

JOURNAL INTERNATIONAL

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

ISSN (electronic): 1737-9350

ISSN (printed): 1737-6688

Volume 2 - Numéro 5 - Octobre 2017

Eau-Société-Climat'2017



**Ressources en Eau et Changement Climatique:
Impacts anthropiques et climatiques sur la
variabilité des ressources en eau**

Modélisation Numérique en Hydraulique, Hydrologie et Hydrogéologie

Rédacteur en Chef : Pr Nouredine Gaaloul

Publié par :

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

"وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ"

سورة الأنبياء آية 30

Comité Scientifique International

<i>Hamadi Habaieb</i>	<i>Université de Carthage -IRESA- INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Noureddine Gaaloul</i>	<i>Université de Carthage -IRESA- INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Zouhaier Nasr</i>	<i>Université de Carthage -IRESA- INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Taoufik Hermassi</i>	<i>Université de Carthage -IRESA- INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Zohra Lilli</i>	<i>Université de Carthage -IRESA- INAT (Tunisie)</i>
<i>Mohamed Mechergui</i>	<i>Université de Carthage -IRESA- INAT (Tunisie)</i>
<i>Jamila Tarhouni</i>	<i>Université de Carthage -IRESA- INAT (Tunisie)</i>
<i>Mohamed Habib Sellami</i>	<i>Université de Jendouba -IRESA- ESIER (Tunisie)</i>
<i>Hechmi Belaid</i>	<i>Université de Jendouba -IRESA- ESIER (Tunisie)</i>
<i>Nagaz Kamel</i>	<i>Université de Sfax- IRA (Tunisie)</i>
<i>Kamel Zouari</i>	<i>Université de Sfax- ENIS (Tunisie)</i>
<i>Salwa Saidi</i>	<i>Université de Manar FST (Tunisie)</i>
<i>Mohamed Meddi</i>	<i>ENSH, (Algérie)</i>
<i>Ahmed Kettab</i>	<i>ENP, (Algérie)</i>
<i>Azzedine Hani</i>	<i>Université de Annaba (Algérie)</i>
<i>Mohammed Achite</i>	<i>Université de Chlef (Algérie)</i>
<i>Larbi Djabri</i>	<i>Université de Annaba (Algérie)</i>
<i>Abdelhalim Yahiaoui</i>	<i>Université de Bechar (Algérie)</i>
<i>Mohamed Bessenasse</i>	<i>Université de Saad Dahlab- Blida (Algérie)</i>
<i>Abdessamad Merzouk</i>	<i>Université de Tlemcen (Algérie)</i>
<i>Belkacem Bekkoussa</i>	<i>Université Mustapha Stambouli de Mascara (Algérie)</i>
<i>Guendouz Abdelhamid</i>	<i>Université de Blida I (Algérie),</i>
<i>Benabadj Noury</i>	<i>Université de Tlemcen (Algérie),</i>
<i>Nadia Machouri</i>	<i>Univ. Mohammed V (Maroc)</i>
<i>Abdelmajid Moumen</i>	<i>Université Nadour (Maroc)</i>
<i>Mhamed Amyay</i>	<i>Université de Fès (Maroc)</i>
<i>Abdelaziz Abdallaoui</i>	<i>Université Moulay Ismail (Maroc)</i>
<i>Saeid Eslamian</i>	<i>Université de. Isfahan (Iran)</i>
<i>Diop Ngom Fatou</i>	<i>UCAD FST (Sénégal)</i>
<i>Sousou Sambou</i>	<i>Univ. Cheikh Diop (Sénégal)</i>
<i>Soro Nagnin</i>	<i>UFR STRM (Cote d'Ivoire)</i>
<i>Gil Mahé</i>	<i>IRD (France)</i>
<i>Didier Orange</i>	<i>IRD (France)</i>
<i>Sabine Sauvage</i>	<i>IRD (France)</i>
<i>José Sánchez-Pérez</i>	<i>CNRS (France)</i>
<i>Christan Leduc</i>	<i>IRD (France)</i>
<i>Luc Descroix</i>	<i>IRD (France)</i>
<i>Jean-Denis Taupin</i>	<i>IRD (France)</i>
<i>Jean-Francois Vernoux</i>	<i>BRGM (France)</i>
<i>Dhafer Abbas</i>	<i>ISL Ingénierie (France)</i>
<i>Sami Lallahem</i>	<i>Société Ixsane – Lille (France)</i>
<i>Amjad Aliawi</i>	<i>Water Research Center, Kuwait Institute for Scientific Research (Kuwait),</i>

Préface



L'eau est une source indispensable à la vie. Elle est essentielle au développement industriel et agricole des sociétés humaines. Depuis que l'homme existe, il cherche à développer ses ressources en eau et garantir ses réserves en cette matière vivante notamment en la stockant, et à en améliorer la qualité, en la purifiant.

L'agriculture représente 70% des prélèvements par les secteurs agricole, municipal et industriel (y compris l'énergie). L'utilisation de l'eau dans l'agriculture peut représenter plus de 90% dans les pays où les aliments ne peuvent être produits sans eau (irrigation). Selon FAO une augmentation de 50% de la demande alimentaire en 2050 par rapport à 2006. Il est clair que, même avec l'utilisation de l'eau la plus efficace en l'agriculture, il faudra encore plus d'eau pour produire les aliments supplémentaires nécessaires en particulier pour ceux qui souffrent de l'insécurité alimentaire.

Dans le même temps, les changements climatiques devraient avoir un impact massif sur la disponibilité de l'eau en modifiant radicalement les régimes hydrologiques à travers le monde. Si ils ne sont pas traités correctement et en temps opportun, les conflits sur l'eau entre les secteurs, entre les personnes peuvent déclencher des conflits, menacer la sécurité alimentaire et augmenter les migrations. Une gestion responsable de l'eau agricole contribuera de manière importante à la future sécurité mondiale de l'eau. En effet, une gestion responsable est nécessaire dans chacun des secteurs utilisant de l'eau, même s'ils utilisent moins. Les effets attendus des changements climatiques sur le secteur agricole varient selon les régions et ne doivent pas pour autant inquiéter. L'adaptation doit être adoptée comme solution face à ces changements et aux différents problèmes qu'ils vont provoquer. Il faut s'adapter d'une manière progressive et augmenter la capacité d'adaptation par l'usage des technologies, le développement des infrastructures, du capital social, la promotion de la gouvernance, des connaissances et des compétences, outre la gestion des risques liés aux changements climatiques. Ainsi l'agriculture pourrait être modifiée à cause de plusieurs facteurs : les changements des températures, le niveau de l'humidité, des rayonnements ultraviolets, le niveau de CO₂, la présence d'animaux et d'insectes nuisibles ainsi que des maladies, la dégradation du sol et la sécheresse. Parmi ces problèmes figurent aussi la désertification, le surpâturage, la déforestation, la prolongation des périodes de sécheresse et la diminution des périodes de grandes précipitations.

Les conséquences des changements climatiques sont principalement : l'élévation du niveau de la mer et l'érosion, l'inondation des terres agricoles, des zones habitées et celles côtières, la salinité de l'eau souterraine. Les stratégies visant à réduire la pénurie d'eau au niveau sectoriel doivent être basées sur une compréhension approfondie du bilan hydrique, y compris les approvisionnements et les demandes en eau et leurs dimensions spatiales et temporelles. Le dialogue entre parties prenantes, la planification et / ou l'alignement entre planifications sont presque impossibles si les parties prenantes travaillent avec leurs propres systèmes d'information différents.

Tandis que les politiques d'atténuation s'attaquent aux causes des changements climatiques, les mesures d'adaptation sont destinées à aider les populations à surmonter les conséquences de ces changements. L'adaptation consiste à adopter des politiques et des pratiques pour préparer les populations aux effets des changements climatiques, en acceptant le fait qu'il est désormais impossible de les éviter complètement.

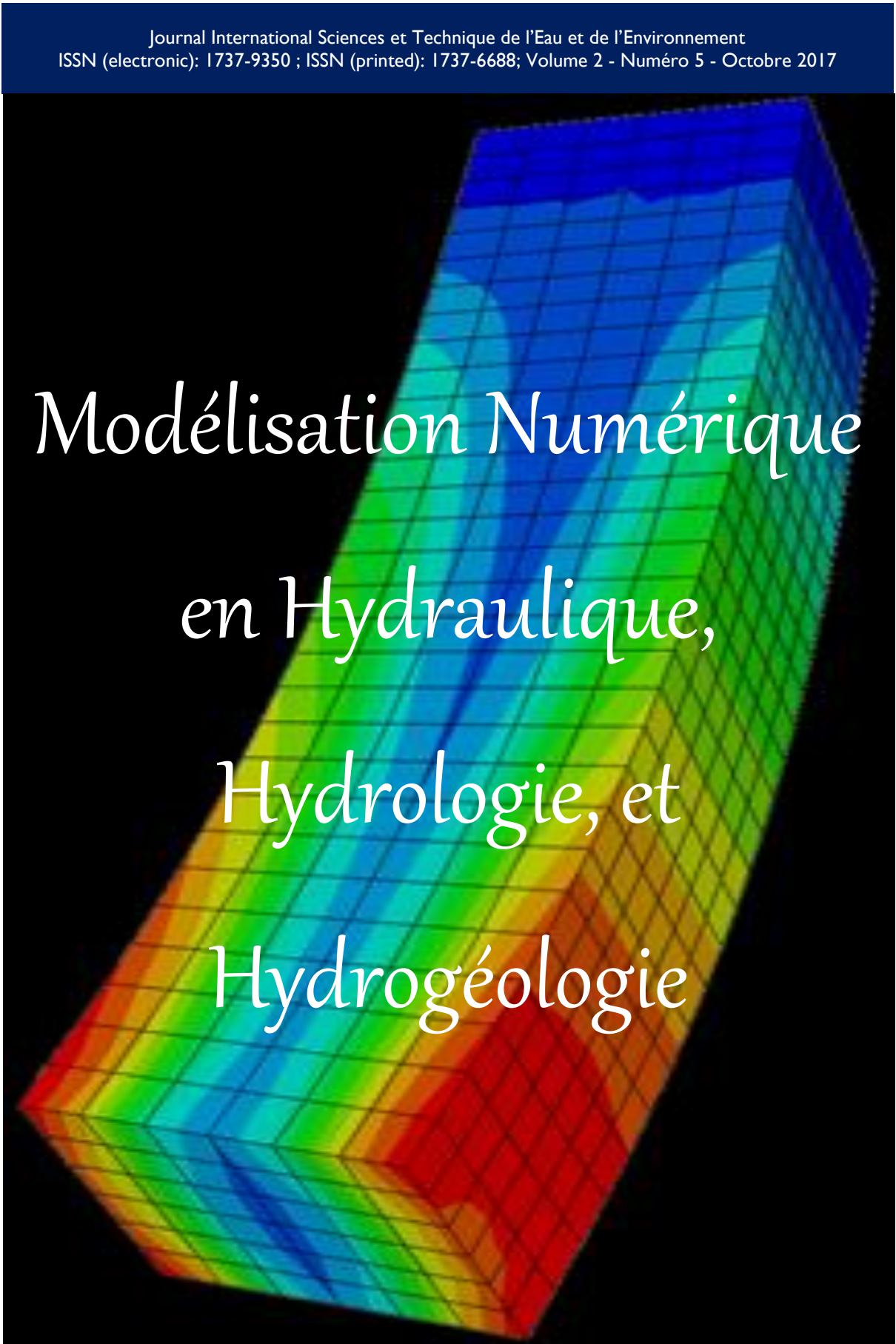
Les questions suivantes sont proposées à la discussion :

- *Comment la comptabilité de l'eau peut-elle aider à planifier les investissements et la répartition de l'eau entre les secteurs ?*
- *La comptabilité de l'eau peut-elle aider à gérer la pénurie d'eau pour l'agriculture ? Expériences à partager ?*
- *Comment développer les capacités humaines sur l'utilisation de la comptabilité de l'eau pour la gestion et la planification ?*
- *Peut-on survivre avec la salinité des eaux ?*
- *Peut-on penser l'adaptation aux changements climatiques ?*
- *Effets du changement climatique sur les ressources en eaux ?*
- *Impact du changement climatique sur les ressources en eaux ?*

Nouredine Gaaloul
Professeur de l'Enseignement Supérieur Agricole (INRGREF)
Président de l'ASTEE *Tunisie*
Président et Coordinateur ESC-2017

Sommaire

Modélisation Numérique en Hydraulique, Hydrologie et Hydrogéologie	6
Jean-Francois Vernoux (BRGM - France), <i>F. Horriche, R. Ghoudi</i> <i>Outils de gestion des aquifères de la Jeffara de Gabès</i>	7
Otmane Abd-el-Kader (Agence spatiale Algérienne - Algérie), <i>Baba-Hamed Kamila, Bouanana Abderrazak, Kebir Lahcen Wahib</i> <i>Apport de la télédétection et le système d'information géographique à la modélisation hydrologique pluie-débit dans le bassin de la Mekerra (MACTA- NW ALGERIEN).</i>	11
Boyossoro Hélène Kouadio (Université de Cocody, Abidjan - Côte d'Ivoire) <i>Vami Hermann N'guessan Bi, Kouakou Bernard Djè, Gabriel Ettienne Aké, Assa Yapi, Sika Brice, Jean Biémi</i> <i>Analyse spatio-temporelle des extrêmes climatiques dans la région semi-montagneuse de Man-Danané par utilisation du programme RClimDEX</i>	15
Brou Loukou Alexis (Université Jean Lorougnon Guédé - Côte d'Ivoire), <i>Kouassi Kouakou Lazare, Konan Kouakou Séraphin, Kouadio Zilé Alex, Dongo Téhua Fiedi, Konan Koffi Félix, Kamagate Bamory</i> <i>Modélisation Pluie-Débit à l'aide des Réseaux de Neurones Artificiels Multicouches sur le Bassin Versant du Fleuve Cavally à la station d'Ity (Zouan-Hounien, Côte d'Ivoire)</i>	19
Kouassi Kouakou Lazare (Université Jean Lorougnon Guédé, - Côte d'Ivoires), <i>Brou Loukou Alexis, Konan Kouakou Séraphin, Kouadio Zilé Alex, Dongo Kobena Tehua Fiedi, Konan Koffi Félix, Kamagate Bamory, Koné Diakaria</i> <i>Modélisation de la propagation des crues du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la Société des Mines d'Ity (Zouan-Hounien, Côte d'Ivoire)</i>	24
Dahmani Meriem Nadia (Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen – Algérie), <i>Baba-Hamed Kamila, Safa Aissa</i> <i>Modélisation hydrologique d'Oued Saida (NW algérien)</i>	28
Mohamed Rata (Université Djillali Bounaama. Khemis Miliana - Algérie), <i>Abdelkader Douaoui</i> <i>Analyse spatiale de la pluviométrie annuelle en utilisant des techniques de krigeage ordinaires et un krigeage lognormal dans le bassin hydrographique de Cheliff. Algérie</i>	32
Najat Serhir (Ecole Hassania des Travaux Publics, Casablanca - Maroc), <i>Abdelhamid Fadil, El Hassan El Brirchi, Bachir Alami</i> <i>Couplage SIG-modèles hydrologiques pour la prévision hydrométéorologique Application au bassin versant de Bouregreg –Maroc</i>	37
Tchékpo Théodore Adjakpa (Centre Interfacultaire de Formation et de Recherche en Environnement pour le Développement Durable (CIFRED)- Bénin), <i>Idelbert Dagbégnon Behanzin, Abraham Ayédon Ayena, Toupta Boguena</i> <i>Facteurs de la recrudescence des crues et des inondations en Afrique : Cas du bassin du fleuve Niger au Bénin</i>	41
Sofiane Kourat (Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique Blida- Algérie), <i>Bénina Touaïbia, Abdelhalim Yahiaoui</i> <i>Vulnérabilité aux Inondations. Cartographie pour une aide à la décision. Cas de la Mitidja ouest – Algérie</i>	45
Abdelaziz Abdallaoui (Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, Meknès - Maroc), <i>Kaoutar Elazhari, Hicham El Babaoui, Hamid Zineddine</i> <i>Perceptrons multicouches avec algorithme d'apprentissage de Levenberg-Marquardt pour la prédiction des teneurs en métaux lourds des sédiments marins</i>	50



Modélisation Numérique
en Hydraulique,
Hydrologie, et
Hydrogéologie

Outils de gestion des aquifères de la Jeffara de Gabès

F. Horriche¹, J.F. Vernoux², R. Ghoudi³

¹ CERTE, Technopole de Borj-Cédria - BP 273-8020 Soliman (Tunisie),
faten.horriche@topnet.tn

² BRGM, B.P. 36009 - 45060 Orléans cedex 2 (France), jf.vernoux@brgm.fr

³ CRDA de Gabes, rue Abou Kacem, Chebbi – 6019 Gabès (Tunisie),
r.ghoudi@gmail.com

Résumé

Le tarissement des sources et des émergences naturelles du système aquifère de la Jeffara de Gabès est la conséquence d'un cumul de l'augmentation des débits de pompage et de la diminution du débit des apports en eau à partir de la nappe du Continental Intercalaire (CI). Un modèle hydrodynamique a été calé en régime permanent et transitoire en se basant sur un modèle géologique et en se référant aux mesures piézométriques et aux débits des sources et du débit d'apport du CI. Le modèle a restitué le fonctionnement hydrodynamique des eaux souterraines et a permis de calculer les différents termes du bilan en eau du système aquifère de la Jeffara de Gabès. Il a également confirmé le rétrécissement des superficies des zones humides qui sont le résultat du phénomène d'évapotranspiration à partir de la nappe phréatique. Le modèle est utilisé comme outil de gestion pour réaliser des simulations prévisionnelles selon différents scénarios de gestion des ressources en eau en prenant en considération les besoins en eau des secteurs socio-économiques et la préservation des écosystèmes oasiens.

Mots clés : Modélisation, Jeffara de Gabès, Aquifère, Tunisie

Aquifer management tools for the Jeffara of Gabes

Abstract

The drying up of the natural springs and emergences of the Jeffara aquifer of Gabes is the consequence of an increase in well pumping and a decrease in water inflow from the Continental Intercalary (CI) aquifer). A hydrodynamic model is calibrated in a steady and transient states based on the geological model and with reference to the piezometric measurements and the flow rates of the springs and the inflow of the CI. The model restored the hydrodynamic functioning of the groundwater and made it possible to calculate the various terms of the water balance of the aquifers for the Jeffara of Gabes. It also confirmed the shrinkage of wetland areas, which are the result of evapotranspiration from the groundwater table. The model is used as a management tool to carry out predictive simulations under different scenarios of water resources management taking into account the water needs of the socio-economic sectors and the protection of oasis ecosystems.

Key Words: Modeling, Jeffara of Gabes, Aquifer, Tunisia

Introduction

Le développement socio-économique de la région de Gabès (Fig. 1) a conduit à une forte exploitation des ressources en eau souterraine du système aquifère côtier de la Jeffara. Cette exploitation a conduit à un tarissement total des sources et émergences naturelles qui alimentaient les oasis. Un des objectifs principaux de l'étude est le développement d'un outil de gestion des ressources en eau souterraine de la Jeffara de Gabès en prenant en considération les besoins en eau des activités socio-économiques et la préservation durable des écosystèmes oasiens.



Figure 1. Localisation de la zone d'étude

1. Méthodologie

L'étude intègre plusieurs composantes depuis la caractérisation hydrogéologique du système aquifère, le développement et le calage d'un modèle hydrodynamique et la simulation de scénarios prévisionnels de gestion. Un modèle géologique a été développé avec Geomodeller 3D sur la base des données des forages d'eau et des forages pétroliers ainsi que des données sismiques (Lasseur, 2014). Il a permis de d'identifier un ensemble de 20 couches géologiques qui sont regroupées en formations aquifères et aquitards. Le modèle géologique est utilisé pour construire le modèle conceptuel du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère de la Jeffara qui est simplifié à trois couches aquifères séparés par des formations imperméables ou semi-perméables. Un réseau de failles caractérisant la région joue un rôle important dans l'écoulement horizontal et vertical des eaux souterraines et est à l'origine des émergences naturelles reconnues au niveau de la région.

Le modèle hydrodynamique est calé sur la période 1970-2014 en utilisant PMWIN en se référant aux mesures piézométriques, aux débits des sources et au débit des apports d'eau souterraine depuis la nappe profonde du Continental Intercalaire (CI). L'ensemble des données de référence a été collecté à partir des archives du CRDA de Gabès et des études antérieures (Rouatbi, 1967 ; Mekrazi, 1975 ; Ben Baccar, 1982 ; Abidi, 2004a ; Abidi, 2004b, Jarraya Horriche, 2004 ; Vernoux et Abidi 2015).

2. Résultats et interprétation

Le modèle hydrodynamique, une fois calé en régime permanent et transitoire, a permis de reproduire la piézométrie et les débits des sources mesurés (Fig. 2 et 3). Il a confirmé le débit des apports souterrains à partir de la nappe du Continental Intercalaire. Le modèle a également permis de calculer les débits de drainage au niveau des oueds, les flux de reprise évaporatoire à partir de la nappe phréatique et les flux de drainage entre les différentes couches aquifères.

Les niveaux piézométriques simulés par le modèle montrent bien le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère de la Jeffara. En effet, l'écoulement se fait vers les zones de drainage au niveau des émergences naturelles matérialisées par les sources, l'aval des oueds, les zones humides et la mer. En 2014, suite aux baisses piézométriques, seuls les zones humides et

la mer jouent le rôle d'exutoire naturel (Fig. 4). Cette situation est la conséquence de la réduction des apports du CI et de l'augmentation des débits de pompage.

En effet, le débit de l'exutoire tunisien simulé par le modèle, a diminué de $2.9 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1970 à $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2014 et on prévoit que ce débit s'annule dans les prochaines années. Ces valeurs sont proches de celles calculées par les modèles du SASS (OSS, 2003) et de l'étude de la Jeffara tuniso-libyenne (Besbes et al., 2005).

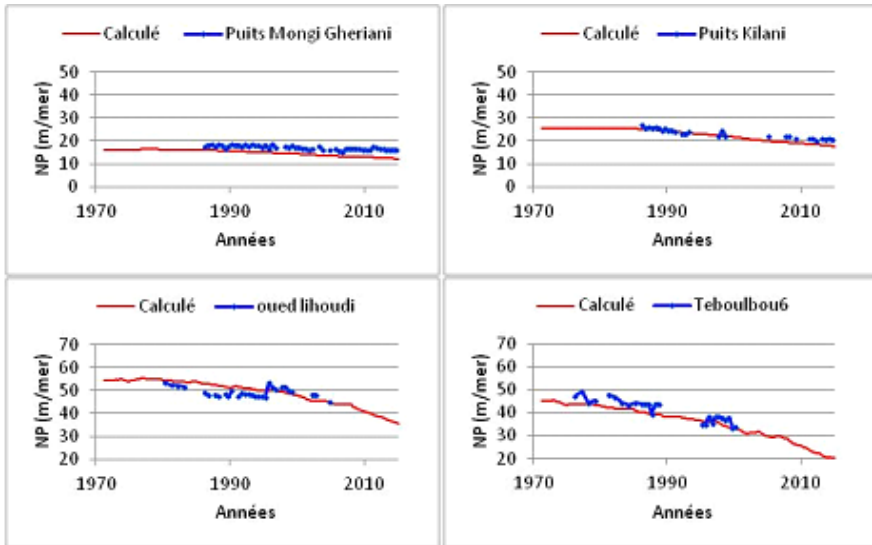


Figure 2. Evolution des niveaux piézométriques mesurés et calculés

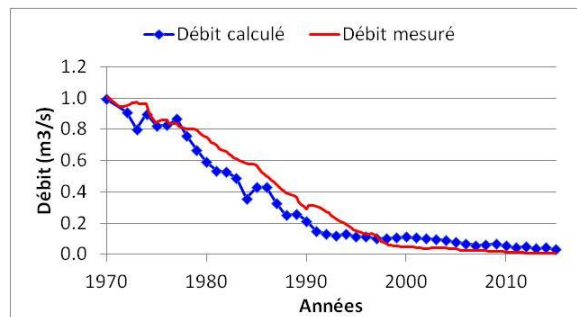


Figure 3. Evolution du débit des sources

La situation s'est aggravée sous l'effet de l'augmentation des débits de pompage pour répondre aux besoins des différents secteurs socio-économiques, en particulier l'agriculture avec une augmentation des périmètres irrigués privés. Ces débits ont augmenté de $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1970 à $3.9 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2014. En conséquence, le bilan en eau a enregistré un déficit continu à partir de 1996. Un rétrécissement des superficies des zones humides est encore enregistré en 2014 qui représente un indicateur alarmant de l'écosystème de la zone de la Jeffara dans son contexte environnemental.

Pour les simulations prévisionnelles, réalisées avec le modèle, on a prévu trois scénarios de base. Le premier scénario considère une stabilisation des débits de pompage actuels jusqu'à 2040. La recharge des eaux de pluie est maintenue constante durant toute la simulation, correspondant à des conditions pluviométriques moyennes. Le deuxième scénario considère une augmentation des débits de pompage de 5% annuellement qui représente la tendance de l'évolution de ces débits durant les années précédentes. Le troisième scénario prend en considération une diminution des pompages. Ce troisième scénario sera ensuite décliné en plusieurs variantes prenant en compte à la fois l'évolution de la consommation en eau (pour l'alimentation en eau potable, l'industrie et l'agriculture) et l'optimisation de la gestion des ressources en eau souterraine grâce à différentes

mesures susceptibles d'être mises en œuvre : optimisation des techniques d'économie d'eau, amélioration des réseaux de distribution d'eau, renforcement de l'alimentation des nappes d'eau souterraine, utilisation de ressources alternatives (usine de dessalement d'eau de mer, utilisation des eaux usées traitées, utilisation des eaux de drainage).

