La mise en culture en sec par des techniques inadaptées, le surpâturage et l'éradication sans oublier les feux des espèces ligneuses sont à la base de la dégradation de la végétation naturelle et de la rupture des équilibres naturels d'une façon générale. Ces phénomènes seront interprétés à partir des informations que nous avons pu avoir auprès notamment des services forestiers de la wilaya.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Populations et aspects démographiques

Un important foyer de peuplement Les Traras constituaient jusqu'au début du 19^{ème} siècle l'une des régions les plus densément peuplées de l'Oranie avec une densité moyenne de 84 habitants au km². Cette densité très élevée résultait d'une croissance démographique accélérée. En fait de 1843 à 1868, la population des Traras avait plus que tripler en passant de 15 000 habitants à 50 000 habitants. Un demi siècle après, en 1921, cette population avait doublé, atteignant ainsi 100 000 personnes. Mais au lendemain de la deuxième guerre mondiale, 1946 elle avait chuté de 7 000 habitants soit près 98 000 personnes contre 105 000 enregistrées au début de cette guerre (1941). Quelques années plus tard (1948), la croissance démographique des Traras était répartit à la hausse et la population atteignait 115 000 habitants soit 17 000 âmes de plus durant cette période relativement très courte puis 125 000 personnes au début de la guerre de libération nationale Ferhi [13].

Evolution de la population : L'étude de la population est fondée sur l'utilisation des différents recensements de la population (1966, 1977, 1987, 1998 et 2004) dont les résultats sont maintenant définitivement connus. Tableau I. D'après Lamote [14] : Toute politique d'aménagement se fonde sur une connaissance précise de la situation actuelle et du passé récent.

L'évolution de la population de Honaine dans le temps peut être analysée suivant quatre phases bien distinctes ; 1966-1977 ; 1977-1987 ; 1987-1998 ; 1998-2004 (Tableau N°1 et 2).

- Période 1966-1977 : Durant cette période le peuplement de Honaine s'est accru à un taux de 1,71 % ce qui le rapproche de la moyenne Wilaya pour la même période qui est passée de 4574 habitants en 1966 à 5001 habitants en 1977.
- Période 1977-1987 : Cette période a connu un phénomène spectaculaire de migration de population vers la France et une bonne partie s'est dirigée vers la ville de Remchi (sud de la région cf : carte de situation géographique); le taux d'accroissement moyen de la moyenne de la zone a été encore plus élevé que celui observé entre 1966 et 1977. Il a été estimé à 2.33% contre 1.71%.
- Période 1987-1998 : Compte tenu d'une conjonction particulière, durant cette décennie les Monts des Traras ont connu une croissance modérée de leur peuplement. Les taux d'accroissement ont été très irréguliers et hétérogènes d'une zone à une autre. Ce sont surtout les Traras orientaux qui ont été le plus concerné par cette conjonction particulière. Leur population a largement fuit cet espace ; concernant la commune d'Honaine, elle a enregistré un taux d'accroissement de l'ordre de 0.014 % la plupart d'entre eux se sont orienté vers la ville de Remchi.
- Période 1998-2003 : A partir de 1999, la population des Monts des Traras a tendance à se stabiliser progressivement. Le rythme de croissance demeure dans l'ensemble faible. Toutefois Honaine faisait l'objet d'un nouveau centre de concentration de population, elle comptait en 2003 près de 5900 habitants soit une densité de 102.

Tableau N°1 : Evolution de la population (Nombre d'habitants) Source : Direction des Services Agricoles 2004

Commune	Superficie (Km ²)	1966	1977	66/77	1987	77/87	1998	87/98	2003	Densité
Honaine	5700	4574	5001	0.83	5347	0.63	5431	0.14	5900	102

Répartition de la population : Les Traras constituaient jusqu'au début de ce siècle l'une des régions les plus densément peuplées de l'Oranie avec 84 habitants /km² [12].

Au niveau de la zone d'étude la population totale s'élève à 5 756 habitants soit une densité de 83 habitants au km². La population agglomérée représente 98 % alors que la population éparse ne représente que 2 % (tableau N°1).

Tableau N°2 : Répartition de la population par dispersion. Source : Direction des Services Agricoles 2004

Population totale	Agglomération Chef lieu	Agglomérations secondaires			Zone éparse
		O/Youcef	O/M'hamed	O/Sidi Cheikh	
5 765	4 849	586	120	122	88

Le nombre de la population active est estimé à 1 147 dont 73 % constitue la population occupée répartie par secteur d'emplois et 27 % de chômeurs.

Causes de la dégradation de la végétation : Les perturbations constituent des événements discrets dans le temps, souvent imprévisibles, agissant à toutes les échelles d'espace et affectant une majorité d'écosystèmes terrestres [15]; [16].

En raison de leur extension et leur répartition, les écosystèmes forestiers sont touchés par une grande variété de perturbations : incendies, tempêtes, insectes ravageurs, érosions torrentielles avec des conséquences importantes sur la biodiversité, les cycles de nutriments, le cycle de l'eau.

Inéluctablement, l'écologie des perturbations en forêt prend de l'importance, avec la prise de conscience du fait que la fréquence des événements extrêmes (ou catastrophes) pourrait sensiblement augmenter dans l'avenir en raison de l'augmentation générale de la pression anthropique, des changements climatiques, de l'urbanisation et la gestion forestière intensive. D'après Barbero *et al.* [17], les perturbations sont nombreuses et correspondent à des niveaux de plus en plus sévères allant de la matorralisation jusqu'à la thérophytisation.

La matorralisation définie le terme de dégradation, explique un processus de remplacement de la structure de la végétation initiale (forêt) par une nouvelle structure, définie par un ensemble d'espèces en général asylvatique.

En bioclimat semi aride et aride, la transformation des forêts potentielles déjà matorralisées se sont traduites par la modification des matorrals originaux où s'installent de nouveaux occupants arbustifs mieux adaptés à l'accentuation des contraintes liées aux actions anthropiques et à l'érosion des sols [18]. Nous assistons sur les versants des piémonts des Traras à un développement de matorral en fonction des espèces dominantes :

- Matorrals à feuilles cotonneuses (*Cistus sp.*, *Rosmarinus*) ;
- Matorrals épineux (*Ulex*, *Genista*, *Calycotome*) ;
- La dématorralisation est marquée par l'installation de Chamaephytes de petite taille constituée surtout de labiées (*Lavandula*, *Thymus*).

La steppisation et la thérophytisation sont considérées comme des phases ultimes de dégradation des écosystèmes forestiers et préforestiers du Maghreb avec des espèces sub nitrophiles liées aux surpâturages Barbero *et al.* [17].

La zone d'étude par sa composition floristique (chiffres sur la composition et la caractérisation botanique) L'analyse du cortège floristique permet de dire qu'il y a une hétérogénéité dans la répartition des genres et des espèces entre les familles. Il comporte 32 familles, 61 genres et 73 espèces. D'autre part les familles les mieux représentées sont les Lamiacées (*Thymus ciliatus*, *Lavandula dentata*...12,33%), les Astéracées (*Chrysanthemum grandiflorum*, *Filago exigua*.....10,96%), les Poacées (*Hordeum maritimum*, *Bromus rubens*....9,59%), les Liliacées (*Urginea maritima*, *Asphodelus microcarpus*.....) et les Cistacées (8,22%), les Ericacées (*Erica arborea*), les Fabacées (*Ulex*, *Genista*, *Calycotome*), les Fagacées (*Quercus ilex*....4,11%), les Apiacées, les Cupressacées, les Euphorbiacées et les Oléacées (*Olea europea*.....2,74%) et en dernier les autres familles avec 1,37%. Sur le plan caractérisation biologique on remarque que les pourcentages ne varient pas beaucoup. Les Chamaephytes et les thérophytes (30.14% pour les 2) se placent en première position, la deuxième place revient aux phanérophytes (20.55 %) et enfin les géophytes et les hémicryptophytes avec respectivement 10.9% et 8.22 %.

Les processus de dégradation ont un facteur qui est lié directement à l'homme. La mise en culture en sec par des techniques inadaptées, le surpâturage et l'éradication des espèces ligneuses sont à la base de la dégradation de la végétation naturelle et de la rupture des équilibres naturels d'une façon générale. Ces phénomènes qui ont pour conséquence la destruction du sol (érosion, diminution de la matière organique ... etc.) ont été fréquemment étudiés [19] ; [20] ; [21].

Parcours et élevage : L'action de l'animal sur le parcours modifie considérablement la composition floristique par le choix des espèces et par conséquent impose à la biomasse consommable offerte une action sélective importante. Le pâturage en forêts représente la première ressource pour les populations des montagnes.



Photos: Pâturage ovin dans la forêt et cultures en sur fortes pentes

Il est généralement reconnu que le pâturage peut avoir des effets positifs comme négatifs sur le couvert végétal. Un pâturage anarchique, disproportionné peut avoir des effets négatifs ; parmi eux, la régression de la phytomasse pérenne avec une augmentation des éphémères dans des zones surpâturées, une diminution de la diversité floristique, une dynamique régressive qui a pour conséquence un appauvrissement édaphique et une prédisposition à l'érosion. A ce

sujet, Monjauez [22] souligne que le troupeau sélectionne en réalité à rebours les essences naturelles, détruits les moins sensibles au feu en priorité, tasse le sol, entretient et développe la strate de la végétation xérophile la plus propre à propager les incendies.

Tandis que, un pâturage modéré peut stimuler la croissance des plantes en raison de la croissance compensatoire, qui permet de surcompenser le prélèvement par broutage Belsky [23] ; Goujon [24] et Perez-trejo, [25], ce dernier peut être considéré comme processus dans l'évolution à long terme des communautés végétales.

Le troupeau, en nettoyant (plus ou moins) la strate herbacée, voir chamephytique limite les passages d'incendies mais aussi permet la régénération des peuplements forestiers (*Juniperus*, *Quercus ilex*).

Lorsqu'au contraire le parcours est supprimé, l'évolution se tourne vers la multiplication des essences les moins xérophiles, vers la fermeture du tapis végétal et au bout d'un temps plus ou moins long, vers la constitution d'un sous-bois qu'une pédogenèse active rend de plus en plus vigoureux.

Armiaud et al. [26] ont souligné que l'arrêt du pâturage peut constituer une perturbation plus que le pâturage lui-même.

Surpâturage Le surpâturage par la réduction du couvert végétal et le tassement de la surface du sol, réduit l'infiltration de la pluie et augmente les risques du ruissellement et du ravinement Roose [27].

Le surpâturage, qui est une action qui consiste à prélever sur une végétation donnée une quantité de fourrage supérieure à la production annuelle à cause d'un broutage excessif de la végétation et des jeunes plants forestiers, empêche toute régénération, épuise les ressources disponibles, dégrade le parcours et les soumet à l'érosion. C'est une perturbation qui limite la biomasse végétale et peut causer sa destruction ou bien son éradication.

Sur le revers Sud de la Méditerranée, en dépit des services forestiers, un accroissement souvent exponentiel des têtes de bétail, a conduit en quelques décennies à une régression dramatique et souvent irréversible du couvert végétal. Quezel [28] a souligné que ce surpâturage quasi-permanent a stoppé les régénérations, transformé beaucoup de forêts en un piqueté d'arbres ébranchés et a profondément modifié le tapis herbacé. Selon le même auteur ce dernier associé aux espèces caractéristiques du cortège sylvatique souvent de haute valeur pastorale a succédé une forêt à tapis ras annuel dans le meilleur des cas, ou une forêt envahie par les espèces non appréciées.

El-Hamrouni [29] relève qu'en Afrique du Nord, le taux de surpâturage varie entre 25 et 50% de leurs possibilités réelles, ce qui se traduit très fréquemment par la réduction voire la disparition des pastorales et la dénudation de plus en plus croissante du sol, prélude à une désertification progressive. Ainsi, sous l'action d'un surpâturage séculaire les parcours se dégradent inexorablement.

Selon l'étage bioclimatique, El-Hamrouni [29] signale aussi une production de biomasse consommable moyenne des différentes formations. Cette dernière oscille dans le semi aride entre 80 à 260 UF et dans le sub-humide entre 110 et 320 UF. Il a montré aussi que le taux de disparition des espèces fragiles est de 67% car dans ce type de bioclimat, l'hiver est moins rude (absence ou rareté de neige), le troupeau broute continuellement la végétation.

Bestaoui [30] a évalué aussi la valeur pastorale au niveau de la région nord de Tlemcen. L'auteur a montré que cette valeur est plus élevée au niveau des Monts de Tlemcen avec une valeur de 36.67, vient par la suite le littoral (celle de Honaine comprise) avec 32.01 UF et enfin les plaines de Maghnia, un peu plus au sud de la région à une trentaine de kilomètres, avec une valeur de 10.42.

A l'échelle des massifs forestiers la taille et le nombre de troupeaux est souvent difficile à estimer. Cependant, il est à signaler que les besoins du cheptel sont nettement plus élevés que les ressources fourragères offertes par les parcours forestiers.

Il est estimé que la charge < animaux domestiques > sur les périmètres forestiers en Algérie a été multipliée par quatre entre les années 1950 et 1980 et que les besoins des troupeaux sont supérieurs à l'offre fourragère des parcours en certains endroits; s'installe alors un surpâturage même dans les maquis et les sous bois environnants.

Le phénomène de surpâturage est particulièrement spectaculaire autour des centres de sédentarisation et des points d'eau Le-Houerou [31].

Cependant, la région de Tlemcen n'échappe pas au fléau du surpâturage. Ainsi, notre zone d'étude ; effectivement pour 123 ha de surface versée au pâturage et au pacage, nous avons 52 000 têtes d'ovins, 2 300 têtes de bovins et 5 800 têtes de caprins conduisant ainsi à une surcharge pastorale (source Direction agricole, 2006). Cela se traduit selon Le-Houerou [31], par une réduction du couvert végétal imposé par le piétinement de l'animal. Il s'agit aussi d'un aspect important qui est l'appétence des espèces broutées. D'après El-Hamrouni [29] et Benabdeli [32], le taux de certaines substances comme le sucre ou le tanin semblent être un facteur de sélection. A ce sujet, Bouazza [33] souligne que les animaux choisissent les espèces et par conséquent imposent à la biomasse consommable offerte une action sélective importante. Il s'agit là de l'aspect de l'appétence des espèces qui représentent des degrés de préférences qu'accorde le bétail à différentes espèces. Cet aspect de sélection agit sur l'écosystème d'une manière quantitative et qualitative, puisqu'il réduit le couvert végétal et modifie sa composition floristique.

Coups de bois et défrichement : Défrichement : Ce processus est défini comme une destruction totale de la végétation d'une zone pour utiliser ces terres à d'autres intérêts comme l'agriculture, l'élevage ou l'urbanisme. Quezel [28] a souligné que sur les hauts plateaux, dans les formations à conifères, *Pinus*, *Juniperus*. *Tertraclinis*, que les défrichements sont les plus importants. Ils affectent au moins 1 % des surfaces forestières totales chaque année dans les pays du Maghreb.

Si les défrichements ont existé en Algérie depuis l'époque Romaine ils se sont accélérés durant la colonisation et continuent de se pratiquer de nos jours. De 1893 à 1940, le domaine forestier a perdu 116 000 ha de forêt au profit de l'extension des cultures coloniales (Services forestiers).

A partir d'une forêt initiale, le labour pour gagner des terrains de culture a été pendant des siècles un facteur d'évolution régressive. Abdelguerfi [34], montre que l'impact de défrichement de la végétation entraîne des transformations radicales irréversibles.

Actuellement, les populations montagnardes en général et ceux de la région des Traras continuent à procéder aux labours dans les différents niveaux de la forêt : listières, clairières, sommets, dans le but de récupérer des superficies au profit de l'extension des cultures, le paysan dépossédé de ses terres a dû défricher les piémonts des montagnes au détriment du domaine forestier.

En Algérie, durant les soixante dernières années, il y a une nette régression du capital forestier ; 5000 hectares de forêts ont été perdus selon les services forestiers.

En Oranie, l'examen de la situation forestière a fait l'objet de plusieurs travaux. Leurs conclusions montrent un délabrement des forêts dans certaines régions et la disparition de la couverture forestière originelle dans d'autres. Ils ont signalé aussi la fragilité du milieu et sa perturbation.

Les défrichements sont d'abord la réponse d'une population à des besoins vitaux. Trop sollicitée, la forêt régresse et les crises érosives s'installent, comme les paysages méditerranéens en portent témoignage depuis l'antiquité Vernet [35].

Délits forestiers : La coupe est considérée comme facteur de dégradation avec des prélèvements de plus en plus importants qui touchent toutes les catégories de bois dans leurs diamètres. Même si l'étude du délit forestier dans ses causes, sa nature et ses effets étant plutôt d'ordre juridique et administrative, néanmoins il est indispensable dans le cadre de notre étude de présenter des observations spécifiques à notre zone forestière.

Boudy [36] souligne que "le délit forestier peut en effet être envisagé au double du point de vue gravité et fréquences". La gravité des délits est quantifiée par l'observation directe sur le terrain ainsi que certaines approches (exemple: approche floristique). Pour la fréquence le seul critère est de faire appel aux statistiques administratives.

L'homme est l'acteur principal de ces délits, il a une grande part dans la destruction de la pinède, il va à la recherche des sous produits de la forêt (exemple: le Diss (*Ampelodesma mauritanicum*) qui sert comme aliment d'engraissement du bétail bovin), il défriche et pratique des coupes illicites.

La zone d'étude présente les traits de défrichements récents, même au niveau des terres à fortes pentes montrant ainsi un envahissement de l'espace agricole au détriment de l'espace boisé. Un autre type de défrichement anarchique des forêts est celui qui se produit à proximité de l'agglomération de Honnaine.

L'extension des cultures sous serre dans les régions côtières de la Méditerranée et les travaux de préparation du sol nécessaires pour leur construction provoquent des taux de dénudation locaux importants et soumettent les sols à l'érosion. Une fois installées, les serres peuvent concentrer le ruissellement d'une manière spectaculaire Bou kheir [37].

Le défrichement et les coupes illicites sont généralement pratiqués à la faveur des parcours, en effet "la destruction des forêts a été faite, le plus souvent tant en raison de la culture qu'en raison de l'élevage". On voit bien ici la relation qui existe entre le défrichement et le pâturage.

Incendies :Incendies de forêts : Le contrôle sélectif de la strate inférieure de la végétation des pare feux arborés laisse subsister des végétaux ligneux et semi ligneux plus ou moins nanifiés. Une flore généralement herbacée envahit assez rapidement ces formations basses clairières. Cette flore de substitution présente un inconvénient grave si son développement est important car elle se dessèche annuellement.

Hennaoui [38, 39] dans ses études sur l'évaluation de la sensibilité au feu des groupements végétaux à *Cistus* dans la région de Tlemcen signale que les strates arborées et arbustives sont les plus vulnérables et inflammables.

Cette évolution floristique varie avec les stations et les traitements, les interventions manuelles ou mécaniques ayant d'ailleurs des effets de même nature, aux conséquences cependant sensiblement différentes. Elle doit être contrariée par l'introduction d'espèces arborées, autochtones ou exotiques, destinée à la reconstitution de la forêt.

Le risque d'incendie n'est jamais totalement éliminé ou écarté. Il est seulement diminué et sa nature en est modifiée. Dans notre pays et particulièrement dans la région, la forêt doit endurer les excès d'un climat où la sécheresse est un facteur écologique limitant et destructeur et ceux de l'homme et son troupeau, qui ne trouvent bois de feu et fourrages qu'en milieu forestier. Partout le maquis et les broussailles remplacent la forêt, sous l'effet conjugué de l'homme, des animaux et d'un climat peu propice. Les formations forestières n'arrivent plus à conserver leur équilibre et se dégradent en permanence Missoumi et al. [40].

D'une manière générale les incendies constituent le facteur le plus ravageur de la forêt. Il détruit en moyenne, dans l'espace de quelques mois seulement (juin à septembre) plus de 36 000 hectares de formations ligneuses par an. Dans ce contexte la moyenne des différents programmes de reboisements engagés par le pays depuis 1963 qui est de 26 000 ha / an ne peut équilibrer ces pertes, même si le taux de réussite des ces actions est de 100 %, ce qui n'est malheureusement pas le cas.

Les dommages dus aux incendies de forêt font l'objet de plusieurs écrits. Selon Delabraz et Valette [41], Le-Houerou [31], Taton et Barbero [42]; les incendies constituent une perturbation majeure des paysages méditerranéens; liées à une pression anthropique intense. Les pratiques de feux courants, l'abandon de certains terrains de parcours permettent

l'installation des essences facilement inflammables et l'action humaine sont autant de facteurs qui favorisent l'éclosion d'incendies.

Le risque d'incendie est tout d'abord conditionné par la combustibilité et l'inflammabilité de chacune des espèces composant les forêts plus ou moins dégradées. L'inflammabilité est la quantité d'énergie nécessaire pour qu'il y ait décomposition thermique totale de la matière végétale. Celle-ci débute par la vaporisation de l'eau libre et liée et des huiles essentielles, et se poursuit par la décomposition de la matière desséchée en un mélange gazeux qui s'enflamme en présence d'une flamme nue ou d'un point chaud. La combustibilité est la propriété qu'un végétal a de brûler Valette [43].

La végétation peut être représentée comme la combinaison de trois strates : la strate herbacée, la strate arbustive et la strate arborée. La strate arbustive est toujours en contact avec la strate herbacée, elle n'est en général jamais en contact avec la strate arborée (hauteur inférieure à la hauteur des premières branches) Dupuy [44].

Tout feu qui prend naissance au sol, c'est-à-dire dans la litière, puis se développe dans la strate herbacée, se propage dans les strates arbustives, puis dans les strates arborées Guiton et Kmiec [45].

Delabrazé [46], a classé les différentes espèces arbustives et arborescentes selon leurs degrés de sensibilité aux feux. Ainsi, il a déterminé les espèces qui présentent un risque d'inflammabilité très élevé et pendant toute l'année comme *Thymus vulgaris*, *Rosmarinus officinalis*, d'autres comme les *Cistus* qui sont inflammables uniquement au moment de la maturité des fruits. Il a déterminé aussi des espèces qui présentent un risque beaucoup plus réduit mais qui restent quand même classées dangereuses comme *Arbutus unedo* et *Phillyrea média*.

Le potentiel forestier de la zone d'étude n'échappe pas à ce phénomène étant donné qu'il est soumis à des pressions multiples intenses menaçant continuellement sa dégradation.

Les données présentées par le tableau 3 nous permettent d'appréhender l'ampleur. La moyenne annuelle des surfaces incendiées est de l'ordre de 122 hectares pour la période allant de 1992 à 2004.

La zone a été le théâtre d'importants incendies au cours de l'année 1994 et 1996 où la surface incendiée a dépassé les 1000 hectares, plus exactement 1304.30 ha.

Les statistiques démontrent que la situation en matière d'incendies de forêts ne cesse d'empirer d'année en année hypothéquant ainsi un couvert végétal déjà fortement dégradé.

Conséquences des incendies de forêts : En premier lieu, il en ressort nettement que le feu constitue un facteur écologique majeur, agissant à plusieurs niveaux d'organisation des écosystèmes et de manière universelle, même s'il semble être une préoccupation encore plus importante dans les régions méditerranéennes.

En effet, dans un premier temps, le feu peut être considéré comme un facteur d'ouverture du milieu ou de renouvellement des écosystèmes, se traduisant au niveau de la végétation par une augmentation du nombre des espèces et une complexification structurale Branka [47].

L'altération de la couverture végétale s'accompagne d'une perte de sol. La succession de ces événements peut conduire à des faciès apparemment dégradés avec d'importants affleurements rocheux. Cette situation constitue un palier dans la dynamique générale de la végétation, mais elle ne présente en aucun cas un caractère irréversible. Les conséquences des incendies sur le sol ont été signalées par Aubert [48], à savoir le changement de la structure de l'horizon humifère, la réduction de la capacité de rétention d'eau, l'élévation du pH, l'accroissement du taux de calcaire par éclatement de la roche mère et la diminution de la capacité totale d'échange cationique.

La caractéristique frappante de la végétation méditerranéenne est son pouvoir d'adaptation à l'action répétée des incendies. Les végétaux des régions méditerranéennes qui subissent le feu périodiquement présentent des adaptations qui assurent leur survie ou leur recolonisation rapide du milieu Lepart et Escarre [49].

Erosion : Les études récentes sur la vulnérabilité aux changements climatiques dans la région méditerranéenne indiquent une tendance à un accroissement de l'aridité qui accélère l'érosion hydrique De Ploey et al. [50]; Shaban et Khawlie [51].

L'érosion des sols par la pluie et le ruissellement est un phénomène largement répandu dans les différents pays de la Méditerranée, et qui continue à prendre des proportions considérables en particulier sur les pentes à cause de la nature torrentielle des pluies, de la forte vulnérabilité des terrains (roches tendres, sols fragiles, pentes raides et couvert végétal souvent dégradé), du surpâturage et de l'impact défavorable des activités humaines : déforestation, incendies, mauvaise conduite des travaux agricoles, urbanisme chaotique, exploitation des carrières, etc.

Les dégâts observés se traduisent par une baisse des rendements des cultures. Dubucq [52]; Jackowski [53], un atterrissement des sédiments érodés dans les zones urbaines Ludwig et al. [54] une réduction de la superficie des sols agricoles Merzouk et al. [55], une accélération du taux d'envasement des réservoirs réduisant ainsi la quantité et la qualité des eaux disponibles El Hadani [56]; Damnati et al. [57], une aggravation des coulées boueuses qui mettent en péril les infrastructures humaines Perez-Trejo [58], et une désertification du milieu naturel. L'importance du taux de boisement au niveau de la zone d'étude n'exclut pas le danger à l'érosion avec ses différentes formes et confirme la fragilité du milieu à ce phénomène. L'érosion en nappe et en rigoles, sont les signes d'une dégradation poussée et généralisée des paysages de cette zone.

Tourisme et urbanisation : Des potentialités côtières et paysagères à valoriser dans une perspective de développement durable du tourisme

Les monts des Traras recèlent un potentiel en ressources côtières et paysagères indéniables qui mérite d'être étudié, analysé et exploité pour la promotion du tourisme. Plusieurs types de tourisme peuvent être en effet développés dans cet espace :

- Tourisme balnéaire,
- Tourisme de montagne,
- Tourisme de transit

Tourisme balnéaire : L'activité touristique reste le salut pour cette région, car avec ses quatre plages (Tafsout, Agla, Ourdania et Béni-Khaled) Honaine peut rivaliser et peut même dépasser la station balnéaire de Port-Say. Il suffit d'une petite visite sur la plage de Béni-Khaled pour avoir une idée de ce que peut rapporter ce trésor de la nature. Pour l'instant, seule la plage de Tafsout est autorisée à la baignade et les chiffres sont encourageants. En 2000, 5000 touristes ont visité la région. En 2005, cette côte a accueilli 1/2 millions d'estivants. Le chef de daïra, nous dira : L'investissement du privé est le bienvenu, mais encore une fois, il nous rappelle la condition première : la réhabilitation de la route.

En effet, les investisseurs n'osent pas s'aventurer avec leurs matériels lourds sur cette unique voie de communication qui reste défectueuse. Beaucoup de choses ont été réalisées à Honaine, notamment dans le cadre de l'habitat rural. Les habitants des douars enclavés ont tous bénéficié du programme 2004. Le chef de daïra de Honaine est plutôt optimiste quant à l'avenir de la région, et pour cause, il nous dira : «L'administration ne nous impose rien, les crédits demandés répondent à notre propre choix pour faire face aux besoins de la population». C'est une forme de démocratie, de proximité qui peut casser bien des tabous.

L'intérêt que revêt le littoral en tant que ressource touristique, apparaît à travers l'étude du schéma directeur d'aménagement touristique de la wilaya réalisé par l'entreprise nationale des études touristiques (ENET) en 1986. Huit (08) zones d'expansion touristique (ZET) ont été décrétées totalisant une superficie globale de 541,83 ha, soit une capacité d'accueil théorique de 33 750 baigneurs.

La particularité de ce potentiel côtier réside également dans la présence d'une forte population riveraine habitant Honaine dont le savoir-faire artisanal ancestral constitue un atout pour la promotion du tourisme balnéaire.

Les forêts de Pin d'Alep (*Pinus halensis*), d'Eucalyptus (*Eucalyptus globulus*), de Pin maritime (*Pinus maritima*), Genévrier (*Juniperus oxycedrus*), Thuya (*Tetraclinis articulata*) et autres végétations spontanées agrémentent la majorité des sites balnéaires. Néanmoins, les projets d'investissement au niveau des plages restent en deçà des objectifs attendus. Ils n'ont bénéficié que de programmes modestes visant essentiellement les structures d'accueil de nature légère (campings en particulier).

Tableau N°3 : Répartition et inventaire des plages. Source : Direction du Tourisme 2005

Plages	Communes	Observations
Taffesout	Honaine	Autorisée
Honaine	Honaine	Non autorisée

D'une manière générale et compte tenu de la configuration du relief, le littoral de la Wilaya offre une série de petites plages et criques qui demeurent encore faiblement valorisées faute de leur accessibilité. Ceux de la commune de Honaine, sont encore desservis par des pistes difficilement carrossables, en ce sens d'importants efforts devront être déployés pour améliorer leur desserte et augmenter les capacités d'accueil.

Tableau N°4: Répartition des Zones d'Expansions Touristiques. Source : Direction du Tourisme 2005

ZET	Superficie (ha)	Couverte par une Etude	Etat d'occupation
Honaine	107	Non	70
Taffesout	45	Non	Non

Tourisme de montagne (Tableau N°4) :La région recèle également d'importantes opportunités pour le développement du tourisme de montagne notamment dans les alentours du djebel Fillaoucène, djebel Tedjra, djebel Sidi Sofiane ainsi que les différentes zaouïas existantes dans la région (zaouïa Sidi Benamar notamment). Cependant le manque d'infrastructures touristiques adéquates rend très difficile la promotion de ce type de tourisme.

Dans ce contexte la réalisation de nouvelles infrastructures (voies d'accès et structures d'hébergement) ainsi que la promotion de certaines zones réputées pour leur savoir faire artisanal (poterie, tissage, sparterie, bois et festivités locales) peuvent largement contribuer au développement de ce type de tourisme.

Tourisme de transit (Tableau N°4) : La présence d'une bande frontalière assez conséquente fait que le territoire de la wilaya draine des flux de population très importants. Actuellement les postes de transit ne sont pas fonctionnels mais il n'empêche que ce type de tourisme pourrait être développé à l'avenir à travers le poste frontalier de Boukanoun.

Equipements et infrastructures forestières

Pistes forestières (Tableau N°5) : Compte tenu de son relief accidenté les accès aux parties boisées des monts des Traras demeurent très insuffisants. Des travaux d'ouverture et d'aménagement de pistes ont été entrepris depuis l'indépendance toutefois beaucoup d'efforts restent encore à déployer pour améliorer la situation et atteindre les normes nationales admises qui sont de 2 km pour 100 ha de forêts. La situation actuelle est estimée à 1.2 km pour 100 hectares de forêts.

Tableau N°5 : Répartition des pistes forestières. Circonscription des Forêts de Ghazaouet Août 2005

District	Commune	Forêt lieux dit	Longueur Piste (km)
Béni Ouarsous	Honaine	Ouled Salah	13
	Honaine	Reggou	16
	Honaine	Ras Nador	17

Tableau N°6 Répartition des pistes forestières dans la zone d'étude. Sources : Conservation des forêts de Tlemcen 2004

District	Commune	Lieu dit	Longueur (km)
Béni Ouarsous	Honaine	Djebel Ouled Salah	13
		Reggou	16
		Rass Nador	17

Tableau N°7 : Consistance et répartition du réseau routier. Source : Direction des Travaux Publics Juin 2005

Commune	Routes Nationales		Chemins de Wilaya		Chemins Communaux		Total	
	Revêtus	Pistes	Revêtus	Pistes	Revêtus	Pistes	Revêtus	Pistes
Honaine	00	00	13,2	0	13,5	37	26,7	37
Béni Khaled	00	00	25,7	0	20,4	29,1	46,1	29,1
Total	00	00	38.90	0	33.90	66.10	72.80	66.1

Tranchés par feu : TPF (Tableaux N°8 et 9) : Les tranchés par feu qui constituent un bon moyen de prévention et d'isolement des incendies ne couvrent que faiblement le potentiel forestier. La superficie actuelle en TPF n'est que de 22 hectares soit une densité moyenne de 0.31 ha de TPF pour 100 ha de Forêts. Cette dernière est également très en de ça de la moyenne nationale qui est de 2.5 ha pour 100 ha de forêts. Il importe de mentionner que durant ces dernières années Honaine enregistre des incendies très fréquents qui ont fortement endommagé et amoindri cette ressource précieuse.

Tableau N°8: Répartition des tranchés par feu. Circonscription des Forêts de Ghazaouet Août 2005

District De la forêt	Nom delà Forêt ou Lieu dit	Commune	Caractéristiques des TPF			
			Superficie (ha)	Largeur (m)	Longueur (m)	Etat
Béni Ouarsous	Oued Reyan	Honaine	12	20	6000	Mauvais
	Oued Sriti	Honaine	10	40	2500	Mauvais

Postes de vigie (Tableaux N°8 et 9)

Les monts des Traras disposent de trois postes de vigie qui dominent largement les massifs forestiers de par leur situation géographique (sommets de crêtes). Néanmoins ces derniers ne sont que très faiblement équipés pour assurer pleinement leur fonction.

Tableau N°9: Répartition des postes de vigie. Circonscription des Forêts de Ghazaouet Août 2005

District	Triage	Dénomination	Nombre d'ouvriers	Observations
Béni Ouarsous	Béni Ouarsous	Ain Berghout	03	Mauvais état
Bab El Assa	Bab El Assa	Bassam	03	Mauvais état
Ghazaouet	Yaghmourassene	Touent	03	Mauvais état

CONCLUSION

Les activités humaines sont le plus souvent à la base de ces altérations du fait de la conjugaison de plusieurs actions comme le surpâturage qui favorise les phénomènes naturels d'érosion, des demandes en terres pour les cultures agricoles, l'industrie ou l'urbanisation ...etc.

En Algérie, cet équilibre a été cassé et la fragilité des milieux montagnards est avant tout, un fait colonial. C'est en effet, durant la période d'occupation française, qu'est apparu le clivage entre espace traditionnel et espace colonial, ce qui a eu pour effet, la perturbation du premier par le second. C'est ainsi, que la petite paysannerie dépossédée de ses terres, s'est trouvée face à l'obligation d'exploiter les terres déclives de montagne à faible fertilité, pour assurer sa survie Khelil [59]. Après l'indépendance en 1962, la forêt algérienne a trouvé petit à petit ses repaires. L'impact de l'action de l'homme sur ces paysages naturels reste cependant incontrôlé parfois.