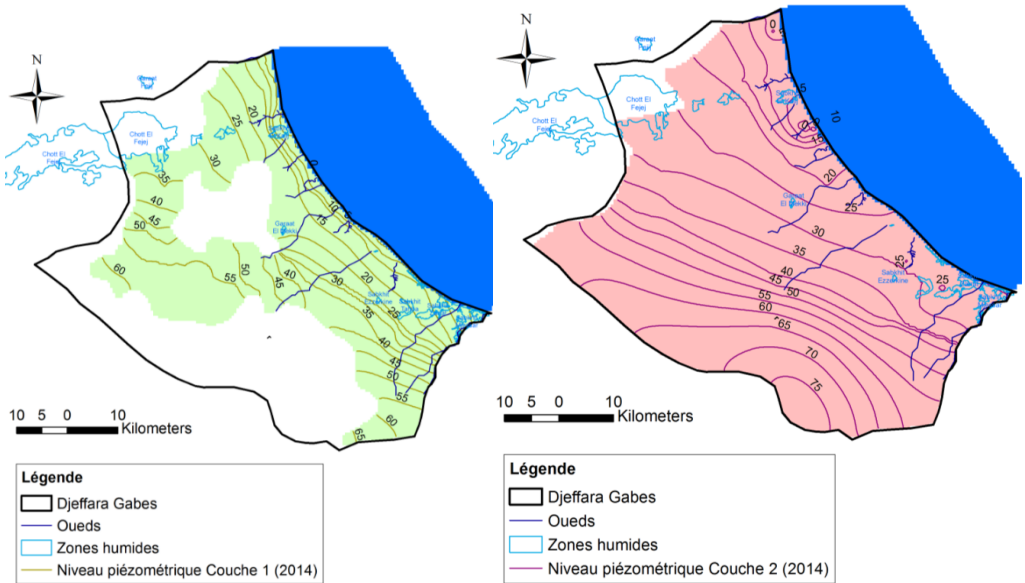


Figure 4. Cartes piézométriques simulées en 2014

Conclusion

Les résultats issus du calage du modèle hydrodynamique ont montré une cohérence avec les mesures effectuées sur la piézométrie, les débits des sources et le débit des apports depuis la nappe du Continental Intercalaire. Ceci a permis de valider la qualité du calage du modèle en vue de son utilisation pour réaliser des simulations prévisionnelles et évaluer l'impact des consommations en eau en lien avec les besoins des usages socio-économiques et des écosystèmes oasiens. Différents scénarios sont planifiés sur la base des projets de développement planifiés et des mesures d'adaptation aux contextes hydrologiques de la zone d'étude.

Références

- [1] A.F. Mekrazi, Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Gabès Nord. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Bordeaux I, France, 1975.
- [2] B. Abidi, Caractéristiques hydrodynamiques et géochimiques de la Djefara de Gabes. CRDA de Gabes et DGRE, Tunisie, 2004b, 198 p., 9 annexes.
- [3] B. Abidi, Etude des nappes phréatiques de la Djefara de Gabes, CRDA de Gabes et DGRE, Tunisie, 2004a, 74 p., 1 annexe.
- [4] B. Ben Baccar, Contribution à l'étude hydrogéologique de l'aquifère multicouche de Gabès Sud. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay, France, 1982, 115 p., 1 annexe.
- [5] E. Lasseur, Modélisation géologique 3D de la Jeffara de Gabès, BRGM/RC-64626-FR, 2014, 95 p.
- [6] F. Jarraya Horriche, Contribution à l'analyse et à la rationalisation des réseaux piézométriques, Thèse de Doctorat, ENIT, Univ. Tunis El Manar, Tunisie, 254 p.
- [7] J.F. Vernoux et B. Abidi, Synthèse hydrogéologique, Rapport final, BRGM/RC-64953-FR, 2015, 157 p.
- [8] M. Besbes, R. Bouhlila, P. Pallas, G. Pizzi, A. Ayoub, M. Babasy, S. El Barouni, et F. Horriche, Etude sur modèles mathématiques de la Djefara tuniso-libyenne, OSS, 2005, 209 p.
- [9] OSS, Système Aquifère du Sahara Septentrional: Modèle mathématique, volume IV, OSS, 2003, 245 p., 10 annexes.
- [10] R. Rouatbi, Contribution à l'étude hydrogéologique du Karst en terre de Gabès Sud, Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Montpellier, France, 1967.

Apport de la télédétection et le système d'information géographique à la modélisation hydrologique pluie-débit dans le bassin de la Mekerra (MACTA- NW ALGERIEN)

Abd-el-Kader Otmane¹, Kamila Baba-hamed², Abderrazak Bouanani²,
Lahcen Wahib Kebir¹

1 Centre des Techniques Spatiales, Département de l'Observation de la Terre. 1 Avenue de la Palestine BP 13 31200, Arzew, Oran, Algérie
aotmane@cts.asal.dz, wkebir@cts.asal.dz

2 Université de Tlemcen, BP 230 Tlemcen 13000, Algérie. Laboratoire Promotion des Ressources Hydriques, Minières et Pédologiques Législation de l'Environnement et Choix Technologique.

kambabahamed@yahoo.fr, a_bouananidz@yahoo.fr

Résumé

Les avancées technologiques en matière d'acquisition de données spatialisées offrent la possibilité de prendre en compte la répartition spatiale de la pluie et des caractéristiques physiques du bassin versant. Celles-ci interviennent dans la détermination de la surface élémentaire de calcul qui représente une combinaison géospatiale identique. Elle est supposée produire une réponse hydrologique similaire. L'objectif de cet article est de mettre en évidence l'intérêt de la télédétection et le Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) à l'amélioration de la capacité et la performance des modèles hydrologiques. Dans ce contexte, nous avons appliqué le modèle hydrologique semi-distribué à base physique SWAT (soil and water assessment tool) et le modèle global à réservoir GR4J sur le sous bassin de la basse Mekerra. Les résultats obtenus de cette étude montrent clairement la supériorité et l'exactitude de l'approche semi-distribuée à décrire correctement le comportement hydrologique à l'échelle spatiotemporelle ce qui confirme l'avantage de prendre en compte les caractéristiques physiques du bassin versant dans la modélisation pluie-débit et par conséquent l'intérêt de la télédétection et SIG.

Mots clés : Télédétection, Modèle Hydrologique, SWAT. GR4J. Basse Mekerra

Contribution of remote sensing and the geographic information system to rainfall-runoff hydrological modeling in the Mekerra basin (MACTA-NW OF ALGERIA)

Abstract

Technological advances in the acquisition of spatial data offer the possibility of taking into account the spatial distribution of rainfall and the physical characteristics of the watershed. These are involved in the determination of the elementary surface of calculation which represents an identical geospatial combination. It is assumed to produce a similar hydrologic response. The aim of this paper is to highlight the value of remote sensing and Geographic Information Systems (GIS) in improving the capacity and performance of hydrological models. In this context, we applied the SWAT (water and water assessment tool) and the GR4J global reservoir model on the lower Mekerra sub-basin. The results obtained from this study clearly show the superiority and the accuracy of the semi-distributed approach to correctly describe the hydrological behavior at the spatiotemporal scale, which confirms the advantage of taking into account the physical characteristics of the watershed in the Rainfall-flow modeling and consequently the interest of remote sensing and GIS.

Key Words: Remote sensing, Hydrological model, SWAT. GR4J. Bass Mekerra

Introduction

La modélisation hydrologique est un outil indispensable aux études et recherches dans le domaine de prévision des catastrophes naturelles, de la prédétermination et de la gestion des ressources en eau. De nombreux modèles hydrologiques ont vu le jour au cours des vingt dernières années au regard de la relation pluie – débit. Le but de cette étude est de mettre en évidence la performance d'un modèle hydrologique semi-distribué par rapport à un modèle global et par conséquent l'avantage de l'intégration des données de télédétection qui sera appliquée au bassin de la Mekerra (Macta NW algérien).

1. Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant de la Macta est situé au nord-ouest de l'Algérie, il couvre une superficie de 14389 km², il se subdivise en 16 sous bassins versants dont le sous bassin de Sidi-Bel-Abbes représente la partie septentrionale du sous bassin de l'Oued Mekerra (Mekerra amont, moyen et aval) où la ville de Sidi-Bel-Abbes est implantée dans la partie aval constituant ainsi son exutoire (Mekerra aval).

Notre étude porte sur le sous bassin versant de Sidi-Bel-Abbes qui s'inscrit entre la latitude nord 34°31' et 35°91' et la longitude ouest 0°56' et 0°20'. Il couvre une superficie de 1093 Km². Géographiquement, la région d'étude est limitée par les monts de Tessala au nord, le massif tabulaire de Tlemcen et Saida au sud, le bassin de l'Oued isser à l'ouest et les monts de Béni Chougrane et Bouhanifia à l'Est.

En contexte climatique, notre région d'étude présente tous les degrés intermédiaires entre l'influence du climat méditerranéen au nord et continentale aride au sud [1].

2. Matériels et Méthodes

La démarche générale adoptée pour cette étude consiste en premier temps à présenter les modèles à appliquer sur notre région d'étude, puis la deuxième étape a porté sur la préparation des données nécessaires pour chaque modèle. Enfin la dernière phase a été réservée à l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus.

2.1. Présentation des modèles

Le modèle GR4J fait partie des modèles GR (Génie Rural) conçus depuis 1983 au Cemagref d'Antony (aujourd'hui appelé IRSTEA). Il s'agit d'un modèle global conceptuel à réservoirs. Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par [2], [3] et [4] qui ont permis d'améliorer progressivement la performance du modèle. C'est la version de Perrin et al., (2003) qui est présentée dans cet article. Le modèle GR4J ne possédant que 4 paramètres à caler qui fonctionnent au pas de temps journalier. Ce modèle est facile à configurer et ne nécessite pas une description du bassin versant. En plus qu'il a été déjà utilisé dans le contexte algérien dans plusieurs études qui ont démontré son adaptabilité au contexte climatique semi-aride [5].

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle hydrologique à base physique, conçu et développé par des chercheurs de l'USDA (United States Department of Agriculture) [6], ce modèle est continu dans le temps, opère au pas de temps journalier sur de longues périodes. SWAT reproduit le cycle de l'eau simplifié à l'échelle du bassin versant de façon semi-distribué, par le biais de différents compartiments hydrologiques : en surface du sol, dans la zone racinaire, dans la nappe souterraine et dans le cours d'eau.

Ce modèle a été validé sur de nombreux bassins versants dans le monde, de tailles, de contextes géologiques et climatiques variés [7].

2.2. Acquisition des données

Pour le modèle SWAT : les données météorologiques utilisées (températures maximale et minimale, précipitations, humidité relative et vitesse du vent) ont été fournies par l'office national météorologique d'Alger avec un pas de temps journalier. Le rayonnement solaire est calculé à partir du modèle horaire de Bird & Hulstrom en w/m²/h et convertie par la suite en MJ/m²/j. Ainsi nous avons utilisé les données hydrométriques de la station de Sidi-Bel-Abbes qui ont été collectées auprès de l'agence nationale des ressources hydraulique.

La carte des sols est réalisée sur la base de 138 profils pédologiques et analyse physico-chimique assez représentatifs de la plaine de Sidi-Bel-Abbes. Le choix des profils s'est fait sur la base des zones homogènes établie par une superposition de couches d'informations (pente, géologie, altitude).

Les données spatiales utilisées sont issues du capteur Landsat 8 prise en mois de mars 2016 ainsi qu'un modèle numérique de terrain ASTER d'une résolution spatiale de 30m. Selon notre problématique nous avons utilisé deux canaux du domaine visible bande 2 et bande 4 ainsi que l'infrarouge bande 5.

L'analyse des données spatiales a été réalisée à l'aide de logiciels ENVI 5 alors que pour le traitement des cartes thématiques, nous avons utilisé l'outil SIG.

Concernant le modèle GR4) les variables d'entrée sont limitées aux séries de pluies en (mm), de l'évapotranspiration potentielle (ETP en mm) et des débits journaliers observés à l'exutoire (station de Sidi-Bel-Abbes) exprimés en lames d'eau écoulées en (mm).

3. Résultats et discussion

Le résultat du calage de modèle SWAT montre que les débits journaliers simulés concordent assez bien avec les débits journaliers observés à la station de Sidi-Bel-Abbes (Nash = 0.7, $R^2=0.83$) (fig. 1). Le critère de Nash indique que le calage est bon. La validation du modèle montre un synchronisme moyen entre les courbes des données observées et simulées, comme en témoigne le critère de Nash (Nash=0.62 et $R^2 =0.61$). Ceci peut être rattachée à la position du bassin de Sidi-Bel-Abbes en aval de la Mekerra (Mekerra aval) avec une seule station hydrométrique implantée à l'exutoire du bassin qui draine toutes sa surface (Mekerra amont, moyen et aval),

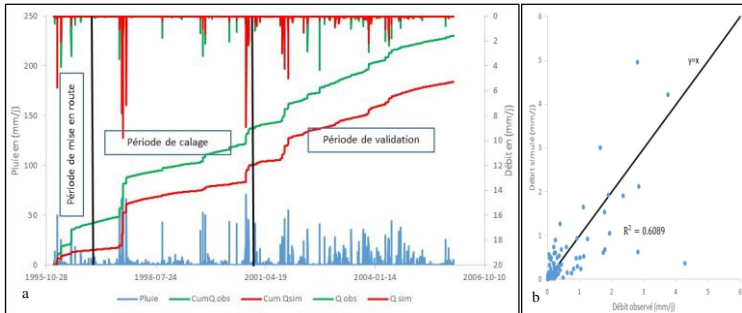


Figure 1 : (a) Hydrogramme de comparaison entre le débit simulé et observé avec le modèle SWAT pour la période de calage et validation ; (b) Validation du modèle SWAT « Débit simulé en fonction du débit observé »

La spatialisations des termes du bilan hydrologique sur le bassin versant fait apparaitre la position de la ville de Sidi-Bel-Abbes dans le sous-bassin le plus générateur de débit de surface (106.23mm/an, presque 27% de lame d'eau précipitée) (fig. 2) ce qui explique l'occurrence des inondations dans cette ville. Tandis que l'évapotranspiration réelle présente des valeurs élevées tout le long de l'oued Mekerra (73 à 80%) ce qui justifie l'écoulement permanent de l'oued principal.

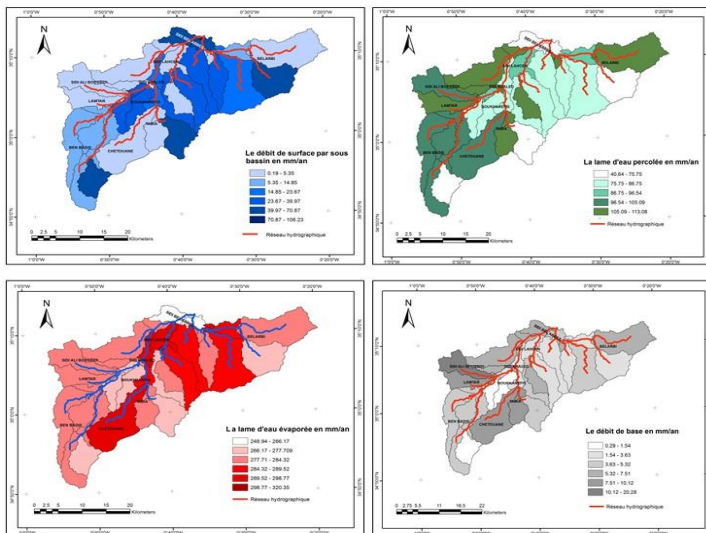


Figure 2 : Spatialisation des différents compartiments du cycle hydrologique en (mm/an) pendant la période du calage du modèle

Contrairement au modèle SWAT, les résultats du calage et de la validation du GR4) ne sont pas concluants (Nash=0.33, $R^2=0.46$). L'allure des courbes n'est pas synchrones en plusieurs endroits (Fig. 3). Les crues qui sont observées pendant toutes

la période d'étude sont largement sous-estimées. Ces écarts semblent être dus à un problème d'extrapolation des paramètres de calage. Ils peuvent révéler aussi l'incapacité du modèle GR4J avec une seule station pluviométrique à suivre la répartition spatio-temporelle des précipitations.

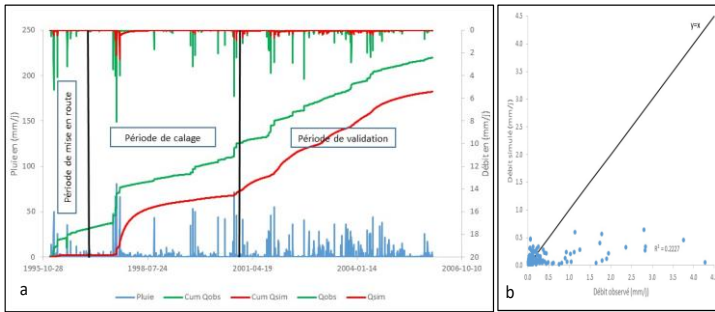


Figure 3 : (a) Hydrogramme de comparaison entre le débit simulé et observé avec le modèle GR4J pour la période de calage et validation ; (b) Validation du modèle GR4J « Débit simulé en fonction du débit observé »

Conclusion

Cette étude fait apparaître l'intérêt de prendre en compte la variabilité spatiale des caractéristiques physiques du bassin versant en utilisant la télédétection et le SIG dans la modélisation hydrologique. Dans cette perspective, l'application du SWAT sur notre site d'étude a permis de modéliser le fonctionnement hydrologique du bassin versant sur 111 unités de réponse hydrologique dans 54 sous bassins, dont l'évolution temporelle de la réponse totale du bassin montre un synchronisme avec la courbe des débits observés, par ailleurs l'évolution spatiale des différents termes du bilan hydrologique donne des résultats concluants et confirme par conséquence les inondations dans la ville de Sidi-Bel-Abbès. Par contre, le modèle GR4J perd sa performance et paraît incapable de reproduire fidèlement les débits à l'exutoire notamment sans prise en compte de l'hétérogénéité spatiale des précipitations. A l'issue de ce résultat, nous remarquons clairement la supériorité et l'exactitude de l'approche semi-distribuée à décrire le comportement hydrologique à l'échelle spatiotemporelle confirmant ainsi les résultats des études antérieures à l'égard des approches globale et semi-distribuée [8] qui mettent en évidence que :

- Plus le bassin est grand, plus l'approche semi-distribuée sera avantageuse (une superficie de 1093 km² pour notre cas).
- La semi-distribution des paramètres est, en moyenne, plus avantageuse pour des bassins qui présentant des indices de réponse élevés.

Cette étude permet donc de présenter, l'avantage de la modélisation hydrologique semi-distribuée à base physique, ainsi que l'avantage de prendre en compte les caractéristiques physiques du bassin. Dans ce sens l'imagerie satellitaire et SIG constitueront les principales sources de données dans la modélisation hydrologique pluie-débit.

Références

- [1] A. Khaldi, Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'ouest Algérien "Monts de Tlemcen - Saida", Thèse de Doctorat d'État, université d'Oran 2005.
- [2] C. Perrin, Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, La Houille Blanche, (6/7) (2002) 84-91.
- [3] S. Mouelhi, Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Rapport de thèse, Cemagref 2003.
- [4] C. Perrin, C. Michel, V. Andréassian, Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, Journal of Hydrology, 279 (1-4) (2003) 275-289.
- [5] A. Otmane, K. Baba-hamed, A. Bouanani et A. Safa, Prédétermination des valeurs de crues extrêmes et contribution de la plaine de Sidi Bel-Abbès dans le bilan hydrologique du bassin versant de l'oued Mekerra, Tech. Sci. Méthodes, (7/8) (2017) 27-48.
- [6] J. G. Arnold, P. M. Allen, G. Bernhardt, A comprehensive surface-groundwater flow model, J. Hydrol, 142 (1-4) (1993) 47-69.
- [7] M. Tripathi, R. Panda, N. Raghuvanshi, Identification and prioritisation of critical sub-watersheds for soil conservation management using the SWAT model, Biosyst. Eng., 85(3) (2003) 365-379.
- [8] J. Michaud, S. Soroshian, Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a midsized semiarid watershed, Water Resour. Res., 30(3) (1994) 593-605.

Analyse spatio-temporelle des extrêmes climatiques dans la région semi-montagneuse de Man-Danané par utilisation du programme RCLimDEX

Boyossoro Hélène Kouadio^(1,2), Vami Hermann N'guessan Bi⁽¹⁾, Kouakou Bernard Djè^(1,3), Gabriel Ettienne Aké⁽²⁾, Assa Yapi⁽²⁾, Sika Brice⁽²⁾, Jean Biémi^(1,2)

¹Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, 22 B. P. 801 Abidjan 22 (Côte d'Ivoire) ; kbhel@yahoo.fr ; vami@outlook.com ;

²Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22 (Côte d'Ivoire) ak_gabe@yahoo.fr ; kbhel@yahoo.fr ; jbiemi@yahoo.fr

³Direction de la météorologie, Société d'exploitation et de Développement Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique (SODEXAM), 15 BP 990 Abidjan 15Abidjan - Côte d'Ivoire. dje_kbernard2003@yahoo.fr

Résumé

La région de man-danané située à l'ouest de la Côte d'Ivoire est soumise à un climat de montagne caractérisé par une forte pluviométrie pouvant dépasser 1500 mm par an. Ceci l'expose normalement à l'aléa inondation. Cependant dans le contexte actuel de changement climatique, il devient nécessaire de caractériser le climat de la région pour mettre en évidence les aléas hydrométéorologiques auxquels est exposée la région. Le présent article a donc pour objectif d'analyser les tendances d'évolution spatio-temporelle des indices pluviométriques en vue de mettre en évidence les événements extrêmes dans la région. A partir de relevés de précipitations journalières couvrant la période de 1985 à 2014, les extrêmes climatiques ont été déterminés par la méthode des indices climatiques à l'aide du programme RCLimDex. Sur la quasi-totalité de la région, selon la moyenne mobile, les jours extrêmement pluvieux montrent une tendance à la baisse de 1980 à 1996. De 1996 à 2004, l'évolution est à la hausse, puis de 2005 à 2014, c'est plutôt une tendance à la baisse qui s'observe. L'évolution de la tendance à la baisse suit un gradient sensiblement Nord-est – Sud-ouest. Cette évolution est également mise en évidence avec la variation des jours secs consécutifs. Cette baisse pluviométrique générale est favorable à l'aléa sécheresse dans la région.

Mots clés : Extrêmes climatiques, Indices climatiques, RCLimDex, Man-Danané, Côte d'Ivoire

Spatio-temporal analysis of climatic extremes in the semi-mountainous region of Man-Danané using the program RCLimDEX

Abstract

The region of Man-Danané located in western Côte d'Ivoire is subject to a mountain climate characterized by a high rainfall that can exceed 1500 mm per year. This normally exposes it to flood hazard. However, in the current context of climate change, it becomes necessary to characterize the climate of the region to highlight the hydro-meteorological hazards to which the region is exposed. The purpose of this paper is therefore to analyze trends in the spatio-temporal evolution of rainfall indices with a view to highlighting extreme events in the region. From daily precipitation records covering the period 1985 to 2014, climatic extremes were determined by the climate index method using the RCLimDex program. Over most of the region, on a moving average basis, the extremely rainy days show a downward trend from 1980 to 1996. From 1996 to 2004, the evolution is increasing, and then from 2005 to 2014, it is rather a downward trend that is observed. The evolution of the downward trend follows a substantially Northeast – Southwest gradient. This evolution is also highlighted with the variation of consecutive dry days. This general rainfall decrease is favorable to the drought hazard in the region.

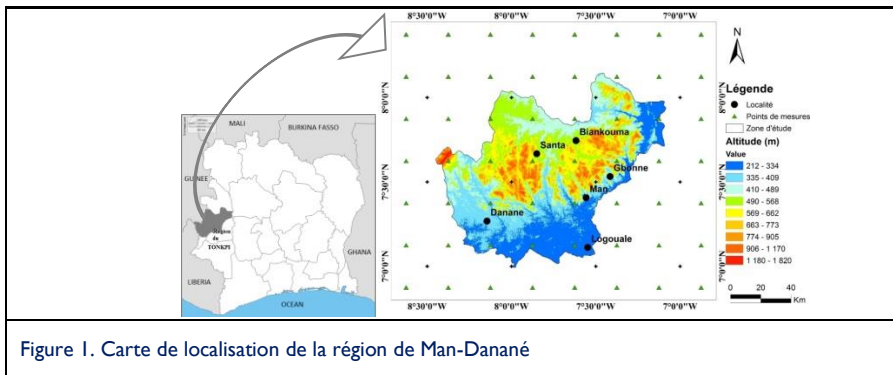
Key Words: Climatic extremes, Climatic index, RCLimDex, Man-Danané, Côte d'Ivoire

Introduction

L'ampleur des dégâts des risques hydrométéorologiques en Côte d'Ivoire est grande depuis plus de 30 ans (138 morts et 13 disparitions, des pertes matérielles dues aux inondations et glissement de terrain, depuis 1996, etc.) [1]. La région de Man-Danané n'est pas en reste. En effet, selon [2] le risque élevé d'érosion hydrique est notable dans la région. En 1997, le village de Voungouè a été inondé avec la destruction de plusieurs maisons et biens matériels et des dizaines de familles sans abri ([2]). La région est également soumise à la longue sécheresse qui a touché toute l'Afrique de l'Ouest depuis les années 60 avec des conséquences telles que l'assèchement des cours d'eau en saison sèche, l'appauvrissement des sols ([3] ; [4]). Cette étude est initiée pour caractériser les extrêmes climatiques dans la région dans le contexte actuel de changement climatique. Le programme RClimDex [5], recommandée par l'équipe d'experts sur la détection des changements climatiques et les indices (ETCCDI) a été utilisé à cet effet.

I. Caractéristiques physiques et socio-économiques de la région de Man-Danané

La zone semi-montagneuse de Man-Danané est située dans la région du Tonkpi à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Elle couvre les régions administratives de Man, de Danané et de Biankouma. Elle est située entre les latitudes 7°00 et 8°15 Nord et les longitudes 7°00 et 8°30 Ouest et est couverte par 56 points de mesures satellitaires météorologiques IRI (Figure 1). Sa particularité est, d'une part, le relief très accidenté avec des altitudes variant de 200 mètres à plus de 1000 mètres, et d'autre part son climat de montagne, très humide (1100 à 2300 mm de pluie par an) avec un dense réseau hydrographique, la prédisposant aux risques géologiques et hydrométéorologiques ([4],[3], [5]). Les principales activités économiques sont l'agriculture, le tourisme et l'exploitation minière ([2], [6]). La population totale de la région en 2014 est de 755 614 habitants [7]. Tous ces atouts montrent l'intérêt de l'étude dans la région.



2. Données et méthodes

La région souffre d'un manque de données climatiques *in situ* à cause de l'insuffisance des postes de mesures et la guerre qu'a connu la Côte d'Ivoire pendant plus de 10 ans. Les données utilisées pour le calcul des indices climatiques sont donc des données journalières de pluie satellitaire de 1981 à 2014 (56 points de mesure), téléchargées de la base de données météorologiques satellitaires IRI obtenue sur le site ([8]) à partir de la *Climate Data Library*. Les données mensuelles *in situ* obtenues à la SODEXAM (de janvier 1986- décembre 1995) de la station snotique de Man ont été utilisées pour vérifier leur corrélation avec les pluies satellitaires. Une corrélation bonne ($R^2 = 0,963$) entre les données IRI et les données *in situ* de la station de Man est trouvée. Cela justifie l'utilisation des données IRI. Le programme RClimDex [5], recommandée par l'équipe d'experts sur la détection des changements climatiques et les indices (ETCCDI) a été utilisé pour les traitements. Onze (11) indices des extrêmes de précipitation ont été calculés. Mais, les indices R99p (Jours extrêmement pluvieux), CDD (Jours pluvieux consécutifs), R20 (Nombre de jours de précipitations ≥ 20 mm), CWD (Jours pluvieux consécutifs) et Rx5day (Cumul maximal des précipitations de 5 jours) ont été retenus pour les analyses. Ensuite une spatialisation des différents indices extrêmes calculés par KRIGEAGE est faite. Cette méthode est considérée comme optimale, au sens statistique, pour l'interpolation et l'extrapolation et donne l'estimation la plus précise selon [9].

3. Résultats obtenus et discussion

3.1. Résultats

Les indices extrêmes de précipitation calculés, pour les années 1984, 1994, 2004 et 2014, sont présentés dans le tableau I pour certains points de mesures quasi-superposés à certaines stations météorologiques de la SODEXAM que sont Danané, Santa et Man. Pour ces points de mesure, l'évolution des indices ne met pas en évidence une tendance claire. L'évolution est faiblement fluctuante d'une année à une autre. Seul l'indice R99p affiche une tendance à la hausse au niveau des points de

mesure de Danané et Santa. Cela a conduit à une analyse des graphes d'indices. Vu la multitude de graphes, seuls ceux pour le point de mesure de Man sont présentés (figure 2). Ils montrent que les indices R99p, R20 et Rx5day présentent une tendance générale d'évolution à la hausse. Par ailleurs, la tendance de l'indice CDD est légèrement à la baisse voire stationnaire, quand la tendance de l'indice CWD est fortement à la baisse. Cependant, l'évolution de la moyenne mobile de l'indice R99p est inversement proportionnelle à celle de l'indice CDD depuis les années 2000 – 2005. Cette évolution montre une concentration de la pluie sur un nombre restreint de jours tout au long de l'année. Une légère tendance de la pluie à la baisse est relevée. D'où la nécessité de faire une analyse spatio-temporelle des indices dans la région.

Tableau 1 : Valeurs de quelques indices pluviométriques au niveau des points de mesures IRI Man, Danané et Santa

Indices	Danané X= -8,145 Y= 7,268				Santa X= -7,85 Y= 7,667				Man X= -7,625 Y=7,375			
	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
Rx5day	143,9	141,6	173,6	186,2	129,6	118,7	113,9	177,3	132,9	149,5	128,4	179,6
R20	31	34	32	34	21	25	33	23	22	30	25	32
R99p	0	70,7	124,1	316	0	0	144,1	188,9	0	93,6	0	70,6
CDD	25	26	29	21	25	50	39	25	32	32	29	19
CWD	15	20	7	9	13	13	10	10	15	20	8	6

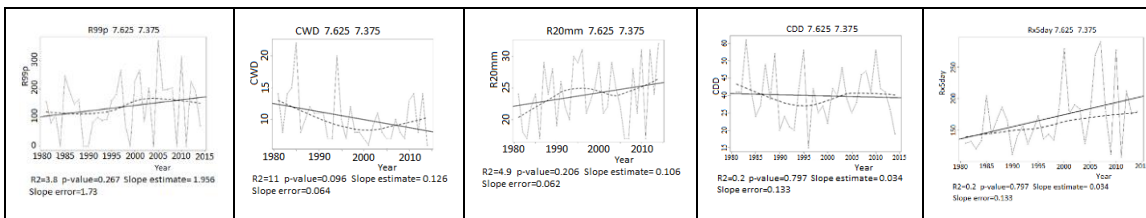


Figure 2. Graphes d'évolution de quelques extrêmes pluviométriques au point de mesures météorologiques IRI de Man

La figure 3 montre la répartition spatiale de l'indice R99p pour les années 1984, 1994, 2004 et 2014, faisant ainsi ressortir sa dynamique sur 3 décennies. En effet l'indice varie de – 6 à 137 mm en 1984, de 23 à 95 mm en 1994, de 9 à 153 mm en 2004 et de 2 à 308 en 2014. L'analyse des cartes montre que l'indice R99p croît de façon générale du Nord-est au Sud-ouest sur toute la région pour toutes les années. Les jours extrêmement pluvieux ont connu une diminution de 1984 à 1994, puis une légère augmentation en 2004 et qui a continué en 2014. Cependant, cette augmentation ne s'observe véritablement que dans l'Ouest de la région. La figure 4 montre la répartition du nombre de jours secs consécutifs (CDD). L'indice varie de 20 à 52 jours sur toute la région. En 1984, la majeure partie du territoire montre un indice faible à moyen, les indices forts se trouvant à l'extrême ouest de la région. En 1994, toute la région est couverte par des indices moyens à fort. Cette évolution connaît une baisse en 2004, puis en 2014. Ce qui traduit une légère reprise de la pluviométrie depuis 2014 dans la tendance générale à la baisse.

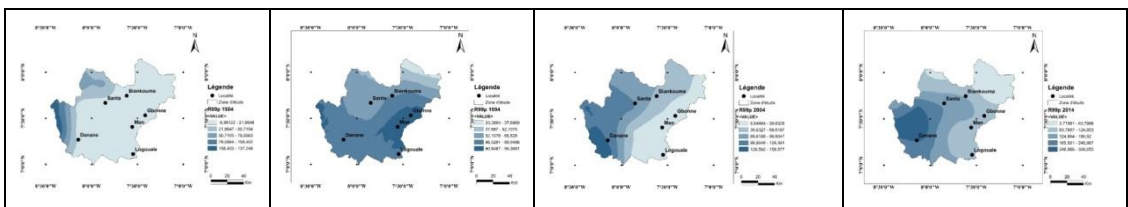


Figure 3. Carte de l'évolution de l'indice R99p dans la région de Man-Danané de 1984 à 2014

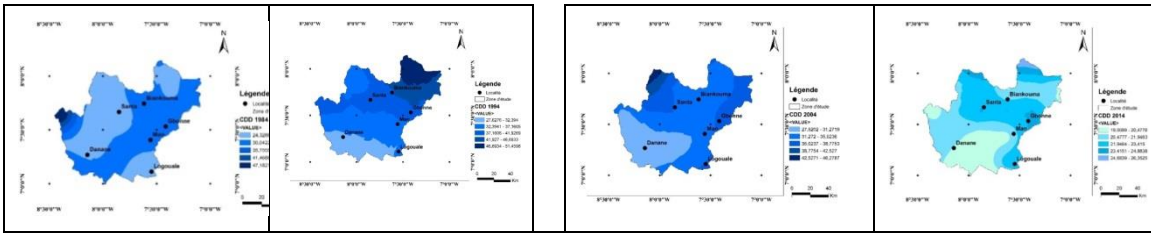


Figure 4. Carte de l'évolution de l'indice R99p dans la région de Man-Danané de 1984 à 2014

3.2. Discussion

Les résultats obtenus montrent une tendance générale du climat à la sécheresse depuis les années 80. Cependant, il faut être prudent dans l'interprétation des résultats puisqu'il existe une grande hétérogénéité quant à la présence ou l'absence de tendances d'une station à une autre [10]. Ces résultats sont en conformité avec ceux de [11] qui ont montré une baisse de 0,003 jours/an de l'indice CWD et une hausse de 0,215 jour/an de l'indice CDD à Gagnoa, à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Les résultats obtenus sont en conformité avec ceux de [3] et de [4], utilisant les données *in situ*, qui montrent une tendance générale à la sécheresse amorcée depuis plus de 30 ans dans la région de Man.

Conclusion

Les indices pluviométriques Rx8day, R99p, R20, CWD, CDD de la région de Man-Danané ont été calculés par utilisation des données de pluie satellitaire IRI. L'analyse de l'évolution de ces indices dans la région fait ressortir la tendance générale à la baisse de la pluviométrie depuis plus de 30 ans, selon un gradient sensiblement Nord-est - Sud-ouest, avec une légère hausse en 2014. La conformité des résultats obtenus avec ceux réalisés par utilisation de données *in situ* soutient l'idée d'une bonne représentativité des pluies satellitaires IRI pour pallier des pluies *in situ*. L'évolution des indices montre aussi une concentration de la pluie sur un nombre restreint de jours tout au long de l'année. Cette concentration de la pluie peut augmenter la probabilité d'occurrence de certains aléas.

Références

- [1] P. Kaman, Analyse des vulnérabilités aux catastrophes et des capacités de réponse en Côte d'Ivoire, Rapport d'étude, Gouvernance du risque et diagnostic de vulnérabilité de la Côte d'Ivoire, rapport d'étude UEMOA, (2013) 58p.
- [2] B.H. Kouadio, Insécurité climatique et géorisques en Afrique de l'Ouest : apport des systèmes d'information géographique et de la télédétection à l'étude des phénomènes de risques naturels dans la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire).Thèse 3e cycle, Université Félix Houphouët Boigny Ex Université de Cocody, 2001, 164p
- [3] M. B. Saley, Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de doctorat, Université de Cocody, 2003, 209 p.
- [4] K. F. Kouamé, Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d'Informations Géographiques et du modèle hydrologique HYDROTEL, Thèse de Doctorat d'Etat, Université Félix Houphouët Boigny Ex Université de Cocody, 2011, 389p.
- [5] X. Zhang et F. Yang: RClimDex 1.0, User Manual; Climate Research Branch Environment, Downsview, Ontario, Canada, (2004) 23p.
- [6] CNRA, La direction régionale du CNRA de Man en quelques mots et chiffres, Rapport du CNRA, 2009, 12p
- [7] INS, Recensement Général de la Population et de l'Habitat en Côte d'Ivoire (2014),
- [8] IRI/LDEO Climate Data Library, <http://iridl.ldeo.columbia.edu>, consulted April 6, 2017
- [9] Gratton Y., les articles de l'Institut d'Analyse Géographique, Juin 2002, www.iag.asso.fr.
- [10] G. Fortin, B. Hétu, F. Gauthier et D. Germain, Extrêmes météorologiques et leurs impacts géomorphologiques : le cas de la gaspésie, Actes du XXVIII Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège, 1^{er} -4 juillet (2015) 469-474
- [11] R. Balliet, M. B. Saley, E. L. A. Eba, M. V. Sorokoby, H. V. N'Guessan Bi, A. O. N'Dri, B. K. Djé, J. Biémi, Evolution des extrêmes pluviométriques Dans la région du Gôh (Centre-Ouest De La Côte d'Ivoire), European Scientific Journal August (2016) Edition vol.12, No.23

Modélisation Pluie-Débit à l'aide des Réseaux de Neurones Artificiels Multicouches sur le Bassin Versant du Fleuve Cavally à la station d'Ity (Zouan-Hounien, Côte d'Ivoire)

Alexis Loukou BROU^{1*}, Lazare Kouakou KOUASSI¹, Séraphin Kouakou KONAN¹, Alex Zilé KOUADIO¹, Félix Koffi KONAN¹, Bamory KAMAGATE²

^{1*} Université Jean Lorougnon Guédé, BP 150 Daloa (Côte d'Ivoire); (+225)07 701 134, brou.alexis@ujlg.edu.ci

² Université Nangui-Abrogoua, 08 BP 109 Abidjan 08 (Côte d'Ivoire)

Résumé

La gestion des ressources en eau constitue un déficit important pour la plupart des pays du monde. La connaissance de ces ressources aussi bien sur le plan quantitatif que sur le plan qualitatif nécessite la disponibilité d'une bonne base de données historique. Cependant, l'absence ou la mauvaise qualité des données hydro-climatiques sur certains bassins rend parfois les études hydrologiques difficiles. Les modèles pluie-débit généralement conceptuels, peuvent être utilisés pour apporter une réponse aux comblements des lacunes. L'objectif de cet article est d'établir un modèle pluie-débit à la station hydrométrique d'Ity sur le bassin du Cavally pour le comblement des lacunes dans la série de données de débit. Pour ce faire, un perceptron multicouche de type feedforwards à deux entrées (pluie moyenne mensuelle et ETP) et une sortie (débits) a été utilisé. L'évapotranspiration a été calculée à l'aide de la méthode de THORNTHWAITE. Les critères de Nash et le coefficient de corrélation ont été utilisés pour évaluer la performance du modèle. La comparaison des critères de performance des différentes structures du modèle de réseau de neurones a montré que la structure 2-3-1 donne des résultats satisfaisants avec des critères d'évaluation de performance de 75,79% de critère de Nash et 95,64% de coefficient de corrélation linéaire au niveau du calage et 73,32% de critère de Nash et 98,33% de coefficient de corrélation linéaire au niveau de la validation. Les paramètres caractéristiques déterminés de ce modèle serviront à combler les lacunes issues des données hydro-climatiques pour étudier les variabilités hydro-climatiques du bassin versant du fleuve Cavally.

Mots clés : modèle pluie-débit, réseau neurones artificiels, Fleuve Cavally, Côte d'Ivoire

Rain-Flow Modeling using a Multi-layer Artificial Neural Network on the Watershed of the Cavally River (Côte d'Ivoire)

Abstract

Water resources management is nowadays a significant stake for the world. However, missing or bad quality of the available hydro-climatic historical data of the study area makes sometimes hydrological studies difficult. Generally, conceptual rain-flow models are designed to bring an appropriate answer to the correction of gaps and prediction of the flows. Hydro-climatic historical data of the Ity station, located on Cavally River, are made up of gaps which it is advisable to fill. The aim of this paper is to establish a model rain-flow of the watershed of Cavally River of the hydrometric station of Ity to determinate flows and fill gaps noted in the set of historical data recorded. For that, a multi-layer perceptron of feed forwards type at two entries (monthly average rain and evapotranspiration) and an exit (flows) were used. Model rain-flow was carried out starting from hydro-climatic historical data of the 3 stations located in the watershed of Cavally River over one period going from 1990 to 2001. Evapotranspiration was calculated through THORNTHWAITE method. Comparison of the criteria of performance of the various architecture of neural network model showed that architecture 2-3-1 gives best results with performance criteria of 75.79% for Nash criterion and 95.64% for correlation linear coefficient to the calibration level and 73.32% for Nash criterion and 98.33% for correlation linear coefficient to the validation level. Given parameters characteristic of this model will be used to study hydro-climatic variability of the watershed of Cavally River.

Key Words: rain-flow modeling, artificial neural network, Cavally River, Côte d'Ivoire

Introduction

La gestion de la ressource en eau constitue aujourd'hui un enjeu important pour la plupart des pays du monde. Par exemple, la prévision des conditions hydrologiques futures constitue une importance capitale dans la planification et la gestion des ressources en eau [1]. Pour prédire les débits, une connaissance des informations sur les débits et ou des pluies du passé et du présent est nécessaire. Malheureusement, l'absence ou la mauvaise qualité (lacunes, erreur de mesure...) des données historiques hydro-climatiques disponibles de la zone étudiée rend parfois difficile ces études hydrologiques. Un comblement des lacunes est donc nécessaire avant toute utilisation. Les méthodes de corrélation entre stations voisines utilisées couramment pour le comblement des lacunes sont très souvent limitées par la faible densité des stations sur les bassins versants. Les modèles pluie-débit pourraient apporter une réponse appropriée au comblement des lacunes dans les séries de débits et de pluie [2]. En effet, la simulation des débits constitue une solution pour le comblement de lacunes dans des séries de données, la reconstitution de débits historiques. En raison des difficultés de formulation des modèles non linéaires, les tentatives récentes ont recours à l'approche des réseaux de neurones artificiels (RNA) pour la modélisation hydrologique de bassins versants complexes. Depuis le début des années 1990, les réseaux de neurones artificiels ont été utilisés avec succès dans les domaines liés à l'hydrologie comme la modélisation pluie-débit, la qualité de l'eau, la politique de gestion de l'eau, la prévision des précipitations, les séries chronologiques hydrologiques [3]. Les réseaux de neurones permettent l'estimation des débits d'un fleuve[4], l'amélioration de la modélisation pluie-débit basée sur des événements pluvieux[5], la modélisation de la relation pluie-débit[2]. Les RNA utilisent des données dépendantes. Ils n'imposent aucune relation fonctionnelle entre les variables indépendantes et dépendantes dans la mesure où cette relation est déterminée par les données dans le processus d'apprentissage (ou calibration) [6]. Mathématiquement, un RNA peut être considéré comme une approximation universelle. Pour sa capacité d'apprendre et de généraliser « la connaissance » de paires de données suffisantes, il est possible pour les réseaux de neurones artificiels de résoudre des problèmes complexes à grande échelle tels que la reconnaissance des formes, la classification, l'association, le contrôle, la modélisation non linéaire et bien d'autres [7]. L'objectif de cet article est d'établir un modèle pluie-débit du bassin du Cavally à la station hydrométrique d'Ity dans le but de déterminer des débits et de combler les lacunes observées dans la série de données.

1. Matériel et méthodes

1.1. Présentation de la zone d'étude

Le fleuve Cavally a un bassin versant transfrontalier entre la Guinée, la Côte d'Ivoire et le Libéria. Situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire, le fleuve Cavally prend sa source en Guinée, au nord du Mont Nimba, à une altitude voisine de plus de 1000 m. Long de 700 km, le lit du Cavally sert de frontière entre le Libéria et la Côte d'Ivoire à partir de son cours moyen (au sud de Toulepleu) sur environ 330 km. Le bassin versant a une superficie totale de 28800 km² à Taté, station hydrométrique située à 60 km de l'embouchure. La superficie de la partie du bassin versant située en Côte d'Ivoire est d'environ 15000 km² [8]. Dans le cadre de cette étude, l'exutoire choisi est la station hydrométrique de Floleu située en aval de la station d'Ity dans la région de Zouan-Hounien. Son bassin versant a une superficie de 3647,53 km² (Figure 1). La région de Zouan-Hounien fait partie de la région des montagnes de la Côte d'Ivoire ; le relief y est accidenté. Zouan-Hounien se trouve en zone forestière et appartient au climat de montagne, marqué par deux saisons : une saison pluvieuse de Mai à Octobre et une saison sèche de Novembre à Mars. La température moyenne annuelle à Zouan-Hounien est de 25,6 °C. Les précipitations annuelles sont en moyenne de 1866 mm. Le mois le plus sec est celui de Janvier avec 15 mm. Les précipitations les plus importantes sont enregistrées en Septembre et sont de 357 mm en moyenne.

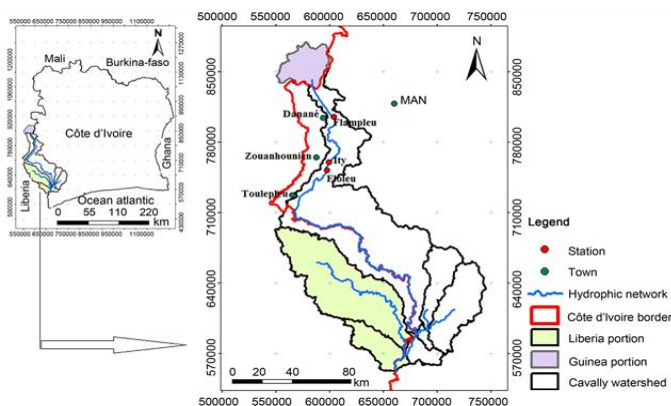


Figure 1: Situation de la zone d'étude

Acquisition et analyse des données

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont issues de trois (3) stations hydrométriques (Fiampleu, Ity et Toulepleu) fournissant les données de débits situées sur le fleuve Cavally et d'une station pluviométrique fournissant les

données de pluies et de température sur le site d'exploitation de la Société des Mines d'Ity (SMI). Les données de débits journaliers sont fournies par la Direction Générale des Infrastructures et de l'Hydraulique Humaine (DGIIHH) sous tutelle du Ministère des Infrastructures Economiques de la République de Côte d'Ivoire, tandis que les données de pluies mensuelles ont été acquises à la Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire et Maritime (SODEXAM). Pour avoir le même pas de temps que les pluies mensuelles, les débits journaliers ont été transformés en débits mensuels. Ces données couvrent la période de 1980 à 2001 pour les débits et de 1990 à 2007 pour les données hydro-climatiques. Afin de permettre au modèle de simuler correctement les données qui lui sont fournies, une période de base commune a été choisie en tenant compte de la qualité des données, c'est-à-dire contenant moins de lacunes sur une période continue allant de janvier 1990 à décembre 2001. L'évapotranspiration potentielle mensuelle a été calculée par la formule de THORNTHWAITE (1944). Les valeurs caractéristiques sont consignées dans le tableau 1.

Tableau 1: Caractéristiques des données hydro-climatiques et de débits dans la zone d'Ity

	Débits (m ³)	Pluie (mm)	Température (°C)	ETP (mm)
Maximum	327,27	531,70	28	141,42
Moyenne	143,69	151,37	25,76	85,9
Minimum	76,52	0,0	24	62,90
Ecart-typs	59,28	109,51	1.03	14,10

1.2. Modélisation pluie-débit par les réseaux de neurones artificiels (RNA)

La mise en place d'un modèle de RNA comprend quatre (4) étapes : la recherche de données, le prétraitement de ces données, l'apprentissage et l'évaluation du modèle [2]. Dans cette étude, un perceptron multicouche de type feedforwards retro propagation à deux (2) couches dont une couche cachée et une couche de sortie a été constitué. Pour la mise en place du modèle de réseaux neuronaux, les données de pluie moyenne, d'ETP et de débits au pas de temps mensuel sur une période continue d'Août 1990 à décembre 2001 ont été utilisées. Ces données sont d'abord normées entre l'intervalle [0 ; 1] afin de permettre un traitement efficace et acceptées aux fonctions d'entrée et de sortie du réseau [9]. La fonction utilisée pour la normalisation du vecteur d'entrée est donnée par la relation suivante [10] :

$$X_N = (X - X_{min}) \frac{(X_{Nmax} - X_{Nmin})}{(X_{max} - X_{min})} + X_{Nmin} \quad (1)$$

Où : X_N = Valeur normalisée correspondant aux éléments du vecteur d'entrées (pluie, ETP),

X = Valeur réelle d'un élément du vecteur d'entrées, X_{min} = Valeur minimum d'un élément du vecteur d'entrées, X_{max} = Valeur maximum d'un élément du vecteur d'entrées, X_{Nmin} = Valeur minimum du vecteur de normalisation [0 ; 1] égale à 0, X_{Nmax} = Valeur maximum du vecteur de normalisation [0 ; 1] égale à 1. Ces données sont par la suite subdivisées en trois (3) sous-ensembles ; calage, test et validation respectivement selon les proportions de 50%, 30% et 20% équivalent à 5, 3 et 2 ans. Un perceptron multicouche de type feedforwards à deux (2) entrées (pluie moyenne et ETP) et une sortie (débits) avec une architecture variant d'un neurone à six neurones cachés a été construit. Le réseau ainsi constitué est entraîné de façon supervisée par un algorithme de deuxième ordre (LEVENBERG MARQUARDT) selon la règle de retro propagation. En outre, pour faire converger rapidement le modèle, les poids et les biais initiaux ont été fixés à 0,1.