La valorisation et le développement de ce patrimoine peuvent-ils se concevoir dans un contexte purement écologique ? L'aspect socio-économique contribue-t-il d'une manière efficace à l'état de stabilité de l'écosystème ?

Nous avons réalisé ou tenter une approche sur l'évolution de la population durant les dernières décennies pour mieux comprendre l'effet de l'action de l'homme. Celle-ci pourra-t-elle affecter considérablement notre zone d'étude à l'avenir ? Une étude détaillée ou presque des données socio-économiques ainsi que leur néfaste impact des activités de l'urbanisation, de production et des infrastructures sur l'environnement dans son ensemble de notre zone d'étude semble s'imposer.

Références

1. M. Bouazza, N. Benabadj, R. Loisel et G. Metge, 2004 - Evolution de la végétation steppique dans le Sud-Ouest de l'Oranie (Algérie). Rev. Ecol. Med. Tome 30, Fasc. 2, 2004: 219-231.
2. J. Despois, 1949 - L'Afrique du Nord. P.F.U. Col. « Colonies et Empires », Paris. 456p.
3. N. Benabadj M. Bouazza, A. Merzouk et B. E. Ghezlaoui, 2004-b - Aspects phytoécologiques des Atriplexes au Nord de Tlemcen (Oranie, Algérie) Rev. Sci. et Tech. n°22. Constantine. pp : 62-79.
4. J. P. Harray, 1967 - Techniques contemporaines de l'agriculture Méditerranéenne. Méd. 31: 38-41.
5. M. Barbero et R. Loisel, 1970 - Contribution à l'étude des pelouses à Brome méditerranéennes et montagnardes Inst. Bot. Cavanilles. 284: 33-165.
6. J. Ganisans et H. Guber, 1980 - Les groupements végétaux du Niolo (Corse) Rev. Ecol. Mediterranea. Tome XI: 26-48.
7. M. Barbero et P. Quezel, 1980 - Biogéographie et écologie des conifères sur le pourtour méditerranéen In person : Actualités d'écologie forestière. Bordas. Edit. Paris. PP : 205-256.
8. N. Benabadj, D. Benmansour et M. Bouazza, 2007 - La flore des Monts d'Ain Fezza dans l'Ouest algérien, Biodiversité et Dynamique. Rev. Sci. Tech. Constantine, N° 26 : 47-59.
9. M. Bouazza, 1995 - Etude phytoécologique de la steppe à *Stipa tenacissima* L. et *Lygeum spartum* L. au Sud de Sebdo (Oranie-Algérie). Thèse Doct. Es Sci. Univ. Tlemcen. 153p. + annexes.
10. A. Merzouk, 2010 - Contribution à l'étude phyto-écologique et biomorphologique des peuplements halophiles dans la région occidentale de l'Oranie. Thèse Doct. Etat. Univ. Tlemcen. 277p.

11. I. Bensenane, 2016 - Bilan des actions anthropiques des trois dernières décennies dans la région steppique d'El-Gor et Sidi-Djilali (Ouest algérien). Thèse Doct. Univ. Tlemcen : 198p. + annexe.
12. R. Thintoin 1960 - Les Traras, étude d'une région musulmane d'Algérie, Bull. Soc. Geogr. Arch. Oran 309 p.
13. S. Ferhi, , 1992 - Migration, Urbanisation et développement local ; Le cas des Traras dans l'Ouest algérien. Thèse. Doct. Univ. Pau et des pays de l'Adour : 343p.
14. M. Lamote, 1985 - Fondements rationnels de L'aménagement d'un territoire. Ed. Mass. Cie. Paris. 175p.
15. A. Branka, 2001 - Etude comparée des incendies de forêts et de leurs préventions dans les départements du Var et des Landes. Université de Cergy-Pontoise, France.
16. J. Claudin, H. N. Le-Houerou et Haywood M 1975 - Etude phytoécologique du Hodna (Direction H. N. Le-Houerou), Pub. FAO, Rome, 154 p., 2 cartes.
17. M. Barbero, R. Loisel et P. Quezel, 1990 - Les apports de la phytoécologie dans l'interprétation des changements et perturbation induite par l'homme sur les écosystèmes forestiers méditerranéens. Forêt Méd XII (3): 194-216.
18. B. Damnati, S. Bouhiassa, A. Bouraja, F. Leveque et Y. Mohsine, 1998 - Identification des sources de l'érosion et du colmatage du barrage Sidi Mohamed Ben Abdallah: Etude du bassin pilote de Mezguida (Sud du Plateau central marocain). L'observation spatiale: un outil pour l'étude du bassin méditerranéen, Tunis : 23-27.
19. A. El Hamrouni, 1992 - Végétation forestière et pré forestière de la Tunisie : Typologie et éléments pour la gestion. Thèse. Doct. Es. Sci. Univ. Aix - Marseille III. 220p.
20. Greco J., 1966 - L'érosion, la défense et la restauration des sols, le reboisement en Algérie. Pub. Univ. Agr. Révolution Agraire. Algérie.
21. Floret G. H., Le Floch'e., R. Pontanier et F. Romane 1977 - L'étude de cas sur la désertification. Région d'Oglat Mertebo, Tunisie, Extrait et adapté du document A. conf. 74/12, conf. Nairobi, 143p.
22. A. Monjaube, 1968 - Répartition et écologie de Pistacia atlantica en Algérie . Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord. Alger. 56p
23. A. J. Belsky 1986 - Does herbivory benefit plant. A review of the évidence. American Naturalist: 870-892.
24. Goujon P., 1976 - L'élevage et la forêt dans le bassin méditerranéen. Colloque : Elevage en Méditerranée occidentale. C.N.R.S actes au colloque international. Institut de recherche méditerranéenne. Mai 1976.
25. F. Perez-Trejo, 1994 - Desertification and land degradation in the European Mediterranean. Eur 14850 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
26. B. Armaud, B. Bouzille et A. Bonis, 1996 - Analyse de la dynamique végétale selon la nature et l'intensité du pâturage : exemple des marais communaux du Maria Poitevin. Annales de zootechnie. Ed. Scientifique « El Sevier » Provider. The British Library.
27. E. Roose, 1994 - Introduction à la GCES, Bull. Pédol. de la FAO, n° 70, Rome. 420p.
28. P. Quezel, 2000 - Réflexion sur l'évolution de la flore et de la végétation du Maghreb Méditerranéen. Ibis Press. Edit. Paris. 117 p.
29. A. El-Hamrouni, 1978 - Etude phyto-écologique des problèmes d'utilisation et d'aménagement dans les forêts de Pin d'Alep de la région de Kassarine (Tunisie Centrale). Thèse 3ème cycle. Univ. Aix Marseille III. 106p.
30. K. Bestaoui, 2001 - Contribution à une étude syntaxonomique et écologique des matorrals de la région de Tlemcen. Thèse Magistère en Biologie. Ecol. Vég. Univ. Tlemcen. 184p. + annexes.
31. H. N. Le-Houerou, 1980 - L'impact de l'homme et de ces animaux sur la forêt méditerranéenne. For. Med. II (1-2): 155-174.
32. K. Benabdelli, 1983 - Mise au point d'une méthodologie d'appréciation de la pression anthropozoogène sur la végétation de la région de Telagh (Algérie). Thèse de spécialité Ecologie. Fac. Sci. Et Tech. St Jérôme. Marseille» 185p.
33. M. Bouazza, 1995 - Etude phytoécologique de la steppe à Stipa tenacissima L. et Lygeum spartum L. au Sud de Sebdo (Oranie-Algérie). Thèse Doct. Es Sci. Univ. Tlemcen. 153p. + annexes.
34. A. Abdelguerfi, 1989 - La gestion des milieux naturels et artificiels en Algérie : conséquences sur les ressources phytogénétiques. Institut National Agronomique Pastoralisme et Foncier. Série N° 32.13 (1). El Harrach, Alger: 145-156.
35. J. L. Vernet, 1997 - L'homme et la forêt méditerranéenne de la Préhistoire à nos Jours. Ed. Errance, Paris. 248p.
36. P. Boudy, 1948 - Economie forestière nord africaine. 4 vol. Ed. Larose. Paris. T1 : Milieu physique et humain. Paris. 688p.
37. R. Bou Kheir, 1998 - Apports de la télédétection et du SIG pour la gestion de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban; Projet pilote: Jba'il - Qarlaba. DEA,
38. S. El-Amine Hennaoui, 2007 - Les Cistacées dans la région de Tlemcen (Nord-Ouest algérien): aspects écologiques, impact du feu et cartographie. Mém. Mag. Ecol. Vég. Université Tlemcen. 514p. + annexe.
39. S. El-Amine Hennaoui, 2013 - Les Cistacées dans la région de Tlemcen (Nord-Ouest algérien): aspects inflammabilité, combustibilité et cartographie. Thèse Doct. Université Tlemcen, 143p.
40. A. Missoumi, K. Mederbal et K. Benabdelli, 2002 - Apport des systèmes d'information géographiques dans la prévention et la lutte contre les incendies de forêts. Rev. Forêt méditerranéenne, tome XXIII, n° 1 Juin 2002: 11-22.

41. Delabrazé P. et J. C. Valette, 1974 - Etude de l'inflammabilité et combustibilité. Consultation FAO sur les incendies de forêts en Méditerranée.
42. TH. Taton et M. Barbero, 1990 - Approche écologique des incendies en forêts méditerranéennes. Ecol. Méd. XII (3/4): 78-99.
43. J. C. Valette, 1990 - Inflammabilité des espèces forestières méditerranéennes -conséquences sur la combustibilité des formations forestières. Revue. Forest. France, 42, N° spécial : 76-92.
44. J. L. Dupuy, 2000 - Apports de la physique du feu. In Conception des coupures de combustible. Document Réseau Coupures de combustible N°4, Edition de la Cardère, Morières : 29-40.
45. J. L. Guiton et L. Kmiec, 2000 - Traitement de la végétation. In Conception des coupures de combustible. Document Réseau Coupures de combustible N°4, Rigolot E., Costa M. Ed. de la Cardère, Morières :41-46.
46. P. Delabrazé, 1985 - Bases biologiques et physiques de la prévention des incendies de forêts. CNRS. Ed. Aren: I-16.
47. A. Branka, 2001- Etude comparée des incendies de forêts et de leurs préventions dans les départements du Var et Landes. Université de Cergy-Pontoise, France.
48. G. Aubert, 1991 - Effets de l'incendie sur les sols forestiers. Symposium «La forêt carbonisée, son présent, son futur» revue les cahiers du conservatoire du littoral. N° 2 «Forêt méditerranéenne»: vivre avec le feu?
49. J. Lepart et J. Escarre, 1983 - La succession végétale, mécanismes et modèles. Analyse bibliographique. Bull. Ecol. 14, 3 : 133-178.
50. J. De Ploey, A. Imeson, L-R. Oldeman, 1991 - Soil érosion, soil dégradation and climatic change. In: Brouwer F-M., Thomas A J., Chadwick M J., editors. Land use changes in Europe, Kluwer Académie Publishers, Dordrecht: 275-292.
51. Shaban A. and Khawlie M., 1998 – Geo-environmental assessment of riparian zones under extrême climatic avents: a case study of représentative rivers in Lebanon. Mediterranean ri vers and riparian zones-processes and management symposium, Zaragosa, Spain, 21 September-2 October 1998, 25 p.
52. M. Dubucq, 1986 - Télédétection spatiale et érosion des sols: Etude bibliographique. Cahiers Orstom, série Pédologie, 22(2): 247-258.
53. Jackowski W-F., 1996 - Assessment ofsoil érosion risk in Poland. In: Dallemand, J.F. and Perdigao, V., editors. Phare{ulti country environnement programme Mars and environmcntal related applications (Mare) project. Proceedings (1994-1996 results conférence): 67-77.
54. B. Ludwig, A-V. Auzet, J. Boiffin, F. Papy, D. King et J. Chadoeuf, 1996 - Etats de surface, structure hydrographique et érosion en rigole de bassins versants cultivés au Nord de la France. Etude et Gestion des sols, 3(10): 53-70.
55. Merzouk A., Rayan J. et Kaccmi M., 1994 - A perspective on soil érosion in Morroco's dry land semimarinid zone. Actes du colloque International des Sciences du Sol: « Sciences du sol au développement », Rabat, Maroc, 6-8 Avril 1993. 12 p
56. D. El-Hadani , 1997 - Télédétection et système d'informations géographiques pour la gestion et la recherche de l'eau. Géoobservateur, les rapports thématiques I. 28 p.
57. B. Damnati, S. Bouhiassa, A. Bouraja , F. Leveque et Y. Mohsine, 1998 - Identification des sources de l'érosion et du colmatage du barrage Sidi Mohamed Ben Abdallah: Etude du bassin pilote de Mezguida (Sud du Plateau central marocain). L'observation spatiale: un outil pour l'étude du bassin méditerranéen, Tunis : 23-27.
58. F. Perez-Trejo, 1994 - Desertification and land dégradation in thé European Mediterranean. EUR 14850 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
59. A. Khelil , 2000 - La société montagnarde en question. ANEP, Rouïba, 140p.

Détermination et analyse des paramètres de rendement chez deux variétés d'avoine soumises à un stress hydrique dans un contexte de changement climatique

Boughdiri Amor¹, Tibaoui Gouider², Boubaker Hiba³, Dhaouadi Latifa⁴, Sellami Mohamed Habib⁵

^{1,2,3} Ecole Supérieure d'Agriculture de Mateur, Route de Tabarka 7030, Mateur, Tunisie,

⁴ Centre de Recherche en Agriculture Oasienne BP62, Km1 Route de Tozeur 2260 –Degache – Tunisie,

⁵ Ecole Supérieure des Ingénieurs de Medjez El Bab, Route de Kef Km5-9070- Medjez El Bab, Tunisie,

Résumé

Ce travail vise à étudier l'effet de stress hydrique sur les paramètres de rendement de deux variétés d'avoine : Frétissa V_1 (variété locale) et V_2 (variété candidate : présentée à l'inscription) sous différents régimes hydriques (25, 50, 75, 90% Hcc). Dans la première partie de travail, une étude a été effectuée sur le taux et la cinétique de germination en utilisant différentes concentrations (1,2,3,4,5,6,7 et 8%) de polyéthylène glycol 400 (PEG400). Les résultats obtenus montrent que l'augmentation des concentrations du milieu en PEG 400 a été traduite par une diminution importante du taux germinatif chez les deux variétés ($p < 0,001$). Dans la deuxième partie on s'est intéressé aux paramètres de rendement (rendement en graines par plante, poids de milles graines, rendement en matière sèche, etc) après 60 jours du stress. Les résultats obtenus montrent qu'après 60 jours de stress et à 25 % Hcc la variété V_1 (Frétissa) et V_2 (variété locale) maintiennent 65 % et 58 % de leurs rendements en matière sèche par rapport au témoin. Le rendement maximal a été observé chez la variété V_1 à 90% RU avec une valeur de l'ordre de 58 ± 10 , et la valeur minimale est obtenue chez la variété V_2 à 25% RU (23 ± 5). L'analyse de la variance signale un effet hautement significatif du régime hydrique sur ce paramètre ($P < 0.0001$).

Mots clés : Variété, avoine, taux germinatif, stress hydrique, rendement,

Determination and analysis of yield parameters for two varieties of oats subjected to water stress in a context of climate change

Abstract

This work aims to study the effect of water stress and variability of response in two oat varieties V_1 (Frétissa) and V_2 (candidate variety presented at the time of inscription for year 2018) under different stress levels (25, 50, 75 and 90% Hcc). In the first part of the work, the effect of water stress on germination rate and kinetics was studied using different concentrations (1,2,3,4,5,6,7, and 8%) of polyethylene glycol 400 (PEG400). The results obtained show that the increase in PEG400 concentrations of the medium results in a significant decrease in the germination rate in V_1 and V_2 ($p < 0,0001$). In the second part, we studied yield parameters (seed yield per plant, seed weight, dry matter yield, etc.) after 60 days of stress. The results obtained show that after 60 days of stress and at 25%, Hcc the variety V_1 (Frétissa) and V_2 (local variety) maintain 65% and 58% of their yields in dry matter compared to the witness. The maximum yield was observed in variety V_1 at 90% RU with a value of the order of 58 ± 10 , and the minimum value is obtained in the variety V_2 at 25% RU (23 ± 5). Variance analysis indicates a highly significant effect of water regime on this parameter ($P < 0.0001$).

Key words: Variety, oat, water stress, parameters yield, germination rate

¹ Corresponding author: amor.boughdiri@yahoo.fr

INTRODUCTION

Les changements climatiques se caractérisent principalement par une diminution de la disponibilité de l'eau et une augmentation de la température. Vers les années 2050, les quantités de précipitations dans les pays du Nord de l'Afrique seraient réduites de 20 à 50 % par rapport aux valeurs moyennes actuelles (Raga et Prudhome, 2002).

L'eau reste le facteur le plus limitant de la production agricole dans les régions du monde où les pluies ne sont pas suffisantes pour satisfaire les besoins hydriques des cultures (Hsiao et al., 2009). Ainsi, l'amélioration de son utilisation par les espèces cultivées sous conditions pluviales ou irriguées a fait l'objet de plusieurs études (Turner et al., 2004, Nair et al., 2012, Para et al., 2007, Boughdiri, 2017). Par conséquent, de nouvelles variétés et des améliorations des techniques culturales ont été introduites en agriculture (Turner, 2004 ; Reynolds et al., 2009).

De ce fait, ces changements imposent la réflexion sur les stratégies à entreprendre pour comprendre les mécanismes mis en jeu par les plantes afin de s'adapter aux nouvelles conditions de l'environnement et de maintenir leur croissance et leur productivité. Dans ce contexte, la reconstitution du couvert végétal est loin d'être assurée par les mécanismes naturels de régénération, elle nécessite de plus en plus le recours à la réintroduction d'espèces autochtones productives de bonne valeur pastorale et adaptées aux conditions variées et variables des zones arides (Tibaoui, 2008).

Certaines cultures fourragères sont caractérisées par une grande capacité de résistance à des variations importantes de la teneur en eau de leurs tissus (Morad, 1995). Beaucoup de plantes peuvent supporter sans dommage apparent une perte d'eau de 30 %. Cette valeur peut atteindre 40 % pour le maïs et 70 % pour la luzerne (Morad, 1995).

La tolérance d'une plante à une contrainte hydrique peut être définie, du point de vue physiologique, par sa capacité à survivre et à s'accroître, du point de vue agronomique par l'obtention d'un rendement plus élevé que celui des plantes sensibles. La tolérance globale d'une plante vis-à-vis du déficit hydrique est la résultante de nombreuses modifications phonologiques, anatomiques, morphologiques, physiologiques et biochimiques. Ces dernières interagissent pour permettre le maintien de la croissance, du développement et de la production (Passioura, 2004).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Présentation de la zone d'étude

L'essai a été réalisé sous abri à l'Ecole Supérieure d'Agriculture de Mateur, appartenant au gouvernorat de Bizerte à 70 Km au Nord-Ouest de la Tunisie et à l'étage bioclimatique subhumide qui se caractérise par un hiver doux et pluvieux avec une moyenne de pluviométrie de 533 mm et un été chaud et sec. Les coordonnées GPS sont: l'attitude est de 37°03'N et la longitude est de 9°37'E.



Fig. 1- Localisation de la zone d'étude

Matériel végétal

L'étude a porté sur deux variétés d'avoine : V1 (Féritissa) et V2 (Variété candidate) qui sont les plus utilisées dans la région vu leurs valeurs nutritives.

Protocole expérimental

Des études contrôlées ont été menées au laboratoire et sous abri:

♦ Au laboratoire

L'essai de germination est réalisé en appliquant différents niveaux de potentiel hydrique simulé à l'aide d'une solution de Polyéthylène glycol (PEG 400, une densité de 1.13 g/cm³).

Pour chaque variété on effectue 8 traitements avec des différentes doses de PEG : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8% et un témoin (eau distillée : 0% PEG) avec quatre répétitions pour chaque traitement.

Pour chaque répétition, 25 graines sont mises dans des boîtes de pétri de diamètre 10 centimètres sur une couche de coton. Cette étude permet de déterminer :

- La cinétique de germination : le nombre des graines germées par unité de temps
- Le taux de germination : pourcentage des graines germées

$$\text{Taux de germination \%} = \frac{\text{Nombre totale des graines germées}}{\text{Nombre initiale des graines semées}} * 100 \quad (1)$$

❖ Sous abri

Le semis a été effectué le 19 janvier 2018, à raison de 25 graines par pot. Le nombre des pots par variété est 12. Les pots sont en plastique, de diamètre moyen 30 cm et de hauteur 29 cm. Les pots sont placés sous l'abri pour contrôler l'alimentation hydrique et répartis selon les traitements hydriques correspondants : **T0** : 90% de la capacité de rétention de l'eau (témoin) **T1** : 25% de la capacité de rétention de l'eau, **T2** : 50% de la capacité de rétention de l'eau, **T3** : 75% de la capacité de rétention de l'eau. Le dispositif expérimental adopté est un dispositif factoriel en bloc complet aléatoire avec trois répétitions dont le premier facteur est l'effet variétal et le second facteur est l'effet des différents traitements hydriques (figure 2).



Fig. 2- Disposition des pots sous abri

Paramètres mesurés

❖ Capacité de rétention de l'eau CR

Quatre pots ont été remplis d'eau de robinet pour déterminer la capacité de rétention du sol, qui a été faite en quatre étapes:

- Pesée de quatre pots identiques à ceux utilisés dans l'essai (12 kg substrat + 1 kg gravier) : c'est le poids initial P_i
- Mise des pots dans un seau rempli d'eau de robinet pendant 24 heures,
- Ressuyage des pots pendant 12 h afin d'évacuer l'eau libre,
- Une deuxième pesée des pots est effectuée afin d'obtenir le poids à la rétention (P_r après ressuyage).

La différence entre les deux poids définit donc la capacité de rétention d'eau.

$$CR = P_r - P_i \quad (2)$$

❖ Germination

Les tests de germination ont démarré avec 25 graines par boîtes de Pétri et 4 boîtes par traitement pour les 9 traitements. Le taux de germination final : C'est le rapport du nombre total de graines germées par le nombre total de graines mises en germination.

- La cinétique de la germination : C'est le nombre des graines qui germent par unité journalière.

Rendement en matière sèche (MS) et rapport de la partie aérienne et racinaire (Pa/Pr)

Afin de déterminer le rendement en matière sèche on prélève durant les trois stades du stress 20, 40 et 60 jours une plante entière par variété, pour chaque traitement et pour chaque répétition. On sépare la partie aérienne de la partie souterraine et on les pèse immédiatement au laboratoire pour déterminer leurs poids frais (Pf).

On met les échantillons dans l'étuve à 60 °C pendant 48 heures. Après dessèchement, on détermine le poids sec (Ps).

Le rapport entre la partie aérienne (Pa) et la partie racinaire (Pr) est déterminé à l'état frais et l'état sec. Le rendement en matière sèche est obtenu en appliquant la formule suivante :

$$\text{Rdt. Ms/plante} = P_f * \text{taux MS} \quad (3)$$

$$\text{Avec : } \text{taux MS(\%)} = \frac{P_s}{P_f} * 100 \quad (4)$$

❖ Matières Azotées Totale (MAT) ou protéines brutes

La teneur en matières azotées Totales (MAT) ou en Protéines Brutes (PB) des échantillons est déterminée selon la méthode de Kjeldahl après 60 jours du stress.

RESULTATS ET DISCUSSION

Effet du stress hydrique sur la germination

Taux de germination

Les résultats obtenus montrent que, quelle que soit la variété, la capacité germinative des graines en condition du stress est réduite comparativement au témoin et ceci pour les traitements de PEG 400 appliqués (figure 3). En effet, le taux de germination est réduit de 94% à 24% et de 91% à 28% respectivement chez la variété Frétila (V₁) et la variété candidate (V₂).

L'analyse de la variance montre un effet hautement significatif des différents pourcentages de PEG400 (témoin, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,8%) sur les deux variétés d'avoine.

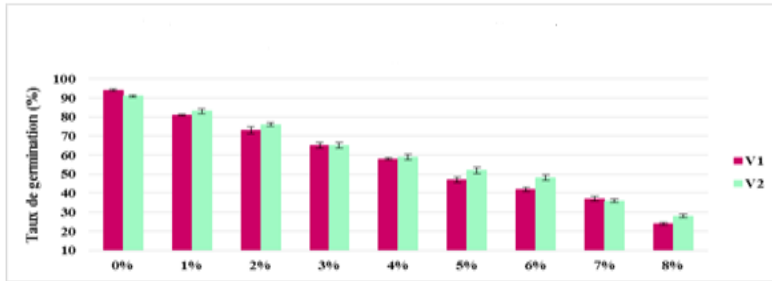


Fig. 3- Variation du taux de germination en fonction des traitements

Cinétique de la germination

L'analyse de la cinétique montre généralement une première phase de latence, due à l'imbibition des graines, une deuxième phase exponentielle où l'on assiste à une accélération de la germination et enfin une troisième phase caractérisée par un palier indiquant un arrêt de germination. Chez le témoin (0% PEG), la phase de latence est très courte et ne dure qu'un seul jour ; la phase exponentielle de germination dure 6 jours, avant d'atteindre la phase stationnaire où la germination s'arrête après un maximum de germination. L'effet dépressif du déficit hydrique sur la germination se manifeste au cours de l'une ou de l'ensemble de ces trois phases, selon le degré d'abaissement du potentiel hydrique. Cet effet se traduit par un ralentissement de la vitesse de germination visible dès le traitement de 5% PEG et qui s'accroît par la suite chez les deux variétés étudiées (figure 4 et 5).

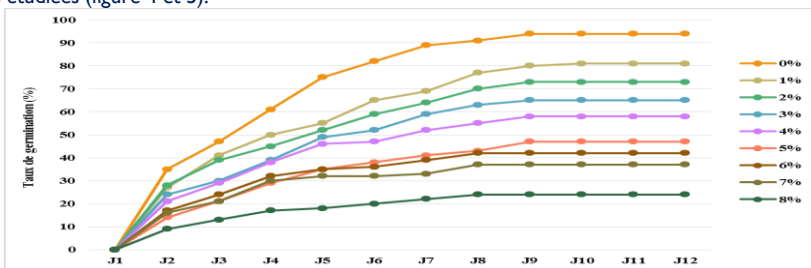


Fig. 4- Cinétique de germination pour la variété V1

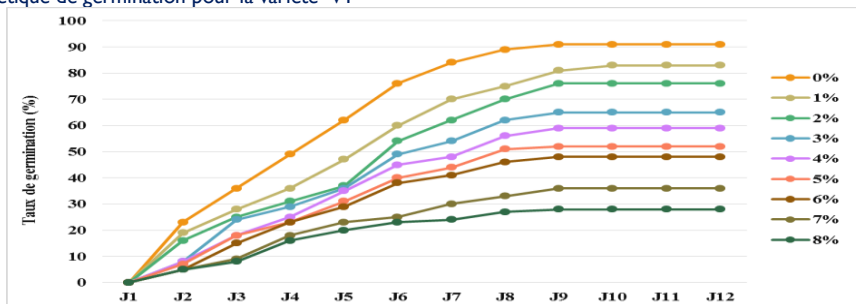


Fig. 5- Cinétique de germination pour la variété V2

Effet du stress hydrique sur les paramètres de rendement

Rendement en matière sèche

Le rendement en matière sèche (g MS/plante) chez les deux variétés soumises à différents niveaux de stress hydrique (figure 6), diminue en augmentant l'intensité de stress. En effet après 60 jours de stress et à 25 % Hcc la variété V1 (Frétissa) et V2 (variété locale) maintiennent 65 % et 58 % de leurs rendements en matière sèche par rapport au témoin. Ces résultats se concordent avec celles de Lazali et al (2013).

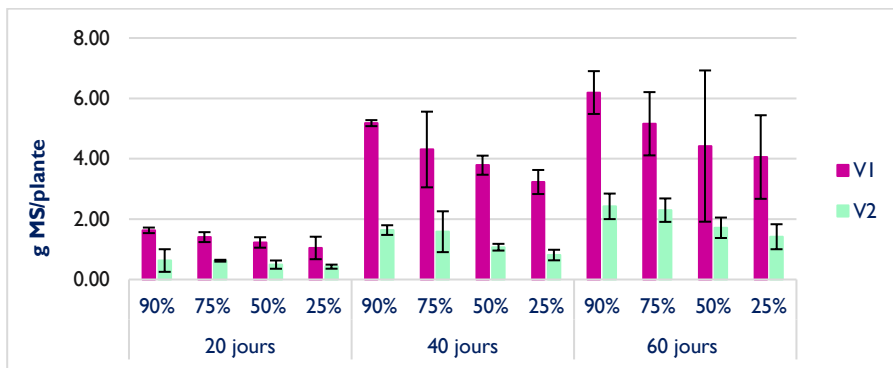


Fig. 6- Variation du rendement en matière sèche en fonction des traitements

Rapport de la partie aérienne et racinaire sèches

Après 60 jours du stress les résultats montrent que les valeurs les plus faibles sont enregistrées chez la variété locale V2 (figure 7). En effet, devant la contrainte hydrique imposée, la réduction de la masse végétative concerne essentiellement la partie aérienne que la partie racinaire. Ceci indique que la plante consacre les possibilités de facteurs de croissance pour la protection de ses racines susceptibles d'assurer sa nutrition hydrique et minérale.

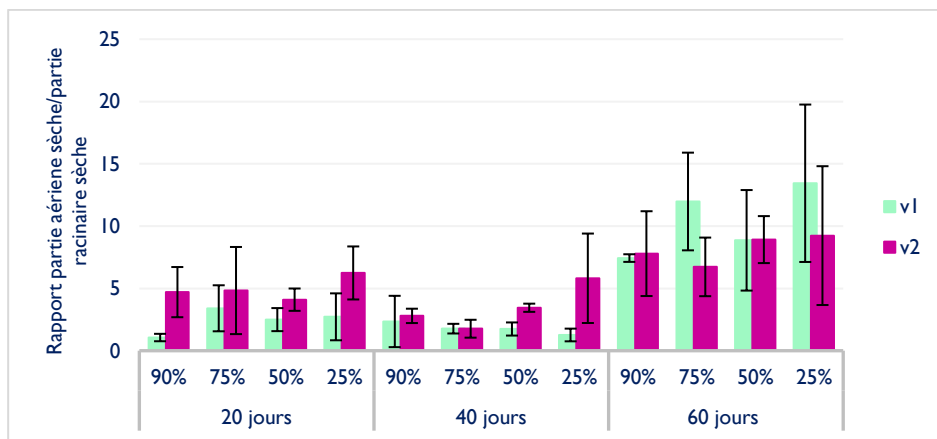


Fig. 7- Variation du rapport partie aérienne sèche /partie racinaire sèche

Rapport de la partie aérienne et racinaire fraîches

Après 60 jours du stress les résultats montrent que la variété V1 (Frétissa) a tendance à développer mieux sa partie racinaire par rapport à sa partie aérienne (figure 8). Pour la variété candidate V2, les résultats montrent que le volume racinaire est réduit par la réduction de l'humidité du sol.

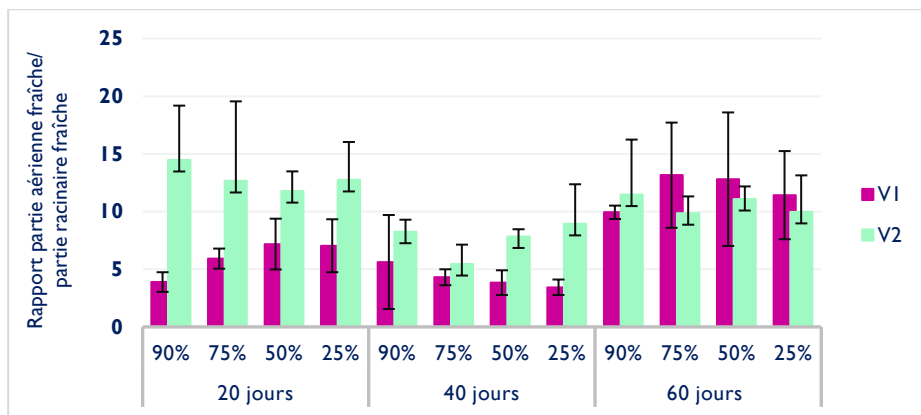


Fig. 8- Variation du rapport partie aérienne fraîche et racinaire fraîche

Effet sur le rendement en graines par plante

Le rendement maximal est obtenu chez la variété V1 à 90% RU avec une valeur de l'ordre de 58 ± 10 , et la valeur minimale est obtenue chez la variété V2 à 25% RU (23 ± 5) (figure 9). L'analyse de la variance signale un effet hautement significatif du régime hydrique sur ce paramètre ($P < 0.0001$). Le test de NEWMAN-KEULS au seuil 5% classe le rendement en graines par plante selon les niveaux de stress en trois groupes. Le premier groupe A comprend au niveau 90% RU auxquels les variétés présentent un rendement élevé avec une moyenne de 55.33. Le deuxième groupe B contient les traitements hydriques 75 et 50 % RU avec des moyennes de l'ordre de 44.16 et 42.33 respectivement. Le dernier groupe C renferme le traitement à 25% RU avec une moyenne de 28.33.

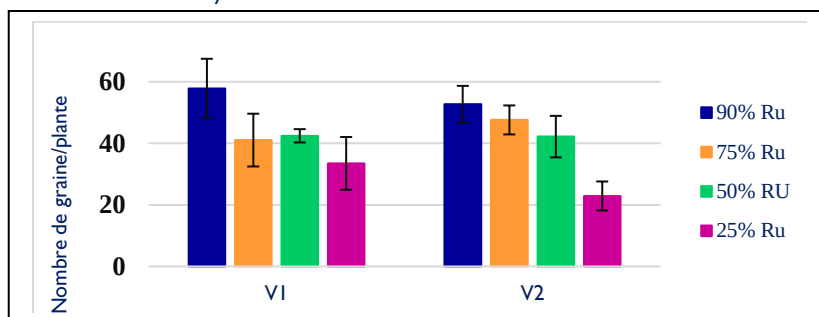


Fig. 9- Variation du rendement en graines par plante en fonctions des traitements hydriques

Poids de Milles graines (PMG)

L'effet du stress hydrique sur les composantes de PMG a montré que c'est le traitement 25% RU qui a présenté les valeurs significativement les plus faibles par rapport aux autres traitements et par rapport au témoin (figure 10). La variété V1 maintient 77% du PMG en condition du stress hydrique sévère (25% RU) par rapport au témoin (90% RU), alors que la variété V2 maintient 67% du PMG par rapport au témoin.