Les programmations ont été effectuées sous le logiciel Matlab version R2014a. Le réseau de neurone artificiel développé dans cette étude a les caractéristiques suivantes : le critère d'erreur : erreur quadratique ; la fonction d'activation : fonction sigmoïde bornée de 0 à 1 ; le pas de gradient : 25 ; les poids initiaux : 0,1 ; les biais initiaux : 0,1 ; les nombre d'itérations : 500. Le modèle est évalué avec deux (2) critères numériques (coefficient de Nash et coefficient de corrélation) et un critère graphique (hydrogrammes des débits observés et simulés).

Coefficient de Nash

Dans le but de quantifier la précision de la simulation et la fiabilité du modèle, le coefficient de Nash est appliqué sur les résultats obtenus [11]. Le coefficient de Nash est alors exprimé par la relation suivante :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_{oi} - q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^n (q_{oi} - \bar{q}_o)^2} \times 100 \quad (2)$$

Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation ou coefficient de Pearson, noté R est la racine carrée du coefficient de détermination donnée par la relation :

$$R = \frac{\sum_i (q_{oi} - \bar{q}_o)(q_{ci} - \bar{q}_c)}{\sqrt{\sum_i (q_{oi} - \bar{q}_o)^2 \times \sum_i (q_{ci} - \bar{q}_c)^2}} \quad (3)$$

Dans ces deux expressions, n représente la taille de la série, q_{oi} représente le débit observé pour le pas de temps i en m³/s ; q_{ci} , le débit calculé pour le pas de temps i en m³/s ; \bar{q}_o , le débit moyen observé en m³/s ; \bar{q}_c , le débit moyen calculé en m³/s.

2. Résultats et discussion

En modélisation par les réseaux de neurones, pour éviter un sur apprentissage (modélisation du brut), les résultats obtenus à partir des données réservées à l'apprentissage doivent être validés sur un nouveau jeu de données. Le tableau 2 présente les critères d'évaluation de la performance du modèle en fonction de quatre (4) architectures (2-3-1, 2-4-1, 2-5-1 et 2-6-1) au niveau du calage et au niveau de la validation.

Tableau 2: Critères d'évaluation de la performance du modèle de réseaux de neurones artificiels pour différentes architectures

Critères d'éval	NASH	Modèles				
		2-3	2-4	2-5	2-6-1	
	Coefficient de corrélation	Calage	75,1	74,1	73,1	74,21
		Validation	73,32	74,6	74,1	73,75
	Coefficient de corrélation	Calage	95,8	95,8	97,1	95,96
		Validation	98,33	98,4	96,1	98,86

Au regard de ce tableau, toutes les architectures donnent de meilleurs critères de performance conformément aux critères d'évaluation de la performance d'un modèle qui doivent être supérieurs à 60% pour le critère de NASH et 80% pour le coefficient de corrélation. Toutefois en modélisation des RNA, plus le nombre de couches cachées est élevé plus le modèle devient complexe et instable [12]. Pour réduire ainsi cette complexité du modèle, il est nécessaire de faire le choix des modèles dont il y a moins de couches. De ce fait, le modèle le plus approprié dans le cadre de cette étude est le modèle d'architecture 2-3-1. Ainsi, les résultats de l'ensemble de calage et de validation seront donc présentés. La figure 3 présente respectivement les hydrogrammes et la corrélation entre les débits observés et les débits simulés par le modèle 2-3-1 au niveau du calage. Bien qu'il y ait quelques écarts, le modèle simule mieux les débits. En effet, des écarts sont constatés au niveau des hydrogrammes des débits observés et des débits simulés lors du calage du modèle (Figure 3). Toutefois, le coefficient de Nash (75,79%) montre que le modèle est performant et stable. La corrélation linéaire entre les débits observés et les débits simulés est forte avec un coefficient de corrélation de 95,64% au niveau du calage tel que présenté à la figure 3.

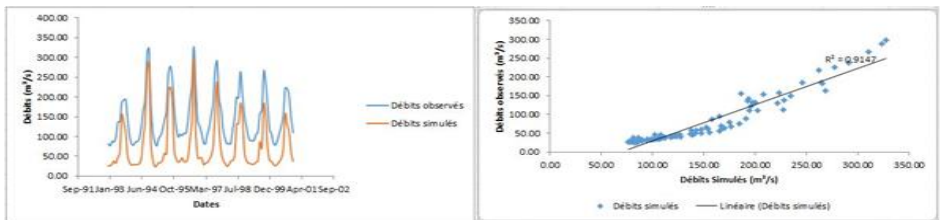


Figure 3: Hydrogrammes des crues et corrélation entre les débits observés et les débits simulés par l'architecture 2-3-1 au niveau du calage

La figure 4 présente respectivement les hydrogrammes de crue et la corrélation entre les débits observés et les débits simulés par le modèle 2-3-1 lors de la validation. Cette étape de la validation du modèle 2-3-1 présente des coefficients de Nash et de corrélation linéaire respectifs de 73,32% et 98,33%.

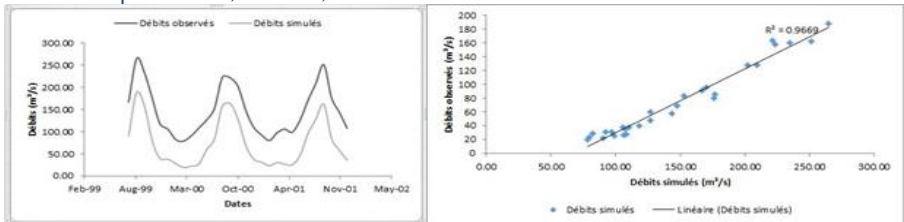


Figure 4: Hydrogrammes de crue et corrélation entre les débits observés et les débits simulés par le modèle 2-3-1 au niveau de la validation

Les critères de Nash et le coefficient de corrélation permettent d'apprécier la fiabilité et la stabilité du modèle de RNA. En effet, lorsque que le critère de Nash est supérieur à 60% et le coefficient de corrélation linéaire est supérieur à 80%, le modèle peut être considéré comme performant et stable. Ainsi, l'analyse des résultats montre que pour trois neurones cachés, le modèle présente de bons critères de performance. Les travaux réalisés par [2] à la station de Bianouan sur la rivière Bia ont révélé cependant, que le modèle à quatre neurones cachés a donné également de résultats intéressants avec des critères de Nash de 68,37% et le coefficient de corrélation de 83,08% pour la validation. Cette différence de résultats pourrait s'expliquer par la densité de la série de données utilisées pour la modélisation. [2] ont utilisé une série de données de 26 ans tandis que dans cette étude la série de données est de 10 ans. Le modèle de réseaux de neurones développé avec les données de pluie moyenne, d'ETP calculée par la méthode de THORNTHWAITE et de débit sur la période de 1990 à 2001 a donné de bons résultats avec l'architecture 2-3-1. Ainsi, trois (3) neurones cachés sont nécessaires pour bien simuler les débits à la station hydrométrique d'Ity à partir de deux (2) entrées (pluie moyenne et ETP calculée par la méthode THORNTHWAITE). Les travaux de [13] cités par [2] ont montré qu'une formulation d'ETP faisant intervenir l'insolation et la température, utilisée avec la pluie moyenne simulerait mieux les débits. Des écarts sont cependant observés entre les débits observés et les débits simulés par l'architecture 2-3-1 du modèle de réseau de neurones artificiels au niveau de la

validation. Ces décalages peuvent s'expliquer par le fait que les RNA sont des modèles influencés par le nombre de variables d'entrées du modèle, la longueur de la série de données pour le calage et la qualité des données. En effet, bien que les deux (2) variables d'entrées (pluie moyenne et ETP) simulent bien les débits à la station d'Ity, les débits à cette station ne sont pas seulement influencés par la pluie et l'ETP. Selon [14] ; [15] et [2], la végétation, l'ordre du cours d'eau, la capacité de rétention en eau du sol, le relief et les autres pertes sont des facteurs qui influencent la transformation de la pluie en débit. Ainsi, [16] ont-ils montré qu'en augmentant le nombre de variables d'entrées d'un modèle de réseau de neurones artificiels de un (1) à trois (3) entrées, la performance du modèle s'améliore considérablement. Les résultats obtenus dans cette étude (modèle 2-3-1) comparés avec ceux obtenus (modèle 2-4-1) par [2] donnent des résultats sensiblement similaires. Dès lors, on pourrait dire que le nombre de neurones n'influence pas trop la performance du modèle à transformer la pluie en débit à comparer à la quantité des données, le nombre de données d'entrées dans le réseau.

Conclusion

Cette étude a permis d'établir un modèle pluie-débit à l'aide de réseau de neurone artificiel (RNA) (perceptron multicouche de type feedforwards) pour combler les lacunes dans les séries de débits de la station hydrométrique d'Ity sur le fleuve Cavally. Les résultats obtenus avec ce modèle de réseau de neurone artificiel montrent que l'architecture 2-3-1 donne des résultats satisfaisants avec au niveau du calage un critère de Nash de 75,79% et une forte corrélation entre débits observés et débits simulés de 95,64%, et au niveau de la validation un critère de Nash de 73,32% pour une corrélation entre débits observés et débits simulés de 98,33%. Ce modèle pourra aider en plus du comblement des lacunes au niveau des données de pluie et de débits, à l'évaluation des impacts des activités anthropiques sur le bassin versant du fleuve Cavally.

Références

- [1] S. Araghinejad, M. Azmi, and M. Kholghi, 'Application of artificial neural network ensembles in probabilistic hydrological forecasting', *Journal of Hydrology*, 2011.
- [2] K. L. Kouassi, K. M. Kouassi, K. S. Konan, N. H. Meledje, Y. B. Koffi, and J. Biémi, 'Modélisation Pluie-Débit à L'aide des Réseaux de Neurones Artificiels sur le Bassin Versant Transfrontalier de la Bia (Côte D'ivoire - Ghana)', *European Journal of Scientific Research*, vol. 109, no. 1, p. pp.133-140, 2013.
- [3] ASCE, 'Artificial Neural Networks in Hydrology. I: Preliminary Concepts', *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 115-123, 2000.
- [4] Elcin Kentel, 'Estimation of river flow by artificial neural networks and identification of input vectors susceptible to producing unreliable flow estimates', *Journal of Hydrology*, vol. 375, no. 3-4, pp. 481-488, 2009.
- [5] L. H. C. Chua and T. S. W. Wong, 'Improving event-based rainfall-runoff modeling using a combined artificial neural network-kinematic wave approach', *Journal of Hydrology*, vol. 390, no. 1-2, pp. 92-107, 2010.
- [6] P. Coulibaly, F. Ancil, and B. Bobee, 'Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach', *Journal of Hydrology*, vol. 230, no. 3, pp. 244-257, 2000.
- [7] ASCE, 'Artificial Neural Networks in Hydrology. II: Hydrological Applications', *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 5, no. 2, p. PP 124-137, 2000.
- [8] J. Tricart et al., 'Une monographie physique de la Côte-d'Ivoire', in *Annales de Géographie*, 1973, vol. 82, pp. 369-372.
- [9] T. Özel and A. Nadgir, 'Prediction of flank wear by using back propagation neural network modeling when cutting hardened H-13 steel with chamfered and honed CBN tools', *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 42, pp. 287-297, 2002.
- [10] N. H. Mélédje, 'Modélisation de la dynamique hydrologique et du flux de sédiments dans le lac du barrage hydroélectrique d'Ayamé', Doctorat unique, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 2016.
- [11] K. L. Kouassi, 'Hydrologie, Transport Solide et Modélisation de la Sédimentation dans les Lacs des Barrages Hydroélectriques de Côte d'Ivoire : Cas du Lac de Taabo', Thèse de doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, Abidjan, Côte d'Ivoire, 2007.
- [12] É. Larouche, *Exploration de différentes architectures de réseaux de neurones pour la prédiction de la glace atmosphérique sur les conducteurs des réseaux électriques*. Chicoutimi : Université du Québec à Chicoutimi, 2002.
- [13] L. Oudin, 'Une formule simple d'évapotranspiration potentielle pour la modélisation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant', *La houille blanche*, vol. 6, p. 8p, 2003.
- [14] S. Mouelhi, 'Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier', Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Paris, France, 2003.
- [15] Y. B. Koffi, 'Modélisation pluie-débit en région tropicale humide : Application des réseaux de neurones sur quatre stations hydrométriques du Bandama Blanc (Bada, Marabadiassa, Tortiya et Bou), Nord de la Côte d'Ivoire', Thèse de doctorat, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 2007.
- [16] R. N. Randrianarivony, P. Lauret, Z. A. Randriamanantany, and J. C. Gatina, 'Modélisation du régime annuel des petites rivières en vue d'installation de microcentrales hydroélectriques', *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie*, vol. 5, no. 1, p. 11p, 2009.

Modélisation de la propagation des crues du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la Société des Mines d'Ity (Zouan-Hounien, Côte d'Ivoire)

Lazare Kouakou KOUASSI¹, Alexis Loukou BROU¹, Alex Zilé KOUADIO¹, Séraphin Kouakou KONAN¹, Félix Koffi KONAN¹, Bamory KAMAGATE², Diakarria KONÉ³

¹Université Jean Lorougnon Guédé, BP 150 Daloa (Côte d'Ivoire) ; (+225) 09 56 05 70 k_lazare@yahoo.fr

;

²Université Nangui Abrogoua, 08 BP 109 Abidjan 08 (Côte d'Ivoire) ; kambamory2@yahoo.fr ;

³Office National de l'Eau Potable (ONEP), Direction des Ressources en Eau, Abidjan, Côte d'Ivoire ;
konediak@live.fr

Résumé

Les crues sont des phénomènes naturels aléatoires aux conséquences souvent désastreuses. En Côte d'Ivoire, face à la récurrence de ces événements, la compréhension et la prévision des crues représentent un moyen intéressant de prévention des risques d'inondation. Le fleuve Cavally, situé à la frontière entre la Côte d'Ivoire et le Libéria, traverse la zone d'exploitation de la société des mines d'Ity (SMI). Le Cavally présente beaucoup de méandres dans cette zone et le lit du cours d'eau est très perturbé par des orpailleurs clandestins. Dans le but d'étendre ses activités de part et d'autre du fleuve, la SMI envisage de couper l'un des principaux méandres et de construire un canal de dérivation pour dévier le fleuve ainsi qu'un pont et une digue pour faciliter les déplacements sur le site des travaux. Ces aménagements vont sans doute perturber le régime du Cavally dont les crues causent fréquemment des dégâts sur les activités agricoles des populations riveraines. Dans cette étude, un modèle 2D a été conçu afin de simuler l'écoulement du fleuve Cavally et sa plaine inondable dans les conditions initiales avant la réalisation des travaux. Ce modèle a été réalisé à partir des données historiques et des mesures de débits effectués durant trois mois pendant la période de crue et d'un modèle numérique d'élévation (MNE).

Mots clés : modèle de propagation de crues, Fleuve Cavally, modèle 2D, Côte d'Ivoire

Flood propagation Modeling of the Cavally River in the operating area of the Ity Mines Company (Zouan-Hounien, Côte d'Ivoire)

Abstract

The floods are random natural phenomena with the often-disastrous consequences. In Côte d'Ivoire, face of the recurrence of these events, comprehension and prediction of the floods represent an interesting means of prevention of the risks of flood. The Cavally river, located at the border between the Côte d'Ivoire and Liberia, crosses the zone of exploitation of the company of the mines of Ity (SMI). Cavally presents many meanders in this zone and the bed of the river is very disturbed by clandestine gold washers. With an aim of extending its activities on both sides river, the SMI plans to cut one of the principal meanders and to build a diversion canal to deviate the river as well as a bridge and a dam to facilitate displacements on the building site. These installations undoubtedly will disturb the mode of Cavally whose floods frequently cause damage on the agricultural activities of the bordering populations. In this study, a model 2D was designed to simulate the flow of Cavally and it's easily flooded plain under the initial conditions before the realization of work. This model was carried out starting from the historical data and of measurements of flows carried out during three months for the period of raw and a digital elevation model (DEM).

Key Words: flood propagation modeling, Cavally River, 2D model, Côte d'Ivoire

Introduction

Les inondations causées par les crues constituent un phénomène courant et récurrent dans l'histoire de l'humanité. Néanmoins, depuis quelques années, ces phénomènes semblent survenir à un rythme accéléré et deviennent plus dévastateurs. Une connaissance précise de ces phénomènes aléatoires est nécessaire pour la prévention des risques [1]. Pour apporter des réponses précises à la compréhension des problèmes d'inondations, plusieurs études ont été déjà menées à travers différents modèles hydrologiques et hydrauliques [2]; [3]; [4]; ; [5]; [6]; [7]; [8] et [9]. En Côte d'Ivoire, face à la récurrence de ces événements, la compréhension et la prévision des crues représentent un moyen intéressant de prévention des risques d'inondation. Cependant, la prévision des crues à travers des modèles facilement compréhensibles est actuellement très peu développée; ce qui conduit à la non maîtrise de ces phénomènes tant en milieu urbain qu'en milieu rural. Il en résulte donc une méconnaissance des mécanismes de propagation des ondes de crues le long des principaux cours d'eau ivoiriens et un manque de suivi de l'évolution des crues aux conséquences souvent désastreuses. Par conséquent, la capacité des décideurs ivoiriens à répondre à ce type de catastrophe sur la base d'informations scientifiques fiables reste extrêmement limitée. Le fleuve Cavally, situé à la frontière entre la Côte d'Ivoire et le Libéria, traverse la zone d'exploitation de la société des mines d'Ity (SMI). Le Cavally présente beaucoup de méandres dans cette zone (figure 1) et le lit du cours d'eau est très perturbé par des orpaillers clandestins. Dans le but d'étendre ses activités de part et d'autre du fleuve, la SMI envisage de couper l'un des principaux méandres et de construire un canal de dérivation pour dévier le fleuve ainsi qu'un pont et une digue pour faciliter les déplacements sur le site des travaux. Ces aménagements vont sans doute perturber le régime du Cavally dont les crues causent fréquemment des dégâts sur les activités agricoles des populations riveraines. Cette étude vise à simuler l'écoulement du fleuve Cavally et sa plaine inondable dans les conditions initiales avant la réalisation des travaux. La section du cours d'eau étudié est entre Ity et Fleou dans le département de Zouan-Hounien.

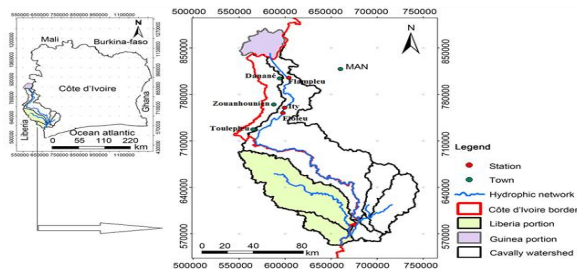


Figure 5: Localisation de la zone d'étude

I. Matériel et méthodes

I.1. Collecte de données

Les données utilisées pour cette étude sont issues des stations pluviométriques et hydrométriques se trouvant dans le bassin versant et les stations attenantes. Il s'agit de données historiques journalières de débits, de niveau d'eau et de pluies. Ces données ont servi à calculer les différentes périodes de retour qui ont été utilisées pour la modélisation des crues de période de retour 10, 20 et 100 ans (Tableau 1). Ces différentes crues ont été calculées à l'aide du logiciel HYFRAN suivant la loi de Weibull.

Tableau 3: Débits de crue en fonction des périodes

Période de retour	Débits (m ³ /s)
10 ans	316
20 ans	334
100 ans	365

Un modèle numérique d'élévation (MNE) de 90 m de résolution a été utilisé pour la détermination des altitudes et les pentes à l'aide du logiciel ArcGIS 10.2.2 (<http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>). Une image satellitaire de type LANDSAT L8 OLI_TIRS datant de la période de décembre 2015 à Février 2016 de résolution 30 m (<http://earthexplorer.usgs.gov/wms/custom/0101605288603>) a également été utilisée. Cette image a été utilisée pour la réalisation de la carte d'occupation du sol à l'aide du logiciel ENVI version 4.7.

I.2. Modélisation de la propagation des crues en 2D

Les équations de Saint-Venant ont été utilisées pour la modélisation de la propagation des crues en 2D. Pour ce faire, une formulation sans terme temporel de ces équations a été établie et plusieurs schémas de résolution de grands systèmes linéaires ont été implémentés [10]. Ces équations sont les équations du mouvement fluide souvent utilisées pour la modélisation des ondes longues telles que les inondations et les ondes de tempête [11]. Il s'agit d'un ensemble d'équations différentielles partielles non linéaires, consistant en l'équation de continuité (équation 1) et l'équation des moments (équation 2), décrite dans le plan horizontal comme suit :

Equation de contiuité
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} + \frac{\partial h V_y}{\partial y} = q \quad (1)$$

Equations des moments
$$\begin{cases} S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} \frac{V_x}{g} - \frac{\partial V_x}{\partial x} \frac{V_x}{g} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \\ S_{fy} = S_{0y} - \frac{\partial h}{\partial y} \frac{V_y}{g} - \frac{\partial V_y}{\partial y} \frac{V_y}{g} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \end{cases} \quad (2)$$

Avec h : profondeur ; V_x, V_y : vitesses suivant les directions x et y ; S_{fx}, S_{fy} : rugosités ; S_{0x}, S_{0y} : pentes, g : accélération de la pesanteur, q : débit latéral, t : temps

1.3. Calibration du modèle 2D

Le logiciel HEC-RAS version 5.03 a été utilisé pour la modélisation de la propagation des crues en 2D. Le maillage de la zone inondable donne une superficie de 38,69 km² pour une maille ayant 30 m sur 30 m, soit un total de 42987 mailles. La simulation a été effectuée en écoulement permanent à partir des périodes de retour de 10, 20, et 100 ans avec des débits respectifs de 316, 334 et 365 m³/s. La pente moyenne utilisée pour la condition aux limites en aval est de 0,000194 m/m. Le coefficient de Manning choisi pour la calibration est de 0,066. Cela se justifie par le fait que dans cette section du cours d'eau, des zones d'orpillage ont été observées dans le lit du fleuve Cavally. Cette activité modifie considérablement la rugosité du fleuve car le lit est constamment perturbé. Le choix du coefficient de Manning est fondé sur les travaux de Chow[12]. Les sorties du modèle sont les profondeurs de l'étendue de l'inondation, les vitesses de propagation des crues et les altitudes de la surface libre du cours d'eau.

La validation du modèle passe par la vérification des résultats de la simulation à travers une comparaison entre les valeurs simulées et les valeurs observées. Si les erreurs et le pourcentage d'erreur sont relativement faibles tendant vers zéro alors dans ce cas le modèle est ajusté [13].

2. Résultats et discussion

2.1. Résultats

Les résultats obtenus dans cette étude seront présentés sous forme de cartes et de tableaux. Ces résultats concernent donc uniquement les altitudes de la surface libre de l'eau issues des différentes périodes de retour. La figure 2 ci-dessous présente ainsi les cartes des altitudes de la surface libre du cours d'eau par rapport aux différentes périodes de retour montrant les étendues des différentes crues. Ces cartes montrent que les altitudes de surface libre de l'eau les plus élevées sont dans la partie amont du tronçon du fleuve Cavally où le maximum peut atteindre environ 265 m. L'altitude moyenne de la surface libre du cours d'eau pour chaque période de retour respective (10, 20 et 100 ans) est de 260,875 ± 0,831 m, 260,905 ± 0,807 m et 260,918 ± 0,777 m (tableau 2). Les surfaces inondées sont respectivement de 18,15 ; 18,81 et 21,74 km² soit 46,91 ; 56,19 ; 48,62% pour les crues de 10, 20 et 100 ans.

Tableau 4: Valeurs caractéristiques des altitudes de la surface libre du cours d'eau concernant les différentes périodes de retour

Periodes de retour	Minimum (m)	Maximum (m)	Moyenne (m)	Ecart type (m)
10 ans	258,003	264,868	260,875	0,831
20 ans	258,782	265,102	260,905	0,807
100 ans	259,009	265,664	260,918	0,777

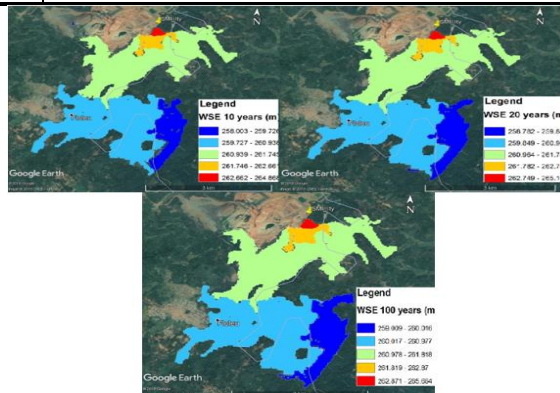


Figure 6 : Cartographie des altitudes de la surface libre en fonction des périodes de retour

Le tableau 3 ci-dessous présente les erreurs et le pourcentage d'erreurs issus des calculs itératifs effectués par le modèle numérique. Au regard de ce tableau, les pourcentages d'erreurs convergent bien vers zéro, ce qui montre que le modèle a bien simulé les différentes crues.

Tableau 5: Erreurs et pourcentage issus des calculs itératifs effectués par le modèle HEC-RAS

Periodes de retour	Erreurs	% erreurs
10 ans	1,569	0,000442
20 ans	0,5137	0,000137
100 ans	0,3190	0,000078

2.2. Discussion

Les altitudes de la surface libre du cours d'eau varient très peu à quelques centimètres près au niveau de chaque débit donné. L'étendue des plaines inondables varie avec des altitudes de surface libre de l'eau de 260,964 m à 265,664 m sur des dizaines de kilomètres aux voisinages du lit mineur du fleuve Cavally. Les zones situées dans un rayon d'environ 5 km de la station d'Ity sont les plus exposées avec un niveau d'eau de plus de 265,96 m contrairement à celles situées en aval dont les niveaux d'eau maximum varient de 258,78 m à 259,85 m. Cependant il ne faudrait pas occulter la pratique intense de l'orpillage clandestin dans le lit du cours d'eau dans cette zone qui modifie considérablement la rugosité du lit du fleuve car ce lit fortement perturbé. Les résultats obtenus dans cette étude sont confirmés par les travaux de Baptista [2] et par ceux d'Archambeau [10] dans le même contexte de modélisation de la propagation des ondes de crue. Selon ces auteurs, toutes modifications du sol (déboisement, pratiques agricoles, imperméabilisation) réduisent la pénétration de l'eau dans celui-ci, favorise le ruissellement et donc une concentration des eaux, conduisant à augmenter les périmètres immergés donc une grande surface inondable. Des études récentes de [14]–[16] ont également confirmé que les inondations sont plus importantes dans les zones de décharge et au niveau des surfaces suffisamment anthropisées. Les zones inondées sont respectivement de 21,74 km², 18,81 km² et 18,15 km² soit de 56,19 ; 48,62 et 46,91% de la zone inondable pour les inondations de 100, 20 et 10 ans.

Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence l'étendue de la propagation des ondes des crues ainsi que la localisation des zones vulnérables à l'inondation. Aussi, convient-il de rappeler que les zones inondables les plus exposées sont observées au voisinage de la Société des Mines d'Ity c'est-à-dire dans la partie amont (Ity) où les pressions anthropiques sont plus importantes. Les résultats de cette étude pourraient être utilisés comme un outil d'aide à la décision dans la gestion des risques d'inondation. Cependant, une modélisation 1D-2D serait intéressante en écoulement non permanent afin de mieux comprendre le passage du débordement du lit du fleuve à l'inondation des zones attenantes au cours d'eau.

Remerciements :

Cette étude a été rendu possible grâce aux concours de la Société des Mines d'Ity (SMI) qui a financé la collecte des données sur le terrain.

Références

- [1] A. T. Ngo, 'Evaluation environnementale du risque d'inondation dans le delta du fleuve Ha Thanh (centre Viêt-Nam)', Thèse de doctorat, Université d'Orléans, Orléans, France, 2014.
- [2] M. Baptista, 'Contribution à l'étude de la propagation de crues en hydrologie', Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1990.
- [3] M. Tangara, 'Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global', Ecole Pratique des Hautes Etudes de Paris, France, 2005.
- [4] C. W. Dawson, R. J. Abrahart, A. Y. Shamseldin, and R. L. Wilby, 'Flood estimation at ungauged sites using artificial neural networks', *Journal of Hydrology*, vol. 319, no. 1–4, pp. 391–409pp, 2006.
- [5] J. Barredo, 'Major flood disaster in Europe: 1950-2005', *Natural Hazards*, vol. 42, no. 1, pp. 125–148, 2007.
- [6] R. Champredonde, 'Modélisation, Spatialisation de l'étendue d'une crue, Applications au bassin de la Lèze', Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Toulouse, Rapport de stage master 1, 2008.
- [7] M. Borga, E. N. Anagnostou, G. Blöschl, and J.-D. Creutin, 'Flash floods: Observations and analysis of hydro-meteorological controls', *Journal of Hydrology*, vol. 394, no. 1–2, pp. 1–3, 2010.
- [8] E. Hyung-Il, A. Vasan, and Slobodan P. Simonovic, 'Integrated Reservoir Management System for Flood Risk Assessment Under Climate Change', *Water Resources Management*, vol. 26, no. 13, pp. 3785–3802, Oct. 2012.
- [9] K. Karagiorgos, T. Thaler, J. Hübl, F. Maris, and S. Fuchs, 'Multi-vulnerability analysis for flash flood risk management', *Natural Hazards*, vol. 82, no. 1, pp. 63–87, 2016.
- [10] P. Archambeau, 'Contribution à la modélisation de la genèse et de la propagation des crues et inondations', Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 2006.
- [11] L. Kasuri, 'Modelling for Ecosystem Restoration Hydrodynamic Modelling of the Yolo Bypass Using HEC-RAS', Mémoire Master, UNIVERSITY OF CALIFORNIA DAVIS, USA, 2014.
- [12] V. Chow, *Open Channel Hydraulics*, NY, 1959.
- [13] USACE, *Hydrologic Engineering Center-River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*, US Army Corp of Engineering, vol. Version 4.1, 2010.
- [14] A. Gharagozlou, H. Nazari, and M. Seddighi, 'Spatial Analysis for Flood Control by Using Environmental Modeling', *Journal of Geographic Information System*, vol. 03, no. 04, pp. 367–372, 2011.
- [15] S. Boudjelal, A. Fourar, and F. Merrouchi, 'Modélisation en 2D des écoulements brusquement instationnaires dans un canal prismatique à surface libre', *LARHYSS Journal ISSN 1112-3680*, no. 22, pp. 7–13, 2015.
- [16] W. Bouchenafa, 'Modélisation des inondations en tunnel en cas de crue de la Seine pour le Plan de Protection des Risques Inondations de la RATP (PPRI)', Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, 2017.

Modélisation hydrologique d'oued Saida (NW algérien)

Dahmani meriem nadia ¹, Baba-hamed kamila ², Safa aissa ³.

^{(1),(2)} Laboratoire Promotion des ressources hydriques, minières et pédologiques législation de l'environnement et choix technologiques. Université Abou Bekr Belkaid, BP 119 Tlemcen, Algérie, dahmanin2008@yahoo.fr kambabahamed@yahoo.fr

⁽³⁾ Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers, Université d'Oran 2, safa.aissa@yahoo.fr

Résumé

Le bassin versant de l'Oued Saida (644 Km²) a fait l'objet d'une modélisation pluie-débit, par l'utilisation des modèles GR (Génie Rural) à pas de temps Annuel.

Dans un premier temps, nous avons cherché à caractériser quelques facteurs en particulier physiques, géologiques et climatiques régissant l'écoulement. Ensuite une étude hydrologique basée sur le traitement des données hydrométriques relatives à une période de 23 ans a été utilisée. Les résultats obtenus par la simulation de la transformation de la pluie en débit par l'utilisation du modèle du Génie Rural GRIA sont satisfaisants. En effet le modèle GR prend en compte, d'une part, la succession chronologique des phénomènes et, d'autre part, l'influence des paramètres aussi bien climatiques (évapotranspiration) que celle physico-hydrogéologiques du bassin versant (humidité du sol et échanges externes).

Mots clés : Oued Saida, Algérie, Modélisation pluie-débit, GRIA

Hydrological modeling of wadi Saida (NW Algéria)

Abstract

The wadi Saida watershed (644 km²) was the purpose of a rainfall-discharge modeling, by the use of the GR (Genie Rural) models with the time intervals annual. At first, we tried to characterize some factors; in particular physical, geological and climatic; governing the flow. Then a hydrological study based on the processing of hydrometric data for a period of 23 years was used. The results obtained by simulating the transformation of rainfall into runoff by the use of the Genie Rural model GRIA and satisfying. Indeed, on the one hand, the GR model takes into account the chronological succession of phenomena and, on the other hand, the influence of the climatic (evapotranspiration) as well as that of the watershed physical and hydrogeological (soil moisture and external exchanges) parameters.

Key Words: wadi Saida, Algeria, rainfall-runoff modeling, GRIA

Introduction

La simulation de la transformation de la pluie en débit du bassin versant par des modèles mathématiques est devenue très répandue grâce à l'accroissement des capacités de calcul et l'amélioration de l'outil informatique. Parmi le nombre de modèles existant, les modèles conceptuels ou empiriques globaux sont les plus performants, ils présentent le lien entre la pluie et le débit par des agencements variés de réservoirs.

1. Zone d'étude

Le bassin versant de l'Oued Saïda (codé 11-11) qui appartient au grand bassin versant de la Macta, présente une superficie de 644 km² pour un périmètre de 164,5 km. Orienté Sud-Nord, en exceptant la partie la plus au Nord qui est de direction (SE-NW), le bassin versant se caractérise par un relief assez fort. De part sa forme allongée du Nord au Sud et sa position géographique dans les Hauts Plateaux, le bassin versant de l'Oued Saïda jouit d'un climat semi-aride. La pluviométrie est irrégulière, caractérisée par des périodes hivernales pluvieuses et des périodes estivales sèches.

2. Méthode

Le modèle GRIA (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre à caler X qui traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (échange avec les nappes profondes ou les bassins adjacents). Il a été initié au Cemagref à la fin des années 1990. La principale version, présentée ici, est celle proposée par Mouelhi. 2003 [1]. La structure mathématique du modèle est simple puisqu'elle se résume à une simple équation (1). Le débit Q_k de l'année K étant proportionnel à la pluie P_k de la même année, avec un coefficient d'écoulement dépendant de P_k , de la pluie P_{k-1} et de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne E_k .

3. Application du modèle GR

L'évaluation d'un modèle consiste à comparer les valeurs simulées aux valeurs observées. Des critères statistiques sont utilisés pour caractériser la qualité de la simulation. Dans ce travail, nous avons utilisé les critères classiques en hydrologie à savoir, bilan, corrélation et critère de Nash. Le modèle GR a été appliqué sur des données annuelles des pluies mesurées à la station de Saïda et Sidi Boubekeur et des lames d'eau écoulées mesurées à chaque station.

Dans cette étude, pour prédire le débit à une année donnée, on utilise à l'entrée du modèle des valeurs des pluies annuelles observées (mm), des ETP calculées par la méthode de Thornthwaite et celle de Turc en mm et des débits annuels (exprimés en lames d'eau écoulées) observés au niveau de la station de Saïda, Sidi Boubekeur, qui se trouve en aval du bassin versant d'Oued Saïda.

3.1 Calage du modèle

Le calage du modèle a été réalisé après le passage par un certain nombre de simulations. Nous avons procédé au calage du paramètre X du modèle en appliquant des changements sur ce dernier en commençant comme point de départ par une valeur fixée à 0,13 et la faisant accroître successivement avec un intervalle de 0,01 jusqu'à la valeur supérieure limite donnée par le modèle 3,5 et jusqu'à l'obtention d'un critère de Nash optimum égale ou supérieur à 70% (sachant qu'un bon critère de Nash-Sutcliffe a une valeur proche de 1) et un coefficient de corrélation entre les débits simulés et les débits observés plus acceptable. Les résultats du calage sont présentés dans le Tableau ci-dessous.

Tableau 1. Résultat du calage du modèle GRIA

Données annuelles	ETP (Thornthwaite)				ETP (Turc)			
	X	Nash	Bilan	Coeff. de détermination (r ²)	X	Nash	Bilan	Coeff. de détermination (r ²)
Saïda (P Saïda-Q Saïda)	0,60	90,5	99,4	0,90	0,54	89,7	100,4	0,89
Sidi Boubekeur (P SB-Q SB)	0,76	76,2	93,6	0,79	0,68	76,6	94,5	0,79

X : Coefficient de correction de l'ETP (mm)

4. Résultats

D'après les résultats obtenus et la superposition des deux graphes, des débits simulés et calculés pour les stations de Saida (figure 1 et 2) et Sidi Boubekeur (figure 3 et 4) nous pouvons dire que les modèles sont calés, l'évapotranspiration résultante de la formule de Thornthwaite et celle de Turc est assez équilibrée pour l'ensemble des sous bassins.

Selon le coefficient de correction de l'évapotranspiration X, nous remarquons que ce paramètre augmente de l'amont vers l'aval tout au long du bassin de l'Oued Saida. Le paramètre X traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique et montre que pour la valeur de X qui varie entre 0,60 à 0,76 (Thornthwaite) et entre 0,54 à 0,68 (Turc) le bassin reçoit de l'eau en profondeur.

En effet, le caractère karstique de notre bassin nous laisse penser qu'il existe des échanges tout au long de l'oued [2].

En plus le paramètre $X < 1$ traduit que notre bassin gagne de l'eau. En effet le système global « aquifère-Oued » du bassin de l'Oued Saida est matérialisé par une alimentation de l'oued principal par la nappe tout le long de son parcours.

L'alimentation de la nappe est assurée, en plus de son impluvium, par les eaux provenant des bassins versants voisins.

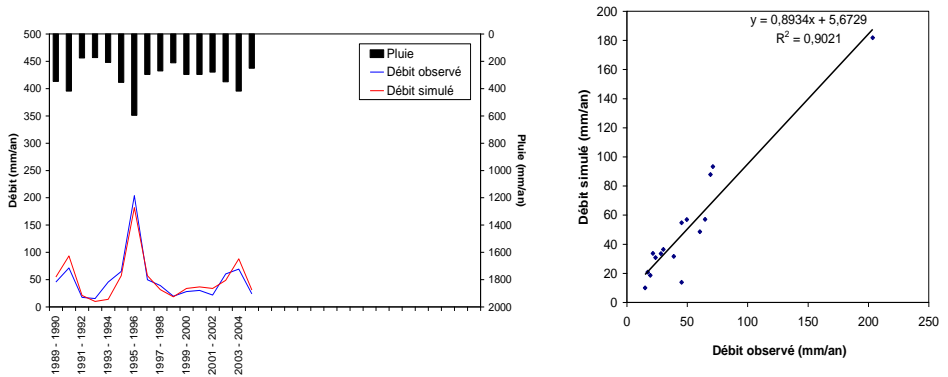


Figure 1 : Résultat obtenu par le calage du modèle GR1A pour le sous bassin de Saida avec l'ETP de Thornthwaite (1989/1990-2004/2005)

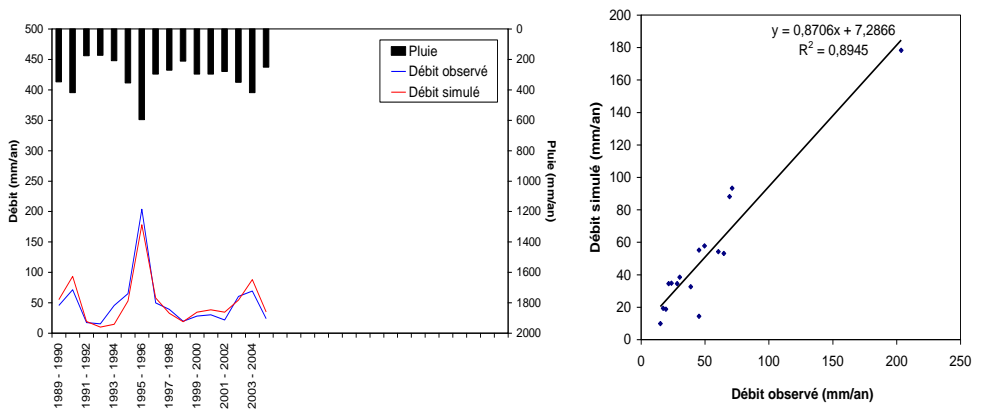


Figure 2 : Résultat obtenu par le calage du modèle GR1A pour le sous bassin de Saida avec l'ETP de Turc (1989/1990-2004/2005)

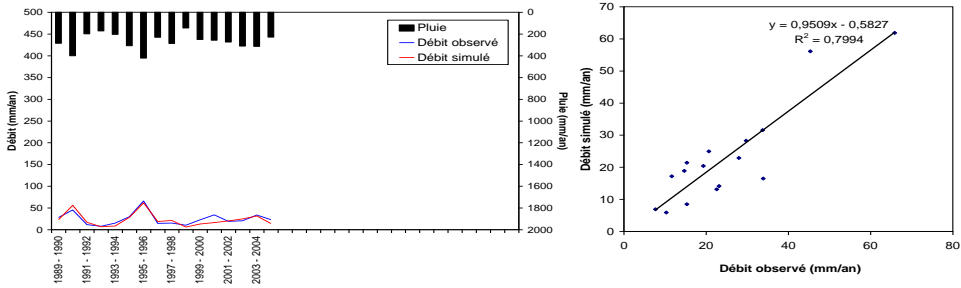


Figure 3 : Résultat obtenu par le calage du modèle GRIA pour le sous bassin de Sidi Boubekeur avec l'ETP de Thornthwaite (1989/1990-2004/2005)

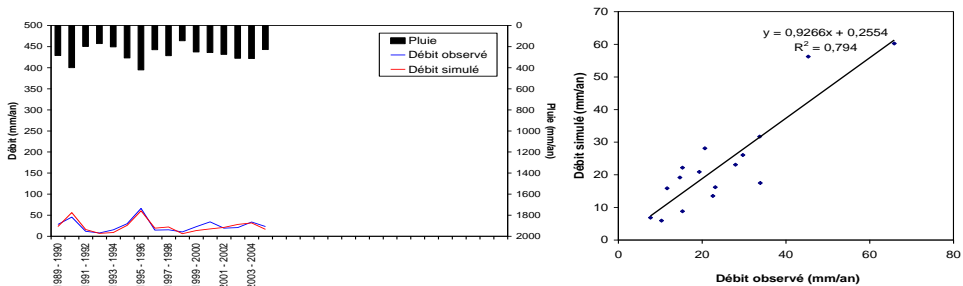


Figure 4 : Résultat obtenu par le calage du modèle GRIA pour le sous bassin de Sidi Boubekeur avec l'ETP de Turc (1989/1990-2004/2005)

4.1 Validation du modèle

La validation porte sur l'application des modèles sur une série de données qui n'ont pas été utilisées lors du calage, elle est relative à la période (2005/2006 – 2011/2012).

A partir des résultats obtenus, nous remarquons que la validation du modèle GRIA, obtenue par l'utilisation des ETP de Turc et Thornthwaite donne des coefficients de détermination $R^2 > 0,7$ qui indiquent que les modèles sont bien calés.

Selon ces coefficients de corrélation qui sont obtenus à partir des débits simulés en fonction des débits observés, nous constatons que la modélisation pluie-débit élaborée par l'utilisation de GRIA, donne des résultats très acceptables.

Conclusion

L'application du modèle Génie Rural (GR) au bassin versant d'Oued Saida avec pas du temps Annuel(GRIA) en intégrant les différentes données d'entrée les précipitations et ETP et comme sorties lames d'eau écoulée. La phase de validation entre débits observés et débits simulés a donné de très bons résultats confirmant le bon calage du modèle sur le bassin. Les résultats indiquent que le modèle est bien calé et permet de bien simuler le comportement hydrologique réel du bassin.

Références

- [1] S. Mouelhi., vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp. 2003
- [2] M.N.Dahmani., Etude hydrologique et hydrogéologique du bassin versant de l'Oued Saida. Mémoire de Magister, Université d'Oran, 171p. 2016

Analyse spatiale de la pluviométrie annuelle en utilisant des techniques de krigeage ordinaires et un krigeage lognormal dans le bassin hydrographique de Cheliff-Algérie

Mohamed RATA¹, Abdelkader DOUAOUI²

¹Université Djillali Bounaama de Khemis-Miliana, route Theniat Elhad, Khemis-Miliana (44225) Algérie, +21 3559592935, mohamed.ratta@yahoo.fr

² Centre universitaire Morsli Abdallah de Tipaza, Tipaza-Algérie, +21 3552834311, adouaoui@yahoo.fr

Résumé

L'analyse spatiale des précipitations annuelles à l'aide de techniques de krigeage ordinaires est bien connue pour être robuste lorsque les données ont une distribution normale. Mais nos données pluviométriques ne répondent jamais pleinement à ces hypothèses. Notre aire d'étude est centrée dans le bassin hydrographique de Cheliff, situé dans le nord-ouest de l'Algérie; Il est connu par les régions hétérogènes dans les précipitations annuelles. Les données provenant de 58 stations de précipitations ont également été utilisées pour interpoler et prédire les erreurs par les deux techniques de krigeage. Une étude comparative de deux méthodes d'interpolation est présentée. Le krigeage log normal est très sensible aux valeurs extrêmes plus ou moins éloignées de la moyenne arithmétique (distribution non normale). L'objectif de cette étude est de cartographier les précipitations annuelles et de minimiser les erreurs d'interpolation par une technique plus robuste. La différence entre la précision du krigeage ordinaire et lognormal est bien représentée sur la carte d'estimation des erreurs, donc la deuxième technique est plus robuste que la première dans notre bassin versant.

Mots clés : Bassin hydrographique de Cheliff, précipitations, krigeage, cartographie.

Spatial analysis of annual rainfall using standard kriging techniques and lognormal kriging in the Cheliff hydrographical basin. Algeria

Abstract

Spatial analysis of annual precipitation using ordinary kriging techniques is well known to be robust when data have a normal distribution. But our rainfall data never fully respond to these hypotheses. Our study area is centered in the Cheliff hydrographic basin, located in northwestern Algeria; It is known by heterogeneous regions in annual rainfall. Data from 58 precipitation stations were also used to interpolate and predict errors by both kriging techniques. A comparative study of two interpolation methods is presented. Normal log krigage is very sensitive to extreme values more or less distant from the arithmetic mean (non-normal distribution). The objective of this study is to map annual precipitation and to minimize interpolation errors by a more robust technique. The difference between the accuracy of ordinary and lognormal kriging is well represented on the error estimation map, so the second technique is more robust than the first one in our hydrographic basin.

Key Words: Cheliff hydrographic basin, precipitation, kriging, mapping.

Introduction

Les changements climatique observés au cours des ces dernières décennies ont entraîné de nombreux bouleversements à l'échelle de la planète avec des conséquences sur l'environnement et le bien être des hommes. Au vu de la nature de son climat, l'Algérie se trouve parmi les pays les plus touchés par ces changements climatiques dont les indicateurs, tels que la température et la pluviométrie, sont facilement décelable. C'est en effet ce qui a monté par de nombreuses études effectuées au cours des ces dernières années, parmi les quelles certaines sont faites dans le bassin versant du Chélif qui constitue la zone de notre investigation [1,2].

L'analyse spatiale des précipitations annuelles à l'aide de techniques de krigeage ordinaires est bien connue pour être robuste lorsque les données ont une distribution normale. Mais nos données pluviométriques ne répondent jamais pleinement à ces hypothèses. L'objectif recherché est d'arriver à connaître d'une part, la spatiale de la pluviométrie annuelle par l'utilisation deux méthode géostatistique (krigeage ordinaire et log normal de krigeage), et d'autre part fixer la meilleure méthode d'interpolation pour optimisé la fiabilité de la carte pluviométrique et minimisé les erreurs de l'interpolation.

I. Méthodologie

I.1. Choix des stations et période d'étude

La représentativité spatiale et temporelle des stations pluviométriques sur la zone d'étude a une influence majeure sur la fiabilité d'une carte finale. Les données sur les précipitations recueillies directement auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H.). L'hétérogénéité de la série d'observations crée donc un grand problème; Plus la dissymétrie dans la répartition des postes d'observation et l'absence presque totale de données des stations dans les zones hautes entre 1990 et 2000. Ou l'Algérie a connu un problème de sécurité majeur, en particulier dans le bassin versant du sud-ouest. Pour ça. Nous avons limité notre étude à la région nord où il y a un nombre suffisant de stations et bien réparties. Les 58 postes sélectionnés et répartis sur 40 ans ont une série de mesures suffisantes pour mener à bien cette étude (figure 1), soit au moins 30 ans, comme la recommandé l'organisation mondial de la météorologique (O.M.M.). Certaines stations ont des lacunes qui seront comblées en utilisant la méthode de régression linéaire sur une échelle mensuelle avec les stations de base (mesure complète et correcte) [3].