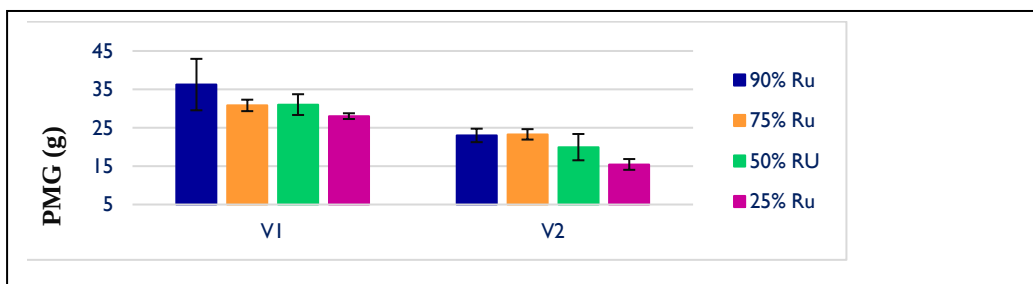


Fig. 10- Variation du PMG en fonction des traitements hydriques

Teneur en matières azotées totales (MAT)

L'intensité du stress augmente le pourcentage de la matière azotée totale. La valeur maximale enregistrée a été de 7.9% chez la variété V2 à 25% RU. Cela confirme les résultats de Cole et al. (1970), Snaydon (1972), Carter & Sheaffer (1983) et G. Lemaire (1998) qui ont montré que la sécheresse avait tendance dans certains cas à augmenter la teneur en azote alors que dans d'autres situations, ces teneurs n'étaient pas augmentées ou étaient même réduites.

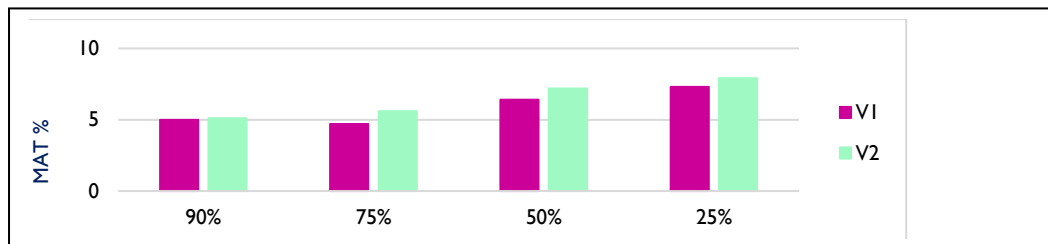


Fig.11 - Variation de la MAT chez les deux variétés en fonction des traitements hydriques

CONCLUSION

Deux variétés d'avoine V1 (Féritissa) et V2 (variété candidate) font l'objet de l'étude au laboratoire et sous abri. L'essai de germination effectué au laboratoire en utilisant des différentes doses de PEG (1,2,3,4,5,6,7 et 8%) a permis de conclure qu'en augmentant les concentrations de ce dernier on observe un ralentissement de la cinétique de germination et une réduction importante du pouvoir germinative chez les deux variétés. Le rendement en matière sèche chez les deux variétés soumises à différents régimes hydriques diminue en augmentant le niveau de stress. Après 60 jours du stress la variété V1 (Frétissa) a tendance à développer mieux sa partie racinaire par rapport à sa partie aérienne. Le rendement moyen a été de 58 graines/plante enregistrée pour un niveau de stress de 90 % de RU et le rendement le plus faible a été de 23 graines /plante qui correspond à un régime de 25 % de RU. La meilleure valeur de la teneur en matières azotées totales a été de 7,9 % chez la variété Féritissa pour un traitement accentué (25% RU).

REFERENCES

1. Boughdiri A. (2017). Efficience de l'utilisation de l'eau et efficacité de l'irrigation de complément du blé : Essai de modélisation : Cas du périmètre public irrigué de Lakhmess à Siliana. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques de- Tunisie. INAT. Tunisie. 238 p.
2. Hsia D. (2009). Sélection In vitro et caractérisation de mutants de blé dur tolérants à la sécheresse. Thèse de doctorat. Univ. Catholique de Louvain.
3. Lazalhaki, M., Ounane, SD., Chaker, H., Alkama N., Nouar, S. (2013). Reponses morpho-physiologiques et biochimiques de la symbiose rhizobia-arachide au stress hydrique. Algerian journal of arid environnement vol. 3, n° 1.
4. Monneveux, PH et M. Nemmar (1986). Contribution à l'étude de la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum*.L) et chez le blé dur (*Triticum durum* Desf). *Agronomie*, 6. : 383-590
5. Morard P. (1995). Les cultures hors sol, publications agricoles, Agen.
6. Nair, D., Murray-Rust H., Sakthiadivel R., Makin, I. (2013). A water-productivity framework for understanding and action. In Kijne, J. W.; Barker, R. Molden. D. (Eds.). *Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement*. Wallingford, UK: CAB; Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI) Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture Series
7. Para, T. and Hachum A.Y. (2007). Improving Water Productivity in the Dry Areas of West Asia and North Africa. In CAB International 2003 – *Water Productivity in Agriculture: Limits and opportunities for improvement*. Kijne W; and Molden D. (eds) pp179-198.
8. Raga S., Prudhome M. (2002). Yield potential debate: germplasm vs. methodology, or both. In M.P.Reynolds, S. Rajaram & A. McNab, eds. *Increasing Yield Potential in Wheat: Breaking the Barriers*. Workshop Proc., Cd. Obregon, Mexico, 28-30 Mar. Mexico, DF, CIMMYT.
9. Reynolds M. P., Singh R. P., Ibrahim A., Ageeb O. A., Larqué-Saavedra A. et Quick J.S. (2009). Evaluating physiological traits to complement empirical selection for wheat in warm environments. *Euphytica*, 100: 84-95.
10. Tibaoui G. (2008). Diversité biologique locale d'hedysaum cornosome desf et recherche d'écotypes cultivars tolérants à la sécheresse et à la salinité. Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences Agronomiques - Tunisie. INAT. Tunisie. 209 p.
11. Turner N.C. (2013). Optimizing water use. In: Nösberger J, Geiger HH, Struik PC (eds) *Crop Science, Progress and Prospects*, Third International Crop Science Congress Hambourg. CAB, Wallingford, pp. 119-135.



Le cortège floristique d'une Orobanchacée rare du nord-ouest algérien face aux fluctuations climatiques : *Cistanche mauritanica*.

Aissaoui Mansour¹, Sari-Ali Amel², Babali Brahim³

1,2 et 3 Laboratoire d'Écologie et Gestion des Écosystèmes Naturels, Département d'Ecologie et Environnement. Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen

Résumé

Cistanche mauritanica (Coss. & Durieu) Beck est une espèce endémique algéro-marocaine, appartenant à la famille des Orobanchaceae parasites.

Cet article relate une description de l'habitat naturel de cette Orobanchacée dans le Nord-Ouest algérien.

Peu de travaux ont été effectués sur l'évolution du cortège floristique de *Cistanche mauritanica* face aux fluctuations climatiques.

L'analyse du climat de la région d'étude (station météorologique de Ghazaouet) montre la rareté des précipitations, l'accroissement des températures moyennes annuelles et l'allongement de la période de sécheresse estivale.

Au niveau de la station d'étude « Beider » (Tlemcen) *Cistanche mauritanica* s'attaque à deux espèces *Suaeda maritima* (L.) Dumort. et *Atriplex halimus* L. de la famille des Chenopodiaceae ; ces deux hôtes sont des halophytes caractéristiques des milieux salins.

La flore analysée montre que la station d'étude est floristiquement riche, nous y avons recensé de 2019 à 2020, 33 familles renfermant 111 espèces et 92 genres. En revanche cette richesse floristique, laisse apparaître un pourcentage élevé de therophytes (55%) suivies par les chamaephytes (16%), les hémicryptophytes (16%), les géophytes (11%) et enfin les phanérophytes (2%). Ceci est le reflet de la dégradation progressive de ce milieu naturel si fragile.

Mots clés : facteurs climatiques, *Cistanche mauritanica*, Orobanchaceae, Beider , parasite, salinité.

The floral procession of a rare Orobanchaceae from northwestern Algeria facing climatic fluctuations": *Cistanche mauritanica*.

Abstract

Cistanche mauritanica (Coss. & Durieu) Beck. is an endemic Algerian-Moroccan species, belonging to the family of Orobanchaceae parasites.

This article relates a description of the natural habitat of this Orobanchaceae in northwestern Algeria.

Few studies had been done on the evolution of floristic community of *Cistanche mauritanica* facing climatic fluctuations.

The climate analysis of the study region (meteorologic station of Ghazaouet) shows the scarcity of rainfall, the increase in average annual temperatures and the lengthening of the summer drought period.

In the study station of "Beider" (Tlemcen) *Cistanche mauritanica* attacks two species: *Suaeda maritima* (L.) Dumort. and *Atriplex halimus* L. of the Chenopodiaceae family; these two hosts are halophytes characteristic of saline environments.

The analyzed flora shows that the study station is floristically rich; from 2019 to 2020, 33 families containing 111 species and 92 genera have been recorded there. On the other hand, this floristic richness reveals the importance and the dominance of therophytes (55%) followed by chamaephytes (16%), hemicryptophytes (16%), geophytes (11%) and finally phanerophytes (2%). This clearly reflects the progressive degradation of such a fragile natural environment.

Key words: climatic factors, *Cistanche mauritanica*, Orobanchaceae, Beider (Algerian west), Parasite, salinity

¹ Corresponding author: mansour.aissaoui@univ-tlemcen.dz

INTRODUCTION

Les plantes parasites ne représentent qu'environ 1% de toutes les espèces connues d'angiospermes (TERYOKHIN et al., 1993). Le nombre d'angiospermes parasitaires est étonnamment élevé avec plus de quatre mille espèces parasitaires identifiées dans dix-neuf familles de plantes différentes (TORRES et al., 2005). Parmi celles-ci, les Orobanchaceae (Lamiales) constituent la plus grande famille avec 90 genres et 2060 espèces. Cette famille est morphologiquement diversifiée, à l'exception de quelques autotrophes non parasitaires, d'hémiparasites exclusifs et d'holoparasites qui parasitent principalement le système racinaire d'autres plantes (McNeal et al., 2013).

Le genre *Cistanche*, appartenant à la famille des Orobanchacées, a été décrit par HOFFMANNSEGG & LINK (1813), il comprend environ 25 espèces dans le monde (ATAEI et al., 2014). Ces dernières forment un groupe attrayant de parasites phanérogamiques des racines, dont les parties végétatives souterraines parasitent par holoparasitisme. Ceux sont en général des plantes vivaces et robustes. L'apparition du genre est limitée à certaines régions arides et semi-arides d'Afrique, d'Asie et de la zone méditerranéenne, y compris certaines parties de l'Europe du Sud (SHAVVON et MEHRVARZ, 2010). En Algérie, il existe trois espèces appartenant au genre *Cistanche* parasitant les racines de diverses chenopodiaceae telles que *Suaeda vera* et *Atriplex halimus*, à savoir *Cistanche phelipaea* (L.) Cout., *Cistanche violacea* (Desf.) Hoffmanns. & Link et *Cistanche mauritanica* (Coss. et Durieu) Beck (Quézel et Santa, 1963). *Cistanche mauritanica* est une espèce endémique algéro-marocaine rare dans la région de Tlemcen. Les travaux sur cette plante sont rares ou incomplets aussi nous tentons, à travers cette contribution de clarifier l'environnement de celle-ci grâce à un travail de terrain corrélé aux fluctuations climatiques.

MATERIEL ET METHODE :

Situation géographique

Le choix de la station d'étude a été orienté par la présence de *Cistanche Mauritanica*. La station d'étude « Beider » se localise dans la partie occidentale du Nord-Ouest algérien et plus précisément dans la wilaya de Tlemcen. S'étendant de Marsat Ben M'Hidi à l'ouest jusqu'à Ghazaouet à l'est, celle-ci est caractérisée par une altitude allant de 5 m à 400 m, une exposition nord, un taux de recouvrement variant de 20 à 40 % et est située géographiquement entre le 35°0' et 35°55' de latitude nord et 2°3' et 2°6' de longitude ouest.

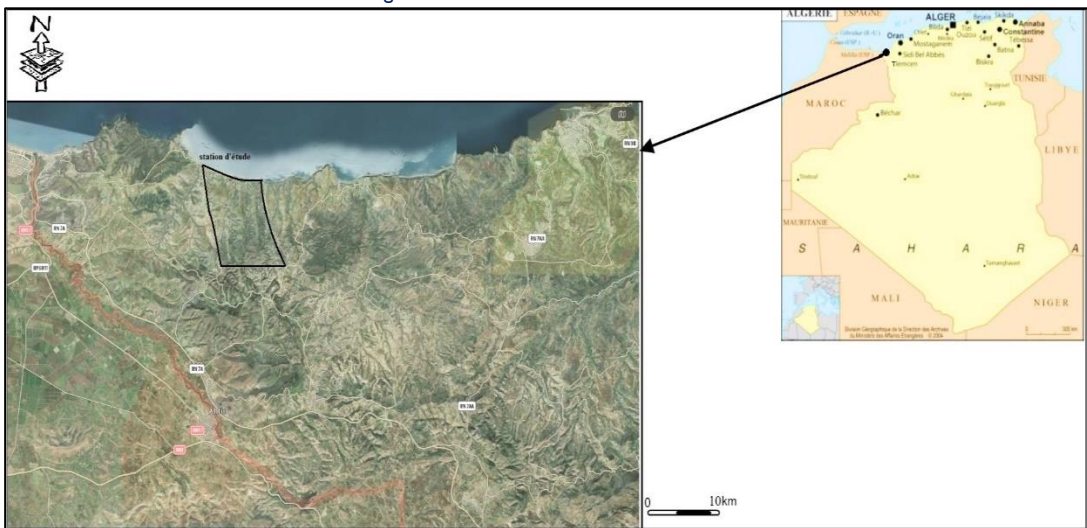


Fig. 1 : Vue satellitaire de la station d'étude « Beider »



Fig. 2 : *Cistanche mauritanica* (Coss. & Durieu) et son hôte *Suaeda maritima* (L.)

Méthodologie

Bioclimat :

Pour les données climatiques, nous avons choisi la station météorologique la plus proche de la station d'étude, à savoir, celle de « Ghazaouet » et ce pour deux périodes, l'ancienne (1913-1938) à partir du recueil météorologique de SELTZER et la nouvelle période (1990-2019). Plusieurs indices climatiques sont utilisés, le quotient d'EMBERGER, l'indice de continentalité de DEBRACH, l'indice d'aridité de DEMARTONNE, le coefficient relatif saisonnier de MUSSET et parallèlement le diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (1953).

Sol :

Les échantillons de sol, ont été prélevés au niveau de la rhizosphère, sur une profondeur de 10 à 30 cm en moyenne sous la plante parasite. Les analyses de sol ont été faites selon le manuel de Guy Aubert (1978). Ont été analysés : la texture selon la méthode de Stokes, le pH selon la méthode électrométrique, le CaCO_3 (Calcaire total) à l'aide du calcimètre de Bernard, la matière organique selon la méthode Anne, le pourcentage de carbone organique et d'humus dans le sol (le rapport % humus/ % Cox = 1,724), la conductivité électrique en mS/cm par la méthode de l'extrait dilué ou l'extrait un cinquième (1/5) et la coloration selon le code MUNSEL.

Méthodologie sur le terrain

Les relevés ont été réalisés au printemps (2019-2020), saison considérée comme optimale correspondant à la période de floraison pour la plupart des espèces. Un échantillonnage exhaustif a été réalisé selon la méthode de Braun Blanquet avec une surface de relevé choisie en fonction de l'aire minimale échantillonnée, c'est-à-dire une surface au-delà de laquelle le nombre d'espèces végétales reste inchangé (GUINOCHET, 1973, LACOSTE, SALANON, 1980).

Nous avons procédé à une caractérisation biologique et biogéographique. L'indice de perturbation calculé selon Loisel et GAMILA (1993) nous a permis de quantifier la thérophytisation du milieu avec la formule $IP = (\text{nombre de chamaephytes} + \text{nombre de géophytes}) / \text{nombre total des espèces}$.

La plante hôte est située soit à quelques centimètres de la plante parasite soit parfois à quelques mètres. Dans ce dernier cas, cela rend son identification difficile, surtout lorsque la végétation est dense. Aussi, 5 individus ont été choisis au

hasard au niveau de la station d'étude. Afin d'identifier l'espèce parasitée, nous avons creusé sous le parasite, avec des outils de jardin et tracé le chemin des racines jusqu'à la plante hôte.

RESULTATS ET SYNTHESE

Synthèse Bioclimatique

Pluviosité annuelle :

Une diminution de la pluviosité annuelle de 59 mm a été relevée, on a enregistré 375 mm durant la nouvelle période et 434 mm durant l'ancienne période.

Régime mensuel :

Durant l'ancienne période (1913-1938), les précipitations mensuelles décroissent de 58,2 mm pour le mois de novembre à 1,1 mm pour le mois de juillet. Dans la nouvelle période (1990-2019), les précipitations mensuelles passent de 69,1 mm pour le mois de décembre à 1,1 mm pour le mois de juillet.

Régime saisonnier

Les résultats du calcul du coefficient relatif saisonnier de MUSSET (Cr_s) montrent qu'il n'y a pas de changement du régime saisonnier, d'une période à l'autre, il est du type HAPE.

Températures moyennes annuelles

On note une augmentation des températures moyennes annuelles de 1,5°C ; 17,9°C pour l'ancienne période et 19,4°C pour la nouvelle période.

Les températures moyennes des maxima du mois le plus chaud (M)

Le mois le plus chaud durant les deux périodes est Août. M passent de 29°C durant l'ancienne période à 32,3°C durant la nouvelle période.

Les températures moyennes des minima du mois le plus froid (m)

Au cours de l'ancienne période, le mois le plus froid est janvier (m = 7°C) mais durant la nouvelle période c'est le mois de décembre (m = 6,1 °C).

Indice de continentalité de DEBRACH

Selon l'indice de DEBRACH, le type de climat passe du type « littoral » dans l'ancienne période (Indice = 22) au type « semi-continental » (Indice = 26,2) dans la nouvelle période.

Classification des ambiances bioclimatiques en fonction de "T" et "m"

RIVAS MARTINEZ (1981) utilise la température moyenne annuelle " T " avec la température moyenne des minima comme critère de définition des étages de végétation, aussi dans les deux périodes l'étage de végétation est du type « Thermo-méditerranéen ».

Indice d'aridité de DE MARTONNE

L'indice d'aridité de DE MARTONNE passe de 15,6 pour l'ancienne période à 12,8 pour la nouvelle période et le type de climat correspond pour les deux périodes au semi-aride avec écoulement temporaire et formations herbacées.

Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN

Cinq mois de sécheresse s'étalant de mai à fin septembre caractérisent l'ancienne période alors que dans la nouvelle période nous avons 6 mois de sécheresse d'avril à fin septembre.

Indice xérothermique D'EMBERGER

L'indice xérothermique D'EMBERGER (Is) passe de 0,53 mm/°C pour l'ancienne période à 0,30 mm/°C pour la nouvelle période. Dans les deux périodes, celui-ci est en dessous du seuil Is <5 qui caractérise le climat méditerranéen. Ceci confirme la rareté des pluies, les fortes chaleurs ainsi que l'étendue de la saison sèche durant la nouvelle période.

Le quotient pluviothermique d'EMBERGER Q₂

Selon Le quotient pluviothermique D'EMBERGER, la station de « Ghazaouet » est située au niveau de l'étage bioclimatique semi-aride à hiver chaud durant l'ancienne période ($Q_2 = 67,79$) et du semi-aride à hiver tempéré (Q_2 48,98) durant la nouvelle période.

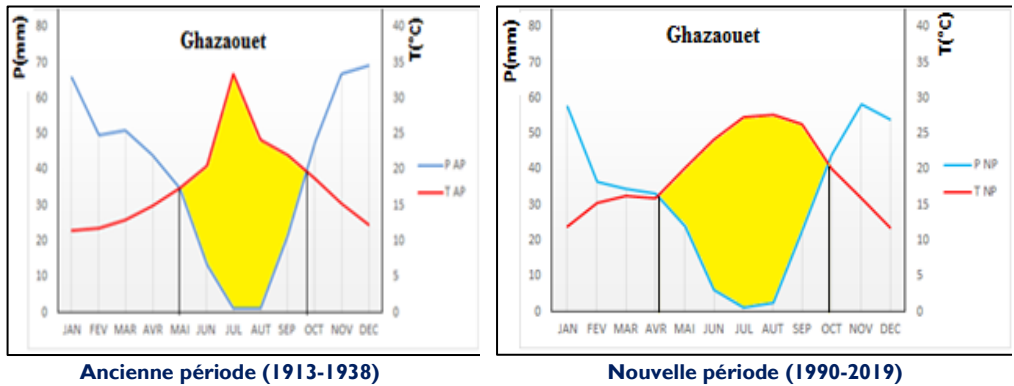


Fig. 3 : Diagrammes Ombrothermiques de Bagnouls et Gausson de la station météorologique de « Ghazaouet »
(P : précipitations moyennes mensuelles ; T : température moyenne mensuelle. ; période sèche)

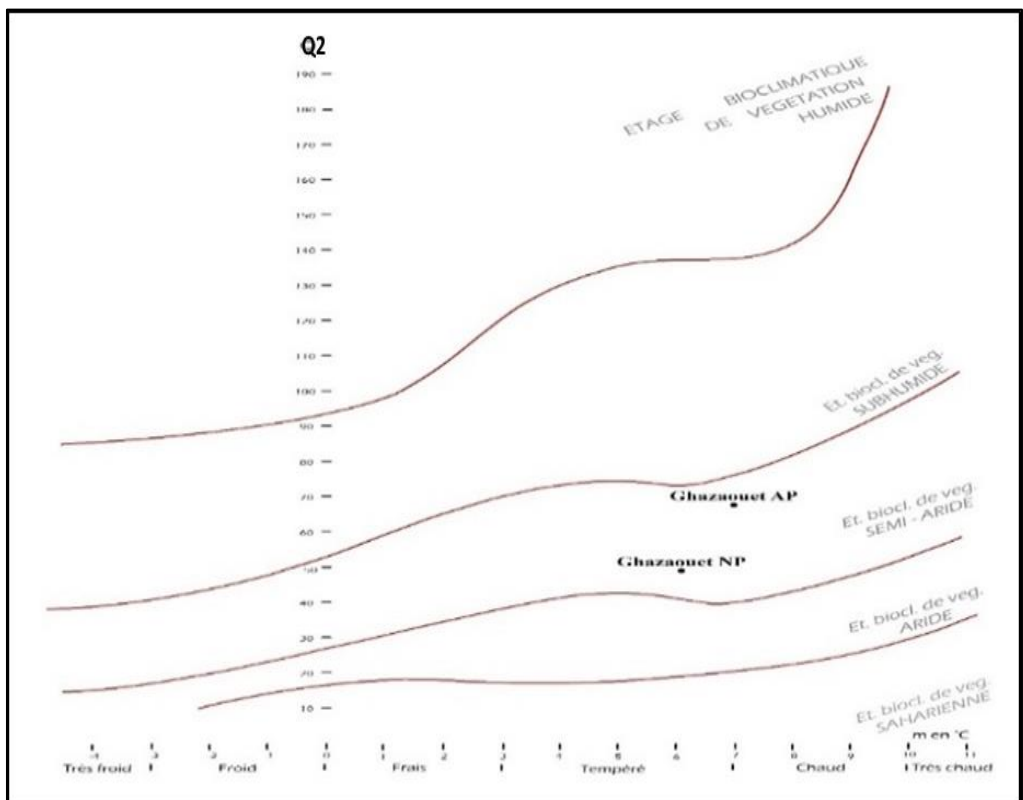


Fig. 04 - Climagramme pluviothermique d'Emberger (Q_2) (AP : Ancienne période ; NP : Nouvelle période)

Synthèse pédologique

La couleur des sols échantillonnés est, selon le code MUNSELL, soit le 10YR 4/6 soit le 10YR 7/1.

L'ensemble des caractères physico-chimiques des échantillons montre : une texture sableuse à limono-sableuse, un pH peu alcalin (7.82- 7.91), un taux de matière organique très faible (0.3- 0.4%) et un pourcentage de calcaire qui varie de 39- 61, correspondant à un sol fortement calcaire.

Synthèse phytoécologique

Tableau 1 : Liste des espèces inventoriées au niveau de la station d'étude « Beider »

Taxon	Famille	Type morphologique	Type biologique	Type biogéographique	Rareté
<i>Aegilops triuncialis</i> L.	Poacées	HV	GE	Méd-Irano-Tour	-
<i>Allium subhirsutum</i> L.	Liliacées	HV	GE	Méd. Ethiopie	-
<i>Alopecurus urticulatus</i> (L.) Pers.	Poacées	HA	TH	Atl-Méd	-
<i>Ammoides verticillata</i> (Desf.) Briq.	Apiacées	HA	TH	Méd	Très commun
<i>Anabasis prostrata</i> Pomel.	Amaranthacées	LV	CH	End.-Oran-Rif	Rare
<i>Anacyclus vallentinus</i> L.	Astéracées	HA	TH	Méd	Assez commun
<i>Anagallis arvensis</i> L.	Primulacées	HA	TH	Sub-Cosmop	Assez commun
<i>Anthyllis tetraphylla</i> L.	Fabacées	HA	TH	Méd	Commun
<i>Arisarum vulgare</i> Targ. Tozz.	Aracées	HV	GE	Circum Méd	-
<i>Artemisia herba alba</i> L.	Astéracées	LV	CH	Canarie-Egypt-Asie Occ	Assez rare
<i>Asparagus stipularis</i> (Forsk).	Liliacées	HV	GE	Macar-Méd	-
<i>Asphodelus tenuifolius</i> L.	Liliacées	HV	GE	Macar-Méd	Commun
<i>Asteriscus maritimus</i> (L.) Less.	Astéracées	LV	CH	Canard-Eur-Mérid-NA	Particulièrement répandu
<i>Astragalus echinatus</i> Murr.	Fabacées	HA	TH	Méd	Commun
<i>Astragalus epiglottis</i> L.	Fabacées	HA	TH	Méd	Commun
<i>Astragalus hamosus</i> L.	Fabacées	HA	TH	Méd	Très rare
<i>Astragalus stella</i> Gouan.	Fabacées	HA	TH	Méd	-
<i>Attractylis cancellata</i> L.	Astéracées	HA	TH	Circum-Méd	Particulièrement répandu
<i>Atriplex halimus</i> L.	Amaranthacées	LV	CH	Cosmp	Commun
<i>Avena sterilis</i> L.	Poacées	HA	TH	Macar-Méd-Irano-Tour	Très commun
<i>Bartsia trixago</i> L.	Orobanchacées	HA	TH	Méd	Très commun
<i>Blackstonia perfoliata</i> L.	Gentianacées	HA	TH	Méd	-
<i>Bromus madritensis</i> L.	Poacées	HA	TH	Eur-Méd	-
<i>Bromus rubens</i> L.	Poacées	HA	TH	Paléo-Sub-Trop	-
<i>Calendula arvensis</i> L.	Astéracées	HA	TH	Sub-Méd	Assez commun
<i>Calendula Bicolor</i> Batt. non auct.	Astéracées	HA	TH	Canaries, Sicile, Grèce, Afr, sept	-
<i>Calycotome intermedia</i> (Salzm.) M.	Fabacées	LV	CH	W-Méd	Commun

Aissaoui et al./ JISTEE, Vol. (v), No. 2, December 2020, pp. 98-108

<i>Carduus pycnocephalus</i> L.	Astéracées	HA	TH	Euras	-
<i>Catananche coerulea</i> L.	Astéracées	HV	HE	Méd	Très commun
<i>Centaurea involucreta</i> Desf.	Astéracées	HV	HE	End.Alg.Mar	-
<i>Centaurea pullata</i> L.	Astéracées	HV	HE	Méd	Particulièrement répandu
<i>Centaurea solstitialis</i> L.	Astéracées	HV	HE	Méd.As	-
<i>Chamaerops humilis</i> L.	Acéracées	LV	CH	W-Méd	Très commun
<i>Chenopodium album</i> L.	Amaranthacées	HA	TH	Cosmp	-
<i>Cichorium Intybus</i> L.	Astéracées	HV	HE	Naturalisé	Très commun
<i>Cistanche mauritanica</i> (Coss, et Dur).	Orobanchacées	HA	TH	End	Rare
<i>Convolvulus althaeoides</i> L.	Convolvulacées	HA	TH	Macar-Méd	-
<i>Convolvulus valentinus</i> subsp. <i>Suffruticosus</i> Cav.	Convolvulacées	HA	TH	Ibéro-Mar	Rare
<i>Cordylolobos muricatus</i> Desf.	Brassicacées	HA	TH	End-Alg-Mar	Assez commun
<i>Cuscuta epithymum</i> L.	Convolvulacées	HA	TH	Cosm	Très commun
<i>Cynoglossum cheirifolium</i> L.	Boraginacées	HA	TH	Méd	Commun
<i>Dactylis glomerata</i> L.	Poacées	HV	HE	Paleo-Temp	Commun
<i>Daucus carota</i> L. (sensu lato)	Apiacées	HV	HE	Méd	Commun
<i>Echinops spinosus</i> L.	Astéracées	HV	HE	S-Méd-Sah	-
<i>Echium vulgare</i>	Boraginacées	HV	HE	Méd	Très commun
<i>Erodium moschatum</i> (Burm.) L'Her.	Géraniacées	HA	TH	Méd	-
<i>Eruca vesicaria</i> (L.) car.	Brassicacées	HA	TH	Méd	Commun
<i>Euphorbia serrata</i> L.	Euphorbiacées	HA	TH	W.Méd	Rare
<i>Fagonia cretica</i> L.	Zygophyllacées	HA	TH	Méd	Commun
<i>Frankenia thymifolia</i> Desf.	Frankeniaceae	LV	CH	End.N.A.	Commun
<i>Fumana thymifolia</i> (L.) Verlot.	Cistacées	LV	CH	Euras.Af.sept	Très commun
<i>Genista tricuspidata</i> Desf.	Fabacées	LV	CH	End-N A	-
<i>Glyceria maritima</i> (Hartm.) Holmb.	Poacées	HV	GE	Sub Cosmp	-
<i>Gnaphalium luteo-album</i> L.	Astéracées	HA	TH	Cosmp	Assez commun
<i>Helianthemum villosum</i> Thib	Cistacées	LV	CH	Ibéro-Maur	Très rare
<i>Herniaria hirsuta</i> L.	Caryophyllacées	HA	TH	Paléo-Temp	Assez commun
<i>Hordeum murinum</i> L.	Poacées	HA	TH	Circumbor	-
<i>Inula viscosa</i> (L.) Ait.	Astéracées	HV	HE	Circum-Méd	Très commun
<i>Iris sisyrinchium</i> L.	Iridacées	HV	GE	Paléo-sub-trop	Très commun
<i>Lagurus ovatus</i> L.	Poacées	HA	TH	Macar-Méd	Très commun

<i>Lathyrus cicera</i> L.	Fabacées	HA	TH	Méd	Très commun
<i>Lavandula dentata</i> L.	Lamiacées	LV	CH	W-Méd	Très commun
<i>Limonium sinuatum</i> subsp eu- sinuatum (M.) Sauv.et Vindt.	Plumbagina cées	HV	CH	Méd-Sah-Sind	-
<i>Linum strictum</i> L.	Linacées	HA	TH	Méd	Assez commun
<i>Lolium rigidum</i> Gaud.	Poacées	HA	TH	Paléosubtrop	Commun
<i>Lotus edulis</i> L.	Fabacées	HA	TH	Méd	Commun
<i>Lycium intricatum</i> Boiss.	Solanacées	LV	CH	Ibéro-Mar	Très commun
<i>Lygeum spartum</i> L.	Poacées	HV	GE	Méd	-
<i>Medicago marina</i> L.	Fabacées	HA	TH	Méd	Assez commun
<i>Medicago minima</i> Grufb.	Fabacées	HA	TH	Eur- Méd	Assez commun
<i>Micromeria inodora</i> Desf., S. Barceloi (Willk. Pau).	Lamiacées	LV	CH	Ibéro-Maur	Rare
<i>Onobrychis crista-galli</i> Gouan.	Fabacées	HA	TH	E. Méd	Commun
<i>Ophrys speculum</i> L.	Orchidacées	HV	GE	Circumméd	Assez commun
<i>Ornithogalum pyramidale</i> L.	Liliacées	HV	GE	Circumméd	Assez commun
<i>Oxalis pes-caprae</i> L.	Oxalidacées	HV	HE	Cosmp	Très commun
<i>Pallenis spinosa</i> (L) Casso.	Astéracées	HV	HE	Euro-Méd	-
<i>Phagnalon saxatile</i> (L) Cass.	Astéracées	HV	HE	W-Méd	-
<i>Phalaris brachystachys</i> Link.	Poacées	HA	TH	Méd	Commun
<i>Pinus halepensis</i> L.	Pinacées	LV	PH	Méd	Très commun
<i>Pistacia lentiscus</i> L.	Anacardiacees	LV	CH	Méd	Très commun
<i>Plantago lagopus</i> L.	Plantaginacées	HV	HE	Méd	Très commun
<i>Plantago serraria</i> L.	Plantaginacées	HV	HE	W-Méd	Très commun
<i>Reseda alba</i> L.	Résédacées	HA	TH	Euras	-
<i>Reseda phyteuma</i> L.	Résédacées	HA	TH	Méd	-
<i>Salsola longifolia</i> Forsk.	Amaranthacées	LV	CH	Méd	Assez commun
<i>Salvia verbenaca</i> (L) Briq.	Lamiacées	HV	HE	Méd.Atl	-
<i>Scilla peruviana</i> L.	Liliacées	HV	GE	Madère, W.Méd	Commun
<i>Scolymus hispanicus</i> L.	Astéracées	HV	HE	Méd	Très commun
<i>Scorpiurus muricatus</i> L.	Fabacées	HA	TH	Méd	-
<i>Scorzonera laciniata</i> L.	Astéracées	HA	TH	Sub-Méd.sib	-
<i>Senecio vulgaris</i> L.	Astéracées	HA	TH	Subcosm	Particulièrement répandu
<i>Sherardia arvensis</i> L.	Rubiacees	HA	TH	Euras	-
<i>Sinapis arvensis</i> L.	Brassicacées	HA	TH	Paléo-Temp	Assez commun
<i>Sonchus asper</i> (L)Vill	Astéracées	HA	TH	Cosmp	-
<i>Spergularia salina</i> Presl.	Caryophyllacées	HA	TH	Méd-Stepp	-
<i>Stipa retorta</i> Cav.	Poacées	HA	TH	Circumméd	-