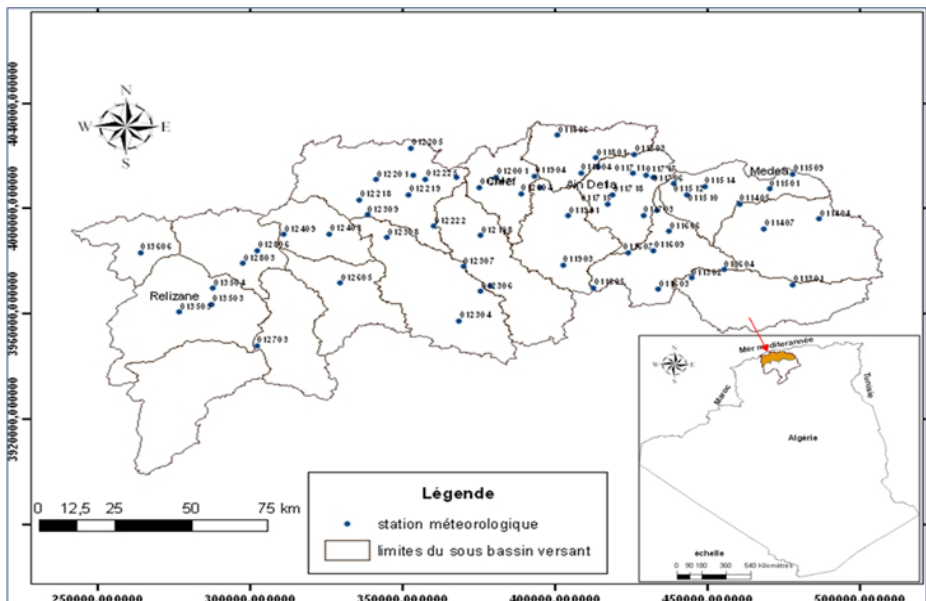


Figure 1. Localisation géographique des stations pluviométriques

1.2. Analyse comparative des résultats de deux méthodes appliquées

L'objectif de l'analyse comparative est d'établir une carte pluviométrique avec un minimum d'erreurs par krigeage ordinaire (estimée par une combinaison linéaire d'observations: $\hat{z}(s) = \sum_i \lambda_i z(s_i)$ [4]). Déposé à l'asymétrie de la distribution de données; Nous avons transformé ces données climatiques en log avec l'application de la méthode box-cox. Ensuite, calculer le variogramme original en utilisant l'algorithme de [5]. Selon [5], le variogramme de la variable z dans l'échelle d'origine (formule 1) ou $\gamma_L(h)$ est le variogramme dans l'échelle logarithmique, \bar{Z}_s est la moyenne de l'échantillon de la variable dans l'échelle d'origine, β est une constante ajoutée à la variable afin d'éviter des valeurs zéro pour les quelles le logarithme n'est pas défini (1 dans Le cas présent), s^2 est la variance des échantillons dans l'échelle d'origine, S^2_L , la variance des échantillons dans l'échelle logarithmique et α^2 est calculée comme formule 2.

$$\gamma_L(h) = ((\beta + \bar{Z}_s)^2 + S^2) (1 - e^{-\alpha^2 \gamma_L(h)}) \quad (1)$$

$$\alpha^2 = \log \left(1 + \frac{s^2}{(\beta + \bar{Z}_s)^2} \right) \quad (2)$$

2. Les Résultats et Interprétations

2.1. Paramètres statistiques

Le tableau 1 ci-dessous présente les résultats statistiques calculés sur les données de la pluviométrie. Le coefficient de variation montre que l'écart-type est de l'ordre de grandeur de la moyenne mais indique une variabilité non significative. D'autre part, le coefficient de variation des données transformées en logarithmique est inférieur, ce qui montre que ces données suivent une distribution normale.

Au niveau de la signification ; Alpha = 0,05, nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle l'échantillon suit une loi normale. En d'autres termes, la non-normalité est significative (Tableau 2).

La courbe de test de Shapiro-Wilk [6] montre que les données sur les précipitations ne suivent pas une distribution normale (figure 2). Au niveau de la signification Alpha = 0,05, on peut rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle l'échantillon suit une loi normale. En d'autres termes, la non-normalité est significative (Tableau 2).

Lorsqu'une distribution non linéaire a été trouvée. Une forme de transformation a été recherchée en appliquant la technique de transformation la plus connue est la transformation Box-Cox, proposée par [7]. On a constaté que la transformation logarithmique est idéale pour l'étude de ces données.

Tableau 1. Paramètres statistiques

Paramètres statistiques	Pluie (mm)	Ln pluie (mm)
Minimum	251,000	5,526
médiane	369,710	5,913
Maximum	644,800	6,469
Moyenne	395,010	5,957
Coefficient de variation	0,210	0,035
variance	7393,940	0,044
Ecart type	85,980	0,209

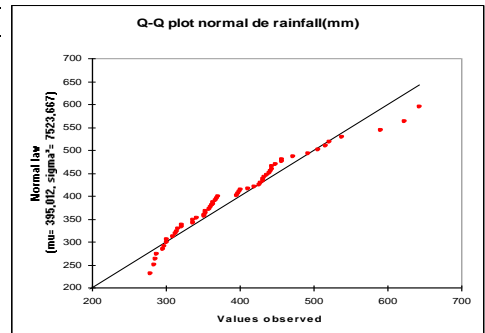


Figure 2. Courbe de test Shapiro-Wilk

Tableau 2. Test de Shapiro-Wilk

W (valeur observé)

Valeur p unilatérale

Alpha

2.2. Analyse spatiale des précipitations

L'estimation spatiale des moyennes annuelles de précipitations a été effectuée par le krigage ordinaire, qui est une technique d'interpolation développée dans les années 1950 par le géologue sud-africain Krige [4]. L'utilisation de nos données dans le cadre d'un système d'information géographique (SIG) nous a permis d'établir deux cartes de précipitations. Dans notre cas, le krigage ordinaire et le lognormal de krigage ordinaire sont appliqués en tant que méthode d'interpolation, et le logiciel ArcGis 9.2 a été utilisé comme SIG.

Le variogramme établi montre une continuité dans la structure spatiale des précipitations à l'échelle de la zone d'étude (figure 3). Ce variogramme est caractérisé par un modèle exponentiel et avec ces paramètres: effet de pépite: 75,72 mm, portée: 44501,3 mètres et seuil: 6171,85 mm².

L'effet de pépite qui est très élevé montre l'existence d'un aléatoire à l'échelle des petites distances.

D'autre part, le variogramme expérimental des données calculé après la transformation logarithmique (figure 4) caractérisé par le même modèle exponentiel mais avec un effet de pépite plus petit que le premier variogramme et caractérisé par ces paramètres: effet de pépite: 60 mm, portée: 28545 mètres et palier : 4071mm².

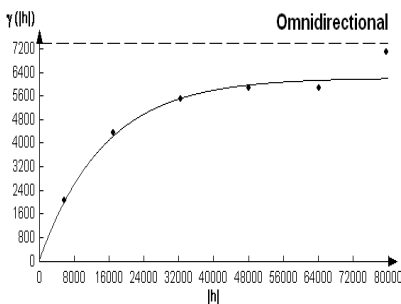


Figure 3. Variogramme expérimental des précipitations

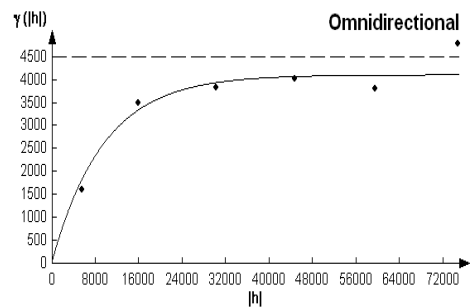


Figure 4. Variogramme expérimental des Log précipitations

2.3. La qualité du modèle

Le degré de précision du modèle a été quantifié en utilisant cinq indicateurs statistiques [8] : le coefficient de corrélation de Pearson entre les valeurs prédites et les valeurs observées; l'erreur quadratique moyenne (RMSE) (3); l'erreur moyenne absolue (MAE) (4); l'erreur relative moyenne en pourcentage (MRE%) (5) et le coefficient de Lin (6). Les formules numériques sont les suivantes:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i' - z_i)^2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i' - z_i| \quad (4)$$

$$MRE\% = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|z_i' - z_i|}{z_i} \cdot 100 \quad (5)$$

$$CC_{Lin} = 2s_{xy} / (s_x^2 + s_y^2 + (x' - y')^2) \quad (6)$$

Avec : Z' : valeur estimé Z: valeur observé

Remarque: pour les valeurs estimées, la méthode de validation croisée a été utilisée pour déterminer ces valeurs.

Tableau 3. Statistique de l'interpolation par deux méthodes

Variable	Métho	Coefficient de corrélation de Pearson	RMSI	MRE%	CC	Coefficient de concordance de Lin
Précipitation moyenne annuelle (mm)	KO	0,693	62,3	0,0037	6,	0,65
	Log K	0,696	62,0	0,0036	6,	0,648

Les résultats présentés dans le tableau 3 indiquent que la méthode de krigeage log normale est optimale car le RMS (62,08 mm) est plus faible par rapport au RMS (62,34 mm) que ce qui est déterminé par le krigeage ordinaire, bien que la différence soit plus faible dans notre étude de cas, mais a été montré que la transformation logarithmique a minimisé une erreur d'estimation. à cette fin, le coefficient de corrélation de Pearson est plus élevé pour la méthode de krigeage log normale par rapport au krigeage ordinaire. D'autres indices tels que le coefficient de concordance de Lin montrent que l'accord est passable (moins de 0,65). Parmi les résultats présentés ci-dessus, il est clair que la méthode de krigeage log normale fonctionne mieux que le krigeage ordinaire.

2.4. Cartographie des précipitations

Les deux cartes des précipitations moyennes annuelles (Figure 5 et 6) pour la période de 1972 à 2012 montrent que les régions les plus tempérées sont situées dans les massifs du nord Est et les massifs du Sud Est, à des altitudes supérieures à 500 mètres. Dans le même temps, ce résultat cartographique a confirmé que la tendance du régime pluviométrique diminue de Nord Est vers le Sud Ouest. Les différences entre ces deux cartes sont bien notées lorsque les précipitations sont supérieures à 500 mm, c'est-à-dire dans les régions montagneuses, contrairement à la plaine est presque la même moyenne.

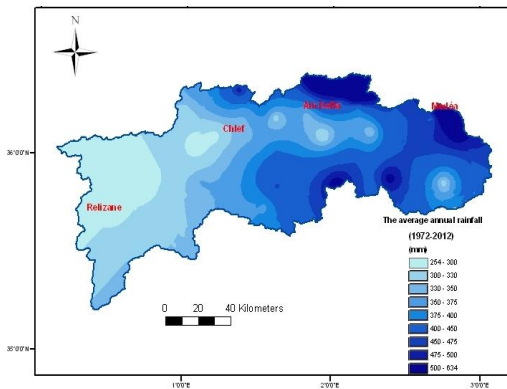


Figure 5. Carte des précipitations moyennes annuelles (Méthode KO)

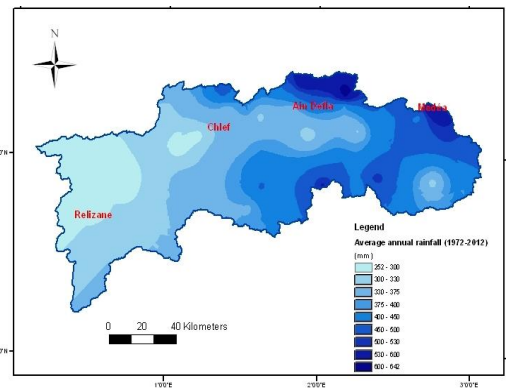


Figure 5. Carte des précipitations moyennes annuelles (Méthode Log KO)

Conclusion

Dans cette étude, deux méthodes d'interpolation ont été testées pour obtenir la meilleure répartition des précipitations annuelles pour une région centrée dans le principal bassin versant en Algérie. Il est intéressant de noter que la méthode d'interpolation de krigeage log normale (log KO) est la meilleure par rapport à la méthode de krigeage ordinaire (KO), lorsque les données climatiques ne suivent pas une distribution normale. En outre, il a été noté que la méthode Log Ko prend en considération les données extrêmement élevées dans l'estimation spatiale. D'autre part, les régions homogènes dans les plaines à la précipitation moyenne annuelle est inférieure à 350 mm, l'estimation spatiale est presque identique. La méthode d'interpolation Log_Ko est donc la meilleure lorsque les données de précipitations sont hétérogènes et ne correspondent pas à une distribution normale.

Références

- [1] Box GEP, Cox DR (1964) An analysis of transformations. Journal of the Royal Statistical Society, Series B 26: 211–252.
- [2] GUIBLIN et al 1995 - Analyse structurale de données à distribution dissymétrique, exemple du hareng écossais. Cahiers de Géostatistique, Compte-rendu des journées de Géostatistique 1.5-16 juin 1995, Paris, E.N.S.M.P
- [3] Matheron, G. (1962). Traité de géostatistique appliquée, Tome I. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, No.14. Editions Technip, Paris.
- [4] Royston P. (1982). An Extension of Shapiro and Wilk's W Test for Normality to Large Samples. Applied Statistics, 31, pp. 115–124.
- [5] Vicente-Serrano SM, Saz-Sánchez MA, Cuadrat JM. 2003. Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climat*

Couplage Sig-modèles hydrologiques pour la prévision hydrométéorologique Application au bassin versant de Bouregreg –Maroc

Najat SERHIR¹, Abdelhamid FADIL¹, El Hassan El BRIRCHI¹

(1) Ecole Hassania des Travaux Publics, Km7 Route El Jadida, Casablanca, Maroc.
najatserhir@gmail.com

Résumé

Le projet s'articule autour de l'utilisation conjointe des systèmes SIG couplés à des modèles numériques et des modèles hydrologiques : un ensemble d'outils incontournables dans les études de prévision hydrologique dans un objectif de maîtrise du risque hydrologique des bassins.

Il consiste en la mise au point et la conception d'un système intégré de prévision en hydrologie dans le but de fournir les éléments nécessaires afin d'anticiper dans la connaissance de la genèse d'une crue à la suite d'un événement pluviométrique : Caractéristiques bassin, pluie moy, intensité max, pointe et hydrogramme de crue ainsi que sa fréquence. Les événements pluviométriques prévus sont fournis sous forme de grilles et représentent les inputs variables principaux du système.

Le système se réalise sur ArcGIS Engine et son exploitation nécessite un prétraitement sur la base des inputs invariables qui doivent être saisies et traitées : le MNT du bassin, les cartes numériques, le réseau hydrographique, le réseau des stations hydrologiques, la carte d'occupation des sols et images satellites. Il est prévu d'être couplé avec des modèles hydrologiques (conceptuel, statistique et modèle empirique) dont les données d'entrées sont les précipitations et les débits antérieurs

Mots clés : bassin versant, prévision crues, couplage, SIG, modèles hydrologiques

Implementation of an Integrated System based on GIS for Hydrometeorological Forecasting - Application to Watershed Bouregreg – Morocco

Abstract

The project interest is to provide water resource managers with a tool for decision making support that provides the necessary elements (watersheds characteristics, mean precipitations, maximum precipitations, flows, volumes, quintiles, hydrographs ...) to anticipate in the knowledge of the flood formation process in order to help better manage the risk of this disaster by taking adequate warning and protection measures. The development of this system is focused on combining the functions of GIS (preparation, handling, retrieval and display of data) and those of prediction models to develop an integrated, ergonomic and extensible tool. The development platform chosen was ArcGIS Engine that allows the implementation of such tools without requiring huge knowledge in GIS.

The work of the system is based on the preparation of basic inputs (DEM, land use, soil, river network and stations network) from which the system will calculate the various physiographic properties of the basin. The loading of forecasting data will thus simulate the basin response using the three prediction models integrated into the tool (HEC-HMS, model based on multiple regression and the empirical model).

Key Words: Watershed, forecasting flows, integrated system, GIS, Hydrologic models

Introduction

Afin de profiter de l'émergence des technologies de l'information en matière de bases des données et interfaces graphiques et tout en exploitant les technologies SIG, ce projet est lancé en visant à mettre en œuvre des outils informatiques couplés à des modèles hydrologiques pour en former un système informatique intégré fonctionnel pour la prévision en hydro météorologie. L'application est réalisée sur le bassin Bouregreg situé au centre nord du Maroc. Il est limité au site du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA) et s'étale sur une superficie de 9 600 km². Il a été découpé, en fonction des stations hydrologiques inventoriées, en huit sous bassins de surface allant de 650 à 3900 km². Le contraste montagneux varie de 46m à 1627 m et les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 420 mm avec un potentiel en eau de surface évalué à 690 Mm³/an. [1], [6]

I. Schéma organisationnel du fonctionnement du système intégré

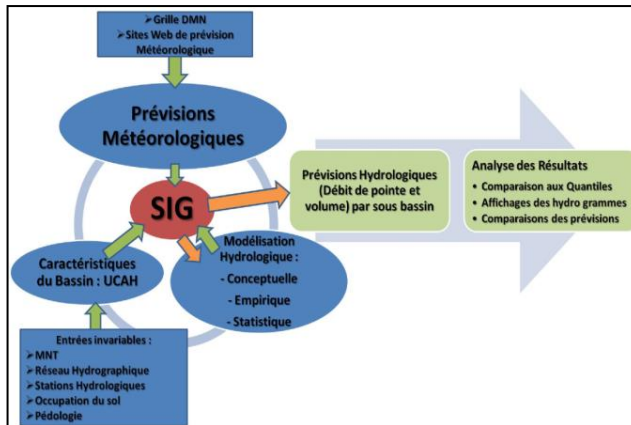


Figure 1 : Schéma organisationnel du fonctionnement du système SIPHYDRO

Le système est développé en utilisant la solution ArcGIS Engine offrant l'accès à la librairie ArcObjects d'ESRI à partir d'une plateforme de développement Dot Net. Une licence de type ArcGIS Engine Runtime est suffisante pour son fonctionnement. Il est conçu pour fonctionner tout seul et indépendamment de l'outil ArcGIS Desktop.[7],

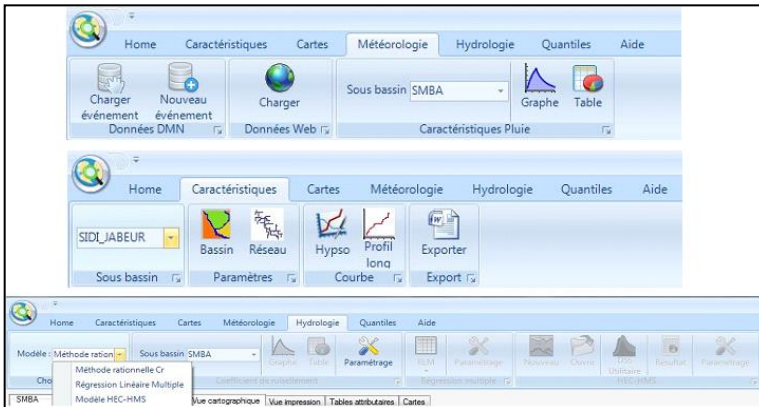


Figure 2 : Interface du système intégré

Le système est composé de quatre composantes principales telles que montrées à la figure 2:

- Calcul des caractéristiques des sous-bassins.
- Chargement et traitement des données de la prévision météorologique.
- Prévision hydrologique à travers différentes approches : empirique, conceptuelle et statistique.
- Edition et analyse des résultats de la prévision hydrométéorologique par rapport aux quantiles statistiques calculés.

2. Inputs invariables : Données spatiales

La prévision à base de la modélisation hydrologique est tributaire de la connaissance des données spatiales pour la détermination des paramètres structurels liés à la configuration physique et le fonctionnement hydrologique du bassin versant : Les limites du bassin pilote et de sous bassins, l'ensemble des caractéristiques physiographiques de relief, pente et du réseau hydrographique, le réseau des stations de mesure hydro pluviométrique, le type du sol et l'occupation du sol. Ces données sont générées à partir du MNT (Aster-GDEM), l'image satellite (Landsat TM) et la carte des sols en utilisant les techniques des SIG et de la télédétection. En particulier les données qui se génèrent automatiquement du MNT (délimitation des bassins et réseau hydrographique) doivent être corrigées et améliorées en utilisant des fonds cartographiques. Dans le cas du bassin de Bouregreg une carte à l'échelle de 1/ 50 000 a été utilisée. [4], [5]. Les graphes de la figure 3 présentent les données de base utilisées, les cartes générées et les informations tabulaires extraites caractérisant un bassin donné et dont les paramètres caractéristiques de relief, de pentes et de temps de concentration. [1], [2]

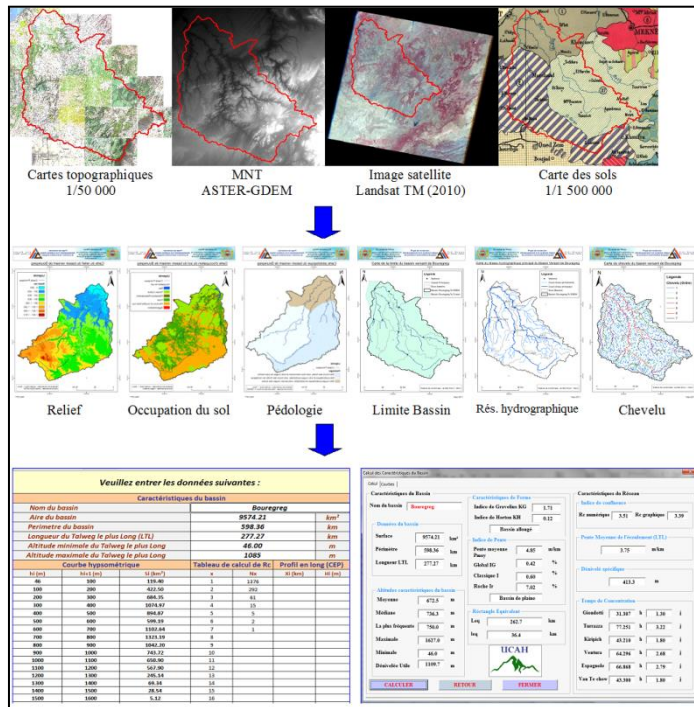


Figure 3 : Les entrées invariables calculées par le système

3. Inputs variables : previsions meteorologiques

Le calcul des entrées variable suit les étapes suivantes [3]:

- Récupération des fichiers de la prévision météorologique horaire ou tri-horaire sous forme texte (longitude, latitude, pluie).
- Chargement des fichiers textes dans le système et affichage de la grille Météo.
- Calcul de la pluie moyenne par sous- bassin ou Conversion des fichiers textes après traitement en fichier DSS (HEC-HMS).
- Calcul et affichage des caractéristiques de l'événement sous forme de graphe et table.

4. Prevision hydrologique

La prévision hydrologique se fait par un modèle empirique, un modèle statistique basé sur la régression linéaire multiple et le modèle conceptuel HECHMS.

4.1 Modèle empirique

Disposant des statistiques sur l'occupation des sols (Forêt, plantations, terrains cultivés, nus, eau et agglomération), de la carte pédologique du bassin et des caractéristiques physiques de relief et pente calculés par sous bassin, l'estimation du

coefficient de ruissellement (Cr) peut y être faite d'une façon fine. La méthode rationnelle basée sur le Cr, est proposée pour donner un ordre de grandeur de la pointe et de sa fréquence.

4.2 Modèle conceptuel

Bien adapté pour simuler le comportement hydrologique des bassins versants non urbanisés, le modèle américain HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) a été recommandé pour faire les simulations des prévisions hydrologiques et ceci selon les étapes suivantes :

- Modélisation du bassin pilote pour la simulation par HEC. Le découpage a été effectué en relation avec la disposition des stations hydrologiques.
- Calage et test sur les événements importants sélectionnés pour obtenir les paramètres optimums propres aux sous bassins.
- Saisie et édition des paramètres optimums par sous bassin et spécification des fichiers d'entrée du modèle.
- Affichage de l'hydrogramme de débit avec la pointe et sa fréquence

4.3 Modèle statistique :

La régression linéaire multiple permet d'exploiter la relation de corrélation évidente existant entre les mesures de débits dans les différents points d'un cours d'eau. En effet, l'élaboration du modèle de prévision hydrologique débit-débit permet d'exploiter les mesures instantanées de débit fournies par le réseau de télémesure pour avoir des prévisions immédiates des débits depuis l'amont vers l'aval. Elle est, ainsi, applicable pour retrouver des débits en aval en fonction des débits mesurés en amont. Leur avantage est leur simplicité et adaptation à différents types de bassins sans exiger des données supplémentaires les caractérisant.

L'équation générale des modèles statistiques s'écrit comme suit :

$$Q(S_{aval}(t)) = a_1 * Q(S1_{amont}(t - d_1)) + \dots + a_n * Q(Sn_{amont}(t - d_n))$$

Avec : a_i le Coefficients de corrélation, $Q(S_i)$ le débit mesuré à la station hydrologique i (m³/s) et d_i le temps de décalage entre la station i et l'aval (heure)

Conclusion :

Devenues très fréquentes et génératrices de dégâts importants, les inondations ont représenté une grande priorité dans le Plan National de l'Eau élaboré par le Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau au Maroc. Ce projet permettra de mettre en œuvre un système informatique qui aidera à la maîtrise des enjeux de la prévision hydrométéorologique à partir d'une étude concrète sur le bassin pilote du Bouregreg. Le système développé permet de conclure sur l'intérêt du couplage entre les modèles hydrologiques et les outils SIG vu l'apport des techniques SIG dans l'ensemble de la chaîne de la prévision en hydrologie : depuis la saisie et la caractérisation du bassin à la saisie et traitement des événements pluviométriques pour en élaborer les prévisions hydrologiques, les éditer, les afficher et les exporter.

Références

- [1] Ahattab J., Bensaïd H. (2010) : Modélisation de Bouregreg pour la prévision des crues. Rapport de PFE, École Hassania des Travaux Publics.
- [2] Ait Bahassou A. (2010) : Développement d'un outil SIG pour la préparation des données et le calcul des paramètres d'entrée des modèles de prévision des crues. Rapport de PFE, École Hassania des Travaux Publics
- [3] Dardouri A. (2011) : Développement d'une application SIG sous ArcGIS Engine pour la prévision des crues, Rapport de PFE, École Hassania des Travaux Publics,
- [4] Roques J. M. : Types d'information et outils pour les systèmes d'information géographique et la gestion des crues.
- [5] Hostache R. (2006) : Analyse d'images satellitaires d'inondations pour la caractérisation tridimensionnelle de l'aléa et l'aide à la modélisation hydraulique. Thèse Sciences de l'eau, École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts de Montpellier, 256 p.
- [6] ABHBC : La zone d'action de l'agence – Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et Chaouia [en ligne]. Disponible sur : <http://www.abhbc.com/spip.php?article8>
- [7] ESRI France : ArcGIS Engine - Création d'applications SIG bureautiques personnalisées ; Les solutions SIG et cartographiques [En ligne]. Disponible sur : http://www.esrifrance.fr/ArcGIS_Engine_presentation.asp
- [8] Lavalley C. : Windows 8 Secrets : Microsoft teste l'interface en rubans dans Windows Explorer [En ligne]. Disponible sur : <http://www.pinnula.fr/news/08176-windows-8-secrets-microsoft-teste-linterface-en-rubans-ribbon-ui-dans-windows-explorer/fr/>

Facteurs de la recrudescence des crues et des inondations en Afrique : Cas du bassin du fleuve Niger au Bénin

Tchékpo Théodore ADJAKPA¹, Idelbert Dagbégnon BEHANZIN¹, Abraham Ayédon
AYENA², Toupta BOGUENA³

¹Centre Interfacultaire de Formation et de Recherche en Environnement pour le
Développement Durable (CIFRED); 03 BP 1463 Jéricho- Cotonou- Bénin ;
adjakpatheo@yahoo.fr ; bidelbert@gmail.com.