Aissaoui et al./ JISTEE, Vol. (v), No. 2, December 2020, pp. 98-108

<i>Suaeda maritima</i> (L) Dumort.	Amaranthacées	HA	TH	Cosmp	Assez commun
<i>Tamarix gallica</i> L.	Tamaricacées	LV	PH	N. Trop.	-
<i>Teucrium mauritanicum</i> de Noé.	Lamiacées	HA	TH	End	Très rare
<i>Teucrium polium</i> subsp capitatum (L.) Briq	Lamiacées	LV	CH	Eur. Méd	Rare
<i>Thapsia garganica</i> L.	Apiacées	HV	HE	Méd	Très commun
<i>Thesium humile</i> Vahl.	Santalacées	HA	TH	Méd	Assez commun
<i>Torilis arvensis</i> (Hudson) Link	Apiacées	HA	TH	Paléo-Temp	-
<i>Trifolium tomentosum</i> L.	Fabacées	HA	TH	Méd	Commun
<i>Trifolium angustifolium</i> L.	Fabacées	HA	TH	Méd	Commun
<i>Trifolium arvense</i> L.	Fabacées	HA	TH	Paléo-temp	Très commun
<i>Trifolium comosum</i> L.	Fabacées	HA	TH	Méd	-
<i>Trifolium scabrum</i> L.	Fabacées	HA	TH	Méd-Atl	Commun
<i>Trifolium stellatum</i> L.	Fabacées	HA	TH	Méd	Très commun
<i>Urginea maritima</i> (L) Baker.	Liliacées	HV	GE	Can-Méd	-
<i>Viola arborescens</i> L.	Violacées	LV	CH	W- Méd	Commun

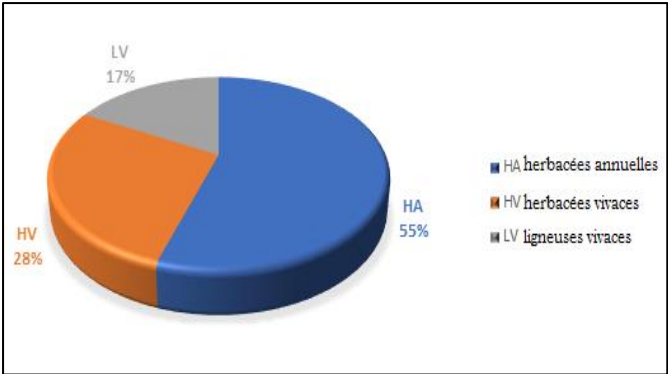


Fig. 5 : Types morphologiques de la station « Beider »

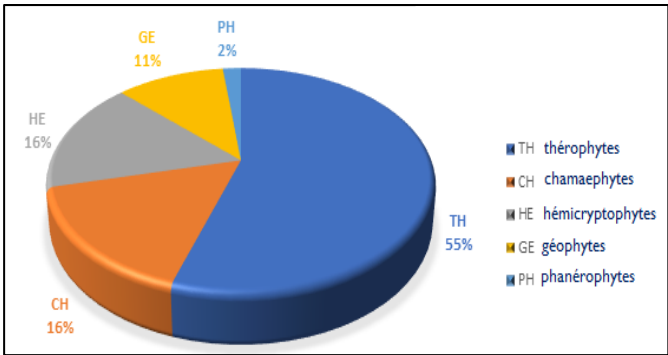


Fig. 6 : Types biologiques de la station « Beider »

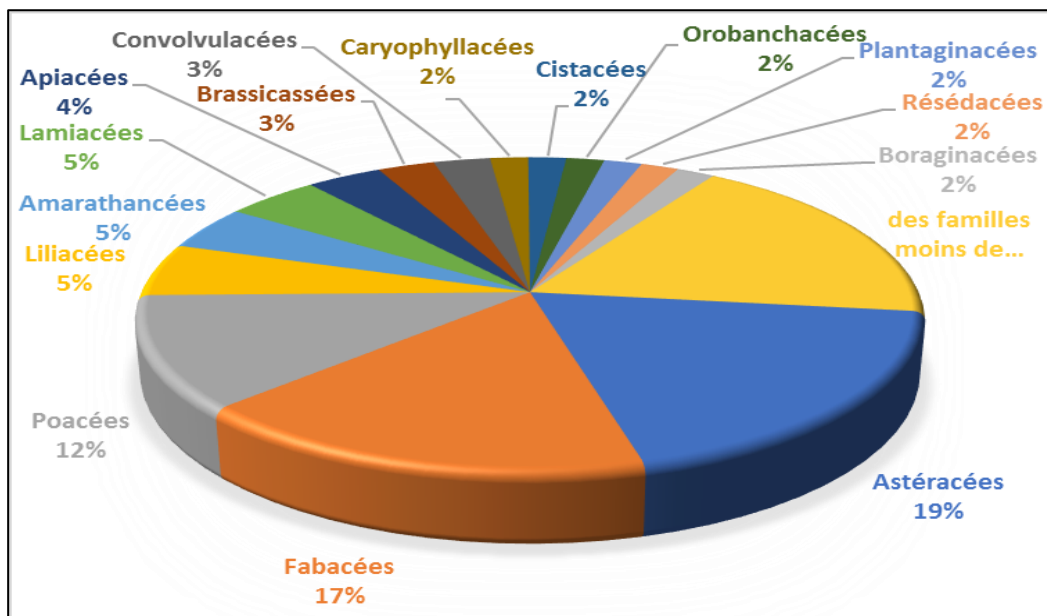


Fig. 7 : Familles botaniques de la station « Beider »

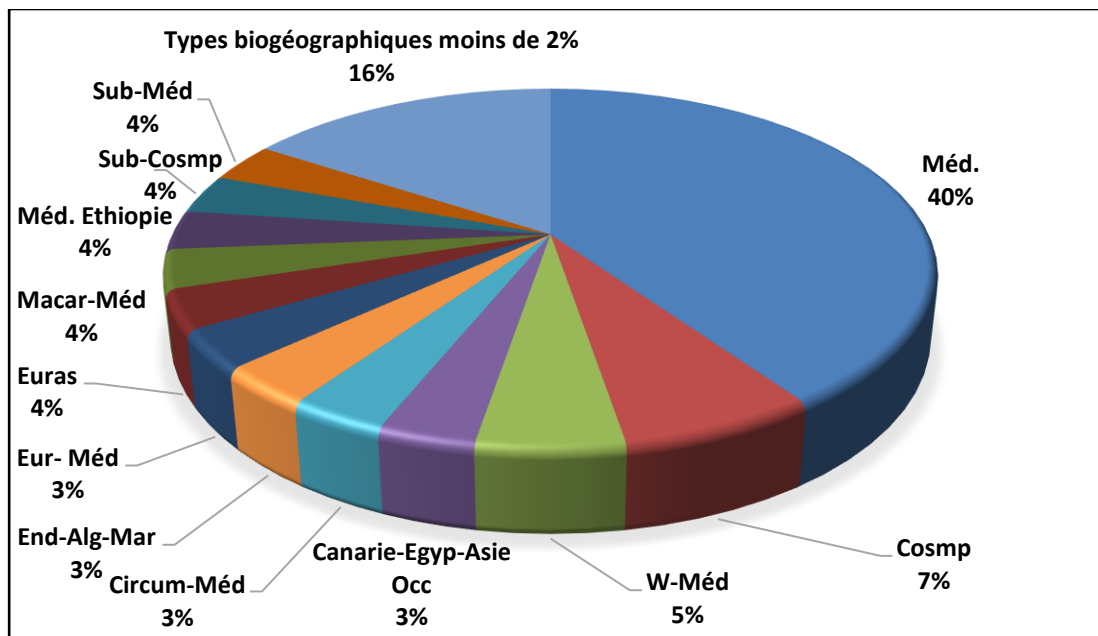


Fig. 8 : Types Biogéographiques de la station « Beider »

DISCUSSION ET CONCLUSION

Cistanche mauritanica parasite deux espèces *Suaeda maritima* (L.) Dumort. et *Atriplex halimus* L. de la famille des Chenopodiaceae ; ces deux hôtes sont des halophytes caractéristiques des milieux salins. Le cortège floristique dominant qui accompagne *Cistanche mauritanica* se compose essentiellement d'espèces de la famille des Astéracées (19%), des Fabacées (17%) et des Poacées (12%). Le type biologique " thérophyte" domine largement dans la station étude avec 55%, suivi par les chamaephytes (16%), les hémicryptophytes (16%), les géophytes (11%) et enfin les phanérophytes (2%).

La répartition biogéographique montre que la majorité des espèces sont de type méditerranéen (40%), suivent les cosmopolites avec 7% et les ouest-méditerranéennes avec 5%. L'indice de perturbation de la station d'étude est de l'ordre de 71,17 %. Ce chiffre confirme la dégradation que subissent ces formations végétales avec l'invasissement des espèces annuelles. DAGET (1980) et BARBERO et al. (1990) confirment que la thérophytisation est une forme de résistance à la sécheresse ainsi qu'aux fortes températures dans les zones arides environnantes. La thérophytisation est due à l'adaptation des plantes au stress de l'hiver, sécheresse hivernale ou estivale ainsi qu'à la perturbation de l'environnement par le pâturage et les cultures. Selon BENABADJI (1995), le pâturage favorise l'installation d'une manière complète des chamaephytes souvent rejetés par le troupeau. L'accroissement des températures moyennes annuelles et l'allongement de la période de sécheresse estivale se traduisent par des modifications importantes de la composition du cortège floristique de *Cistanche mauritanica*, modifiant ainsi le paysage en imposant une végétation xérophile plus adaptée au stress écologique.

Références

- ATAEI N., SCHNEEWEISSG. M., MUÑOZ J., WEISS-SCHNEEWEISSH., TEMSCH E., GARCÍA M. A., VALIZADEH J., SHEIK-AKBARI MEHR R., WICKE S., MAUL K., QUANDT D. 2014. Molecular systematics and evolution of the non-photosynthetic parasitic *Cistanche* (Orobanchaceae). Bio Div Evo. Poster presented at the Joint Conference 15th Annual Meeting of the Society of Biological Systematics (GfBS) and 22nd International Conference of the German Botanical Society (DBG), Dresden, March 24–27.
- AUBERT G., 1978 – Méthodes d'analyses du sol 2ème Edition C.N.D.P. Marseille 199 p.
- BAGNOULS F. et GAUSSEN H., 1953 – Saison sèche et indice xéothermique. Doc. Carte prot. veg. art.8 : 47 p. Toulouse.
- BARBERO M., QUEZEL P. ET LOISEL R., Les apports de la phytocécologie dans l'interprétation des changements et perturbations induits par l'homme sur les écosystèmes forestiers méditerranéens. Forêt Méditerranéenne. 1990 ; : 194-215.
- BENABADJI N., 1995 - Etude phyto-écologique de la steppe à *Artemisia inculata* au sud de Sebdu (Oranie-Algérie). Thèse. Doct. Es-sci. Univ.Tlemcen. pp : 150-158.
- DAGET PH., 1980- Sur les types biologiques botaniques en tant que stratégie adaptative, cas des thérophytes. In "Recherches d'écologie théorique" Les stratégies adaptatives ; 89-114.
- DE MARTONNE E., 1926 - Une nouvelle fonction climatologique : l'indice d'aridité. La météo. pp : 449 - 459.
- DEBRACH J., 1953 - Notes sur les climats du Maroc occidental. Maroc méd., n°342 : 14 p.
- EMBERGER L ; 1930 - A- Sur une formule climatique applicable en géographie botanique. C.R.A cad. Sc ; 1991 pp : 389 – 390.
- HOFFMANNSEGG J. C. von, LINK J. H. F-1809–1820. Flore portugaise ou description de toutes les plantes qui croissent naturellement en Portugal avec figures coloriées, cinq planches de terminologie et une carte. Vol. I. [Orobanchinae, p. 311–320 (1813), t. 62–63 (1813–1820).] – Berlin.
- LOISEL R. et GAMILA H., 1993-Traduction des effets du débroussaillage sur les écosystèmes forestiers et pré-forestiers par un indice de perturbation. Ann. Soc. Sci. Nat. Archéol. De Toulon du var. Pp : 123-132.
- McNeal, J.R., Bennett, J.R., Wolfe, A.D. & Mathews, S. 2013- Phylogeny and origins of holoparasitism in Orobanchaceae. *American journal of botany* 100 : 971–983.
- MUSSET R., 1935- Les calculs relatifs aux régimes pluviométriques. Fraction pluviométrique, écart pluviométrique relatif, coefficient pluviométrique relatif.
- QUEZEL P. ET SANTA S. 1962- Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales, Editions du CNRS - Paris – 1962, 2 vol., 1170 p., 112 pl. in t., planches h.t.
- RIVAS MARTINEZ, S. 1981- Les étages bioclimatiques de la végétation de la péninsule ibérique. Actas III Congr. OPTIMA. Anal. Inst. Bot. Cavanilles, 37(2) : 251–268.
- SELTZER P., 1946 – Le climat de l'Algérie. Inst. Météor. Et de Phys.- Du globe. Univ. Alger. 219 P.
- SHAYVON, R. S., MEHRVARZ, S. S. 2010- Pollen and seed morphology of the genus *Cistanche* (Orobanchaceae) in Iran. *Biologia*, 65(4), 615-620.
- TERYOKHIN, E.S., SCHIBAKOVA, G.V., SERAFIMOVICH, N.B. & KRAVCOVA, T.I. 1993 –SSSR (s atlasom plodov i semjan). Determinator of broomrapes of the USSR flora (with atlas of fruits and seeds). Sankt-Peterburg: Nauka.
- TORRES, M.J., TOMILOV, A.A., TOMILOVA, N., REAGAN, R.L. & YODER, J.I. 2005 - Psocroph, a parasitic plant EST database enriched for parasite associated transcripts. *BMC Plant Biology* 5: 24. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-5-24> .

Etude qualitative et quantitative des ressources en eaux dans la plaine Sidi Bouzid (Tunisie centrale)

Jawadi Issam¹, Gaaloul Noureddine²

¹Doctorante FST et INRGREF, Tunis

² Professeur d'Enseignement Supérieure Agricole INRGREF, Tunis

Résumé

La plaine de Sidi Bouzid se caractérise par son extension géographique sur une superficie de 9376 Km², l'un des principaux réservoirs d'eau souterraine du pays. Elle dispose de nombreux systèmes aquifères. Cette dernière est un exemple typique de région climatique aride où les ressources en eaux souterraines sont exploitées de manière intensive pour répondre aux besoins humains en raison du développement agricole et démographique. La situation est devenue dangereuse, vue le grand recours à l'irrigation et la situation climatique défavorable. Dans un contexte d'analyse de la situation actuelle des ressources en eau (qualité et quantité), la cartographie et les analyses statistiques montrent une baisse considérable du niveau piézométrique tel que la nappe de la plaine Sidi Bouzid a été sollicitée une exploitation intensive, qui s'est traduit par une baisse piézométrique généralisée sur l'ensemble de l'aquifère, mais ce rabattement n'est pas de la même ampleur. Les niveaux des eaux souterraines sont plus touchés que les ressources en eau de surface par un futur climat plus sec ; et une hausse de la salinité des eaux souterraines, tel que les classes de la salinité occupent plus d'espace mais aussi avec un gradient plus élevés. Une claire corrélation si on examine les zones plus salines et les zones de rabattement, la salinité est présente là où il ya un abaissement élevé de niveau piézométrique. Là où se trouve plus des puits de surface (exploitation intensive), une altération de la nappe est établie et qui engendre une concentration géochimique par la suite. Cette problématique pourrait être accentuée principalement par les modifications des régimes de précipitation et par l'augmentation de la température.

Mots clés : Changement climatique, Ressources en eau, Salinité, Sidi Bouzid, Tunisie

Qualitative and quantitative study of water resources in the sidi bouzid plain (central Tunisia)

Abstract

The plain of Sidi Bouzid is characterized by its geographical extension over an area of 9376 km², one of the main underground water reservoirs in the country. It has many aquifer systems. The latter is a typical example of an arid climatic region where groundwater resources are intensively exploited to meet human needs due to agricultural and demographic development. The situation has become dangerous, given the extensive use of irrigation and the unfavorable climatic situation. In the context of analyzing the current situation of water resources (quality and quantity), the mapping and statistical analyzes show a considerable drop in the piezometric level such that the water table of the Sidi Bouzid plain has been called upon for intensive exploitation, which resulted in a generalized piezometric drop over the entire aquifer, but this drawdown is not of the same magnitude. Groundwater levels are more affected than surface water resources by a future drier climate.; and an increase in the salinity of groundwater, such that the salinity classes occupy more space but also have a higher gradient. A clear correlation if we look at the more saline areas and the drawdown areas, salinity is present where there is a high drop in piezometric level. Where there are more surface wells (intensive exploitation), an alteration of the water table is established and which generates a geochemical concentration thereafter. This problem could be accentuated mainly by changes in precipitation regimes and by an increase in temperature.

Key words: Climate change, Water resources, Salinity, Sidi Bouzid, Tunisia,

¹ Corresponding author: jjawadi9@gmail.com

INTRODUCTION

Pendant les dernières décennies, les périodes des sécheresses prolongées enregistrées ont durement affecté les régions du monde entier, notamment les pays Africains qui sont très vulnérables aux changements climatiques. Les ressources hydriques souterraines constituent les premières réponses à ces changements. En effet, une tendance généralisée à la baisse du niveau piézométrique a été enregistrée au niveau de plusieurs nappes. Les effets du changement climatique sur les ressources en eau sont relatifs à leur pénurie, la variabilité de la pluie et l'importance du facteur évaporation conduit souvent à la salinisation des sols (Hachicha, 2007). Cette salinisation est de plus en plus accentuée dans les régions arides et semi-arides dont les ressources en eaux douces sont limitées. Au centre de la Tunisie (gouvernorat de Sidi Bouzid) la croissance socioéconomique et démographique de plus en plus grandissants s'est accompagnée d'une augmentation exponentielle de l'exploitation des ressources hydriques déjà limitées (Gaaloul, 2020). La plaine de Sidi Bouzid l'un des principaux réservoirs d'eau souterraine du pays est un exemple où l'exploitation de l'eau s'est intensifiée durant les vingt dernières années (Hamdi, 2016). Cette région est connue par l'insuffisance de ces ressources en eau et une surexploitation des ressources en eau souterraines couplée à une mauvaise gestion de l'irrigation, en effet parmi les principales conséquences de cette surexploitation sont le rabattement continu du niveau piézométrique de la nappe et la dégradation de la qualité chimique des eaux (Boughanmi et al., 2018). Les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement en eau de la plaine de Sidi Bouzid. En effet une bonne compréhension et évaluation de l'évolution des eaux souterraines est importante pour subvenir aux besoins dans différents domaines : en agriculture, en industrie, en alimentation en eau potable de la population.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Situation géographique

Le gouvernorat de Sidi Bouzid se caractérise par son emplacement stratégique au centre de la Tunisie, constituant un trait d'union entre des différentes régions du pays (figure 1). Situé à 260 kilomètres de la capitale, le gouvernorat de Sidi Bouzid fait la liaison entre la Tunisie steppique et la Tunisie présaharienne. La région d'étude se situe au centre de la Tunisie. Elle couvre de l'Est à l'Ouest le bassin de la plaine de Sidi Bouzid (SBZ) et le bassin d'oued El HechimGaraa-Hamra. La plaine de SBZ est une structure synclinale entourée par les reliefs des Dj. Al Rakhmat et Dj. Hamra à l'Ouest, Dj. Kebar au Sud, Dj. Lessouda au Nord et enfin l'alignement de l'axe Nord – Sud à l'Est. Il constitue l'un des principales cuvettes synclinales de la Tunisie centrale. Administrativement, la zone d'étude fait partie du gouvernorat de Sidi Bouzid et elle couvre les délégations de Sidi Bouzid Est, la délégation de Sidi Bouzid Ouest et la délégation de Bir EL Hfay. Cette région est matérialisée par les zones d'évaporation de Nagadha et Sebkhat Akrich principales exutoires des eaux souterraines et superficielles (figure 1).

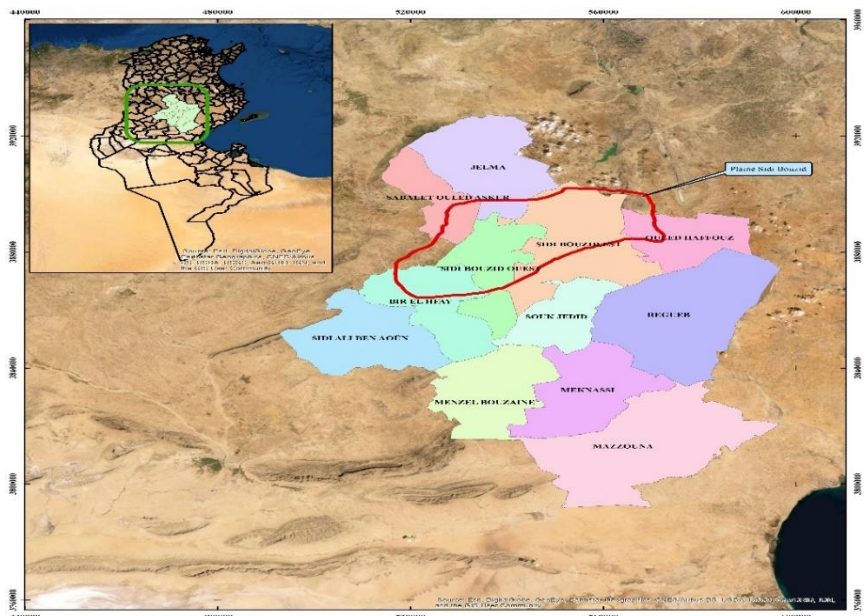


Figure 1: Situation géographique et localisation de la zone d'étude

Cadre climatique

Le Gouvernorat de Sidi Bouzid se trouve dans les étages bioclimatiques allant de l'aride inférieur au semi-aride supérieur. La plaine de Sidi Bouzid est relative à l'aride supérieur comme environ 79 % de la superficie totale et seulement environ 19 % de la superficie totale se rapporte à l'aride inférieur (figure 2).

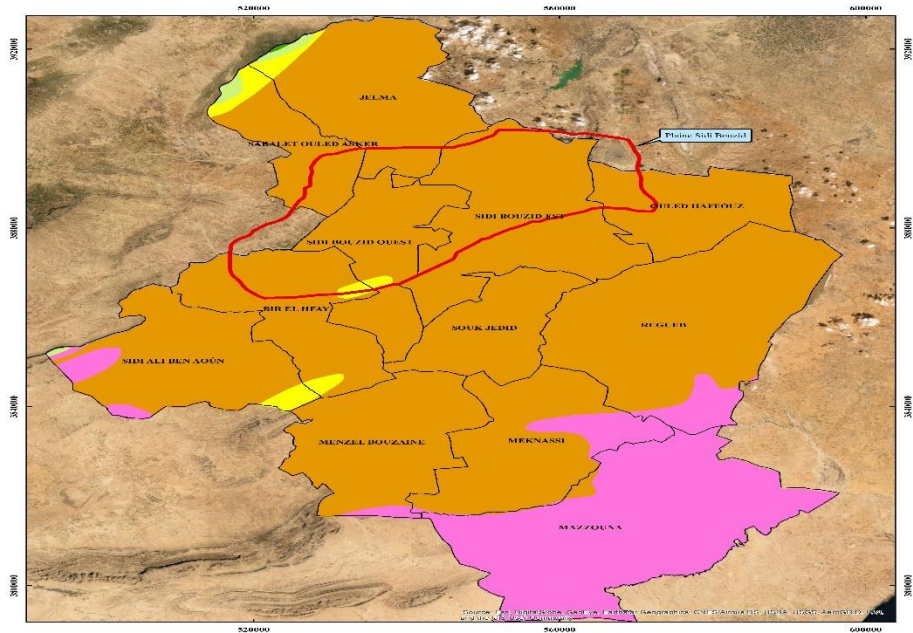


Figure 2: Etages bioclimatiques

Cadre hydrologique

Les deux principaux cours d'eau de la plaine de Sidi Bouzid sont essentiellement formés par oued Sereg Edhiba, d'importance secondaire, et oued Al Fakka. Celui-ci prend naissance à la confluence, en amont de la plaine de Sidi Bouzid, d'oued Al Htab et oued El Hachim d'écoulement intermittent. L'oued Al Fakka traverse la cuvette de SBZ d'Ouest en Est. A sa sortie de la plaine de Sidi Bouzid, l'oued Al Fakka donne naissance à oued Naggada qui se prolonge en aval par oued El Hjal. Dans la plaine de sidi bouzid (figure 3).

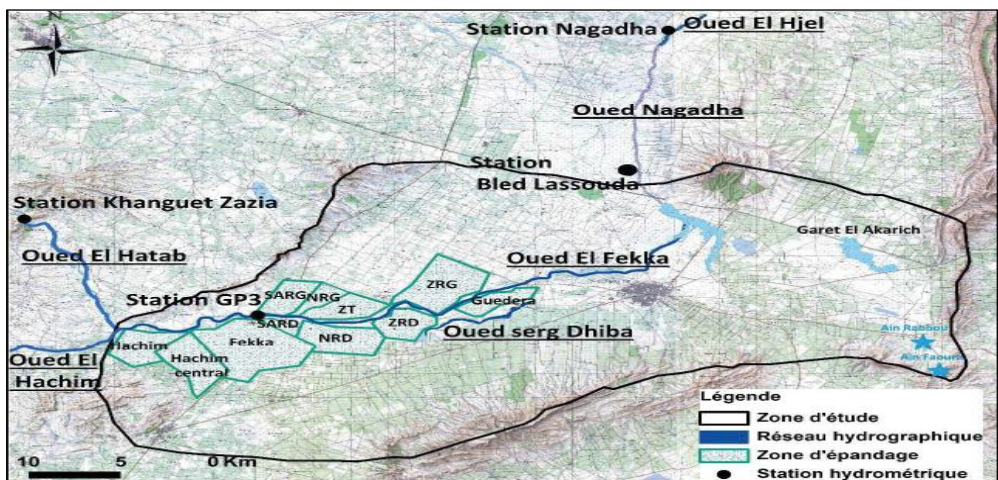


Figure 3: Réseau hydrographique de la plaine de Sidi Bouzid

- ✓ **Système d'information géographique (SIG) :** Cartographier la plaine de Sidi Bouzid, suivre l'évolution de la salinité et les niveaux piézométriques durant les années précédentes (1995-2015).
- ✓ **Analyse statistique :** Paramètres climatiques (Température, Pluviométrie)
- ✓ **Les données qualitatives** ont été récupérées des annuaires piézométriques et sur des mesures effectuées depuis 1985. Les données collectées de CRDA Sidi Bouzid, concernent les piézomètres Pz 16 et Pz 20 (installés en 1989 et 1988, respectivement) et Pz 3 et Pz 17 (installés en 1985). En outre, les données climatiques (Température, Pluviométrie) ont été prises de la station CRDA, Khanguet Zazia, située dans la plaine de Sidi Bouzid.
- ✓ **L'évaluation de la qualité et la quantité des eaux** dans la plaine de Sidi Bouzid s'est appuyée sur la comparaison de la situation précédente et la situation actuelle.
- ✓ **La caractérisation d'un climat** repose essentiellement sur la caractérisation de son aridité. Quotient pluviométrique d'Emberger Q_e qui est valable pour différents climats méditerranéens. Pour la plaine de Sidi Bouzid quotient calculé est de l'ordre de 41 mm K^{-1} .

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Etude qualitative (Salinité)

Les changements climatiques pourraient affecter l'accumulation de sels à la surface du sol en raison d'une diminution de la capacité de lixiviation des sels par la pluie et en raison d'une augmentation de l'évapotranspiration due à l'augmentation de la température (Khanzari et al., 2012). La salinisation contribue à la dégradation des propriétés physiques du sol, notamment la texture, la stabilité structurale et la conductivité hydraulique du sol (Saidi et al., 2004). L'effet cumulé des irrigations avec une eau de qualité médiocre et sous un climat très évaporant engendre une salinisation des terres agricoles (Hachicha, 2007).

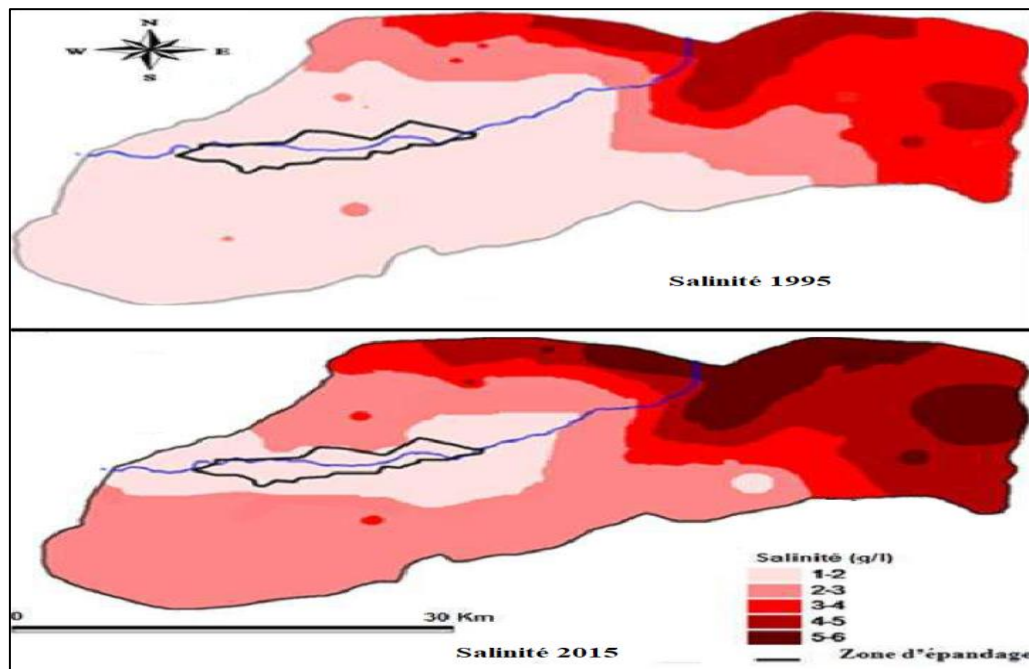


Figure 4: Evolution de la salinité dans la plaine Sidi Bouzid

Durant la période (1995-2015) :

- La salinisation d'eau s'accroît vers le centre et l'amont de la nappe plus de 4 g/l et avance vers le centre de la plaine traduisant une invasion du réservoir par les eaux salées.
- La zone aval menacée s'élargit et enregistre des valeurs plus importantes. En aval la variation de la salinité est plus grave, tel que les classes de la salinité occupent plus d'espace mais aussi avec un gradient plus élevé.
- La tendance générale tend à l'augmentation de la salinité.

Durant cette période l'évolution de la salinité est plus grave, tel que les classes de la salinité occupent plus d'espace mais aussi avec un gradient plus élevé.

Etude quantitative

La première période allant de 1970-1990 Avec un coefficient de régression élevé. Cette figure montre que pour tous les points proches de la courbe, le ruissellement de l'eau est proportionnel à la pluviométrie. Cette période indiquant que l'apport de d'eau de crue est tributaire de la pluviométrie telque l'apport d'eau augmente et diminue avec la pluviométrie est cela justifié par l'inexistence des aménagements hydriques dans cette période dans la plaine de Sidi Bouzid. Aux contraires, la période allant de 1990-2015 les points sont loin de la courbe de tendance, le ruissellement donc n'est corrélé avec la pluviométrie. La relation pluie ruissellement ne reste plus linéaire. Les aménagements hydriques ont interrompus et perturbés la relation pluie ruissellement et la relation linéaire entre eux.

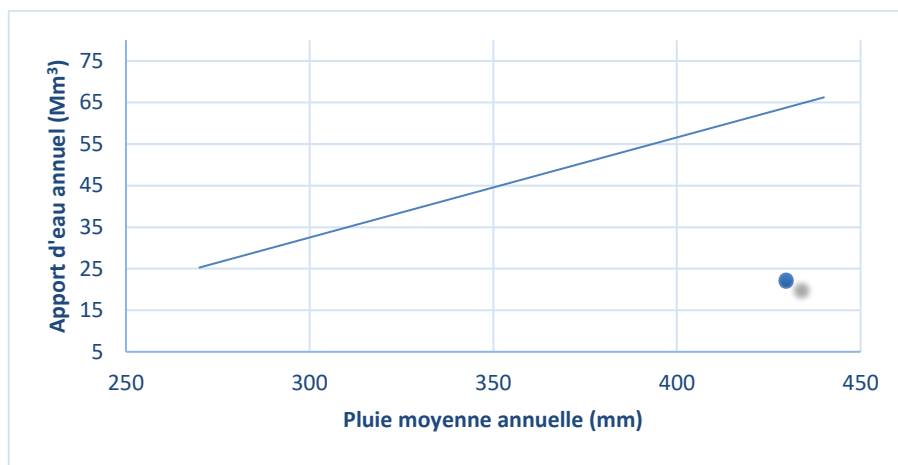


Figure 5: Relation Pluie Ruissellement

L'exploitation des eaux de la nappe est ancienne mais suite à des changements climatiques (sécheresses, inondations,) elle a pris une grande ampleur après les années 1980, ce qui a engendré des problèmes (rabattement et salinisation). La nappe est sollicitée par plus de 4000 puits de surface en 2015, qui engendrent environ 34 millions m³/an, traduisant une surexploitation près de 160%.

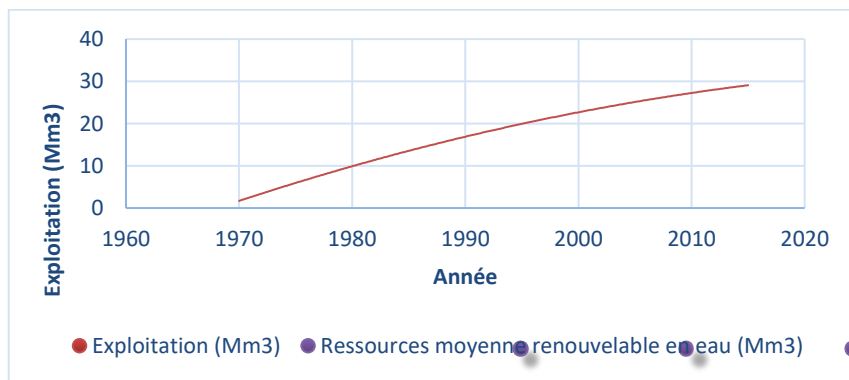


Figure 6: Exploitation et ressources renouvelables

Les niveaux des eaux souterraines sont plus touchés que les ressources en eau de surface par un futur climat plus sec. En effet, les résultats révèlent que la température moyenne annuelle future devrait augmenter tandis que la précipitation devrait augmenter en saisons pluvieuses et diminuer en saisons sèches. Cette situation conduira à la surexploitation des eaux souterraines. La recharge devrait diminuer à court, à moyen et à long terme. En conséquence, les niveaux et le stockage des eaux souterraines se devraient également diminuer à l'avenir (Majdoud., et al 2014).