²Département de Géographie et Aménagement du Territoire ; Université d'Abomey-
Calavi, Bénin ; 01 BP 526 Cotonou ; ayenabrac@yahoo.fr

³Autorité du Bassin du Niger (ABN) ; BP 729 Niamey- Niger ; touptab@yahoo.com

Résumé

Au cours des dernières décennies, les inondations enregistrées en Afrique de l'Ouest se sont accrues dans un contexte de baisse de la pluviométrie. La présente étude vise à analyser les facteurs de la recrudescence des crues et des inondations dans le bassin du fleuve Niger au Bénin plus précisément dans les Communes de Malanville et Karimama. Elle a été réalisée par le biais de la Méthode Accélérée de Recherche Participative (MARP). Les données qualitatives et quantitatives recueillies sur la période 1954-2013 ont été traitées aux moyens des logiciels Excel et Arc-GIS 10.3. Les résultats obtenus indiquent que plusieurs facteurs naturels et anthropiques aggravent les inondations dans bassin du fleuve Niger au Bénin. Ils sont relatifs à la proximité des deux Communes par rapport au cours principal du fleuve, à l'ensablement, à la dégradation du couvert végétal, à l'occupation anarchique des rives du fleuve et à l'intensification des activités agricoles dans les plaines inondables.

Mots clés : Ensablement, crues, inondations, recrudescence, bassin du Niger au Bénin.

Flood Recrudescence Factors and Flooding in Africa: Case of the Niger River Basin of Bénin

Abstract

During the last decade, floods recorded in West Africa have increased in a context of rainfall declining. The current study aims to analyze flood recrudescence factors and flooding in the Niger River basin of Benin, specifically in the Communes of Malanville and Karimama. It was carried out through the Rapid Participatory Research Appraisal. The qualitative and quantitative data collected over the period 1954-2013 were processed using the Excel and Arc-GIS 10.3 software. The results indicate that several natural and anthropogenic factors aggravate flooding in the Niger River Basin of Benin. They relate to the proximity of the two municipalities in relation to the main stream of the river, sandbank, degradation of the vegetation cover, the anarchic occupation of the river banks and the intensification of agricultural activities in the floodplains

Key Words: Sandbank, floods, flooding, recrudescence, Niger Basin of Benin

et 2014. On en déduit une réduction de la profondeur du lit du fleuve. Ceci peut s'expliquer en partie par son comblement par des dépôts de sédiments (Figure 3).



Figure 3 : Bing Image satellite, année 2011 : Ensablement du lit du fleuve Niger à Malanville
 Source : PNUD-Bénin, 2014

Ces dépôts de sédiments réduisent la profondeur du lit du fleuve Niger et obligent les eaux à s'étaler dans la plaine inondable provoquant ainsi de graves inondations. Outre ces facteurs naturels, les activités agricoles dans les plaines inondables expliquent dans une certaine mesure la recrudescence des inondations. La figure 4 présente l'évolution comparée des superficies emblavées et de la population du bassin du fleuve Niger au Bénin.

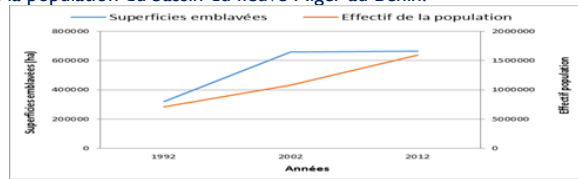


Figure 4 : Evolution comparée des superficies emblavées et de la population du bassin du fleuve Niger au Bénin ; Source des données : INSAE, 2013 et MAEP, 2013

L'observation la figure 4 montre, qu'au fur et à mesure que la population évolue, les superficies emblavées augmentent (tableau I). Il s'en suit une érosion éolienne et hydrique des terres nues entraînant le comblement du lit du fleuve. et le déferlement des eaux dans les basses altitudes assujetties aux inondations. Aussi, les besoins en eau provoqués par la sécheresse des années 1970, ont poussé les populations à s'installer de façon anarchique sur les rives et les basses plaines du fleuve Niger pour leurs activités. Nonobstant ces facteurs locaux, il convient de noter que les crues en amont amplifient les inondations en aval. En effet, les crues en provenance de la Guinée et du Mali combinées aux crues des affluents nigériens et burkinabé de la rive droite en amont de Niamey (Gorouol, Dargol, Sirba) viennent à leurs tours par le phénomène de la propagation des ondes de crues provoquer les inondations dans les Communes de Malanville et Karimama (Vallée du Niger au Bénin) pendant les mois d'août et septembre.

Tableau I : Bilan statistique de l'évolution des superficies des différentes unités d'occupation du sol entre 1986 et 2012.

Occupation du sol	1986		1998		2012		Dynamique (+), (-) ou (=)
	ha	%	ha	%	ha	%	
Forêt dense	152169	3,41	142525	3,19	120327	2,77	(-)
Forêt claire et sa boisée	753413	16,87	731052	16,37	534316	11,97	(-)
Savane arborée e arbustive	2823050	63,22	2558943	57,31	2170352	48,60	(-)
Savane inondable	17952	0,40	17952	0,40	17952	0,40	(=)
Plantation	718	0,02	12136	0,27	18421	0,41	(+)
Mosaïque de cult jachère	614962	13,77	896078	20,07	1492741	33,43	(+)
Agglomération	8263	0,19	11741	0,26	16318	0,37	(+)
Plan d'eau	6563	0,15	6563	0,15	6563	0,15	(=)
Total	4465410	100,00	4465410	100,00	4465410	100,00	

(-) : la superficie de l'unité d'occupation du sol a régressé ; (+) : la superficie de l'unité d'occupation du sol a augmenté ; (=) : la superficie de l'unité d'occupation du sol est stable.

2.2. Discussion

Les graves inondations répétées dans les Communes de Malanville et de Karimama ont pour causes les crues locales du fleuve Niger qui s'observent entre les mois d'août et de septembre (Ayéna, 2013). Ces résultats sont similaires à ceux de Blalogoé (2014) qui a montré que parmi les causes des inondations dans le Grand Cotonou, il y a les apports fluviaux de l'Ouémé et de ses affluents depuis le Nord et le Centre du Bénin qui viennent provoquer la crue du lac Nokoué se déversant sur les quartiers périphériques. A ces causes, s'ajoutent des facteurs aggravants comme l'occupation anarchique de la plaine inondable. De pareils résultats ont été obtenus par Kane (2007) à Dakar affirmant que les inondations sont l'aboutissement de l'urbanisation accélérée, favorisé par une occupation anarchique des terrains disponibles sans respect des dispositions prévues par le plan directeur urbain. Egalement N'Bessa (2008) a montré que l'occupation anarchique des zones inondables est un facteur responsable des inondations à Cotonou (Bénin). Les activités humaines menées dans le bassin constituent également un facteur aggravant des inondations (Ayéna, 2013 ; Béhanzin, 2014). De pareilles conclusions ont été obtenues par Descroix (2012) à Niamey pour qui, les activités anthropiques notamment l'agriculture crée l'encroûtement des sols, le rend imperméable, accélère et amplifie le ruissellement provoquant rapidement les crues de fortes intensités et par conséquent les inondations

Conclusion

Les facteurs naturels et humains tels que le comblement du lit du fleuve Niger, la sécheresse des années 1970 à 1980, la régression du couvert végétal, l'installation anarchique des populations sur les rives du fleuve et les activités humaines menées dans le bassin constituent les facteurs aggravants des graves inondations provoquées par les crues et le déferlement des eaux du fleuve dans les plaines inondables au cours des mois d'août à septembre. Pour atténuer les effets des inondations, il faut reboiser une grande partie du bassin afin de réduire l'érosion des sols et le comblement du fleuve. Il faut aussi construire des digues de protection en matériaux locaux (latérite compactée par de l'argile) et des barrages de retenues d'eau le long du fleuve Niger pour réduire la montée des eaux et empêcher le débordement du fleuve. Les systèmes de cultures en parallèle à la pente et en quinconce vont permettre de réduire la vitesse du ruissellement, l'apport des sédiments vers le lit du fleuve et son comblement.

Références

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

Vulnérabilité aux Inondations. Cartographie pour une aide à la décision. Cas de la Mitidja ouest – Algérie

KOURAT S.¹, TOUAIBIA B.¹ & YAHIAOUI A.²

¹ Doctorant, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique Blida. Algérie.

kouratsofiane@yahoo.fr

¹ Professeur, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique Blida. Algérie.

touaibiabenina@yahoo.fr

² Docteur, Université de Béchar, B.P. 417 Bechar. Algérie. yahiaouidz@hotmail.com

Résumé

Les inondations comme un aléa naturel, représentent la moitié des catastrophes naturelles mondiales, faisant près de 20000 victimes annuellement dont l'Algérie en fait partie. L'historique des inondations à travers le pays, sur la période de 1969 à 2014, décèle l'existence de plusieurs régions vulnérables à ce risque spatio-temporel et imprévisible. Les paramètres concourant à la genèse des inondations sont nombreux, cependant l'un d'eux est déterminant, la pluie voire son intensité. La prévision des inondations consiste principalement en une observation continue des pluies de courtes durées. La modélisation comme outil aide à la prévision, donne une anticipation des évolutions futures du débit pluvial. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques. Dans la plupart des cas, les modèles développés sont basés sur des régressions multiples et font peu appel aux connaissances sur les processus hydrologiques. La question de la gestion des ressources en eau face à ce risque est l'objectif de développer une carte thématique localisant les zones vulnérables pour une aide à la décision en se basant uniquement sur les intensités des précipitations. La plaine de la Mitidja Ouest, située à 50 Kms au Sud-Ouest de la capitale Alger, sujette aux inondations. Cette plaine perd chaque année, par asphyxie, des récoltes considérables. Les données sont insuffisantes et éparpillées, seule la régionalisation à travers une modélisation adaptée aboutit à des résultats satisfaisants.

Mots clés : Vulnérabilité, Risque, Inondations, Cartographie, Mitidja Ouest.

Vulnerability to flooding. Mapping for decision support. Case of the Western Mitidja

Abstract

Flooding as a natural hazard accounts for half of the world's natural disasters, with nearly 20,000 victims annually, including Algeria. The history of floods across the country over the period 1969 to 2014 reveals the existence of several regions vulnerable to this spatio-temporal and unpredictable risk. The parameters contributing to the genesis of the floods are numerous, however one of them is decisive, the rain even its intensity. Flood forecasting consists mainly of continuous observation of short-term rainfall. Modeling as a tool helps forecast, gives an anticipation of future changes in storm flow. This is the most common operational use of hydrological models. In most cases, the developed models are based on multiple regressions and make little use of knowledge about hydrological processes. The question of the management of water resources in the face of this risk is the objective of developing a thematic map locating the vulnerable areas for decision support based solely on the intensities of precipitation. The plain of the Mitidja west, located 50 km to the South-West of the capital Algiers, subject to the floods. This plain loses every year, by asphyxiation, considerable crops. The data are insufficient and scattered, only regionalization through an adapted modeling results in satisfactory results.

Key words: Vulnerability, Risk, Flood, Cartography, Mitidja West.

Introduction

Les inondations sont parmi les catastrophes naturelles qui engendrent de pertes en vie humaines et dégâts matériels, elles constituent le risque le plus distribué sur la planète. De plus, leur grande fréquence dans certaines régions du globe, leurs dépendances face aux changements climatiques et la pression démographique de plus forte sur les rives des cours d'eau, en font des événements de plus en plus préoccupants et difficiles à gérer.

Selon l'Institut international de l'eau de Stockholm en Suède pour la période 1996-2005, environ 80 % des catastrophes naturelles étaient d'origine météorologique, les inondations auraient lors de cette décennie affecté en moyenne 66 millions de personnes par an.

L'Algérie, est parmi les régions méditerranéennes qui sont affectées par des crues qui engendrent des inondations dues généralement aux débordements des cours d'eau traversant des villes et des agglomérations. Plusieurs catastrophes provoquées par les crues ont été recensées en Algérie (Alger en novembre 2001, Sidi Bel Abbès en avril 2007, Ghardaïa et Bèchar en octobre 2008, et récemment Et Taref 2012 etc.).

L'étude de risque d'inondation est basée essentiellement sur l'étude hydrologique de la nature des régimes de courant et sur la réponse hydraulique conséquente, de ce fait laissant pour la cartographie de tous les résultats. Pour décrire cette méthodologie, en ce document il a appliqué sur la captation de Mitidja ouest Sud-Ouest d'Alger.

1. Zone d'étude et données

La plaine de la Mitidja se situe au sud d'Alger et s'étend géographiquement sur le territoire de quatre (04) wilayas : Tipaza, Blida, Alger et Boumerdes. C'est une vaste plaine qui couvre une superficie de 1450 km² avec une longueur moyenne de 100 km et une largeur moyenne de 14 km. Notre région d'étude concerne partie occidentale de la plaine (la Mitidja Ouest). Elle est limitée : au nord par la barrière du Sahel; au sud par les piémonts de l'Atlas de Blida; à l'est par les limites du bassin versant d'Oued Mazafran, à l'ouest par les limites du bassin versant d'Oued Djer-Bouroumi. La région étudiée subit un climat de type méditerranéen caractérisé par l'alternance d'une saison sèche et chaude et d'une saison humide et froide. Le bassin de l'oued Mazafran il occupe une superficie de 1860 km² dont 60% environ se trouve en montagnes. L'oued Mazafran résulte de la réunion de trois autres oueds qui sont : oued Bou Roumi, oued Djer et oued Chiffa. Il fait partie des oueds de la plaine qui provoquent des risques d'Inondabilité importants dont il faut suivre l'évolution lors des précipitations devenues de plus en plus fortes et intenses ces dernières années. Les données hydrométriques extrêmes disponibles sont l'échantillon des débits instantanés maxima QIXA pour les années suivantes 1981/2012. En totalité, la série de la variable QIXA est formée de 32 valeurs, avec une moyenne de 28.3 m³/s et un écart-type de 61.3 m³/s. Cet échantillon est indépendant, homogène et ne contient pas de valeurs aberrant évaluées par les tests statistiques de Wald et Wolfowitz (1943), Mann et Whitney (1947) et Grubbs et Beck (1972).

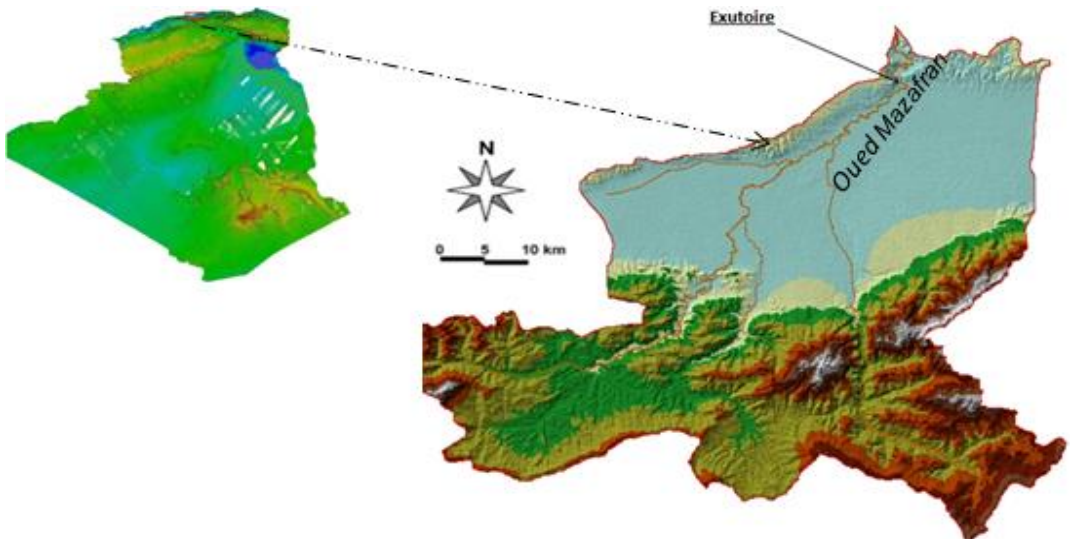


Figure 1. Bassin versant de l'oued Mazafran

2. Modélisation conceptuelle du risque d'inondation

Le risque peut être défini comme le résultat de deux facteurs indépendants: le risque et la vulnérabilité. Le risque peut être défini comme la probabilité d'occurrence d'un événement défini dans une période de temps donnée et est lié au phénomène physique de l'inondation par débordement. Il dépend à la fois du comportement hydrologique du bassin hydrographique et du fonctionnement hydraulique du système d'eau. Le risque peut être quantifié en fonction de la profondeur de l'eau, de la durée de l'événement et de la période de retour (Gendreau et al. 1997, Molin Valdes, 1994).

La vulnérabilité est le degré de dommages des éléments résultant de l'occupation des inondations. Le dommage économique direct et indirect est défini dans la même dimension du danger en fonction de la profondeur de l'eau, de la durée de l'événement et de la période de retour.

En général, le risque est défini comme le produit du risque et la vulnérabilité. Mais en fait, les techniques qui sont implicites dans cette définition ne représentent qu'une modélisation d'une réalité plus complexe. Par conséquent, la méthodologie de l'étude des phénomènes d'inondation doit être détaillée à travers ses différentes composantes. Qui peuvent mieux décrire la procédure depuis l'acquisition des données jusqu'au résultat final. C'est-à-dire la carte de système des risques.

On distingue trois phases principales de la procédure: hydrologique, hydraulique et cartographique. Cette modélisation vise à évaluer le risque à une surface topographique par la quantification du risque et de la vulnérabilité par une période de retour équivalente (TAL pour le risque et TOP pour la vulnérabilité).

3. Cartographie Des Risques

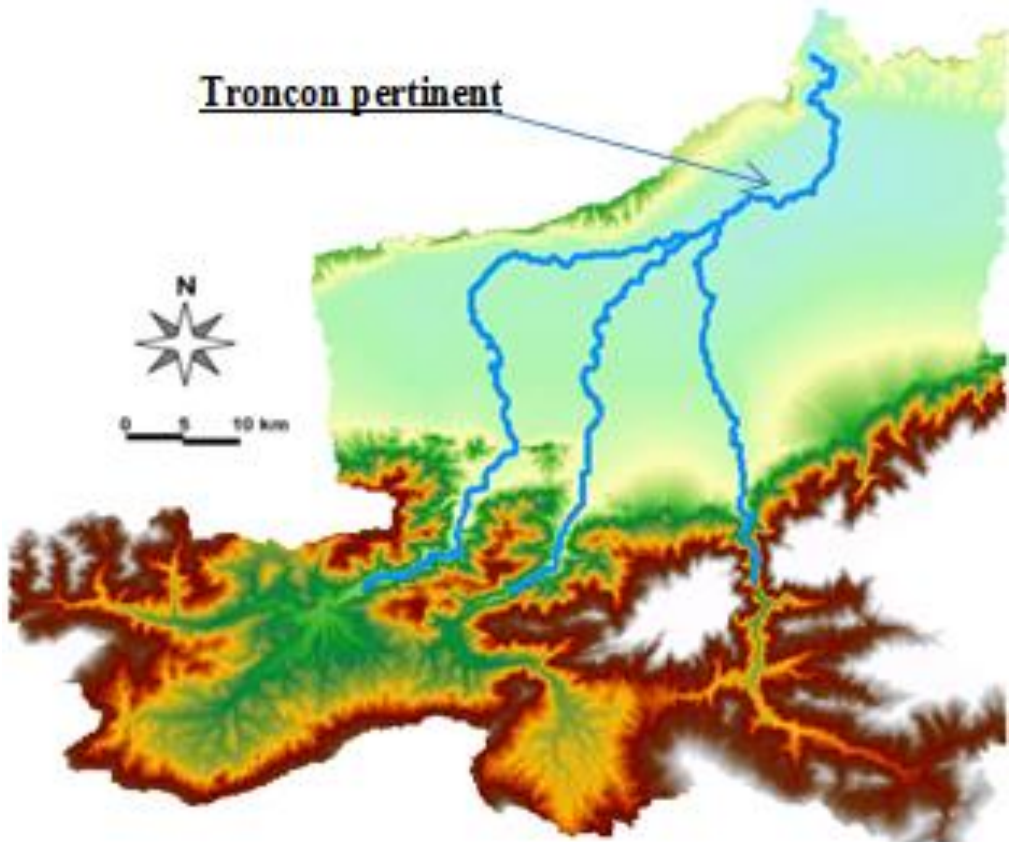


Figure.2.pertinent de l'oued Mazafran.

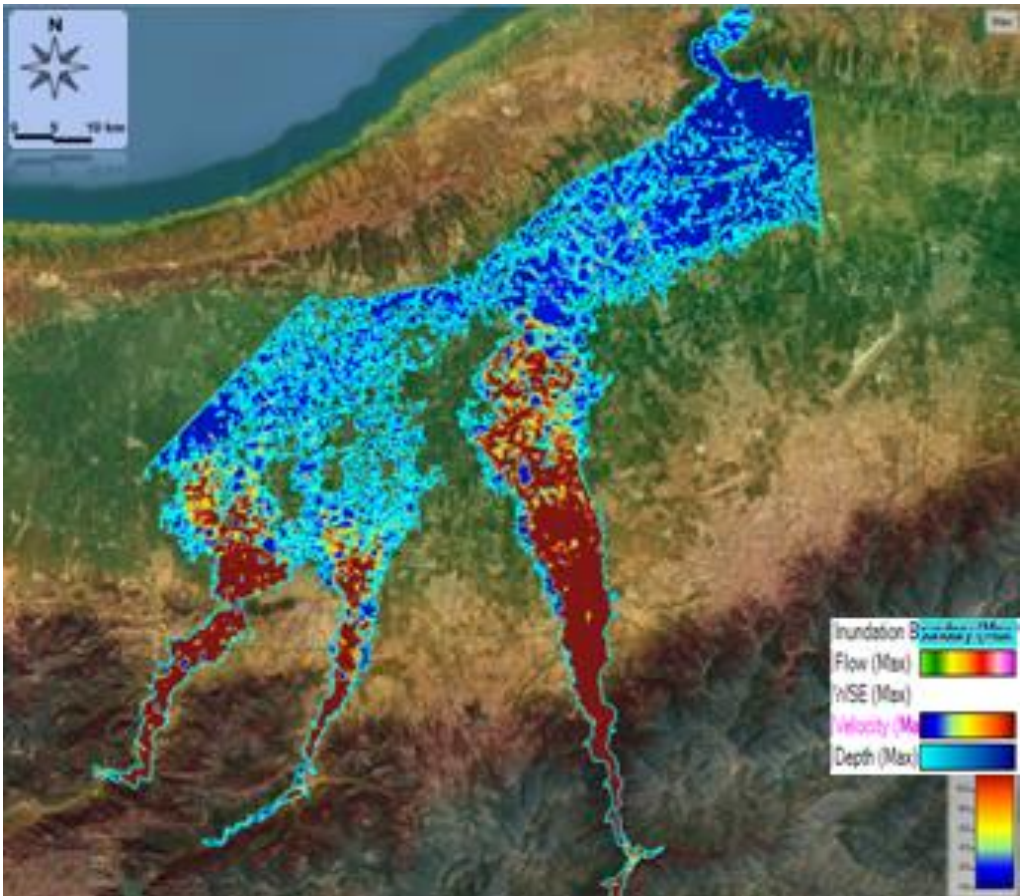


Figure 3. Cartographie des risques.

Attribuer une mesure pour le risque dans un site local, faciliter l'émergence d'une solution plus efficace (Givone, 1995). En effet, pour prendre en compte les interactions entre amont et aval du bassin versant et les contraintes hydrauliques sur le canal d'écoulement, Il est nécessaire de se concentrer sur une partie géographique de la rivière où l'inondation est pertinente. Dans le cas de l'oued Mazafran.

Les deux composantes du risque sont exprimées dans la même unité (année), donc le risque peut être obtenu en comparant TOP et TAL, et pratiquement en utilisant les cartes de risque et de vulnérabilité. De cette façon, il est possible d'obtenir la cartographie des risques.

Cette cartographie est le résultat de l'analyse du risque qui sera considérée comme la base de la négociation en termes de planification et de gestion pour la prévention et la mise à l'essai de l'efficacité de tout projet d'ingénierie hydraulique.

Conclusion

La méthodologie d'étude du risque d'inondation et sa cartographie sont basées sur trois phases différentes qui peuvent être pratiquement définies comme phase hydrologique, hydraulique et cartographique, respectivement. Le niveau hydrologique se concentre sur le régime d'inondation, fournissant finalement les hydrographes mono-fréquences, utilisés comme conditions aux limites du modèle hydraulique pour calculer dans chaque section la profondeur correspondante.