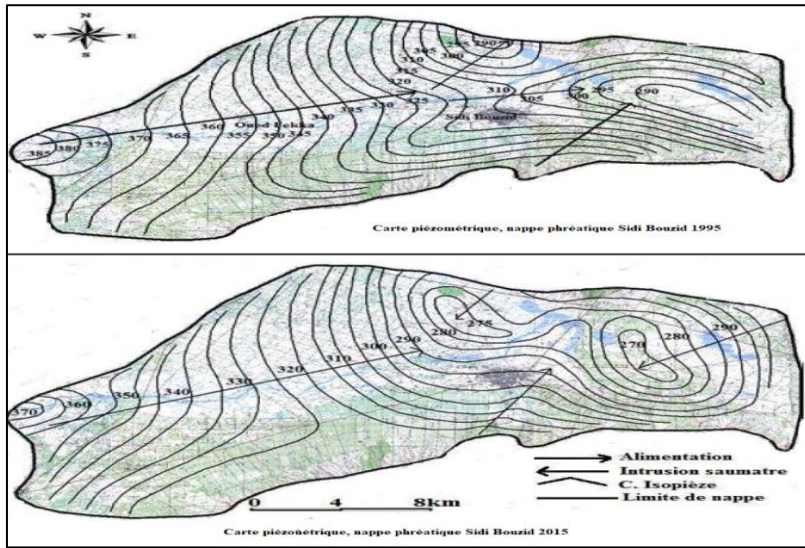


Figure 7: Carte piézométrique, nappe phréatique Sidi Bouzid

Une simple comparaison entre la carte piézométrique 1995 et celle de 2015, montre que la nappe de la plaine Sidi Bouzid a été sollicitée une exploitation intensive, qui s'est traduit par une baisse piézométrique généralisée sur l'ensemble de l'aquifère. Mais ce rabattement n'est pas de la même ampleur comme la montre les figures d'évolution de la surface piézométrique. La situation n'est assez dangereuse jusqu'à 1993, après la demande commence à dépasser la potentialité renouvelable de l'eau le rabattement a été élevé. La situation est devenue dangereuse, vu le grand recours à l'irrigation et la situation climatique défavorable. Cette surexploitation a engendré une baisse considérable du niveau piézométrique et une hausse de la salinité des eaux souterraines.

CONCLUSION

Les zones arides et semi arides se caractérisent par la rareté des ressources en eaux de surface de bonne qualité. Elles sont très vulnérables aux changements climatiques. Cette situation oblige les paysans à faire appel à l'exploitation des ressources souterraines. A long terme, la surexploitation de ces ressources provoque une salinisation des eaux et du sol sous l'effet du pouvoir évaporateur, qui augmente suite au réchauffement global. Cette problématique pourrait être accentuée principalement par les modifications des régimes de précipitation et par l'augmentation de la température. De ce fait, cette région a été choisie pour étudier l'impact des changements climatiques.

Références

1. Boughanmi M., Dridi L., Jridi N., Gerhard S., Majdoub, R. 2018. Etude expérimentale et numérique du transfert hydrique dans la plaine de Sidi Bouzid. *European Journal of Scientific Research* 149(3):289-30.
2. CRDA Sidi Bouzid. (2018). Rapport sur les ressources en eau de Sidi Bouzid. Arrondissement des ressources en eau. 24 pages.
3. Gaaloul N. 2020. Seawater Intrusion into Coastal Aquifer and Climate Change: Impact of the coronavirus (covid-19) on the environment and water resources ISBN 978-613-9-57238-0. Editions Universitaires Européennes. ISBN : 978-613-9-57238-0, 229 pages.
4. Hachicha M. (2007). Les sols salés et leur mise en valeur en Tunisie. *Sécheresse* 18(1) : 45-50.
5. Hamdi, M., 2016. Impacts de l'épandage des eaux de crue sur le, la nappe phréatique et la sécheresse agricole: Cas de l'Oued Fekka (Tunisie Centrale). Thèse de Doctorat. FST El Manar. FSS Sfax.
6. Khanzari S., Hachicha M., Bouhlila R. and Battle-Sales J. (2012). Characterization and modeling of water movement and salts transfer in a semi-arid region of Tunisia (BouHajla, Kairouan), Salinization risk of soils and aquifers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 86: 34-42.
7. Majdoud R., Dridi L. et Mnasri S. (2014). Caractérisation de la nappe profonde Gafsa nord suite à la surexploitation des eaux souterraines. *Larhyss Journal*, 17: 179-192.
8. Saidi D., Bissonais Y., Duval O., Daoud O. et Halitim A. (2004). Effet du sodium échangeable et de la concentration saline sur les propriétés physiques des sols. *Etude et gestion des sols*, 11(2) : 81-92.

INTERNATIONAL JOURNAL

Water Sciences and Environment Technologies

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688
Open Access

Volume (V) - Issue 2 – December 2020

Water-Climate'2020



Integrated Water Resources Management and Climate Change

Editor-in-Chief: Pr Nouredine Gaaloul

Published by:

Scientific and Technical Association for Water and the
Environment in Tunisia (ASTEE *Tunisie*)

Modeling seawater intrusion and groundwater flow pollution

Gaaloul Noureddine ¹, Saeid Eslamian²

¹ National Institute of Research in Rural Engineering of Water and Forestry, INRGREF, IRESA, University of Carthage, Tunisia;

² Department of Water Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

Abstract

The objective of this paper is to set the stage for the modeling procedure and methodology presented in subsequent chapters: what is it that we wish to model and why and, especially, how do we model?

We start by presenting some basic definitions related to groundwater and to aquifers, focusing our attention on the flow of water in the saturated zone, noting that due to the heterogeneity of porous material at the pore, or grain size scale, it is practically impossible to predict and observe the flow at that scale. Instead, the continuum approach is proposed as a device for describing and observing flow in porous media, in the absence of information on the microscopic configuration of the solid matrix. As a further simplification, it is proposed to treat the flow in aquifers as approximately two-dimensional in the horizontal plane.

Seawater intrusion in coastal aquifers is a growing concern in mediterranean regions, due to over- population and over-exploitation of coastal groundwater resources. Under these circumstances, it is essential to model the extent of seawater intrusion and to locate the saltwater-freshwater interface taking into account heterogeneity and parameter uncertainty. There are different ways to couple salt transport and freshwater flow in groundwater models

Key Words: Integrated Water Resources Management and Climat Change.

Modélisation de l'intrusion d'eau de mer et de la pollution des eaux souterraines

Résumé

L'objectif de cet article est de préparer le terrain pour la procédure et la méthodologie de modélisation présentées dans les chapitres suivants : qu'est-ce que nous souhaitons modéliser et pourquoi et, surtout, comment modéliser ?

Nous commençons par présenter quelques définitions de base liées aux eaux souterraines et aux aquifères, en concentrant notre attention sur l'écoulement de l'eau dans la zone saturée, en notant qu'en raison de l'hétérogénéité du matériau poreux au niveau des pores, ou à l'échelle granulométrique, il est pratiquement impossible de prédire et observer le débit à cette échelle. Au lieu de cela, l'approche continuum est proposée comme un dispositif pour décrire et observer l'écoulement dans des milieux poreux, en l'absence d'informations sur la configuration microscopique de la matrice solide. Pour simplifier davantage, il est proposé de traiter l'écoulement dans les aquifères comme approximativement bidimensionnel dans le plan horizontal.

L'intrusion d'eau de mer dans les aquifères côtiers est une préoccupation croissante dans les régions méditerranéennes, en raison de la surpopulation et de la surexploitation des ressources en eaux souterraines côtières. Dans ces circonstances, il est essentiel de modéliser l'étendue de l'intrusion d'eau de mer et de localiser l'interface eau salée-eau douce en tenant compte de l'hétérogénéité et de l'incertitude des paramètres. Il existe différentes façons de coupler le transport du sel et le débit d'eau douce dans les modèles d'eaux souterraines.

Mots Clés : Gestion intégrée des ressources en eau et changement climatique

¹ Corresponding author: gaaloul.noureddine@iresa.agrinet.tn

INTRODUCTION

Groundwater modeling is commonly the most important water resource in arid environments. In areas of high evaporation and limited rainfall, groundwater provides natural storage of water which is protected from surface evaporation, it is spatially distributed, and it can be developed with limited capital expenditure. Groundwater also provides a potential storage that can be managed to increase the useful water resource. Numerical modelling has emerged over the past 40 years as one of the primary tools that hydrologists use to understand groundwater flow and saltwater movement in coastal aquifers. Numerical models that account for the effects of fluid density on ground water flow are being used more frequently to address scientific, engineering, and water resource management problems.

Also being used more frequently are inverse modelling routines based on nonlinear regression methods. As computing power increases and expertise grows, modelling studies will likely use both inverse methods and density-dependent ground water flow simulations to solve complicated water resource or ground water contamination problems. Groundwater models describe the groundwater flow and transport processes using mathematical equations based on certain simplifying assumptions. These assumptions typically involve the direction of flow, geometry of the aquifer, the heterogeneity or anisotropy of sediments or bedrock within the aquifer, the contaminant transport mechanisms and chemical reactions. Because of the simplifying assumptions embedded in the mathematical equations and the many uncertainties in the values of data required by the model, a model must be viewed as an approximation and not an exact duplication of field conditions. Groundwater models, however, even as approximations are a useful investigation tool that groundwater hydrologists may use for a number of applications.

Numerical models are mathematical representations (or approximations) of groundwater systems in which the important physical processes that occur in the systems are represented by mathematical equations. Application of existing groundwater models include water balance (in terms of water quantity), gaining knowledge about the quantitative aspects of the unsaturated zone, simulated zone, simulating of water flow and chemical migration in the saturated zone including groundwater relations, assessing the impact of changes of the groundwater regime on the environment, setting up/optimising monitoring networks, and setting up groundwater protection zones. The governing equations are solved by mathematical techniques (such as finite-difference or finite-element methods) that are implemented in computer codes. The primary benefit of numerical modelling is that it provides a means to represent, in a simplified way, the key features of what are often complex systems in a form that allows for analysis of past, present, and future groundwater flow and saltwater movement in coastal aquifers. Such analysis is often impractical, or impossible, to do by field studies alone.

Numerical models have been developed to simulate groundwater flow solely or groundwater flows in combination with solute transport (the movement of chemical species through an aquifer). For a number of reasons, numerical models that simulate groundwater flow and solute transport are more difficult to develop and to solve than those that simulate groundwater flow alone. Coastal aquifers are particularly difficult to simulate numerically because the density of the water and the concentrations of chemical species dissolved in the water can vary substantially throughout the modelled area. To address these difficulties, one of two approaches generally is used to simulate freshwater-saltwater interactions. In the first approach, the freshwater and saltwater zones are assumed to be immiscible (that is, they do not mix) and separated by a sharp interface. In the second approach, the freshwater and saltwater are considered being a single fluid having a spatially variable salt concentration that influences the fluid's density; this approach is referred to as density dependent groundwater flow and solute-transport modelling (Reilly, 1993).

Mathematical models are tools, which are frequently used in studying groundwater systems. In general, mathematical models are used to simulate (or to predict) the groundwater flow and in some cases the solute and/or heat transport. Predictive simulations must be viewed as estimates, dependent upon the quality and uncertainty of the input data. Models may be used as predictive tools; however, field monitoring must be incorporated to verify model predictions. The best method of eliminating or reducing modelling errors is to apply good hydrogeological judgments and to question the model simulation results. If the results do not make physical sense, find out why. Scientists and groundwater resources managers are involved in numerical modelling studies of environmental problems, such as contaminant migration prediction, aquifer remediation, seawater intrusion, etc.

From a methodological point of view, numerical modelling of such phenomena faces challenges such as characterizing and accounting for complex geological settings. Other challenges are specific to the applications themselves, such as accounting for complex flow and solute transport processes like density effects or reactive solute transport. Those issues affect the accuracy of the forecasts made by numerical models and consequently may affect decisions about groundwater management policies. Numerical models use an approximate form of the governing equation to calculate head at selected locations. In contrast to analytical solutions and the AEM, a numerical solution is not continuous in space or time; head is calculated at discrete points (nodes) in space and for specified values of time.

However, numerical models can solve the full transient, 3D, heterogeneous and anisotropic under complex boundary and initial conditions. The numerical methods most commonly used in groundwater modeling are the finite-difference (FD) method and the finite- element (FE) method. In the FD method, nodes are located in 3D space using indices (i,j,k) to assign relative locations within a rectangular grid.

NUMERICAL MODELS

Finite Differences (FD): The method of finite differences (FD) is generally very intuitive and relatively easy to implement. In the FD method, nodes are designated by i, j, k indices, which here represent the column, row, and layer, respectively, of a node in 3D space (Figure 1). The spacing of nodes along rows is designated by Dx and the spacing along columns by Dy , while the spacing between layers is Dz . The node is situated within an FD cell or block (Figure 1(b) and (c)). Heads are defined only at nodes and the head at a node represents the average head in the FD cell/block (Gaaloul, 1992).

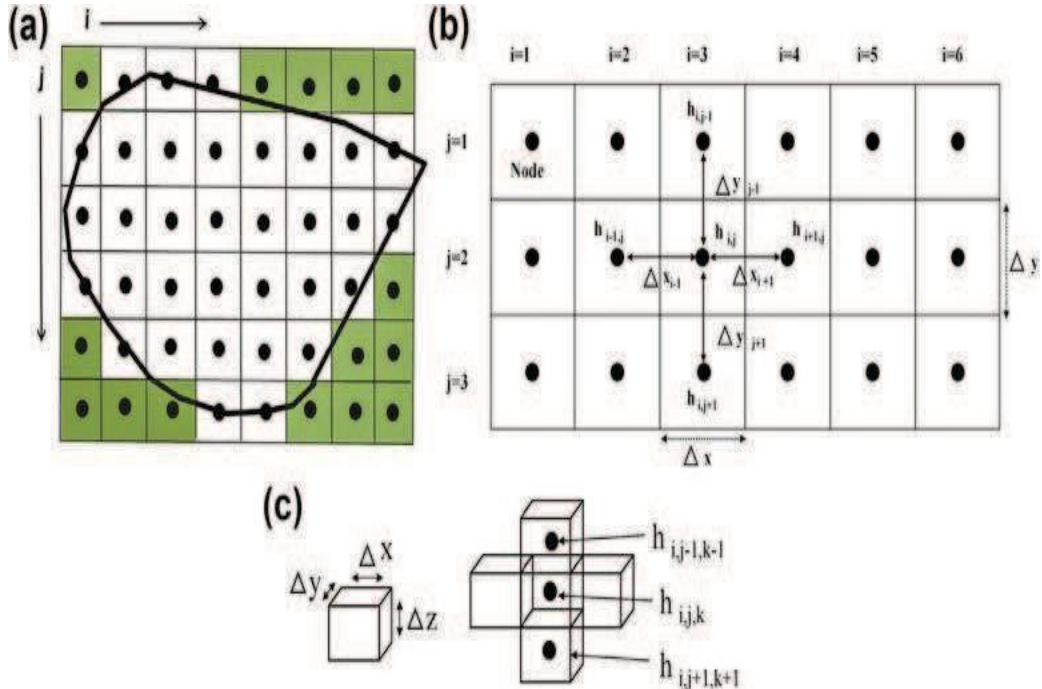


Figure 1. Finite-difference (FD) grid and notation. (a) Two-dimensional (2D) horizontal FD grid with uniform nodal spacing; $i \frac{1}{4}$ columns and $j \frac{1}{4}$ rows. Sometimes a different indexing convention is used. For example, in MODFLOW $i \frac{1}{4}$ rows and $j \frac{1}{4}$ columns. The cells are block-centered; the heavy dark line represents the problem domain. Inactive cells (those outside the boundary of the problem domain) are shaded. (b) 2D horizontal FD grid with notation for the group of five nodes comprising the FD computational module (star) centered around node (i,j) . (c) Three-dimensional notation where Dz represents the vertical distance between nodes and k is the vertical index. The group of blocks at the right is shown in 2D space (the two blocks perpendicular to the page along the y -axis are not shown). The group of seven nodes including node (i,j,k) comprise the FD computational module in three dimensions.

Finite Elements (FE): In the FE method, the locations of nodes are designated using spatial coordinates (x,y,z) in a mesh (Figure 2). Numerous texts and reports cover the basic theory of these methods. For example, Remson et al. (1971) discuss finite differences and Diersch (2014), Huyakorn and Pinder (1983), Pinder and Gray (1977), and Istok (1989) discuss finite elements. Wang and Anderson (1982) provide an elementary introduction to both methods. Pinder and Gray (1976) and Wang and Anderson (1977, 1982), among others, have shown that the FD and FE formulations of the Laplace equation yield the same set of algebraic equations. They also demonstrated that both methods yield the same results if nodal spacing is sufficiently small. Thus, while the methods differ in concept, they yield similar results, even for more complex versions of the governing equation than the Laplace equation. The FE solution is piecewise continuous, as individual elements are joined along edges. A large variety of element shapes and nodal locations are possible, although the most common elements are triangular and quadrilateral. Elements are lines in one dimension, planes in two dimensions, and volumetric polygons in three dimensions. The mathematics of the FE method is less straightforward than the FD method. In the FE method, the problem domain is subdivided into elements (Figure 2) that are defined by nodes.

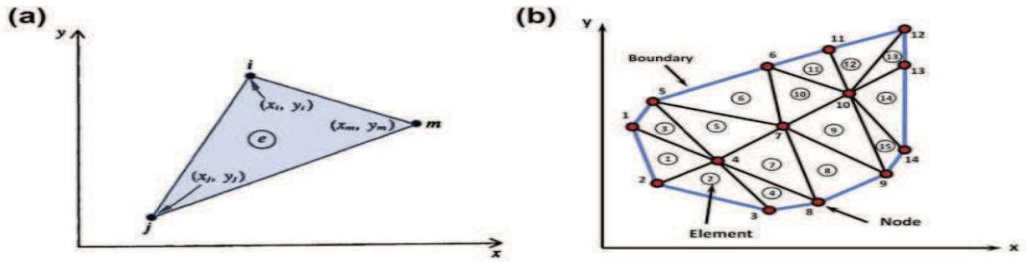


Figure 2. Two-dimensional horizontal finite-element mesh with triangular elements and notation. (a) A representative triangular element with nodes i, j, and m, labeled in counterclockwise order, with spatial coordinates (x,y); (b) Triangular elements, with element numbers inside circles, are defined by numbered nodes. The elements are fitted to the boundary of the problem domain (Wang and Anderson, 1982).

The dependent variable (e.g., head) is defined as a continuous solution within elements (Figure 3(a)) in contrast to the FD method where head is defined only at the nodes and is considered piecewise constant between nodes (Figure 3(b)).

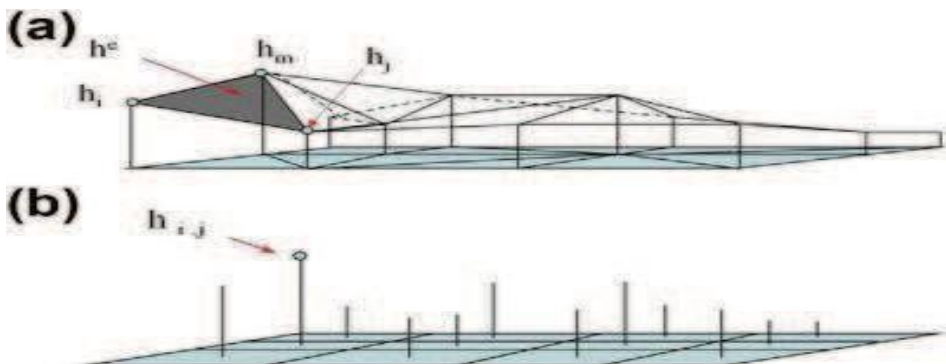


Figure 3 Representation of head in the finite-element (FE) and finite-difference (FD) methods. (a) In the FE method, head (h_e) is a continuous function within each element. In the FE mesh shown in the figure, the elements are triangular with heads at nodes designated h_i , h_j , and h_m . (b) In the FD method, head ($h_{i,j}$) is defined only at the node.

Locations of nodes in an FE mesh are designated using x, y, z coordinates. Both nodes and elements are numbered, and the location of each element is defined in terms of the surrounding nodal numbers. The FE method requires more bookkeeping of nodal locations than in FD because not only is the x, y, z location of each node required but the element number and the numbers of the nodes forming the element must be input to the code to generate the mesh. Mesh generation is both tedious and important because the sequence of nodal numbering can have an impact on computer memory during code execution (Wang and Anderson, 1982). Hence, FE codes usually include mesh generating software. The FE equations are generated by introducing a trial solution of head within the element. For example, for the triangular element, the trial solution is defined by interpolation functions, usually called basis functions, that relate head at the nodes to head within the element (Figure 4). Typically, a linear interpolation function is chosen, though more complex functions are possible.

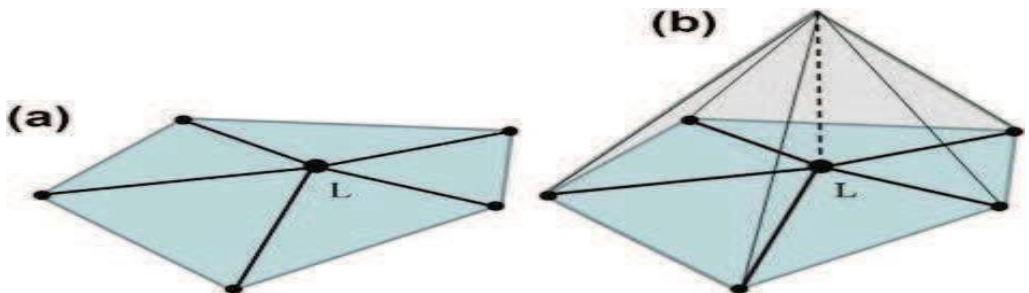


Figure 4 (a) Plan view of a patch of elements around node L in a finite-element mesh. (b) Three-dimensional view of the nodal basis function $N_L(x,y)$ (Wang and Anderson, 1982 and Cheng, 1978).

Control Volume Finite Differences (CVFD): Standard FD methods require rectangular grids and rectangular cells within the grid. Although rectangular grids are simple to code and visualize, they often require inconvenient assumptions about system geometry. Furthermore, rectangular grids have two other drawbacks: they generate cells in areas of the model domain outside the main area of interest and they require that any increased resolution in discretization is extended areally to the edges of the model domain and vertically into all layers of a 3D model. For example, increased resolution (smaller node spacing and smaller FD cells) around surface water features for better representation of groundwater/surface water interaction in layer I of a model requires the same higher level of discretization in all lower layers even though the surface water features are present only in layer I. The control volume finite-difference (CVFD) method was used in one of the first applications of numerical models to a groundwater problem (Tyson and Weber, 1964) and was explored in detail by Narasimhan and Witherspoon (1976) in another early application. The method was called integrated finite differences in those early applications.

The CVFD method gives FD methods much of the same flexibility in spatial discretization as the FE method. In a CVFD model, spatial discretization can include a combination of rectangular and square cells as well as hexagons, triangles, and irregular shapes. Moreover, spatial discretization can be different in each vertical layer. Recently, Panday et al. (2013) used CVFD to develop the code MODFLOW-USG, a version of the FD code MODFLOW with an unstructured grid (USG). As in an FE mesh, nodes in a USG are numbered sequentially, rather than using the i,j,k indexing convention of standard FD methods. Similar to FE, each cell is numbered. Adjacent nodes are said to be connected and the user must input the area of the shared cell face for every cell connection. Given the complexity of assembling the data for a USG, a preprocessor code is recommended to assemble the grid (Panday et al., 2013). The equations used in the CVFD method are briefly discussed below but the details of the method are beyond the scope of our text. The interested reader should refer to Narasimhan and Witherspoon (1976) and Dehotin et al. (2011) for details of the theory, and to Panday et al. (2013), who show how to adapt the CVFD approach to the coding used in MODFLOW. We provide an overview of the CVFD method below, following Panday et al. (2013) and Narasimhan and Witherspoon (1976).

Solution Methods: The set of algebraic equations resulting from applying a numerical approximation to the governing equation using the FD, FE, or CVFD method is solved for head using either direct methods or direct methods combined with iteration. Some general features of solution methods are discussed briefly in this section. Wang and Anderson (1982) discuss basic iterative and matrix solution techniques in more detail. Direct methods solve the global matrix using matrix solvers and give an exact numerical solution of the set of algebraic equations subject to numerical roundoff error. Roundoff errors are generated because the computer stores a finite number of digits to represent each numerical value. Although in principle direct method solutions are desirable, they often require large amounts of computer memory since all entries of the coefficient matrix must be stored in the computer and the number of entries is typically large. Moreover, owing to the large number of calculations required to solve a matrix equation directly, significant numerical roundoff error can occur. In practice, execution time of direct solvers is fastest with small, linear, groundwater problems, but can be unacceptably long if the modeling problem is highly nonlinear. Therefore, convergence problems (Konikow and Reilly, 1998) and computer memory have limited the application of direct solution methods. However, improved solution methods and improved computer power are motivating new developments in direct methods. The FE code FEFLOW (DHI-WASY, 2013; FEFLOW version 6.2) includes a direct solver that can accommodate up to 1 million nodes. There is also a direct solver for MODFLOW (Harbaugh, 1995, 2005). Nevertheless, direct solutions continue to be more appropriate for steady-state models, which solve for only one set of heads. Transient models, especially models that use variable length time steps (Harbaugh, 1995), may be better served by a solver that combines direct methods with iteration.

An iterative solution is the simplest type of numerical solution and point iteration was used routinely to solve FD equations in the early years of groundwater flow modeling. Today, point iterative solutions for the groundwater flow equation are rarely used. Instead, direct (matrix) methods are combined with iteration. With point iteration, the FD equation is solved sequentially for head at each node in the problem domain and then the process is repeated until heads between iterations stop changing (i.e., the solution converges). Methods that combine iteration with a direct solution first simplify the coefficient matrix in the global matrix equation so that more efficient direct matrix solvers can be used. Because the resulting matrix equation has a coefficient matrix that is not exactly correct, the solution is not accurate, and iteration is used to improve the solution. Wang and Anderson (1982) present examples of methods for combining direct and iterative solution methods for 2D groundwater flow problems. McDonald and Harbaugh (1988) discuss direct methods combined with iteration for solving the 3D flow equation. Codes generally include several different solvers from which the user may choose. The solution of large, complex groundwater models may require the modeler to experiment to find the solver that converges most efficiently. Iterative solutions are inexact because the iteration process is stopped when the solution is (subjectively) judged to have converged. Moreover, iteration involves a large number of calculations making the solution prone to roundoff error and associated artifacts. Acceleration parameters and relaxation factors speed up convergence but the modeler has to select values for those parameters. A residual error in head ($1/4$ the difference in heads at the start and end of an iteration) is calculated for each node. The modeler specifies a value for the head closure criterion (also called the head error criterion, error tolerance or convergence criterion) that sets the maximum allowed value of the residual error in head. Many solvers also use a similarly defined second closure criterion for the water balance.).

Multi-component reactive transport models and variable density flow models are important tools for improving the understanding of governing processes in groundwater systems. Representatives of multi-component reactive transport models are, for example, PHREEQC-II, PHAST, Hydro Bio Geo Chem and some MODFLOW/MT3DMS based models such as RT3D and PHT3D. Numerous other models were developed for transport of a single solute species in aquifers with variable density, for example

SUTRA, METROPOL, FEMWATER, HST3D, NAMMU, FEFLOW and MOCDENS3D (Gaaloul et al., 2012). Some of the recently developed simulation models are based on this sharp interface approach. On the other hand, when the transition zone stretches to a considerable extent, the seawater intrusion phenomenon is modelled using the density-dependent miscible flow and transport approach. Coastal aquifers are particularly difficult to simulate numerically because the density of the water and the concentrations of chemical species dissolved in the water can vary substantially throughout the modelled area. A management problem is formulated with two conflicting objectives involving maximization of groundwater development in coastal zones while limiting the head and seawater intrusion to desired levels of salinity by the use of barrier wells. Unlike many earlier models, the proposed model is based on a recently developed 3-D density- dependent seawater intrusion model, SEAWAT. Use of SEAWAT as the simulator is expected to result in a better representation of the flow system, as compared to the sharp interface approach. (Gaaloul et al., 2012). To simulate the seawater intrusion (SWI), one can either adopt a sharp interface or a density- dependent dispersive model. The freshwater and saltwater are considered immiscible. This simplification allows for treatment of the problem analytically or numerically in a very efficient manner. Reviews of this approach can be found in (Gaaloul et al., 2012). Despite the fact that assuming a sharp interface allows the development of solutions that are useful for understanding SWI and for solving real-world problems, this approach does not account for hydrodynamic dispersion. However, it is well known that instead of a sharp interface between freshwater and saltwater there is a transition zone since both fluids are miscible. Therefore, several methods have been developed to solve the coupled variable-density flow and advective dispersive solute transport equations. In the case of unstable variable in the case of unstable variable density flow and transport, have shown that heterogeneity can affect transport over many length scales.

Computer models have become an indispensable tool to study aquifers, to understand the interaction of different processes affecting the biogeochemistry and/or the heat distribution, to predict the effect of changes, and to solve practical groundwater problems. Examples are aquifer characterization, capture zone delineation, pumping and recharge well design and management, watershed simulation, groundwater pollution, potential hazards and remediation, acid mine drainage, natural attenuation, geo- and hydrothermics, and saltwater intrusion. The simulation of groundwater flow systems and solute transport using computer codes is standard practices in the field of hydrology. Models are used for a variety of purposes that include education, hydrologic investigation, water resources management, and legal determination of responsibility. The main purpose of the model is to understand the behavior of an aquifer in response to stress conditions or change in the initial conditions. Many studies have focused on the modeling of seawater intrusion, considering it as an important stress condition. The freshwater-seawater relationships in coastal aquifers in open boundaries by a 2-D numerical approach. In spite of diversity of numerical studies treating seawater intrusion problem, some aspects remain unrevealed: relationship of the position and shape of seawater-freshwater interface with pumping rate and other geographical/hydrogeological factors. In particular, occurrence of saltwater up-coning is one of the most interesting phenomena that need to be deepened with 3- D numerical simulations. The provision of adequate data plays an important part in the development of successful models. However, due to practical difficulties and uncertainties of interpretation together with financial constraints, the modeller often considers that insufficient data is available to prepare a reliable model. On the other hand, when detailed data have been collected, the modeller frequently finds that he does not know how to use these data.

GROUND WATER MODELING PROGRAM

To address this issue effectively, density dependent groundwater model is required to track the movement of the solute in coastal aquifers (Lin et al. 2009). Three-dimensional groundwater flow and solute transport models namely FEFLOW, 3DFEMFAT, HST3D, AQUA3D, FEMWATER, SEAWAT and MOCDENS3D are in use worldwide. SEAWAT is one of the widely used codes to simulate saltwater intrusion (Werner et al., 2013). There are several ways to classify groundwater flow models. Models can be either transient or steady state, confined or unconfined, and consider one, two, or three spatial dimensions. In setting up the grid of a numerical model, the classification that is most relevant is one based on spatial dimension. We can classify models in terms of spatial dimension as two-dimensional areal, twodimensional profile, quasi three-dimensional, and full three-dimensional. Two-dimensional areal and quasi three-dimensional models assume the aquifer viewpoint, while two-dimensional profile and full three-dimensional models use the flow system viewpoint. Particle tracking codes to simulate the advective transport of contaminants can be used with any of these models. If unsaturated flow, immiscible flow, density effects, dispersion, or flow through fractures is an important feature of the conceptual model, it will be necessary to solve a different governing equation than the general saturated flow equation.

FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW and transport system) is an interactive groundwater modeling system for • three-dimensional and two-dimensional • regional and cross- sectional (horizontal, vertical or axisymmetric) • fluid density-coupled, also thermohaline, or uncoupled • variably saturated • transient or steady state • flow, groundwater age, mass and heat transport • reactive multi-species transport in subsurface water environments with or without one or multiple free surfaces. FEFLOW can be efficiently used to describe the spatial and temporal distribution and reactions of groundwater contaminants, to model geothermal processes, to estimate the duration and travel times of chemical species in aquifers, to plan and design remediation strategies and interception techniques, and to assist in designing alternatives and effective monitoring schemes. Sophisticated interfaces to GIS and CAD data as well as simple text formats are provided. The option to use and develop user-specific plug-ins via the programming interface (Interface Manager IFM) allows the addition of external code or even external programs to FEFLOW.

SUTRA (Saturated-Unsaturated TRAnsport) simulated using the finite element-based flow and solute transport model SUTRA (Saturated-Unsaturated TRAnsport) developed by Voss (1984). The model employs hybrid finite element and integrated-finite-difference method to solve the governing equations, which describe the variable-density groundwater flow and transport processes of either solute or energy in aquifer system under saturated-unsaturated conditions. SUTRA uses bi-linear quadrilateral elements in 2D and tri-linear hexahedrons elements in 3D. The implicit finite difference is predominately used for temporal, and thus for nodewise discretization of the non-flux terms (e.g. time derivatives and sources) of these balance equations. The SUTRA code solves the generic equations of Bear (1979), which cover most types of known groundwater flow and transport problems.

SEAWAT 4.0 is a coupled version of MODFLOW and MT3DMS designed to simulate three-dimensional, variable-density, saturated groundwater flow, and transport of dissolved species. The SEAWAT program is a coupled version of MODFLOW and MT3DMS designed to simulate three-dimensional, variable-density, saturated ground-water flow. Flexible equations were added to the program to allow fluid density to be calculated as a function of one or more MT3DMS species. Fluid density may also be calculated as a function of fluid pressure. The effect of fluid viscosity variations on ground-water flow was included as an option. Fluid viscosity can be calculated as a function of one or more MT3DMS species, and the program includes additional functions for representing the dependence on temperature. Although MT3DMS and SEAWAT are not explicitly designed to simulate heat transport, temperature can be simulated as one of the species by entering appropriate transport coefficients. For example, the process of heat conduction is mathematically analogous to Fickian diffusion. Heat conduction can be represented in SEAWAT by assigning a thermal diffusivity for the temperature species (instead of a molecular diffusion coefficient for a solute species). Heat exchange with the solid matrix can be treated in a similar manner by using the mathematically equivalent process of solute sorption. By combining flexible equations for fluid density and viscosity with multi-species transport, SEAWAT Version 4 represents variable-density ground-water flow coupled with multi-species solute and heat transport. SEAWAT Version 4 is based on MODFLOW-2000 and MT3DMS and retains all of the functionality of SEAWAT-2000.

SEAWAT Version 4 also supports new simulation options for coupling flow and transport, and for representing constant-head boundaries. In previous versions of SEAWAT, the flow equation was solved for every transport timestep, regardless of whether or not there was a large change in fluid density. A new option was implemented in SEAWAT Version 4 that allows users to control how often the flow field is updated. New options were also implemented for representing constant-head boundaries with the Time-Variant Constant-Head (CHD) Package. These options allow for increased flexibility when using CHD flow boundaries with the zero-dispersive flux solute boundaries implemented by MT3DMS at constant-head cells.

Modflow Flex: Visual MODFLOW (VMOD) Flex is a powerful software package that provides the tools for building three-dimensional groundwater conceptual and numerical models using raw GIS data objects. The conceptual model approach to groundwater modeling allows you to: 'Build a conceptual model of the groundwater system, prior to the simulation - Geological formations, property model, and boundary conditions are all designed outside the model grid or mesh; this allows the flexibility to adjust your interpretation of the groundwater system before applying a discretization method and converting to a numerical model. Build the model with minimal data pre-processing required - Working with grid-independent data allows you to maximize the use of your existing GIS data and incorporate physical geology and geographic conditions before designing a grid or mesh. Generate and simulate regional and local-scaled models - With support for MODFLOW-LGR, you can design local grids around areas of interest, directly within the conceptual model environment. Calculated heads from a regional model can also be used as boundary conditions for local-scaled models. Design the correct model faster - The grid-independent raw data is left intact and is not constricted by grid cells or mesh elements when modifying the data and project objective. This allows you to generate multiple numerical models from the same conceptual model. Make changes to the model data and immediately see results - The conceptual model environment provides simultaneous 2D and 3D views which are updated whenever changes to the data are made.

Visual MODFLOW: MODFLOW is a computer program that numerically solves the three-dimensional ground-water flow equation for a porous medium by using a finite-difference method. Although MODFLOW was designed to be easily enhanced, the design was oriented toward additions to the ground-water flow equation. Frequently there is a need to solve additional equations; for example, transport equations and equations for estimating parameter values that produce the closest match between model-calculated heads and flows and measured values. MODFLOW is a computer program that simulates three-dimensional ground-water flow through a porous medium by using a finite-difference method.

Modflow: MODFLOW is the name that has been given the USGS Modular Three-Dimensional Groundwater Flow Model. Because of its ability to simulate a wide variety of systems, its extensive publicly available documentation, and its rigorous USGS peer review, MODFLOW has become the worldwide standard groundwater flow model. MODFLOW is used to simulate systems for water supply, containment remediation and mine dewatering. When properly applied, MODFLOW is the recognized standard model used by courts, regulatory agencies, universities, consultants and industry. MODFLOW is a block-centered finite difference code that can simulate of the aquifer types discussed in Section 3.2. The sophistication present in MODFLOW means that the input assembly is complex, and readers are referred to the user's manual (McDonald and Harbaugh, 1988) for details. Preprocessors are available to help with data assemble and post-processors can assist in viewing the output. "MODFLOW is developed by the U.S. Geological Survey (USGS); it is a three-dimensional (3D) finite-difference groundwater model. MODFLOW is considered an international standard for simulating and predicting groundwater conditions and groundwater/surface-water interactions". MODFLOW has been used for more than 30 years, and is widely accepted for its easy

of use and flexibility in working with other programs. The code is developed in FORTRAN and runs in a DOS window taking a variety of text files as inputs, and generated both text and binary output files. The main objectives in designing MODFLOW were to produce a program that can be readily modified, is simple to use and maintain, can be executed on a variety of computers with minimal changes, and has the ability to manage the large data sets required when running large problems. The MODFLOW report includes detailed explanations of physical and mathematical concepts on which the model is based and an explanation of how those concepts were incorporated in the modular structure of the computer program. The modular structure of MODFLOW consists of a Main Program and a series of highly-independent subroutines called modules. The modules are grouped in packages. Each package deals with a specific feature of the hydrologic system which is to be simulated such as flow from rivers or flow into drains or with a specific method of solving linear equations which describe the flow system such as the Strongly Implicit Procedure or Preconditioned Conjugate Gradient. The division of MODFLOW into modules permits the user to examine specific hydrologic features of the model independently. This also facilitates development of additional capabilities because new modules or packages can be added to the program without modifying the existing ones. The input/output system of MODFLOW was designed for optimal flexibility.

MT3D: MT3D is a comprehensive three-dimensional numerical model for simulating solute transport in complex hydrogeological settings. MT3D has a modular design that permits simulation of transport processes independently or jointly. MT3D is capable of modeling advection in complex steady-state and transient flow fields, anisotropic dispersion, first-order decay and production reactions, and linear and nonlinear sorption. The new MT3D99 can also handle bio plume-type reactions, monad reactions, and daughter products. This enables MT3D99 to do multi-species reactions and simulate or assess natural attenuation within a contaminant plume. MT3D99 is linked with the USGS groundwater flow simulator, MODFLOW, and is designed specifically to handle advectively-dominated transport problems without the need to construct refined models specifically for solute transport.

MODPATH: MODPATH is a particle tracking post-processing package that was developed to compute three-dimensional flow paths using output from steady-state or transient ground-water flow simulations by MODFLOW. MODPATH uses a semi-analytic particle tracking scheme that allows an analytical expression of the particle's flow to be obtained within each finite-difference grid cell. Particle paths are computed in MODPATH by tracking particles from one cell to the next until the particle reaches a boundary, an internal sink/source, or satisfies some other termination criterion. Data input for MODPATH is a combination of data files and interactive keyboard input. Output from steady-state or transient MODFLOW simulations is used in MODPATH to compute paths for imaginary "particles" of water moving through the simulated ground-water system. In addition to computing particle paths, MODPATH keeps track of the time of travel for particles moving through the system. By carefully defining the starting locations of particles, it is possible to perform a wide range of analyses such as delineating capture and recharge areas or drawing flow.

MODELING SEAWATER INTRUSION

Seawater intrusion and saline groundwater

What is Saltwater Intrusion? :Saltwater intrusion is the movement of saline water into freshwater aquifers. Most often, it is caused by ground-water pumping from coastal wells, or from construction of navigation channels or oil field canals. When fresh water is withdrawn at a faster rate than it can be replenished, the water table is drawn down as a result.

In an unconfined aquifer that contacts the sea at the shoreline or seaward, the freshwater, which is less dense than seawater, floats as a lens-shaped layer on top of seawater, and the weight of the overlying freshwater depresses the seawater below sea level. Generally, freshwater recharge in these aquifers moves downgradient and eventually discharges to low-lying coastal areas and into the sea. But pumping out fresh ground water reduces the weight of the overlying freshwater, which in turn can decrease or even reverse the seaward flow so that seawater moves landward into the freshwater aquifer. This migration of seawater into the freshwater aquifer is known as SeaWater Intrusion (SWI).

Seawater intrusion or called "saltwater intrusion" is a specific process of groundwater contamination. This phenomenon draws special attention in the management of the coastal aquifers. As seawater intrusion progresses, a part of the aquifer close to the saline water. In such case, pumping wells operated there have to be controlled. Seawater intrusion (SWI) is a principal cause of fresh groundwater salinization in many regions of the world (Bear et al., 1999). Fresh groundwater in arid and semi-arid regions, like the Mediterranean basin, is even more threatened by this type of contamination. Indeed, such regions are characterized by a constant increase of water demand, especially for agricultural purposes, contrasting with the limited possibility of natural recharge and the high rates of evapotranspiration.

In general, hydraulic gradient from inland toward the sea exists in a coastal aquifer, because the sea serves as main outlet of freshwater from the aquifer. The seawater occupies the void space in the aquifer formation beneath the sea. This seawater zone in the aquifer extends to some distance landward from the coast below freshwater zone. Consequently, a zone of transition between freshwater and saltwater exists and it is referred as "interface zone" or more simply "interface".

Seawater intrusion associated with groundwater overdraft and lowering of groundwater levels has occurred in many of the coastal aquifers of the world. The extent of seawater intrusion varies widely among localities and hydrogeological settings. Quantifying

the extent and rate of seawater intrusion is key to sustainable management and use of groundwater resources. This involves understanding the aquifer-ocean interconnection, and distinguishing among multiple sources of saline water. The Process of Saltwater Intrusion: The figure 5 above illustrates how the process of saltwater intrusion into an aquifer system can occur. The boundary between fresh groundwater and saline groundwater is referred to as the freshwater/saltwater interface. Fresh groundwater discharging to the coast prevents the landward encroachment of saline groundwater. If this balance is upset by too much water being removed from the aquifer system from pumping, then saline groundwater can migrate landward by a process referred to as “saltwater intrusion”. If a pumping well is close to the landward migrating freshwater/saltwater interface, the potential exists for saltwater contamination in the well.

Under natural conditions (Figure 5a), the seaward movement of freshwater prevents saltwater from encroaching on freshwater coastal aquifers. This interface between freshwater and saltwater is maintained near the coast or far below the land surface. The interface actually is a diffuse zone where freshwater and saltwater mix. This zone is referred to as the zone of dispersion or the zone of transition. Groundwater pumping (Figure 5b) can reduce freshwater flow toward coastal areas and cause saltwater to be drawn toward the freshwater zones of the aquifer. Saltwater intrusion decreases freshwater storage in the aquifers, and, in extreme cases, can result in the abandonment of wells. Saltwater intrusion occurs by many ways, including lateral encroachment from coastal waters and vertical movement of saltwater near discharging wells. The intrusion of saltwater caused by withdrawals of freshwater from the groundwater system can make the resource unsuitable for use. Thus, groundwater management plans should take into account potential changes in water quality that might occur because of saltwater intrusion.

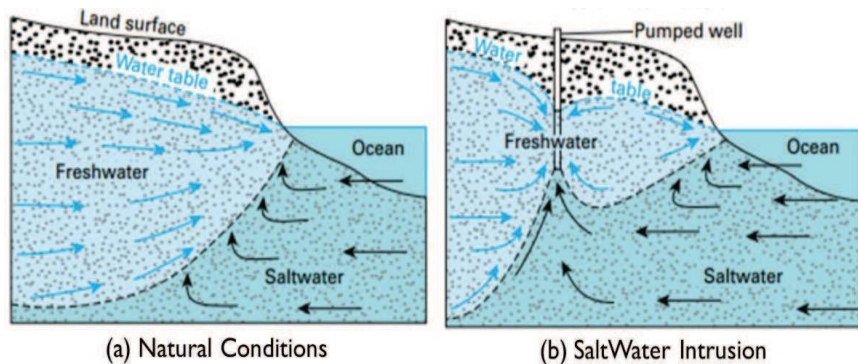


Figure 5. The Process of Saltwater Intrusion

Coastal aquifers constitute important sources of fresh water in many parts of the world, especially in arid and semiarid zones. Often, coastal areas are also heavily urbanized, a fact that makes the need for fresh water in such areas even more acute. However, the proximity and contact with the sea require special attention when planning the management of such aquifers. In fact, in many coastal aquifers, the intrusion of sea water has become one of the major constraints on groundwater management. As sea water intrusion progresses, the part of the aquifer close to the sea becomes saline, and pumping wells close to the coast start pumping saline water and have to be abandoned. Also, the area above the intruding sea water wedge is, usually, lost as a source of fresh water (by natural replenishment).

Since the famous works of Badon-Ghyben (1888) and Herzberg (1901), and the less known work of Du Commun (1828) (Konikow and Reilly, 1999), extensive research has been carried out, leading to the understanding of the mechanisms that govern sea water intrusion. The dominant factors are (1) the flow regime in the aquifer above the intruding sea water wedge, (2) the variable density, and (3) hydrodynamic dispersion. Reviews of the phenomenon of sea water intrusion, and of the research that has been carried out on this subject, both theoretical work and field and laboratory investigations, may be found in many books and publications, and will not be repeated here (Bear, 1972, 1979; Reilly and Goodman, 1985; Bear and Verruijt, 1987; Bear et al., 1999; Cheng and Ouazar, 2004). Briefly, under normal conditions in a coastal aquifer, excess fresh water (i.e., natural and artificial recharge minus pumping) is discharged into the sea. This means that close to the coast; a seaward hydraulic gradient exists in the aquifer. Due to the presence of sea water in the aquifer under the sea, a zone of contact is formed between the lighter fresh water flowing towards the sea, and the heavier sea water in the aquifer. A typical cross section, with natural replenishment, pumping, and a transition zone, is shown in Figure 6. The detailed shape of the transition zone, from fresh water to sea water, depends also on whether this zone is advancing inland or retreating. In all cases, the domain in the aquifer that is occupied by sea water has, usually, the form of an advancing or receding wedge. One should note that, like all figures that describe aquifers, these are also highly distorted figures, not drawn to scale.

Sea water and fresh water are often referred to as “miscible liquids,” although, actually, both constitute a single liquid phase—water, H₂O—with different concentrations of total dissolved matter (salt, TDM). For the sake of simplicity, we shall continue to refer to them as two liquids — fresh water and sea water. Hence, the passage from the portion of the aquifer that is occupied by the former to that occupied by the latter takes the form of a transition zone, rather than a sharp interface. Under certain

circumstances, depending on the extent of sea water intrusion and on certain aquifer properties, this transition zone, which is primarily a result of hydrodynamic dispersion of the dissolved matter, may be rather wide. Under other conditions, it may be rather narrow, relative to the aquifer's thickness, and the passage from the zone occupied by fresh water to that occupied by sea water may be approximated as a sharp interface. Often, the term "interface" is used for the iso-density surface that is midway between fresh water and sea water. In this article, the term "interface" will, sometimes, be used interchangeably with "transition zone." Under natural undisturbed conditions in a coastal aquifer, a state of equilibrium is maintained, with a steady-state sea water zone and a zone of flowing fresh water above it. The transition zone is also fed from below by sea water (Figure 6). When the discharge to the sea is reduced as a result of pumping fresh water from a coastal aquifer, water levels (or the piezometric heads in a confined aquifer) close to the sea are lowered and the transition zone rises. The sea water wedge and the transition zone advance landward, until a new equilibrium is reached. Wells that operate within the sea water wedge and the transition zone pump saline water and have to be abandoned. When pumping takes place in a well located above the transition zone, the latter upcones towards the well. Unless the well is at a sufficient distance above this zone and the rate of pumping is sufficiently small, the well will eventually pump saline water.

We should emphasize here that the geological structure and configuration of a coastal aquifer are usually much more complex than the schematic one shown in Figure 6. Often, especially close to the sea, the coastal aquifer is divided into a number of sub-aquifers by impervious or semi-pervious layers, with leakage taking place through the latter. The flow in such multilayered aquifers and the shape of the transition zone(s) are often much more complex than shown in Figure 6. As emphasized so far, a transition zone always exists between fresh water and sea water. Moreover, nowadays, we also have enough tools to handle three-dimensional (3D) transition zone models. Nevertheless, it is useful to use the "sharp interface approximation" of this zone to discuss certain basic features of sea water intrusion. Here, we shall present the concept of a sharp interface to introduce the relationship between seaward flow of fresh water and the extent of sea water intrusion. We shall do so by a simple steady-state analysis. We start by introducing the famous Ghyben–Herzberg rule that describes the relationship between the freshwater flow to the sea and the extent of sea water intrusion, say, as expressed in terms of the length of the sea water wedge.

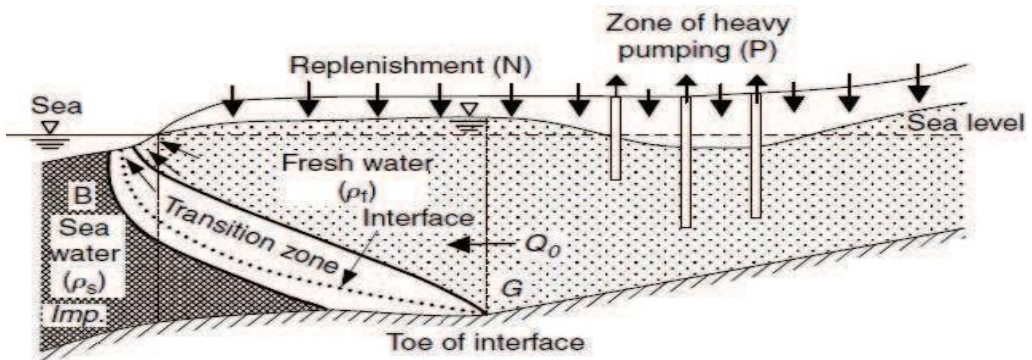


Figure 6. A typical cross section of sea water intrusion in a coastal aquifer. (Bear, 1979)

Figure 7a shows a vertical cross section normal to the coast, with a sharp interface separating the two fluids as envisaged by the Ghyben–Herzberg assumption. Essentially, Ghyben and Herzberg assumed that under steady-state conditions, a static equilibrium exists, with stationary sea water and a hydrostatic pressure distribution in the seaward-flowing fresh water. This means that the flow is (essentially) horizontal and the equipotentials (i.e., surfaces of equal piezometric head) are vertical. This, in fact, is identical to the Dupuit assumption of essentially horizontal flow in aquifers.

Gaaloul et al./ JISTEE, Vol. (v), No. 2, December 2020, pp. 116-139

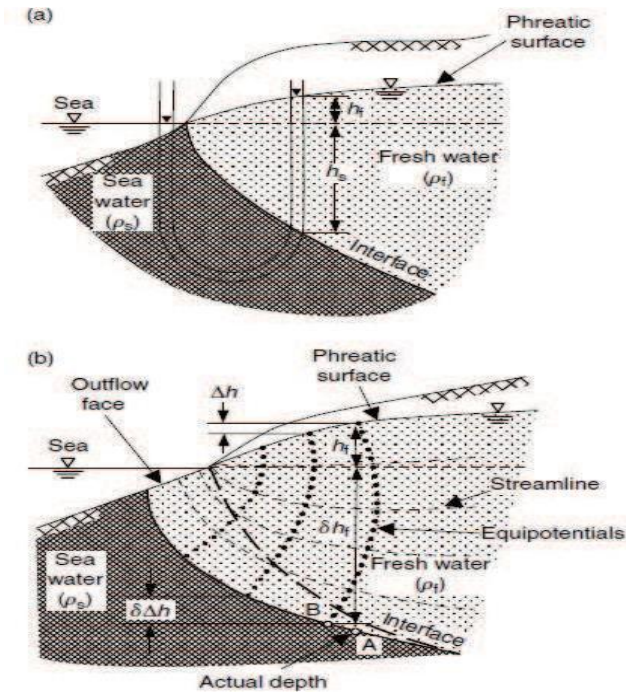


Figure 7. (a) The Ghyben–Herzberg approximation, and (b) the actual sharp interface

In the past, the sharp interface approximation was introduced, primarily, to enable relatively easy solutions, both analytical and numerical, of certain simple sea water intrusion problems of practical interest. However, nowadays, with the availability of new improved numerical techniques, including methods for coping with the nonlinearities that are inherent in the transition zone model, and with fast and large memory computers (even PCs), numerical solutions of 3D models that take the transition zone into account should not pose special difficulties. There is also no reason to limit the models to (vertical) two-dimensional (2D) flow domains. Indeed, a number of models and computer codes that consider sea water intrusion as a solute transport problem have already been developed (Sorek and Pinder, 1999). A number of typical sea water intrusion cases solved by the computer code FEAS (Zhou, 1999; Bensabat et al., 2000; Bear et al., 2001; Zhou et al., 2001, 2005).

Plenty of information on sea water intrusion into coastal aquifers (e.g., the management problem, modeling with the sharp interface approximation, analytical solutions, modeling as a variable density flow and transport problem, numerical solutions, and discussions on specific numerical codes) can be found in Bear et al. (1999).

As already mentioned in the introduction, in reality, the aquifer domain occupied by only sea water, and the aquifer domain occupied by only fresh water are separated by a transition zone. This is a consequence of the fact that the two “miscible” liquids are, actually, single liquid— water—with different concentrations of dissolved salts. The width of the transition zone is dictated by three phenomena (a) advection of fresh water towards the sea (or, under certain conditions, landward), (b) recirculation of sea water and mixed water, and (c) hydrodynamic dispersion (dispersion and molecular diffusion) in the transition zone. Across it, the salinity of the water varies from that of fresh water to that of sea water. The width of this zone grows as it is being displaced in response to changes in the flow regime and in the discharge of water to the sea. The transition zone is also fed by a flux of salt from the sea water zone.

Figure 8 shows a phreatic coastal aquifer with a transition zone between sea water and fresh water. The considered flow domain is ABCDEMFA. The new features here are that the flow and the solute transport models are coupled as the density of the liquid continuously varying in response to the changes in dissolved salt concentration, and that here we apply these models to the particular case of sea water intrusion in a coastal aquifer. We usually refer to such a model as “variable density flow and transport model.” In what follows, we shall present this model, assuming isothermal conditions. The mathematical model describing sea water intrusion in a coastal aquifer consists of (a) mass balance equation for the water, (b) flux equation for the water of variable density (Darcy’s law), (c) mass balance equation for the dissolved salts, and (d) flux equation for the dissolved salts. The first two equations are often combined as a single flow equation for the water. The last two equations may be combined to form a single mass balance equation for the dissolved salts, often referred to as the advection–dispersion equation, or the transport equation.

In addition, the complete model includes (a) constitutive equations that relate the liquid's density and dynamic viscosity to the total dissolved salt concentration, and (b) initial and boundary conditions (Bear, 1999; Zhou, 1999; Zhou et al., 2005).

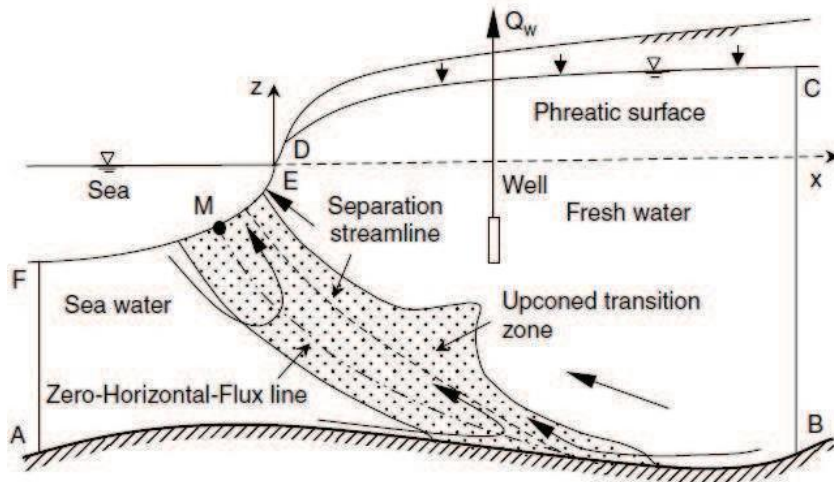


Figure 8. The transition zone with upconing in a simplified vertical cross section of a coastal aquifer, normal to the coast line

Modelling seawater intrusion (SWI) has evolved from a tool for understanding to a water management need. Yet, it remains a challenge. Difficulties arise from the assessment of dispersion coefficients and the complexity of natural systems that results in complicated aquifer geometries and heterogeneity in the hydraulic parameters.

Deterministic modeling considers that the model parameters describing the aquifer system are known and that the response of the system to stresses can be determined through the modeling effort. The most classical deterministic modeling of saltwater intrusion is based on the Ghyben-Herzberg (1901) relation of the position of the (sharp) interface between the fresh and the saline water (Todd, 1980; Bear, 1979). The Ghyben-Herzberg relation ship was conceptualized by assuming hydrostatic balance, immiscible fluids and the existence of a sharp interface between the fresh and the saltwater. Numerical saltwater intrusion models have traditionally been developed for areal- and cross-sectional simulations by assuming this sharp interface-approach between fresh- and saltwater (Todd, 1980; Merritt, 1996; Cheng and Chen, 2001). Mercer et al. (1980) were one of the first authors to present a numerical model that solves the partial differential equations describing the motion of saltwater and freshwater separated by such a sharp interface. Their 2D areal approach was based on the Dupuit approximation.

Voss (1984) developed SUTRA which simulates fluid movement and transport of either energy or solute in a subsurface environment. It employs a two-dimensional hybrid finite-element and integrated-finite-difference method. Essaid (1990) presented a quasi-three-dimensional, finite difference sharp interface model in a multiple-layered coastal aquifer system. Gangopadhyay (1993) modified the SUTRA model to a quasi three-dimensional model to simulate saltwater encroachment in a multiple-aquifer system. A preliminary groundwater flow model was constructed using the SWIP code as modified by Merritt (1994). The model solved groundwater flow equation accounting for fluid density and viscosity dependence on temporal changes of pressure, temperature and solute transport. Putti and Paniconi (1995) applied Picard and Newton linearization for the coupling between the flow and transport equations of saltwater intrusion. Craig et al. (2004) used SUTRA for an idealized evaporating Salt Lake, the results of which are compared with an equivalent laboratory Hele-Shaw cell system. Koch and Zhang (1998) investigated saltwater seepage from coastal brackish canals in Southeast Florida with the SUTRA model. Cheng and Chen (2001) developed a three-dimensional variable density flow and transport model to study saltwater intrusion. Its transport equation is solved by a coupled Eulerian-Lagrangian method. Guo and Langevin (2003) developed the SEAWAT-2000 model to simulate three-dimensional, variable- density, transient ground-water flow in porous media. The source code for SEAWAT-2000 was developed by combining MODFLOW-2000 (Harbaugh et al., 2000) and MT3DMS (Zheng and Wang, 1999) into a single program that either solves the coupled flow and solute-transport equations or uncoupled ones. Voss and Koch (2001) simulated effects of groundwater pumping on saltwater upconing in the state of Brandenburg, Germany, using several 2D and 3D flow and transport models, with and without density effects included. This, in order understands their origins, namely, if they are (1) derived from a major leaching salt dome in the study area or, (2) are just ancient regional formation water. They found that, due to the shallowness of the aquifer system, the surficial topography has a large effect on the flow and migration patterns and, especially, gives rises to upwelling flow underneath the discharge area underneath the major river in the region. Comparing models with and without density effects included, they then investigated possible saltwater upconing due this natural discharge flow pattern. Eventually the accentuated effects of a newly proposed well field on the upconing process were simulated, using both classical non- density-

dependent and density-dependent models. Based on these results, their final objective of the investigation was to provide the water agencies with a proper management plan to secure the long-term quality of the extracted groundwater in that part of the country Bakker (2003) adopted the Dupuit approximation for the simulation of three-dimensional regional seawater intrusion, but diffusion and dispersion are not taken into account. The formulation is based on a vertical discretization of the groundwater into zones of either constant density (stratified flow) or continuously varying density (piecewise linear in the vertical direction). During a simulation both the change of the elevations of the surfaces and the change in head are computed through consistent application of continuity of flow; a simple tip and toe tracking algorithm is applied to simulate the horizontal movement of the surfaces. The main advantage is the tremendous reduction of the number of cells needed for a simulation because every aquifer may be represented by a single layer of cells.

The investigation of groundwater resources in the Bangkok area started in 1969 by Camp, Dresser and McKee (1970) who reported that chloride concentrations in some wells had increased from 10 ppm in 1959 to 600 ppm in 1969 and that they were ranging from 500 ppm to thousands of ppm in depths of only about 35 m. Bashir(1978) applied a 1D finite-difference (FD) model to investigate saltwater intrusion in the Nakhon Luang aquifer. His results showed that saltwater had intruded into the aquifer from a connate water body located on the western side of Chao Praya River and also from the Gulf of Thailand. Yapa(1979) formulated a 2D FD model and investigated the saltwater intrusion in the Phra Pradaeng Aquifer and provided an approximate location for the connate water bodies. He further stated that the saltwater contamination may not only be due to seawater intrusion, but also due to vertical leakage of saline water from adjoining aquifers. Gunasekara(1980) developed a saltwater intrusion model by coupling the 2D hydrodynamic and 2D convection-diffusion equations to simulate saltwater movement in the aquifer. The model was calibrated and applied to different pumping scenarios in the Nakhon Luang aquifer to study the response of the aquifer system and the saltwater intrusion. De Mel (1982) formulated a multiple-aquifer solute transport model which takes into account the interaction between aquifers. A multi-aquifer hydrodynamic model is coupled with the solute transport model to study the cause of saltwater intrusion in the Bangkok and Phra-Padang aquifers considering intrusion caused by sea, seepage from Tha-Chin and Chao-Praya River and connate water bodies. The study results showed that the seepage of saltwater from the two rivers is not the only cause of contamination in the aquifers, but the connate water bodies entrapped in both aquifers may also be responsible. Especially, for the Phra-Padang aquifer the seepage of saline water from the overlying Bangkok clay aquifer is found to be significant in areas where the two layers interconnect as evidenced by a detailed geological investigation. Gupta and Yapa (1982) applied both analytical and numerical models for assessing the saltwater intrusion phenomenon in the Phra Pradaeng aquifer. They considered only longitudinal dispersion to assess the contamination sources and used also numerical modeling to identify the sources of contamination and to evaluate the effectiveness of the present water quality monitoring network. From their study they could conclude that saltwater intrusion in the Phra Pradaeng aquifer does not occur only from the sea but also from the infiltration of connate water bodies entrapped in sediments from the time of deposition under marine conditions, leading to a contamination of fresh water supplies. These bodies are to the west and southwest of the Chao Praya River. Either vertical leakage of saltwater from the upper aquifer of brackish-water content occurs, or some wells from which water samples had been collected were improperly grouted. Possibly both of these conditions have prevailed. Sabanathan (1984) developed a computer program which solved the partial differential equation describing the process of solute transport in the groundwater flow and coupled it to the flow model. This model was applied to the Bangkok, Phra-Pradaeng and Nakhon Luang aquifers and the results showed that the main sources of saltwater intrusion into these aquifers are the connate water body entrapped in the western side of Chao Praya river and the vertical leakage of salt water from the Chao Praya itself, especially in places where the aquifers are vertically interconnected. Furthermore, this connate water body had a very high concentration in the southwest corner of the model area. This may be because of its location closer to the sea where horizontal seawater intrusion becomes more influential. Buapeng (1985) reviewed the previous studies and the observed data in the Bangkok aquifer system. According to these publications he concludes that the groundwater is mainly withdrawn from the Phra Pradaeng, Nakhon Luang and Nonthaburi aquifers. The water levels have dropped around 50- 51m below the ground surface in the Nakhon Luang aquifer, 34-35 m in the Phra Pradaeng aquifer and 50-51m in the Nonthaburi aquifer. In the Bangkok aquifer, water was found to be salty with a chloride content ranging from 500 mg/l to several thousands' mg/l throughout most of the area. The Nakhon Luang and Nonthaburi aquifers contained freshwater in the east bank of the Chao Praya river and in the extreme westerly parts of the multiple-aquifer system. Salty water has been found almost all along the north-south direction of the western bank of the Chao Praya river. From the observations and the interpretation of the hydrochemistry of the water it was deduced that actual sea water intrusion occurs only in areas near the shore, whereas connate water entrapped under marine conditions after the time of their deposition is the predominant contaminating source of the fresh groundwater supply. Gupta (1986) applied analytical and numerical modeling procedures to simulate hydrodynamic dispersion and analyzed the saltwater contamination in the Nakhon Luang aquifer. A preliminary evaluation of the approximate locations of the contaminating sources was performed by simulating one-dimensional transport along selected streamlines. The study showed that (1) the connate water bodies were the predominant source of contamination; (2) the contaminating sources are widespread and located on the western side of the Chao Praya River and, (3) with the current pumping rates, the highest rate of intrusion is from the northwest direction towards the main pumping center. The author recommended further studies to investigate the possibility of contamination due to vertical leakage of saltwater from the Bangkok aquifer through the abandoned deep wells. Gangopadhyay (1993) modified the SUTRA to a quasi-three-dimensional model and then applied it to simulate groundwater flow and chloride movement in the Phra Pradaeng and Nakhon Luang aquifers. His study results revealed that in both aquifers the predominant saltwater front invades from the west, south-west, and north-west toward the central Bangkok region where the maximum pumped zones are located. Also, the critical regions can be identified to be in the south-west, south- east and north of the Chao Phraya River, namely, Samut Sakorn province, Samut Prakarn province

and the western part of Prathumthani province. Kokusai Kogyo (1995) has performed the most comprehensive study up to date. They investigated groundwater flow, land subsidence and saltwater intrusion in the Bangkok area and its vicinity, in order to establish a groundwater management system and to set up scenarios to mitigate land subsidence and saline water intrusion in the study area. The results of this exhaustive study revealed that, (1) according to a well inventory database, the total groundwater extraction rate in the Bangkok aquifers system amounts to around 1.5 million m³/day, (2) piezometric heads in the Phra Pradaeng, Nakhon Luang and Nonthaburi aquifers have declined from 30 m to 60 m below MSL in Pathum Thani, Samut Sakhon and from eastern Bangkok to Samut Prakarn, (3) land subsidence occurred at a rate of more than 20 mm/year underneath Bangkok metropolis, Samut Prakarn, Samut Sakhon, and the central part of Pathum Thani and parts of Nonthaburi and, (4) high chloride concentrations exist underneath the areas from Samut Sakhon to Pathum Thani along the western side of Chao Praya River and in the coastal area of Samut Prakarn. In some areas of the Phra Pradaeng aquifer these saline concentrations are over 5,000 mg/L, between 3,000 to 16,000 mg/L in the Nakhon Luang aquifer and between 2,400 to 13,000 mg/L in the Nonthaburi aquifer. Chaowiwat (1999) used a coupled version of the MODFLOW and MT3D program to simulate groundwater flow and saltwater intrusion in the Nonthaburi aquifer. The study results revealed that the total salt mass transport in the Nonthaburi aquifer is due to seawater intrusion for as much as 84%, and by vertical leakage from the Nakhon Luang aquifer by only 16 %. The author recommended that a further study should investigate the possibility of artificial groundwater recharge along the coast of gulf of Thailand to remedy seawater intrusion which, as stated, is one of the major objectives of the present Ph.D. thesis.

Density effects on solute transport Experimental effects of the impacts of density dependence on the migration of a contaminated plume have been discovered by Paschke and Hoopes (1984) who investigated the leaching of a sodium chloride plume of very high concentration in a sand tank model. Schincariol and Schwartz (1990) investigated the mixing of a variable density plume in a porous medium, Hayworth et al. (1991), show significant vertical plume movements for already relatively low concentrations.

The observed plume delineations of these experiments also disclosed several significant features of hydrodynamic instability and viscous fingering phenomena in a porous medium. Koch (1992) investigated numerically interface instabilities for unfavorable density contrasts between (a) two superposed immobile layers and (b) at boundaries of advected solute plume which is of some environmental interest. The numerical results showed, at least qualitatively, agreement with some of the predictions of a theoretical scaling analysis and with experiments. He disclosed that the onset and evolution of these interface instabilities is mostly affected by the competition of the unfavorable density contrast (destabilizing) and the hydrodynamic dispersion (destabilizing). The latter and here especially the transversal dispersion governs morphology and growth of the finger regime in a non-deterministic way. The author indicated, additionally, that the problem of interface instabilities has to be treated as a classical nonlinear dynamical system. Koch and Zhang (1992) illustrated that the migration of a miscible solute phase is not only due to forced advection by hydraulic gradients and to dispersion, but is also driven by free convective motions due to the density differences. Whether density effects are important or not depends on a variety of hydraulic parameters of the aquifer model. Furthermore, they found that the combined influence of the various model parameters above can be very different, depending on whether the plume is still near the source or has already extended into the region far away from it. In some cases, variable density might have an effect on the plume migration for even moderate density contrasts of ~ 0.3% (which corresponds to a concentration of ~ 2160 mg/l NaCl). Again, hydrodynamic dispersion tends to reduce the density effects.

Koch (1993) investigated numerically the dynamics of viscous fingering arising at a miscible interface in a unstably density-stratified fluid in porous media. The study results unveiled that the onset, evolution and morphology of the instability are mostly affected by the dispersivity of the porous medium. The analysis of S-curves of the vertical plume movement demonstrated that the onset of instability is mainly governed by the longitudinal dispersion, whereas transversal dispersion is more responsible for the dynamics of the mature fingers. The finger instabilities show the typical behavior of a nonlinear dynamical system whose response depends essentially on the initial conditions imposed. Koch (1994) extended his earlier study to include stochastic heterogeneity of the porous media. Both a deterministic and a random heterogeneous (stochastic) porous medium are considered. The results of the simulations showed that unlike in a homogeneous porous medium where the evolution and the morphology of finger instabilities are mostly affected by the initial perturbation, for a random medium it is its stochastic realization that determined the fate of the fingers; i.e., the medium has an ordering effect on the finger pattern and fingers are essentially channeled through local sections of reduced hydraulic conductivity. Koch and Zhang (1998) modeled the phenomenon of density-driven vertical saltwater intrusion from a brackish, tidally-affected open sea-canal in southeast Florida with the density-coupled groundwater flow and transport model SUTRA.

Their results showed that brackish canal water intrusion depends on the adjacent groundwater table elevation: lowering the latter during a dry season may trigger the seepage process which then becomes essentially irreversible. Moreover, the authors reveal a significant influence of the short-term tidal fluctuations on the long-term dispersion of the vertical saltwater plume in the aquifer. Then possible mitigation plans were simulated which show that a minimum of threshold water level must be maintained in the well field during dry seasons. However, raising the water table can not be achieved by artificial injection of reclaimed wastewater, but may be succeeded by placing a freshwater canal along the brackish tidal canal. Voss and Koch (2001) modeled the effects of groundwater pumping on saltwater upconing in the state of Brandenburg, Germany, using several 2D flow and transport models, with and without density effects included. A sensitivity study of the hydrodynamic dispersion and of the hydraulic anisotropy of the aquifer was carried out. The model results revealed that density effects are diminishing for large values of the dispersivity and high anisotropy ratios. Koch and Starke (2001; 2002; 2003; 2006) investigated the macro-dispersion in density- dependent transport in a heterogeneous medium by both experiments and numerical modeling. Their results showed that both experiments

and numerical models exhibit for the same density contrast a larger sinking of the mixing layer with decreasing inflow velocity and, at the same time, an apparent increase of the lateral dispersion coefficient DT.

All of these studies above do, indeed, indicate that density effects on solute transport are, in principal not to be dismissed. Even so, as density-dependent flow and transport modeling poses, at least in many practical applications, a tremendous burden on the computational resources available, the question still remains as for their indispensable need in the every-day modeling of groundwater quantity and quality in a particular real aquifer situation, i.e. to forgo exact representation of the physical system dynamics for computational expediency. The present thesis will attempt to provide some further arguments in this debate.

MODELING GROUNDWATER FLOW AND POLLUTION

The French engineer Henry Darcy (Figure 9) performed experiments on the filtration of water through sand columns. His finding that the rate of flow through a sand column is proportional to the loss of head appeared in an appendix to his treatise on the public fountains of the city of Dijon (Darcy, 1856). Henry Philibert Gaspard Darcy (1803–1858) was a mechanical and hydraulic engineer who was, among others, concerned with water-supply systems. His treatise on the successful design and construction of Dijon's public water supply, published in 1856, contains the results of his famous experiments on ground water percolation through sand filters. From this study he derived his well-known linear law of groundwater flux and hydraulic gradient, which became the foundation of quantitative groundwater hydrology. This law of groundwater flow through porous media shows similarity with the Hagen–Poiseuille equation for laminar viscous flow through small-diameter pipes, developed earlier by the French physician Jean Louis Poiseuille (1799–1869) and the German hydraulic engineer Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen (1797–1884). Darcy, who had a sound theoretical background, was certainly aware of this analogy (Biswas, 1970). Other important contributions to water science at the beginning of the 19th century were discovery of the composition of the water molecule, H₂O, by J ns Jacob Berzelius (1779–1848), and the fundamental law of evaporation by diffusive and turbulent transport of vapor, formulated in 1804 by the founder of atomic chemistry, John Dalton (1766–1844).



Figure 9 Henry Philibert Gaspard Darcy (1803–1858). Portrait by Perrodin, Collection of the Bibliothèque Municipale de Dijon.

A quantitative approach to groundwater hydrology began with the previously mentioned work of the French engineer Henry Darcy (Figure 9). In the framework of his ingenious work for the Dijon central drinking water supply system, he carried out percolation experiments using purification filters as depicted in Figure 10. From these investigations, he derived his well-known law for the linear relation between hydraulic gradient and groundwater flux, which he published as an appendix to his monumental treatise on the water-supply scheme (Darcy, 1856). This work not only revealed Darcy's technical skills, but also accounted for his thorough understanding of the role of topography and geology for the groundwater conditions and their meaning for his water-supply scheme (Brown et al., 2003). The French engineer Henry Darcy performed experiments on the filtration of water through sand columns. His finding that the rate of flow through a sand column is proportional to the loss of head appeared in an appendix to his treatise on the public fountains of the city of Dijon (Darcy, 1856). Figure II shows the original set up utilized by Darcy and Figure I2 shows some of his experimental results as plotted by Hubbert (1956) from Darcy's data. Darcy's law states that the volumetric flow rate, Q [L^3T^{-1}], across a gross area A of a formation with a hydraulic conductivity K [LT^{-1}], under a hydraulic gradient $i = -\frac{dh}{ds}$ in the s direction is given by

$$Q = qA = -kA \frac{\partial h}{\partial s} = KA i = \frac{k \rho g}{\mu} A i \quad (I)$$

where q is a conceptual velocity called the specific discharge or flow rate per unit area [LT⁻¹] also known as the Darcy velocity, μ is the dynamic viscosity, and k is the intrinsic permeability. The hydraulic head, h , is the sum of the elevation head z and the pressure head p/γ_w . The minus sign in Equation (1) indicates that the flow takes place from high to low head, namely in the direction of decreasing head. The pore velocity i is given by $v = q/n_e$, where n_e is the effective porosity, namely the porosity available for the fluid flow, and v is the average flow velocity in the pores, usually called the seepage velocity.

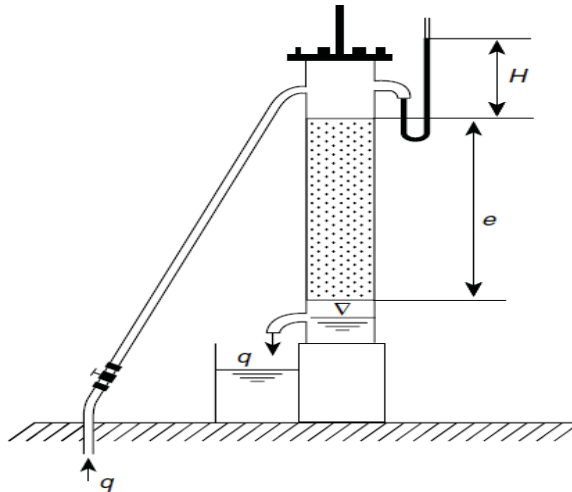


Figure 10 Principle of Darcy's percolation experiment with outflow under atmospheric (=zero) pressure. The results are formulated for the case that the lower boundary of the column is chosen as reference elevation level, so that elevation head and pressure head are both zero at the outflow surface.

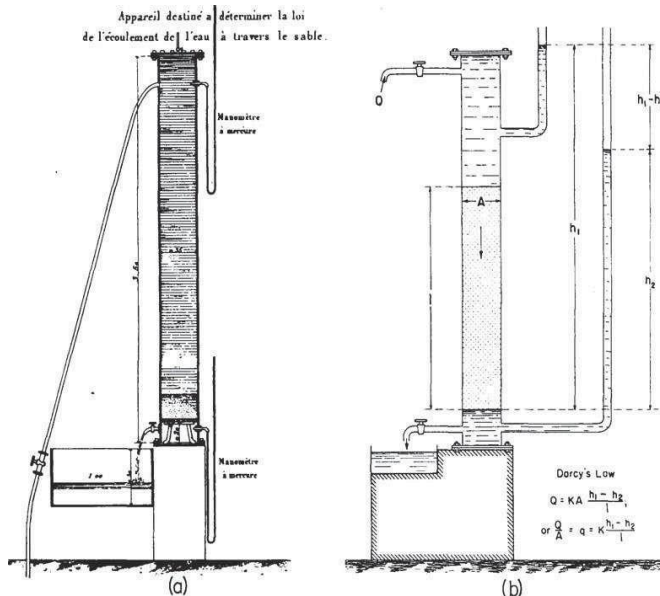


Figure 11 (a) Darcy's original apparatus with mercury manometer and (b) equivalent apparatus with water manometers. (Hubbert, 1953).

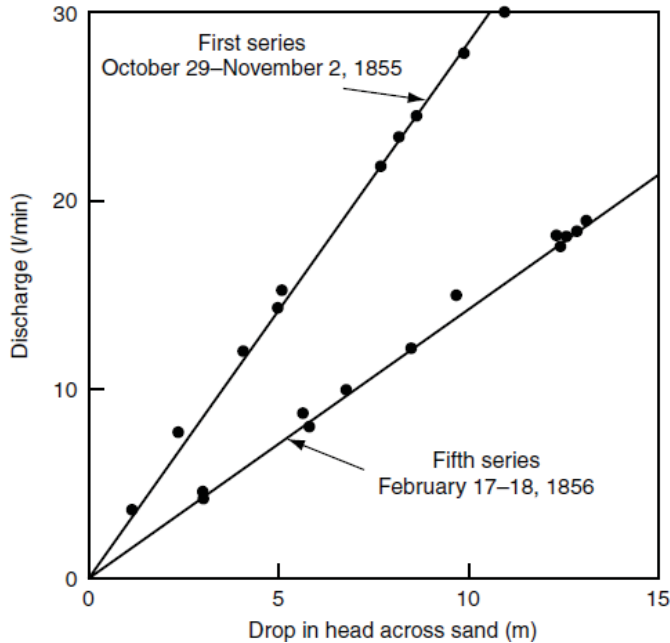


Figure 12 Darcy's data plotted by Hubbert. (Hubbert, 1956.)

A groundwater model is a representation of reality and, if properly constructed, it can be a valuable predictive tool used for management of groundwater resource. A mathematical model simulates groundwater flow indirectly by means of governing equation that represents the physical processes that occur in the system, together with equations that describe heads or flows along the boundaries of the model. For time-dependent problems, an equation describing the initial distribution of heads in the system is also needed. Differential equations that govern the flow of groundwater flow can essentially represent the groundwater flow system derived from the basic principles of groundwater flow hydraulics.

The three dimensional movement of groundwater of constant density through porous earth media may be described by the partial – differential equation (MODFLOW, McDonald and Harbaugh, 1988): The main flow equation for saturated groundwater flow is derived by combining a water balance equation with Darcy's law, which leads to a general form of the 3-D groundwater flow governing equation:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - w = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

Where

K_{xx} , K_{yy} and K_{zz} are values of hydraulic conductivity along the x, y and z coordinate axes (LT-I),
 h is the potentiometric head (L),
 w a volumetric flux per unit volume and represents sources and/or sinks of water (T-I),
 S_s is the specific storage coefficient of the porous media (L-I)
 t is the time (T).

Under steady state conditions, Eq. (2) is equal to zero as continuity requires that the amount of water flowing into a representative elemental volume is equal to the amount flowing out, this leads to Eq. (3)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + w = 0 \quad (3)$$

In transient conditions the general flow equation is formulated by applying the law of conservation of mass over an elemental volume of an aquifer situated in the flow field in function of time. Continuity requires that the net inflow into the elemental

control volume must be equal to the rate at which water is accumulating within the volume under investigation, which is outflow minus inflow equals change in storage. The change in storage is represented by the specific storage, or specific storage coefficient, S_s , which is defined as the volume of water released from storage per volume of soil for a unit decline in hydraulic head. The flow of groundwater is taken to be governed by Darcy's law, which states that the velocity of the flow is directly proportional to the hydraulic gradient. A similar statement in an electrical system is Ohm's law and in a thermal system, Fourier's law. The grandfather of all such relations is Newton's law of motion. Table I presents some other points of similarity. Prior to 1856, the formidable nature of the flow through porous media defied rational analysis. In that year, Henry Darcy published a simple relation based on his experiments on the flow of water in vertical sand filters in Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, namely.

$$v = ki = -k \frac{dh}{ds} \quad (4)$$

Table I Some Similarities of Flow Models

Form of Energy	Name of Law	Quantity	Storage	Resistance
Electrical	Ohm's law	Current (voltage)	Capacitor	Resistor
Mechanical	Newton's law	Force (velocity)	Mass	Damper
Thermal	Fourier's law	Heat flow (temperature)	Heat capacity	Heat resistance
Fluid	Darcy's law	Flow rate (pressure)	Liquid storage	Permeability

Equation (4), commonly called Darcy's law, demonstrates a linear dependency between the hydraulic gradient and the discharge velocity v . The discharge velocity, $v = nv'$, is the product of the porosity n and the seepage velocity v' . The coefficient of proportionality k in Equation (4) is called by many names depending on its use; among these are the coefficient of permeability, hydraulic conductivity, and permeability constant. As shown in Equation (4), k has the dimensions of a velocity. It should be carefully noted in this equation that flow is a consequence of differences in total head and not of pressure gradients. This is demonstrated in Figure I3 where the flow is directed from A to B, even though the pressure at point B is greater than that at point A. Defining Q as the total volume of flow per unit time through a cross-sectional area A , Darcy's law takes the form

$$Q = Av = Aki = -Ak \frac{dh}{ds} \quad (5)$$

Darcy's law offers the single parameter k to account for both the characteristics of the medium

and the fluid. It has been found that k is a function of γ_w , the unit weight of the fluid, μ , the coefficient of viscosity, and n , the porosity, as given by

$$K = C \frac{\gamma_w n}{\mu} \quad (6)$$

Where C (dimensionally an area) typifies the structural characteristics of the media independent of the fluid properties. The principal advantage of Equation (6) lies in its use when dealing with more than one fluid or with temperature variations. When employing a single relatively incompressible fluid subjected to small changes in temperature, such as in groundwater and seepage-related problems, it is more convenient to use k as a single parameter. Some typical values for k are given in Table 2.

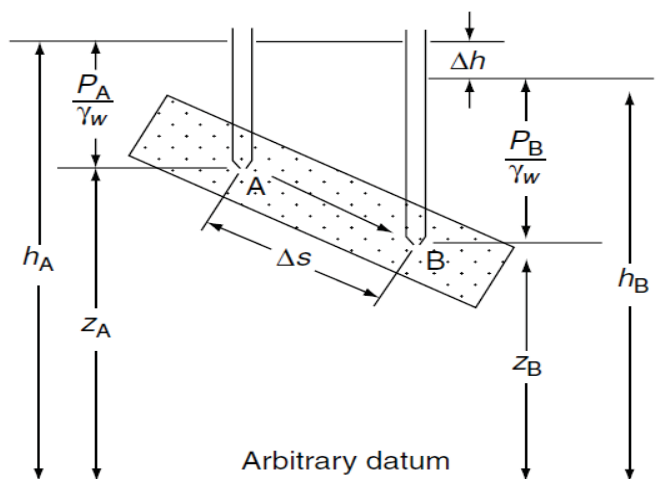


Figure 13. Heads in Bernoulli's equation

Although Darcy's law was obtained initially from considerations of one-dimensional macroscopic flow, its practical utility lies in its generalization into two or three spatial dimensions. Accounting for the directional dependence of the coefficient of permeability, Darcy's law can be generalized to where k_s is the coefficient of permeability in the "s" direction, and v_s and $\frac{\partial h}{\partial s}$ are the components of the velocity and the hydraulic gradient, respectively, in that direction.

Table 2 Some Typical Values of Coefficient of Permeability

Soil type	Coefficient of Permeability k , cm/sec
Clean gravel	1.0 and greater
Clean sand (coarse)	1.0–0.01
Sand (mixtures)	0.01–0.005
Fine sand	0.05–0.001
Silty sand	0.002–0.0001
Silt	0.0005–0.00001
Clay	0.000001 and smaller

In differential form, Darcy's law is expressed as: $q = -K \cdot \text{grad}(h)$

where q is the groundwater flux (LT⁻¹) K is the conductivity tensor (LT⁻¹) $\text{grad}(h)$ is the gradient operator.

This equation clearly shows that the cause of groundwater movement is the difference in the hydraulic potential. The potential is a function of all three space coordinates, that is $h = h(x, y, z)$, the rate of change of head with position giving the gradient, which multiplied by the conductivity yields the groundwater flux. The hydraulic conductivity is represented by a second order tensor that takes into account anisotropic conditions. Usually, anisotropy is only considered in the vertical and horizontal direction, hence.

Where:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Where q_x, q_y, q_z are the three components of the flux, and K_x, K_y, K_z the hydraulic conductivity values in the horizontal (x,y) and vertical (z) direction. In case of isotropic conditions, $K_x = K_y = K_z$ each component of q is the same scalar multiple K of the corresponding component of $-\text{grad}(h)$, such that the vectors q and $-\text{grad}(h)$ both point in the same direction.

A spatial discretization of an aquifer system with a mesh of blocks called cells, the locations of which are described in term of rows, columns and layers. An i, j, k indexing system is used. For a system consisting of "nrow" rows, "ncol" column, and "nlay" layers, i is the row index, $i = 1, 2, \dots, \text{nrow}$; j is the column index, $j = 1, 2, \dots, \text{ncol}$; and k is the layer index, $k = 1, 2, \dots, \text{nlay}$ (Figure I4). Finite difference formulation The groundwater flow equation in finite difference form follows from the application of the continuity equation: the sum of all flows into and out of the cell must be equal to the rate of change in storage within the cell. Under the assumption that the density of groundwater is constant, the continuity equation expressing the balance of flow for a cell is

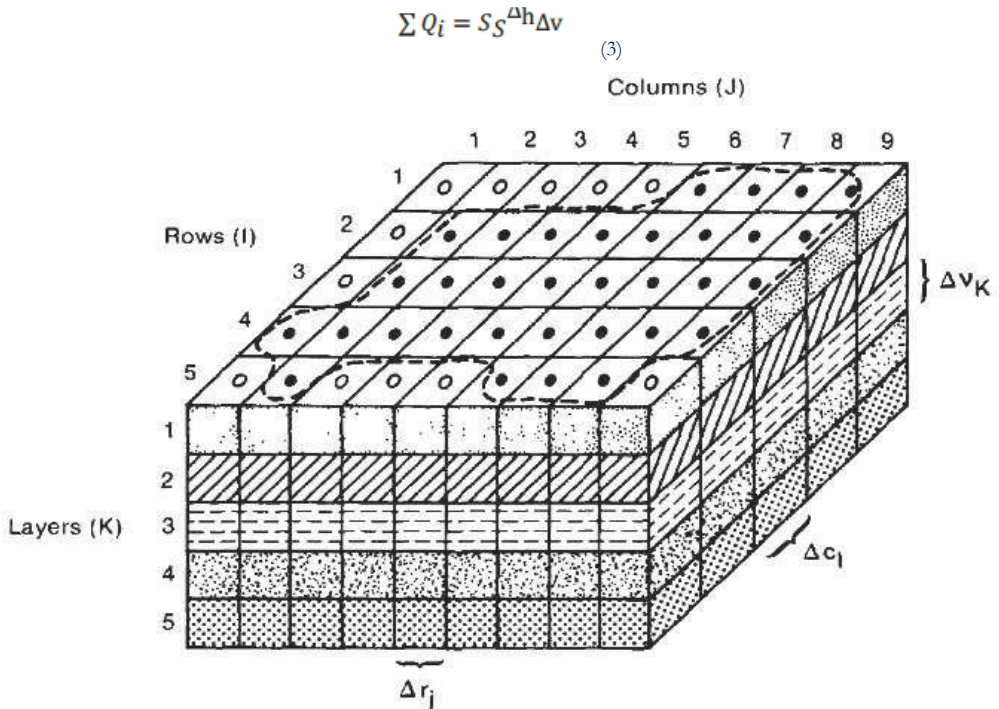


Figure 14. A discretized hypothetical aquifer system; ----- aquifer boundary, • active cell, ○ inactive cell, Δr_j dimension of cell along the row direction; subscript (j) indicates the number of the column, Δc_l dimension of cell along the column direction; subscript (l) indicates the number of row, and Δv_k dimension of the cell along the vertical direction; subscript (k) indicates the number of the layer.

where Q_i is a flow rate into the cell (L^3T^{-1}); S_S has been introduced as notation for specific storage in the finite difference formulation; its definition is equivalent to that of S_s in equation (3)—i.e., it is the volume of water which can be injected per unit volume of aquifer material per unit change in head (L^{-1}); Δv is the volume of the cell (L^3); and Δh is the change in head over a time interval of length Δt .

Figure 15 depicts a cell i, j, k and six adjacent aquifer cells, $i-1, j, k$; $i+1, j, k$; $i, j-1, k$; $i, j+1, k$; $i, j, k-1$; and $i, j, k+1$. To simplify the following development, flows are considered positive if they are entering cell i, j, k ; and the negative sign usually incorporated in Darcy's law has been dropped from direction from cell $i, j-1, k$ (Figure 5.16), is given by Darcy's law as

$$q_{i,j-\frac{1}{2},k} = KR_{i,j-\frac{1}{2},k} \Delta c_l \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (4)$$

where, $h_{i,j,k}$ is the head at node i,j,k and $h_{i,j-1,k}$ that at node $i,j-1,k$; $q_{i,j-1/2,k}$ is the volumetric fluid discharge through the face between cells i,j,k and $i,j-1,k$ (L3T-I); $KR_{i,j-1/2,k}$ is the hydraulic conductivity along the row between nodes i,j,k and $i,j-1,k$ (LT-I); O_{ci} is the area of the cell faces normal to the row direction; and $\Delta x_{j-1/2}$ is the distance between nodes i,j,k and $i,j-1,k$ (L).

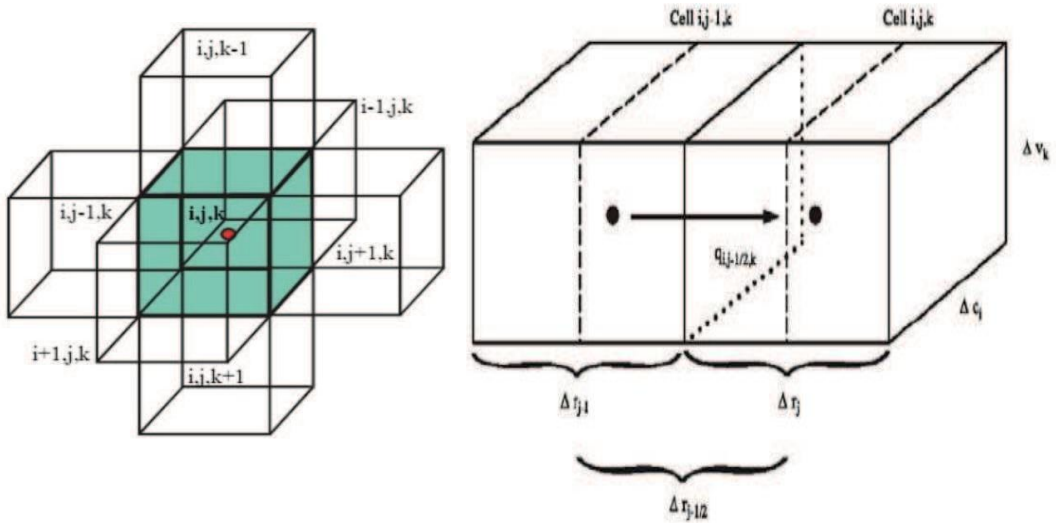


Figure 15. Cell i, j, k and indices for the six adjacent cells.

References

1. Badon-Ghyben, W. (1888) Nota in Verband met de Voorgenomen Putboering Nabij Amsterdam (Notes on the probable results of well drilling near Amsterdam). Tijdschr. Kon. Inst. Ing., The H Darcy, H.P.G. (1856) Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. V. Dalmont, Paris.
2. Bakker, M. (2003), A Dupuit formulation for modeling seawater intrusion in regional aquifer systems, Water Resour. Res., vol. 39, no.5, SBH12-I - SBH12-10.
3. Bashir, A. (1978), Saltwater encroachment in Bangkok aquifers, M. Eng thesis, AIT, Bangkok, Thailand.
4. Bear, J. (1972) Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier Publishing Company: New York, 764pp. Bear, J., (1979) Hydraulics of groundwater. New York: McGraw-Hill Book Co., 1979.
5. Bear, J. and Verruijt, A. (1987) Modeling groundwater flow and pollution: Reidel Publishing Company: Dordrecht, the Netherlands, 414pp.
6. Bear, J., Cheng, A.H.-D., Sorek, S., Ouazar, D., Herrera, I. (1999) Seawater Intrusion in Coastal Aquifers- Concepts, Methods Practices. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/ Boston/ London, 625 p.
7. Bear, J., Zhou, Q., and Bensabat, J. (2001) Three-dimensional simulation of seawater intrusion in heterogeneous aquifers, with application to the coastal aquifer of Israel, Proc. First Inter. Conf. on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers — Monitoring, Modeling and Management, Essaouira, Morocco, April 23–25
8. Bensabat, J., Zhou, Q., and Bear, J. (2000) An adaptive pathline-based particle tracking algorithm for the Eulerian–Lagrangian method. Adv. Water Resour. 23:383–397.
9. Biswas, A.K. (1970) History of Hydrology. North-Holland, Amsterdam. I–336.
10. Brown, G.O., Garbrecht, J.D., and Hager, W.H. (Eds.). (2003) Henry P.G. Darcy and Other Pioneers in Hydraulics. Am. Soc. Civil Engineers, Reston, Virginia
11. Buapeng, S. (1985), Saltwater Intrusion in Bangkok Metropolis, presented at the Unesco Regional Workshop on Salt- Water Intrusion in Large Coastal Cities, Manila, the Philippines, 16-20 December 1985.
12. Camp Dresser and McKee (1970), Water Supplies and Distribution, Metropolitan Bangkok, Thailand, Master Plan report presented to Metropolitan Waterworks Authority.
13. Chaowiwat, W. (1999), Simulation of Saltwater Intrusion in Nonthaburi Aquifer, M. Eng thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
14. Cheng, A.H.-D. and Ouazar, D. (2004) Coastal Aquifer Management: Monitoring, Modeling, and Case Studies. Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, FL, p. 280.
15. Cheng, J.M. and C.X. Chen (2001), Three-dimensional modeling of density-dependent saltwater intrusion in multilayered coastal aquifers in Jahe River Basin, Shandong province, China, Ground Water, vol.39, no.1, p.137-143.

16. Cheng, R.T., (1978) Modeling of hydraulic systems by finite-element methods. In: Advances in Hydrosience, vol. II. New York Academic Press, pp. 207e284.
17. Craig T. Simmons, Kumar A. Narayan, Juliette A. Woods, Andrew L. Herczeg (2002), Groundwater flow and solute transport at the Mourquong saline –water disposal basin, Murray Basin, southeastern Australia, *Hydrogeology Journal*, vol.10, no.2., p.278-295.
18. De Mel, W.S.R. (1982), Development and application of a multi-aquifer solute transport model, M. Eng thesis, AIT, Bangkok, Thailand.
19. Dehotin, J., Vazquez, R.R., Braud, I., Debionne, S., Vailet, P., (2011) Modeling of hydrological processes using unstructured and irregular grids-2D groundwater application. *Journal of Hydrologic Engineering* 16 (2), 108e125. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000296](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000296).
20. DHI-WASY, (2013) FEFLOW 6.2 User Manual. DHI-WASY GmbH, Berlin Germany, 202 p. http://www.feflow.com/uploads/media/users_manual62.pdf.
21. Diersch, H.-J.G., (2014) FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer, 996 p.
22. Du Commun, J. (1828) On the cause of fresh water springs, fountains, etc. *Amer. J. Sci. Arts* 14:174–175.
23. Essaid H.I. (1990), A multilayered sharp interface model of coupled freshwater and saltwater flow in coastal systems: model development and application. *Water Resour Res* 26 (7), 1431–1454.
24. Gaaloul N., (1992) Modélisation mathématique du système aquifère multicouche Application : Bassin Nord-Aquitain (Oligocène - Eocène). Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux I en Sciences et Techniques de l'Eau, en collaboration avec le Bureau de Recherches Géologiques et Minières et le Centre d'Hydrogéologie de la faculté des Sciences de Bordeaux I. Novembre 1992, 283 pages. Ed. BRGM, No 92 BORI 0614. Collection Etudes et Thèses 1992. <http://cat.inist.fr/?aModele=aafficheN&cpsidt=151360>
25. Gaaloul N., Plakias A., Kallioras A., Schuth C., Marinos P., (2012) Simulation of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Forty-Five-Years exploitation in an Eastern Coast Aquifer in NE Tunisia. *The Open Hydrology Journal*, V 6, 31-44.
26. Gangopadhyay, S. (1993), Solute Transport Modeling using SUTRA in a Multiaquifer System, M.Eng thesis, WA-13- 3, AIT, Pathum Thani, Thailand
27. Gunasekara, S.P. (1980), Solute transport modeling for Nakhon Luang aquifer in Bangkok, M.Eng thesis, AIT, Bangkok, Thailand.
28. Gupta, A.D. (1986), Simulated Salt-Water Movement in the Nakhon Luang Aquifer, Bangkok, Thailand, *Groundwater*, 23 (4), 512-522.
29. Gupta, A.D. and P.N.D.D Yapa. (1982), Saltwater Encroachment in an Aquifer: A Case Study, *Water Resources Research*, 18 (3), 546-556.
30. Harbaugh, A.W., (2005) MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey Modular Ground-water Model e the Ground- water Flow Process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods. 6-A16. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/tm6A16>.
31. Harbaugh, A.W., (1995) Direct Solution Package Based on Alternating Diagonal Ordering for the U.S. Geological Survey Modular Finite-difference Ground-water Flow Model. U.S. Geological Survey. Open-File Report 95e288, 46 p. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr95288>.
32. Harbaugh, A.W., E.R. Banta, M.C. Hill, and M.G. McDonald (2000), MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.
33. Hayworth, J.S., O. G ven, J.H. Dane, and M. Oostrom (1991), Experimental studies of dense solute plumes in porous media, *EOS Trans. Amer. Un.*, v.72, p130.
34. Herzberg A (1901) Die wasserversorgung einiger Nordseebäder .The water supply on parts of the North Sea Coast; in German. *J. Gasbeleucht, Wasserversorg* 44:815–819, 842–844
35. Hubbert, M.K. (1953) Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions, *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*, 37, 1954–2026.
36. Hubbert, M.K., (1956) Darcy's law and the field equations of flow of underground fluids, *Transactions, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 297, 222–239. Dallas, TX.
37. Huyakorn, P.S., Pinder, G.F., (1983) *Computational Methods in Subsurface Flow*. Academic Press, 473 p.
38. Istok, J., (1989) Groundwater modeling by the finite element method, American. Geophysical Union. *Water Resources Monograph* 13, 495 p.
39. Koch, M. (1992), Numerical simulation of finger instabilities in density and viscosity dependent miscible solute transport, In: *Computational Methods in Water Resources IX* , Vol. 2, *Mathematical Modeling in Water Resources*, Russel, T.F., R.E. Ewing, C.A. Brebia, W.A. Gray and G.F. Pinder (eds), pp. 155 - 162, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK.
40. Koch, M. (1994), The dynamics of density driven finger instabilities in stochastically heterogenous porous media, In: *Computational Methods in Water Resources X*, A. Peters, G. Wittum, B. Herrling, U. Meissner, C.A. Brebbia, W.G. Gray, and G.F. Pinder (eds), Vol. I, pp. 481 - 488, Kluwer Academic Publishers , Dordrecht.
41. Koch, M. and B. Starke (2002), Experimental and numerical investigation of macrodispersion of density-dependent flow and transport in stochastically heterogeneous media, In: *Proceedings of International Groundwater Symposium 2002*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, March 25-28.

42. Koch, M. and B. Starke (2003), Experimental and numerical investigation of macrodispersion of density- dependent transport in stochastically heterogeneous media: Effects of boundary conditions and high concentrations In: Proceedings of Second International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers, Mérida, Yucatán, México, March 30 - April, 2, 2003.
43. Koch, M. and B. Starke (2006), Laboratory Experiments and Monte Carlo Simulations to Validate a Stochastic Theory of Tracer- and Density-Dependent Macrodispersion , In: Proceedings of CMWR XVI - Computational Methods in Water Resources , Copenhagen, Denmark, June 19-22.
44. Koch, M. and B. Starke (2001), Experimental and numerical investigation of macrodispersion of density-dependent flow and transport in stochastically heterogeneous media, In: Proceedings of the first International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers, Essaouira, Morocco, April 23-25.
45. Koch, M. and G. Zhang (1992), Numerical simulation of the migration of density dependent contaminant plumes, Ground Water, 5, 731 - 742.
46. Koch, M. and G. Zhang (1998), Numerical modeling and management of saltwater seepage from coastal brackish canals in southeast Florida, In: Environmental Coastal Regions, C. A. Brebbia (ed.), pp. 395-404, WIT Press, Southampton, UK.
47. Koch, M., (1993) Modeling the dynamics of finger instabilities in porous media: Evidence for fractal and nonlinear system behavior, In: Advances in Hydrosience & Engineering, Vol. I, Part B, Wang, Sam S.Y. (ed.), pp. 1763
48. Kokusai Kogyo Co., Ltd. (1995), The Study on Management of Groundwater and Land Subsidence in the Bangkok Metropolitan Area and its Vicinity, Final and Main Report, which was funded by JICA and presented to Department of Mineral Resources, Department of Industry and Public Works Department, Ministry of Interior, Thailand.
49. Konikow, L. F., and Reilly, T. E. (1999) Seawater intrusion in the United States. In: Bear, J., Cheng, A., Sorek, S., Ouazar, D., and Herrera, A. (eds), Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Concepts, Methods and Practices, Book Series: Theory and Application of Transport in Porous Media. Kluwer Academic Publishers: The Netherlands. 14, 559-590
50. Konikow, L.F., Reilly, T.E., (1998) Groundwater modeling. In: Delleur, J.W. (Ed.), The Handbook of Groundwater Engineering. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 20-1e20-39.
51. Lin, J.; Snodsmith, J.B.; Zheng, C.; Wu, J. (2009) A modeling study of seawater intrusion in Alabama Gulf Coast, USA. Environ. Geol. 57, 119–130.
52. McDonald, M.G., and A.W. Harbaugh (1988), A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1, 586 p.
53. McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., (1988). A Modular Three-dimensional Finite- Difference Ground-water Flow Model. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations. 06-A1, 576 p. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/twri06A1>.
54. Mercer JW, Larson SP and Faust CR (1980) Simulation of saltwater interface motion. Ground Water 18 (4), 374– 385.
55. Merriitt, M.L. (1994), A rewetting approximation for a simulator of flow in a surficial aquifer overlain by seasonally inundated wetlands: Ground Water, 32 (2), 286-292.
56. Merriitt, M.L. (1996), Simulation of the water table altitude in the Biscayne aquifer, southern Dade County, Florida, water years 1945-89: U.S Geological Survey Water-Supply Paper 2458, I48 p.
57. Merriitt, M.L. (1996), Simulation of the water table altitude in the Biscayne aquifer, southern Dade County, Florida, water years 1945-89: U.S Geological Survey Water-Supply Paper 2458, I48 p.
58. Narasimhan, T.N., Witherspoon, P.A., (1976) An integrated finite-difference method for analyzing fluid flow in porous media. Water Resources Research 12 (1), 57e64. <http://dx.doi.org/10.1029/WR012i001p00057>.
59. Panday, S., Langevin, C.D., Niswonger, R.G., Ibaraki, M., Hughes, J.D., (2013) MODFLOW-USG Versions I: An Unstructured Grid Version of MODFLOW for Simulating Groundwater Flow and Tightly Coupled Processes Using a Control Volume Finite-difference Formulation. U.S. Geological Survey Techniques and Methods. 6-A45, 66 p. <http://pubs.usgs.gov/tm/06/a45/>.
60. Paschke, N.W. and J. Hoopes (1984), Buoyant contaminant plumes in groundwater, Water Resour. Res., 20, II83-II92.
61. Pinder, G.F., Gray, W.G., (1976) Is there a difference in the finite element method? Water Resources Research 12 (1), 105e107. <http://dx.doi.org/10.1029/WR012i001p00105>.
62. Pinder, G.F., Gray, W.G., (1977) Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology. Academic Press, San Diego, CA, 295 p.
63. Putti, M. and C. Paniconi (1995), Picard and Newton linearization for the coupled model of saltwater intrusion in aquifers, Advances in Water Resources, 18 (3), 159-170.
64. Reilly TE. (1993) Analysis of groundwater systems in freshwater-saltwater environments. In: Alley WM, Ed. Regional groundwater quality. New York: Van Nostrand Reinhold; pp. 443-69.
65. Reilly, T. E. and Goodman, A. S. (1985) Quantitative analysis of saltwater-freshwater relationships in groundwater systems – a historical perspective. Journal of Hydrology, 80, 125–160.
66. Remson, I., Hornberger, G.M., Molz, F.J., (1971) Numerical Methods in Subsurface Hydrology. Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc., New York, 389 p.
67. Sabanathan, S. (1984), Model for a multilayer groundwater basin, M.Eng thesis, AIT, Bangkok, Thailand.
68. Schincariol, R.A. and F.W. Schwartz (1990), An experimental investigation of variable density flow and mixing in homogeneous and heterogeneous media, Water. Resour. Res., 26, 2317 – 2329.

69. Sorek, S. and Pinder, G. F. (1999) Survey of computer codes and case histories, in *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers — Concepts, Methods, and Practices*, J. Bear, A. H.-D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar, and I. Herrera (Eds.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
70. Todd, A.D., (1980) *Groundwater hydrology*. Second edition. John Wiley and Sons.
71. Todd, D.K. (1980), *Groundwater Hydrology*, John Wiley&Sons, Englewood Cliffs, NJ
72. Tyson Jr., H.N., Weber, E.M., (1964) Ground-water management for the nation's future computer simulation of ground-water basins, American Society of Civil Engineers Proceedings. *Journal of the Hydraulics Division* 90, 59e77.
73. Voss, A. and. M. Koch (2001), Numerical simulations of topography-induced saltwater upconing in the state of Brandenburg, Germany, *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 26, 353-359.
74. Voss, C.I. (1984), SUTRA-A finite-element simulation model for saturated-unsaturated, fluid density- dependent ground water flow with energy transport or chemically-reactive single-species transport: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 84-4369, 409 p.
75. Wang, H.F., Anderson, M.P., (1977) Finite differences and finite elements as weighted residual solutions to Laplace's equation. In: Gray, W.G., Pinder, G.F. (Eds.), *Finite Elements in Water Resources*, Proceedings of the First International Conference on Finite Elements in Water Resources, Princeton University, July. Pentech Press, London, pp. 2.167e2.178.
76. Wang, H.F., Anderson, M.P., (1982) *Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods*. Academic Press, San Diego, CA, 237 p.
77. *Water Resour. Res.* 37:3057–3069.
78. Werner, A.D.; Bakker, M.; Post, V.E.A.; Vandenboede, A.; Lu, C.H.; Ataie-Ashtiani, B.; Simmons, C.T.; Barry, D.A. (2013) Seawater intrusion processes, investigation and management. Recent advances and futures challenges. *Adv. Water Resour.* 51, 3–26.
79. Wooding, R.A., S.W. Tyler, L.White, and P.A. Anderson (1997b), Convection in groundwater below evaporation salt lake: 2. Evolution of fingers or plumes, *Water Resour. Res.*, 33, I219-I228.
80. Wooding, R.A., S.W. Tyler, L. White, and P.A: Anderson (1997a), Convection in groundwater below an evaporating salt lake: I. Onset of instability, *Water Resour. Res.*, 33, I199-I217.
81. Yapa, Poojitha N. D. D. (1979), Salt water encroachment in Phrapradaeng aquifer, M.Eng thesis, AIT, Bangkok, Thailand.
82. Zheng, Chunmiao, and P. Patrick Wang (1999), MT3DMS, A modular three-dimensional multi-species transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide, U.S. Army Corps of Engineers, Research and Development Center, Contract Report SERDP-99-I, Vicksburg, MS, 202 p.
83. Zhou, Q. (1999) Modeling seawater intrusion in coastal aquifers. Ph.D. thesis, Technion-Israel Institute of Technology.
84. Zhou, Q., Bear, J., and Bensabat, J. (2005) Saltwater upconing and decay beneath a well pumping above an interface zone. *Transp. Porous Media* DOI: 10.1007/s11242-005-0261-4, 61:337–363.
85. Zhou, Q., Bensabat, J., and Bear, J. (2001) Accurate calculation of specific discharge in heterogeneous porous media.

Study of sunlight degradation of methyl orange in wastewater using the CuCrO₂/ TiO₂ heterosystem

Laouici Rima¹, ² Douafer Souaad^{2*}, Lahmar Hicham³, Benamira Messaoud^{3,4}, Telmani Khalid ³, Bouatam Imen ³

¹Department of physics, University of MSBY Jijel, 18000 Algeria, 0674027140

²LMEPA, Department of Fundamental Studies of Science & Technology, University of Jijel, Ouled Aissa 18000, Jijel, Algeria,

³Department of Chemistry, University of MSBY Jijel, 18000 Algeria 18000, Jijel, Algeria,

⁴Laboratory of Materials Interaction and Environment (LIME), University of (MSBY) Jijel, 18000 Algeria,

Abstract

CuCrO₂ is prepared by sol-gel method. The powder as prepared was characterized by X-ray diffraction, scanning electron microscopy and UV-Vis diffuse reflectance. The microstructure is fairly homogeneous with an average crystallite size. The optical deviation (1.87 eV), determined from the diffuse reflectance, is well suited for its use as a photocatalyst. In application, the photo-degradation of an orange methyl dye (12 mg / L) is carried out successfully in a suspension of CuCrO₂ / TiO₂ (1/1). CuCrO₂ is photoactivated by visible light and the electrons of the conduction band are injected into TiO₂. In the presence of oxalic acid as a hole sensor, a total degradation of methyl orange MO is obtained under optimal conditions (pH 6 and T = 25 °C).

Key Words: CuCrO₂ /TiO₂, Photo-degradation, methyl orange, Sol-gel process

Etude de la dégradation de méthyle orange dans les eaux usées par la lumière solaire à l'aide de l'hétérosystème CuCrO₂ /TiO₂

Résumé

CuCrO₂ est un délafrisite élaboré par la méthode sol-gel. La poudre telle que préparée a été caractérisée par diffraction des rayons X, microscopie électronique à balayage et réflectance diffuse UV-Vis. La microstructure est assez homogène avec une taille moyenne de cristallite. L'écart optique (1,87 eV), déterminé à partir de la réflectance diffuse, est bien adapté pour son utilisation comme photocatalyseur. En application, la photo-dégradation d'un colorant de méthyle orange (12 mg / L) est réalisée avec succès dans une suspension de CuCrO₂ / TiO₂ (1/1). CuCrO₂ est photoactivé par la lumière visible et les électrons de la bande de conduction sont injectés au TiO₂. En présence d'acide oxalique comme capteur de trou, une dégradation total de méthyle orange (MO) est obtenue dans des conditions optimales (pH 6 et T=25 °C).

Mots clés : CuCrO₂/TiO₂, Photo-dégradation, méthyle orange, méthode sol-gel).

¹ Corresponding author: rima.ph2019@gmail.com

INTRODUCTION

CO₂ emissions have been identified as the main cause of current climate change [1], emissions due to the increasing consumption of "fossil" energy sources such as coal, oil or natural gas. In addition, in order to respond to this major concern regarding the emission of greenhouse gases, a large number of research studies have been aimed for several years at developing the use of energy sources making it possible to produce less CO₂, or even to stop this production. Drug residues released into our excreta (urine faces) are most likely the main source for most of the products. The concentration in urban wastewater entering the treatment plant correspond substantially to the one which is measured in the urine multiplied by the ratio between the daily volume of urine and the total volume of water discharged. These discharges are purified and some of the active molecules can be stopped at the treatment plant, but not all [2].

Industrial rejection seems to be very difficult to achieve in drug production facilities (process water, wash or drain water, etc.). Even if the losses are minimal, the large quantity of products manufactured or which is handled leads to significant losses to the environment. On a global scale, this contribution is probably small, but the effects can be very significant in aquatic environments immediately downstream of the facilities [3]. Methyl orange is a solution for cutaneous application but the rejection of this drug in the environment likely to have undesirable effects, by its very strong visible color [4].

The photocatalytic process is based on the excitation of a semiconductor (SC) by light radiation, corresponding to an energy greater than or equal to the width of its forbidden band, under light excitation, the electrons (e⁻) of the valence band (BV) of the SC pass to the conduction band (BC), leaving a positive charge or hole (noted h⁺) in the BV. These electron / hole pairs can recombine by releasing heat, or react separately with other molecules present in the medium.

Heterogeneous photocatalysis is based on absorption, by a semiconductor, photons of equal energy or greater than the width of the forbidden band (Ec-Ev), which allows electrons to pass from the valence band (Ev) to the conduction band (Ec). Gaps electronic, commonly called holes (or "holes", h⁺) are thus generated in the valence band and a redox system is created. If their lifespan allows, electrons can be transferred to electron acceptors, while the holes can be fulfilled by electron donors [5, 6]. Provided that the resulting chemical species react before reverse electronic transfers do not take place, generate so-called photocatalytic chemical transformations canthus.

Since molecular oxygen O₂ is the electron acceptor more likely, it can be reduced to a superoxide anion radical O₂^{-•} or, depending on the pH, in its protonated form, the radical hydroperoxyl HO₂[•] (pKa = 4.7). These radicals are less reactive than the HO[•] radical with respect to compounds organic. However, they can react to each other to form hydrogen peroxide, H₂O₂, or the radical hydroxyl HO[•] by successive reductions. However, the most direct way of formation of the radical HO[•] is hole oxidation of adsorbed H₂O or OH⁻ ion. This radical, one of the most reactive and least selective [7], attacks most molecules by providing other radicals, which react with O₂. In addition, the organic compounds, P, which have an oxidation-reduction potential greater than EV, can behave as electron donors, which generally leads to the formation of a P^{•+} cation radical. The latter is likely to react then, eg with H₂O, O₂^{-•} and O₂, or even to deprotonate itself if it is very acidic. Finally, cations (aqueous solution) and some organic compounds like CCl₄ or others halomethanes can be reduced if their potential redox is less than EC.

Photocatalytic treatment is therefore a technology of choice for the depollution and integration of this wastewater because it is a powerful system, simple and economical. These different attractive features have generated as a great deal of interest from researchers for the understanding, optimization and industrial application of this process [8]. This research project aims to study the efficiencies of the photocatalytic process to treat methyl orange -contaminated wastewater by using a new CuCrO₂ / TiO₂ heterosystem irradiated with photons of natural light.

MATERIALS AND METHODS

CuCrO₂ is synthesized by *sol-gel method* according to the following reaction path:

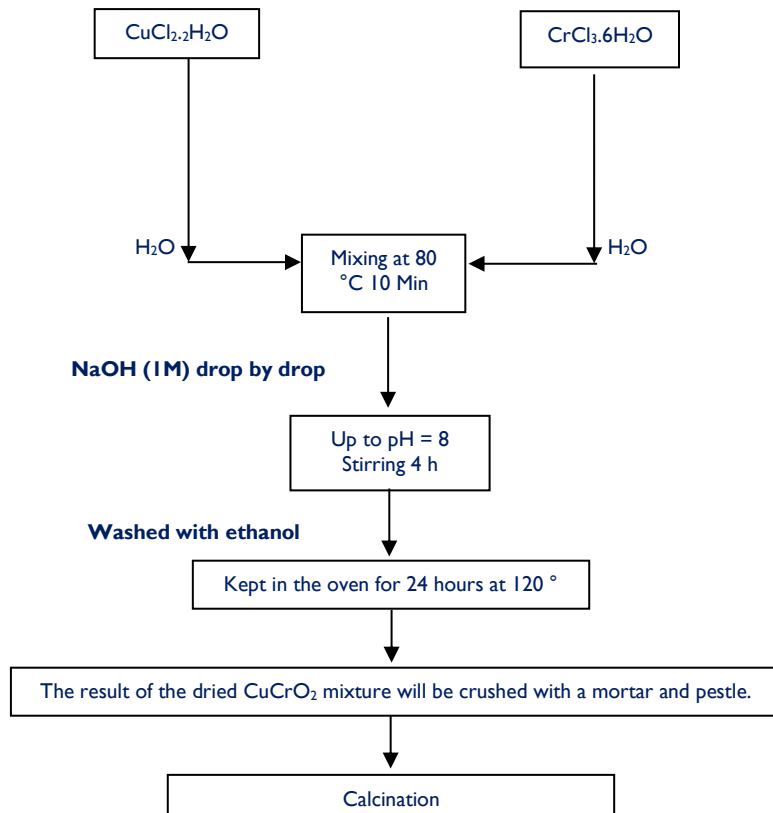
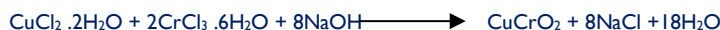


Fig. 1 – Elaboration of CuCrO₂ by *sol-gel method*.

Copper (II) and Chrome (III) chloride are dissolved in water with adequate amounts. The mixture is left with magnetic stirring at a temperature of 80 ° C for 10 min, after adding sodium hydroxide (1M) dropwise until a pH = 8, leaving stirring until the formation of a gel. After rinsing with ethanol, the gel will be dried in the oven, in order to obtain an amorphous powder. At the end, the calcination will be carried out in (750 °C / 3h) to get the finished product. However, for TiO₂ we will use a commercial product in this experiment.

X-ray powder diffraction (XRD) data were collected at room temperature (RT) using a Brüker D8 Advance diffractometer working in Bragg-Brentano reflection geometry with a Cu anode X-ray source, a focusing Ge(III) primary monochromator (selecting the Cu K α_1 radiation) and a 1-D position-sensitive detector ("Vantec" detector). Data were collected in the range 2 θ =20-90°, with a 0.02° step and a 10 s counting time per step.

The diffuse reflectance spectrum is recorded with a UV-VIS spectrophotometer (Specord 210 Plus) equipped with an integrating sphere, PTFE is used as standard. The Scanning Electron Microscopy (SEM) was performed on a FEG-SEM JEOL 7600 in order to evaluate the size distribution as well as the morphology of the nanoparticles.

RESULTS AND DISCUSSION

Characterisation

X-ray powder diffraction (XRD) data were collected at room temperature (RT), the pure phase (Fig.2.a) is confirmed in an agreement with the literature [9].

The width of the forbidden band (E_g) (Fig.2.b) is determined from the abscissa of the point of inflection (λ_0) of the diffuse reflectance curve as a function of the wavelength.

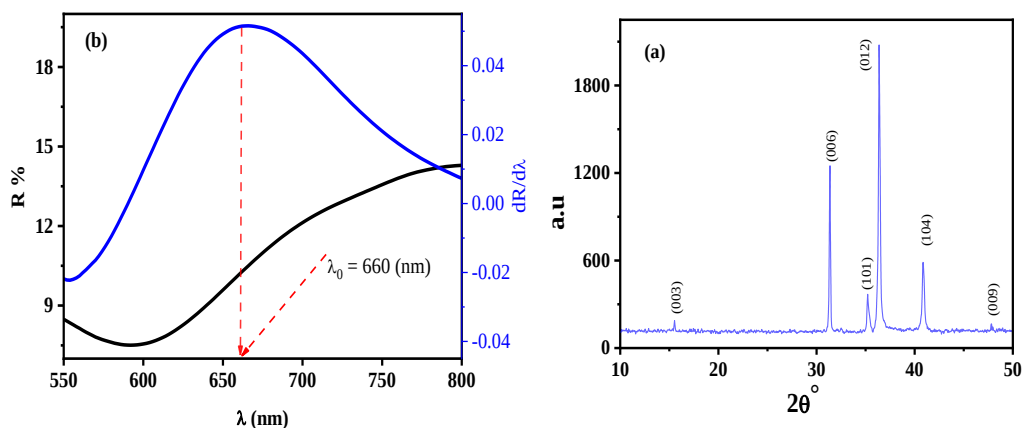


Fig. 2 – a) X-ray diffraction of CuCrO_2 ; b) The diffuse reflectance spectrum of CuCrO_2 ;

The width of the forbidden band (E_g) is deduced from the coordinates of the point of inflection of the curve. This point corresponds to the maximum of the derivative of this curve. The inflection point is located at $\lambda_0 = 660$ (nm), which gives $E_g = hc/\lambda_0 = 1.87$ (eV).

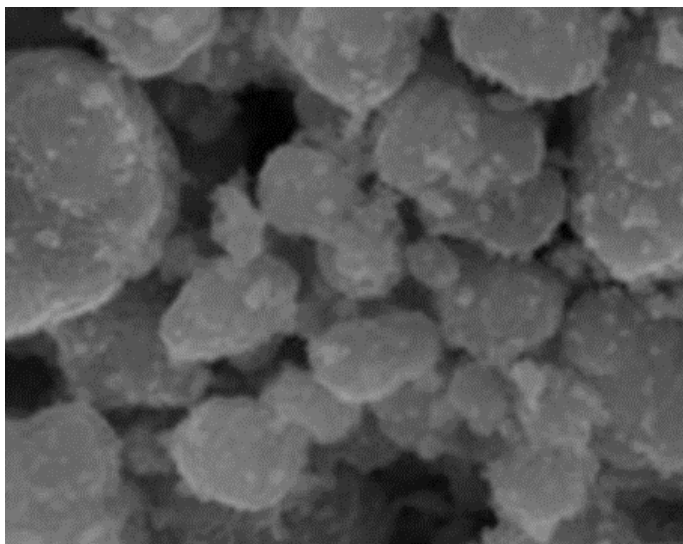


Fig. 3 – Scanning Electron Microscopy of CuCrO_2

Fig 3. Shows the FEG-SEM images of the CuCrO_2 powder. The images obtained of CuCrO_2 , produced by the sol-gel method show particles formed from homogeneous and uniform grains.

Photo catalysis

The reaction mechanism of photo-catalytic degradation of methyl orange catalyzed by the hétérosystème $\text{CuCrO}_2/\text{TiO}_2$ shows that the electrons of the conduction band (e^-) and the holes of the valence band (h^+) are generated when the suspension of the latter is irradiated with a higher luminous energy than its energy of band gap ($E_g = 1.87 \text{ eV}$). The photo-generation of electrons from CuCrO_2 -CB may reduce the dye or react with acceptor electrons such as O_2 adsorbed on the surface of the catalyst or dissolved in water by reducing it to a superoxide radical O_2^- anion (Fig. 4).

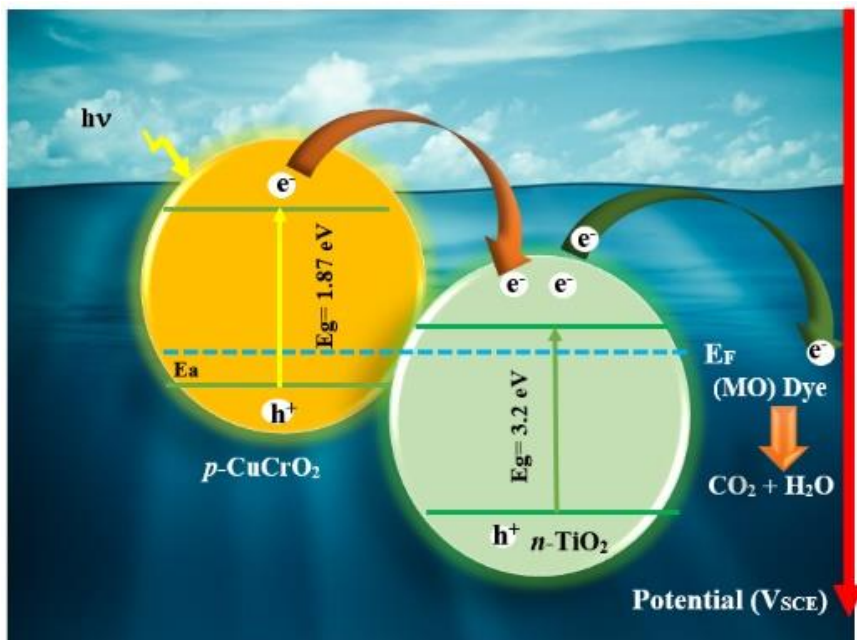


Fig. 4 – The energy band diagram of the hetero-system $\text{CuCrO}_2/\text{TiO}_2/\text{MO}$ electrolyte

The relevant reactions at the surface of our catalyze causing the degradation of the methyl orange dye can be expressed as follows:



The results of treatment (Fig. 5) of MO were followed by UV-visible on a Shimatzu 1800-type device using quartz cells. Absorbance measurements are made at ($\lambda_{\text{max}} = 464 \text{ nm}$).

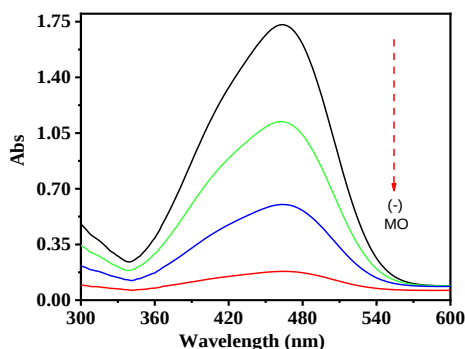


Fig. 5– Photo catalytic degradation of MO (12 mg / L) under CuCrO_2 / TiO_2

CONCLUSION

The main objective of this work is the sensitization of CuCrO_2 in the visible domain with a view to the realization of heterogeneous photocatalysis in this spectral domain for the purification of water loaded with organic compounds, in this case dyes. In order to achieve this objective, XRD analysis shows single phase formation. An E_g value of 1.87 eV was obtained with a direct optical transition. CuCrO_2 was used as a photocatalyst for the detoxification of Methylene orange which was used as a model compound. It can be concluded that the degradation of MO is not directly related to the intensity of solar radiation, but to the presence of catalyst, a total degradation of 12 mg / L as the initial concentration of this model compound was observed at pH = 6 and a temperature of 25 ° C after 4 hours of irradiation.

References

1. Gaaloul, N. 2008. The role of groundwater during drought in Tunisia. In *Climatic Changes and Water Resources in the Middle East and North Africa* (pp. 239-266). Springer, Berlin, Heidelberg.
2. Flannigan, M. D., and Wagner, C. V. 1991. Climate change and wildfire in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 21(1), 66-72.
3. Szejtli, J. 1998. Introduction and general overview of cyclodextrin chemistry. *Chemical reviews*, 98(5), 1743-1754.
4. Crini, G., and Badot, P. M. 2008. Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature. *Progress in polymer science*, 33(4), 399-447.
5. Lahmar, H., Benamira, M., Douafer, S., Akika, F. Z., Hamdi, M., Avramova, I., and Trari, M. 2020. Photocatalytic degradation of Crystal Violet dye on the novel $\text{CuCr}_2\text{O}_4/\text{SnO}_2$ hetero-system under sunlight. *Optik*, 165042.
6. Douafer, S., Lahmar, H., Benamira, M., Messaadia, L., Mazouzi, D., and Trari, M. 2019. Chromate reduction on the novel hetero-system $\text{LiMn}_2\text{O}_4/\text{SnO}_2$ catalyst under solar light irradiation. *Surfaces and Interfaces*, 17, 100372.
7. Benamira, M., Lahmar, H., Messaadia, L., Rekhila, G., Akika, F. Z., Himrane, M., and Trari, M. 2020. Hydrogen production on the new hetero-system $\text{Pr}_2\text{NiO}_4/\text{SnO}_2$ under visible light irradiation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3), 1719-1728.
8. Telmani, K., Lahmar, H., Benamira, M., Messaadia, L., and Trari, M. 2020. Synthesis, optical and photo-electrochemical properties of NiBi_2O_4 and its photocatalytic activity under solar light irradiation. *Optik*, 207, 163762.
9. Wang, J., Zheng, P., Li, D., Deng, Z., Dong, W., Tao, R., and Fang, X. 2011. Preparation of delafossite-type CuCrO_2 films by sol-gel method. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(18), 5715-5719.



Appel à contributions : Prochain numéro la revue Scientifique : JISTEE – Mars 2021

Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688, Open Access Volume (VI) - Numéro 1 – Mars 2021

Nous coordonnons la rédaction, du numéro mois de Mars 2021 Eau-Climat”, qui vous est ensuite offert gratuitement en format pdf.

Le thème retenu pour 2021 est “Eau- Agriculture – Climat”, en vous rappelant, si besoin en était, que le changement global couvre à la fois le changement climatique et les changements anthropiques (variations d'occupation des sols et aménagements des bassins versants, prélèvements, etc.).

Nous lançons donc un appel à contributions pour des articles (articles longs, courts, encadrés) qu'il vous paraîtrait intéressant de voir figurer dans ce numéro de la revue Scientifique : Journal International Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (JISTEE).

Les contributions seront attendues pour le courant du mois de Février 2021 afin de pouvoir être révisées par le Comité Scientifique International et que la mise en forme du numéro ait lieu en Mars 2021 au plus tard.

Visiter notre site : <https://jistee.org/journal-international-sciences-et-techniques-de-leau-et-de-lenvironnement/>



Call for contributions: Next issue of the Scientific review: JISTEE – March 2021

International Journal of Water Science and Environment Technologies

International Journal Water Sciences and Environment Technologies

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688, Open Access Volume (VI) - Issue I – March 2021

We are pleased to inform you that the Vol 5, No 2 of International Journal of Water Science and Environment Technologies is available at <https://jistee.org/volume-v-2020/>

Open access Journal are freely accessible via the internet for immediate worldwide. This Journal is an Open Access International Journal and will accept research and review manuscripts ranging from, Basic research on Water, Climate, Environment, Hydrology; hydrogeology and management of water resources; Agricultural hydraulics (Irrigation, Drainage, etc.), Modeling of Water Resources (Hydraulics, Hydrology, Hydrogeology), Physico-chemical quality of Surface and groundwater; Hydrobiology, microbiology, toxicology and ecotoxicology; the structure and function of aquatic ecosystems; Water quality, wastewater treatment and drinking water; Municipal and industrial wastewater treatment; Management of water resources (quantitative, socio-economic and legal aspects)..

The manuscript/ paper can be submitted via email to jistee@iresa.agrinet.tn or jistee@yahoo.com

to our online direct submission area, located here: <http://www.jistee.org>



REPUBLIC OF TUNISIA



International Conference-Training (EAC'2021)

From 4 to 9 November 2021 Hammamet (Tunisia)



**Water resources,
Agriculture
and Climate Change**



E water **A** Agriculture **C** Climate '2021

Water-Agriculture-Climate'2021
"Ce qui compte c'est demain"

If you have any questions, don't hesitate to Contact Pr.
Noureddine GAALOUL
E-mail: eauclimat@yahoo.com
eauclimat@iresa.agrinet.tn



Abbi Rim



2021

Colloque-Formation International Eau-Agriculture-Climat'2021

Ressources en Eau, Agriculture et Changement Climatique

04 au 09 Octobre 2021, Hammamet (Tunisie)

www.jistee.org



Eau-Agriculture-Climat'2021

Pour plus d'informations veuillez contacter

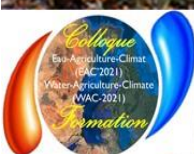
Pr. Nouredine GAALOU

E-mail: eauclimat@iresa.agrinet.tn

eauclimat@yahoo.com

'Ce qui compte c'est demain'

Abd. Rim





Nouredine Gaaloul

Seawater Intrusion into Coastal Aquifer and Climate Change

Impact of the coronavirus (covid-19) on the
environment and water resources

<https://my.editions-ue.com/catalogue/details/fr/978-613-9-57238-0/seawater-intrusion-into-coastal-aquifer-and-climate-change>

<https://www.amazon.fr/Seawater-Intrusion-Coastal-Aquifer-Climate/dp/613957238X>

www.iistee.org

iistee@iresa.agrinet.tn

iistee@yahoo.com



Volume (I) : Eau-Climat'2014 (EC-2014) / Water-Climate'2014 (EC-2014)

- Numéro 1 – Avril 2014 : Ressources en Eaux de Surface en Région Méditerranéenne
Surface Water Resources in the Mediterranean Region.
 Numéro 2 – Août 2014 : Ressources en Eaux Souterraines en Région Méditerranéenne
Ground Water Resources in the Mediterranean Region.
 Numéro 3 – Décembre 2014 : Changements Climatiques en Région Méditerranéenne
Climate Change in the Mediterranean Region

Volume (II) : Eau-Société-Climat'2017 (ESC-2017) / Water-Society-Climate'2017 (ESC-2017)

- Numéro 1 – Février 2017 : Caractérisation qualitative et quantitative des ressources en eau
Qualitative and quantitative characterization of water resources.
 Numéro 2 – Avril 2017 : Évaluation des ressources en eau sous les pressions de l'humanité et des changements climatiques
Assessment of water resources under pressure from humanity and climate change.
 Numéro 3 – Juin 2017 : Vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques
Vulnerability of Water Resources to Climate Change.
 Numéro 4 – Août 2017 : Modélisation de l'impact des changements anthropiques et climatiques sur les ressources en eau
Modeling the impact of anthropogenic and climatic changes on water resources.
 Numéro 5 – Octobre 2017 : Modélisation Numérique en Hydraulique, Hydrologie et Hydrogéologie
Numerical Modeling in Hydraulics, Hydrology and Hydrogeology

Volume (III) : Eau-Environnement-Climat'2018 (E²C-2018) / ater-Environnement-Climate'2018 (E²C-2018)

- Numéro 1 – Avril 2018 : Gestion des Ressources en Eau
Water Resources Management.
 Numéro 2 – Août 2018 : Sciences de l'Environnement
Environmental Earth Sciences.
 Numéro 3 – Décembre 2018 : Changement Climatique et Adaptation
Climate Change and Adaptation

Volume (IV) : Eau-Énergie-Climat'2019 (2EC-2019) / Water-Energy-Climate'2019 (E²C-2019)

- Numéro 1 – Décembre 2019 : Gestion Intégrée des Ressources en Eaux
Integrated Water Resources Management.
 Numéro 2 – Décembre 2019 : Énergies Renouvelables Et changements climatiques
Renewable Energies and climate change

Volume (V) : Eau-Climat'2020 / Water-Climate'2020

- Numéro 1 – Septembre 2020 : Ressources en Eaux et Changements Climatiques
Water Resources and Climate Change.
 Numéro 2 – Décembre 2020

Volume (VI) : Eau-Climat'2021 / Water-Climate'2021

Numéro 1 – Mars 2021 à suivre....

Copyright © 2020 – Jistee Tous droits réservés

JOURNAL INTERNATIONAL

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

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688

Open Access

Volume (V) - Numéro 2 – Décembre 2020

Eau-Climat'2020



Gestion Intégrée des Ressources en Eau et Changement Climatique

Rédacteur en Chef : Pr Nouredine Gaaloul

Publié par:

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

INTERNATIONAL JOURNAL

Water Sciences and Environment Technologies

ISSN Online: 1737-9350 ISSN Print: 1737-6688

Open Access

Volume (V) - Issue 2 – December 2020

Water-Climate'2020



Integrated Water Resources Management and Climate Change

Editor-in-Chief: Pr Nouredine Gaa

Published by:

Scientific and Technical Association for Water and the
Environment in Tunisia (ASTEE *Tunisie*)