Tous ces résultats conduisent à déterminer une zone de danger correspondante, qui peut être cartographiée trop. Bien que, la vulnérabilité peut être cartographiée à travers une étude de l'enquête socio-économique.

La superposition des deux cartes, conduit à l'établissement de la carte des risques. Les résultats scientifiques et techniques ainsi obtenus confirment que des méthodes opérationnelles et novatrices peuvent offrir une gestion plus intégrée de l'eau, capable de concilier les objectifs de réduction des dommages causés par les inondations sans sacrifier les ressources en eau et les valeurs environnementales associées. La méthodologie utilisée recommande en fait une négociation factuelle à travers les problèmes d'inondation du bassin hydrographique. Cette étape est nécessaire pour fournir des solutions de conception acceptables par tous les acteurs impliqués, en ce qui concerne l'importance du bassin versant.

References

- [1] Barkau, R.L. (1982). Simulation of the July 1981 flood along the Salt River. Report for CE695BV. Special Problems in Hydraulics. Department of Civil Engineering. Colorado State University. Ft. Collins. CO. 1982.
- [2] Desbos, E. (1995). Quantification de la vulnérabilité du territoire face aux inondations. Rapport de D.E.A. "Conception en bâtiment et techniques urbaines", INSA Lyon, Laboratoire Méthodes. Cemagref, Lyon. 70 p.
- [3] Fread, D. L. (1976). Theoretical Development of an implicit Dynamic Routing Model. Hydrologic Research Laboratory. Office of Hydrology. U.S. Department of Commerce, NOAA, NWS, Silver Spring, Md., presented at Dynamic Routing Seminar, Lower Mississippi River Forecast Center, Slidell, LA. 13-17 Dec.
- [4] Gendreau, N., and Gilard, O. (1997). Structural and non-structural measures implementation: choice's arguments provided by Inondabilité method. Ribamod concerted action, Proceedings of the 1st workshop, European Commission, EUR 18019 EN, 241-250.
- [5] Givone, P. (1995). La négociation du risque: une étape nécessaire, in "Inondations, du constat à la décision". Ingénieries EAT, n° spécial, 79-85.
- [6] Grubbs, F., and Beck, G. (1972). Extension of sample sizes and percentage points for significance tests for outlying observations. *Technometrics*, 14(4), 847-854.
- [7] Liggett, J. A., and Cunge, J. A. (1975). Numerical methods for the solution of the Unsteady flow equations. In: Mahmood and Yevjevich (eds), *Unsteady Flow in Open Channels*, Water Resources Publications, Littleton, CO, 89-172.
- [8] Smith, R. H. (1978). Development of a Flood Routing Model for Small Meandering Rivers. Ph. D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Missouri at Rolla, MO. U.S. Army Corps of Engineers (2010). HEC-RAS River Analysis System - Hydraulic Reference Manual, Hydrologic Engineering Center, CPD-69, Version 4.1.
- [9] Wald, A., and Wolfowitz, J. (1943). An exact test for randomness in the parametric case based on serial correlation. *Ann. Math. Statistic*, 14, 378-388.
- [10] Yahiaoui, A. (2012). Inondations. Cartographie des zones vulnérables en Algérie du Nord. Cas du l'oued Mekerra W. Sidi Bel Abbès. Thèse de doctorat en Sciences. Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. 210 p.

Perceptrons multicouches avec algorithme d'apprentissage de Levenberg-Marquardt pour la prédiction des teneurs en métaux lourds des sédiments marins

Kaoutar ELAZHAR, Hind OMARI, Hicham EL BADAoui, Abdelaziz ABDALLAOUI*, Hamid ZINEDDINE

Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, Département de Chimie, Equipe Chimie Analytique et Environnement, B.P. 11210, Zitoune, Meknès, Maroc.

* Auteur Correspondant : a.abdallaoui@gmail.com

k.elazhari@gmail.com omari.hind@gmail.com

elbadaoui.hicham@gmail.com zineddineh@yahoo.fr

Résumé

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont une nouvelle méthode d'approximation pour les systèmes complexes, particulièrement utile lorsque les méthodes statistiques bien connues ne sont pas efficaces. Les perceptrons multicouches ont été principalement utilisés pour la prévision environnementale au cours des dernières années. Ces techniques de modélisation sont de plus en plus sollicitées par la communauté écologiste. Dans le présent travail, les réseaux de neurones utilisés sont de type perceptron multicouches (PMC) pour établir un modèle stochastique performant d'une meilleure prédiction des teneurs en métaux lourds (Fe, Mn et Zn) à partir de plusieurs paramètres géochimiques des sédiments de la Mer Rouge. Plusieurs architectures et règles d'apprentissage ont été testées pour permettre le meilleur choix du modèle RNA.

La régression linéaire multiple (RLM) et l'approche de réseau neuronal sont présentées en termes d'étapes de la méthodologie dans le contexte de la prédiction des teneurs en métaux lourds dans les sédiments de la Mer Rouge. Les résultats obtenus dans cette étude sont alors comparés, interprétés et discutés.

Les résultats nous ont montré que la prévision des teneurs en métaux est optimale et plus performante avec le modèle de type RNA utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt, ayant une architecture [13-8-1] et des fonctions de transfert de types Transig et Purelin respectivement pour la couche cachée et la couche de sortie.

Mots clés : RNA, PMC, Algorithme de Levenberg-Marquardt, métaux lourds, Sédiments, Mer Rouge.

Multilayer Perceptron with Levenberg-Marquardt learning algorithm for the prediction of heavy metal concentrations in marine sediments

Abstract

Artificial neural networks (ANN) are a new approximation method for complex systems, particularly useful when well-known statistical methods are not effective. Multilayered perceptron have been mainly used for environmental prediction in recent years. These modeling techniques are increasingly being sought by the ecological community. In this work, the neural networks used are of the multilayer perceptron type (MLP) in order to establish a powerful stochastic model for a better prediction of the heavy metal contents (Fe, Mn and Zn) from several geochemical parameters of the sediments of the Red Sea. Several architectures and learning rules have been tested to allow the best choice of the ANN model.

Multiple linear regression (MLR) and neural network approach are presented in terms of methodological steps in the context of predicting heavy metal levels in Red Sea sediments. The results obtained in this study are then compared, interpreted and discussed.

The results showed that the prediction of the metal content is optimal and more efficient with the ANN model using the Levenberg-Marquardt algorithm, having an architecture [13-8-1] and Transig type transfer functions And Purelin respectively for the hidden layer and the output layer.

Key Words: ANN, MLP, Levenberg-Marquardt algorithm, heavy metals, Sediments, Red Sea.

Introduction

Par rapport aux méthodes statistiques classiques (régression linéaire multiple, segmentation, analyse discriminante, ...), les réseaux de neurones artificiels sont souvent crédités de nombreux avantages telle une meilleure capacité prédictive issue de meilleure représentation du phénomène (variables plus nombreuses, relations non linéaire), une capacité d'adaptation et de généralisation au-delà de l'échantillon étudié, et aussi par une meilleure stabilité des coefficients par une moindre sensibilité aux points aberrants ainsi que l'absence d'hypothèse sur la distribution des variables et encore le respect de contraintes sur la variable à expliquer [1]. L'intérêt des modèles des réseaux de neurones artificiels réside dans leur capacité d'apprendre des relations complexes à partir de données numériques. C'est pourquoi le choix et l'application d'un modèle neuronal demeure un domaine de recherche très actif contrairement aux modèles stochastiques classiques. Par comparaison à d'autres modèles plus classiques, les résultats obtenus indiquent que les modèles connexionnistes possèdent un meilleur pouvoir prévisionnel [2;3;4;5]. Le recours à ces méthodes neuronales plus complexes constitue une alternative pleinement justifiée et privilégiée dans le domaine de la prévision environnementale en général et en particulier dans la prévision des concentrations des métaux lourds en fonction d'autres paramètres environnementaux dans un bassin sédimentaire. Cette étude vise le développement des modèles mathématiques pertinents pour la prédiction des teneurs en fer, en manganèse et en zinc à partir des données environnementales dans les dépôts de six fosses de la Mer Rouge. Pour ce développement nous avons appliqué deux méthodes statistiques, la régression linéaire multiple et les réseaux de neurones artificiels. Pour déterminer le modèle le plus performant, nous avons comparé les coefficients de corrélation des modèles développés. L'objet essentiel de ce travail est donc d'utiliser les avantages des réseaux de neurones artificiels pour établir un modèle statistique neuronal non linéaire de prédiction des concentrations en métaux lourds dans les sédiments de la Mer Rouge, à partir de certains paramètres géochimiques.

I. Matériel et Méthodes

Dans cette étude, nous avons utilisé une base de données, qui est constituée de 348 échantillons et seize variables géochimiques des sédiments marins mesurées en septembre 1992 à bord du navire océanographique français, le Marion Dufresne. Les carottes sédimentaires ont été prélevées dans six fosses situées le long de l'axe de la Mer Rouge (du Nord au Sud : Thétis 'T', Atlantis II 'A', Valdivia 'V', Chain B 'C', Port Soudan 'P', Suakin 'S') et hors fosse, entre 19° et 23° de latitude Nord (Figure 1). Les boues ont été collectées, au moyen d'un carottier de type Kühnberg. Une fois remontées à bord les carottes ont été découpées longitudinalement en sections de 1,5 mètre. Les carottes ont été conservées en chambre froide (4°C) dans la cartothèque du Muséum d'Histoire Naturelle de Paris [6]. La base de données utilisée dans ce travail se compose de treize variables indépendantes (explicatives) et de trois variables dépendantes (à expliquer) : teneurs en Fe, en Mn et en Zn des sédiments (Tableau 1). Dans un premier temps il est indispensable de chercher à répartir la base de données en trois parties [7] : une partie à utiliser comme base d'apprentissage, une partie à utiliser comme base de validation et une troisième partie comme base de test. Pour cela, nous avons divisé aléatoirement notre base de données en trois parties selon des pourcentages bien définis. Ensuite, nous avons enregistré pour chaque répartition les valeurs de l'erreur quadratique moyenne. D'après les résultats des calculs de l'erreur quadratique moyenne relatifs au zinc pour trois essais différents, portés sur le tableau 2, nous avons remarqué que le meilleur pourcentage au niveau des indicateurs de performances est : 70 % dans la base d'apprentissage et 30 % pour les bases de validation et de test.

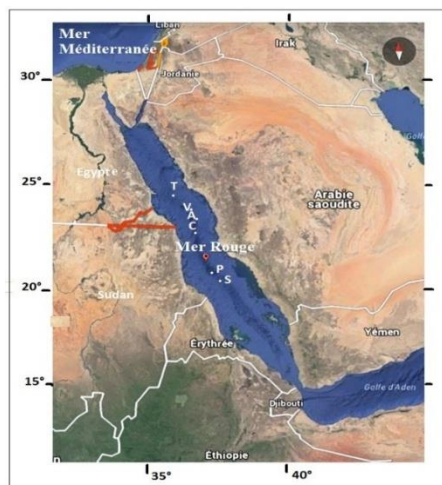


Figure 1. Carte de localisation des sites de prélèvements des carottes.

Tableau 1. Paramètres utilisés et leurs symboles

		Paramètres géochimiques	Symboles	Unités
Variables indépendantes	X ₁	Profondeur	Prof	cm
	X ₂	Carbonates	CaCO ₃	%
	X ₃	Carbone organique	Corg	%
	X ₄	Soufre	S	%
	X ₅	Nombre de foraminifères	Nb foram	Nb/g
	X ₆	Globigerinoides ruber	G. ruber	%
	X ₇	Globigerinoides sacculifer	G. sacculifer	%
	X ₈	Globigerinoides calida	G. calida	%
	X ₉	Globigerinoides Siphonifera	G. siphonifera	%
	X ₁₀	Hastigerina pelagica	Hastigerina	%
	X ₁₁	Orbulina universa	Orbulina	%
	X ₁₂	Globoturborotalia rubescens	G. rubescens	%
	X ₁₃	Sprudts	Sprudts	%
Variables dépendantes	Y ₁	Fer	Fe	g/kg
	Y ₂	Manganèse	Mn	g/kg
	Y ₃	Zinc	Zn	g/kg

Tableau 2. Erreurs quadratiques moyennes (MSE) relatifs à chaque répartition de la base de données : cas du Zn

	MSE ₁	MSE ₂	MSE ₃
Apprentissage: 90% Validation et test: 10 %	0,82	0,79	0,87
Apprentissage: 80% Validation et test: 20 %	0,97	0,90	0,83
Apprentissage: 70% Validation et test: 30 %	0,76	0,61	0,49

Le premier groupe qui correspond à 70 % des données totales, servira à entraîner le système. Le deuxième groupe qui correspond à 15 % des données totales sera utilisé pour valider le réseau et les 15 % restantes qui n'ont pas participé à l'apprentissage des modèles seront utilisées comme un test indépendant de la généralisation du réseau.

2. Résultats et Discussion

Au cours de ce travail, et pour une rigueur scientifique optimale, deux indices de performance ont été calculés pour chaque modèle établi : Le coefficient de corrélation (R) et l'erreur quadratique moyenne (MSE). La mise en œuvre d'un réseau de neurones artificiels a nécessité des tests préliminaires. La modélisation réalisée permet de sélectionner le nombre de neurones nécessaire pour une prédiction satisfaisante des teneurs en métaux lourds et a montré que l'erreur peut être optimisée en choisissant la bonne configuration du réseau. Le choix des poids initiaux est aléatoire. Il faut prendre la précaution pour qu'ils ne soient pas égaux, car il y a un risque de saturation des neurones, et par conséquent un blocage de l'apprentissage. L'optimisation des paramètres d'un réseau de neurones est instable car chaque exécution de l'estimation de l'erreur par validation croisée fournit des résultats différents. Elle est en plus très compliquée par le nombre de paramètres à optimiser : nombre de couches, nombre de neurones dans chaque couche, nombre d'itérations, ... Les exécutions sont parfois longues et les résultats ne sont pas toujours pertinents. Le plus efficace semble être de fixer la taille (nombre de neurones) et le nombre d'itérations pour se focaliser l'optimisation des indicateurs de performance. Plusieurs architectures neuronales ont été alors simulées pour l'apprentissage et la validation. Nous avons alors opté pour une seule couche cachée, et pour le nombre de neurones, les simulations établies ont démarré depuis un seul neurone jusqu'à 20 neurones dans la couche cachée. Une fois le modèle optimal choisi, ses performances seront estimées à l'aide d'un certain nombre d'indicateurs pour évaluer la qualité des modèles. Ceci pourrait se faire entre autres par la représentation de la relation globale entre les valeurs observées et estimées. Le tableau 3 présente les valeurs des indicateurs de performance en fonction du nombre de neurones dans la couche cachée. Les résultats sont optimaux, lorsque le nombre de neurones

cachés est de 8 neurones (NCC = 8 neurones). En effet pour ce nombre de neurones dans la couche cachée et pour les trois métaux étudiés, l'erreur quadratique moyenne (MSE) qui diminue de manière significative, ou pour le coefficient de corrélation(R) qui indique une convergence vers une valeur plus élevée et optimale. Par ailleurs, la figure 2 décrit l'entraînement du réseau. Elle montre qu'au bout de la dix-huitième itération, le résultat désiré est atteint. Avec 8 neurones cachés, les trois courbes relatives à l'évolution de l'erreur quadratique moyenne des trois phases convergent correctement vers le minimum d'erreur quadratique moyenne (MSE). Le réseau a été entraîné jusqu'à atteindre la phase de sur-apprentissage, ce phénomène a été rencontré au bout de 18 itérations. Il est donc intéressant de poursuivre l'apprentissage jusqu'à atteindre cette phase pour le test dans le but de baisser le gradient davantage et de perfectionner donc le réseau.

Tableau 3. Valeurs des indicateurs de performances en fonction du nombre de neurones de la couche cachée.

NCC	Fe		Mn		Zn	
	MSE	R	MSE	R	MSE	R
1	0,920	0,83	0,123	0,79	0,931	0,92
2	0,985	0,82	0,095	0,92	1,033	0,91
3	1,157	0,77	0,095	0,91	0,832	0,93
4	1,210	0,63	0,099	0,90	0,713	0,95
5	1,190	0,65	0,095	0,91	0,748	0,94
6	1,150	0,78	0,095	0,91	0,931	0,92
7	1,140	0,79	0,095	0,91	0,832	0,93
8	0,912	0,84	0,072	0,93	0,500	0,96
9	1,157	0,77	0,095	0,91	1,033	0,91
10	1,140	0,79	0,099	0,90	0,931	0,92

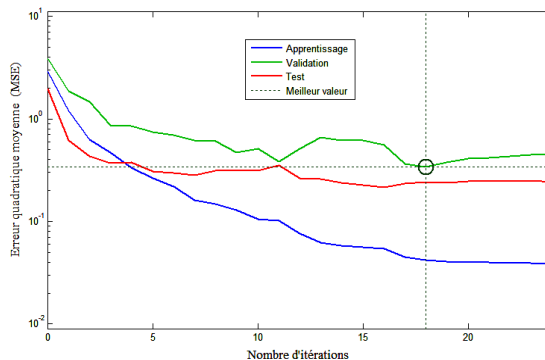


Figure 2. Evolution de l'erreur quadratique moyenne dans le cas du zinc avec 8 neurones dans la couche cachée.

Les résultats obtenus pour le cas du zinc par exemple, permettent de tirer les différentes valeurs relatives aux paramètres d'apprentissage :

- Nombre maximum d'itérations = 18
- Erreur quadratique moyenne (MSE) = 0,5
- Taux d'apprentissage (η) = 0,001
- Gradient minimum = 0,00024

Dans le but de comparer la performance des modèles développés de type neuronal, avec d'autres modèles relatifs aux méthodes classiques [8;9], nous avons développé pour chaque métal le modèle de type régression linéaire multiple (RLM). Les résultats comparés sur le tableau 4, montrent que les modèles établis par les RNA sont clairement plus performants par rapport à ceux établis par la méthode de la RLM. Les valeurs des coefficients relatifs aux modèles de type RLM sont comprises entre 0,31 et 0,73. Elles signifient que les corrélations des modèles de type RLM sont faiblement positives. La limite de ces modèles classique est due au fait qu'ils agrègent toute l'information dans le comportement marginal de chaque variable. À ceci s'ajoute la limite de sa modélisation qui ne donne qu'une idée incomplète sur la nature de la relation entre les paramètres étudiés. Par ailleurs, les résultats obtenus relatifs aux modèles neuronaux, confirment ceux des études

obtenues par d'autres auteurs, qui ont démontré que les modèles des réseaux de neurones artificiels produisent de très bons résultats comparativement à ceux de la méthode de la régression linéaire multiple, car ils sont capables de donner un ajustement aux données avec des résultats largement meilleures que ceux relatifs à la régression linéaire multiple. En effet, cette puissance prédictive démontrée par les modèles neuronaux, est en parfait accord avec les résultats trouvés en 2008 par Rude [10] relatifs à la description fine de la pollution par le dioxyde d'azote, et ceux trouvés en 1998 par Abdallaoui [11] relatifs aux teneurs en métaux lourds dans les sédiments d'une retenue de barrage marocaine.

Tableau 4. Coefficients de corrélations obtenues par RLM et RNA relatifs au Fe, Mn et Zn.

	Phases	RLM	RNA
Fe	Apprentissage	0,36	0,85
	Test	0,31	0,79
Mn	Apprentissage	0,71	0,92
	Test	0,73	0,94
Zn	Apprentissage	0,60	0,99
	Test	0,64	0,90

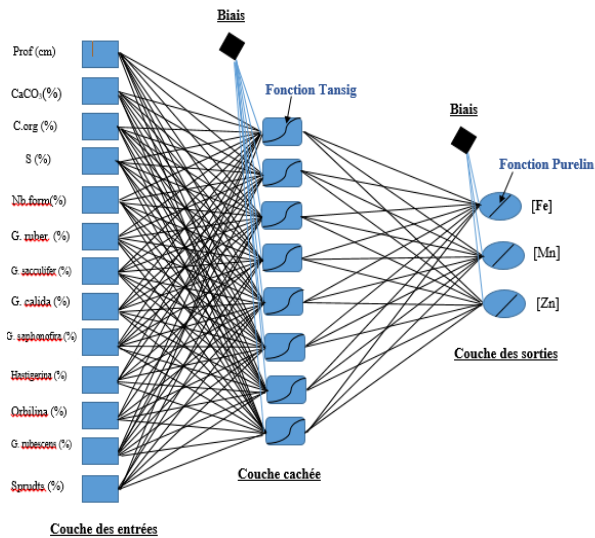


Figure 3. Architecture du réseau de neurones développé dans cette étude de configuration [13-8-3]

Après avoir consulté la bibliographie et effectué plusieurs essais sur la base de données, pour lesquels nous avons obtenu les valeurs optimales des indicateurs de performance (R et MSE), l'architecture du modèle de réseau de neurones le plus pertinent pour la prédiction des teneurs en métaux lourds est de type réseau multicouche non récurrent avec trois couches de configuration [13-8-3], des fonctions d'activations (Tansig-Purelin), avec un taux d'apprentissage ($\eta = 0,001$) et un algorithme d'apprentissage de type Levenberg-Marquardt (LM).

La configuration de notre réseau développé renferme donc :

- 13 neurones dans la couche d'entrée correspondent aux paramètres d'entrée;
- 8 neurones dans la couche cachée ;
- 3 neurones dans la couche de sortie correspondent aux teneurs des métaux lourds (Figure 3).

Conclusion :

Le présent travail a pu réaliser un modèle de prédiction des teneurs en fer, manganèse et zinc, à partir de données environnementales dans les dépôts de six fosses de la Mer Rouge, en utilisant la régression linéaire multiple et les réseaux de neurones artificiels.

On a pu conclure que le meilleur modèle RNA obtenu est un réseau de neurones de type PMC à couches non-récurrentes, avec un algorithme de Levenberg Marquardt comme algorithme d'apprentissage, et la fonction Tansig et la fonction Purelin comme des fonctions de transfert, respectivement dans la couche cachée et dans la couche de sortie. C'est un apprentissage non supervisé, pour lequel l'erreur quadratique moyenne et le coefficient de corrélation (R) ont montré une grande performance pour les phases d'apprentissage, de validation et test. Grâce à des essais préliminaires, on a opté pour le meilleur choix de l'architecture du réseau réalisé. En effet, il s'est révélé que la structure du réseau de neurones d'architecture [13-8-3] est la plus performante comparativement à toutes les autres architectures neuronales étudiées.

Ce modèle performant peut donc être considéré comme un outil important, d'une grande efficacité dans le cadre de la prédiction des teneurs en métaux dans la phase solide et notamment dans la prédiction des taux des métaux lourds dans les sédiments de la Mer Rouge.

Références

- [1] S. Staub, E. Karaman, S. Kaya, H. Karapinar, E. Güven, Artificial Neural Network and Agility, Istanbul University, Istanbul, Turkey, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195 (2015) 1477 – 1485.
- [2] A. El Hmadi, S. Zahid, A. Abdallaoui, B. El Mounni, Application des réseaux de neurones artificiels pour la prédiction des teneurs en carbone organique dans les depots du Quaternaire terminal de la Mer d'Alboran. 6ème Rencontre des Quaternarites Marocains 'RQM6', Faculté des Sciences et Techniques, Tanger, Maroc, Recueil des résumés, (2011) 43.
- [3] S. Abdelli, K. Noura, A. Trabelsi, Prédiction du NO₂ en utilisant la méthode du réseau de neurones. *Business and Economic Statistics Modeling Laboratory, Institut Supérieur de Gestion de Tunis*, (2012) 129-140.
- [4] H. El Badaoui, A. Abdallaoui, I. Manssouri, L. Lancelot, Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction. *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, 3, 6, (2013) 75-81.
- [5] I. Manssouri, A. El Hmadi, T-E. Manssouri, B. El Mounni, Prediction levels of heavy metals (Zn, Cu and Mn) in current Holocene deposits of the eastern part of the Mediterranean Moroccan margin (Alboran Sea). *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, 16, 1, (2014) 117-123.
- [6] A. S. Coulibaly, Cycles climatiques et hydrothermalisme en Mer Rouge. Thèse de doctorat en Sciences du vivant, Université bordeaux I, 2003, 276p.
- [7] C. M. Bishop, *Neural networks for pattern recognition*. Oxford, University Press. 1995, 498p.
- [8] T. Foucart, Colinéarité et régression linéaire, *Math. & Sci. Hum, Mathematics and Social Sciences*, 2006, 173p.
- [9] N. N. Adada, R. A. Styron, The role of technology in professional development. *Journal of Education, Informatics, and Cybernetics*, 1, 3, (2008) 1-8.
- [10] J. Rude, Développement d'un modèle statistique neuronal pour la description fine de la pollution par le dioxyde d'azote : application à la région parisienne. Thèse de Doctorat, Université Paris XII, 2008, 140p.
- [11] A. Abdallaoui, Contribution à l'étude du phosphore et des métaux lourds contenus dans les sédiments et de leur influence sur les phénomènes d'eutrophisation et de la pollution. Cas du bassin versant de l'oued Beht et de la retenue de barrage El Kansera. Doctorat d'État, Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, Meknès., 1998, 213 p.

Colloque International



Ressources en Eau & Changement Climatique:

Impacts anthropiques et climatiques sur la variabilité des ressources en eau

Eau-Société-Climat 2017 (ESC-2017)

Sommaire

Modélisation Numérique en Hydraulique, Hydrologie et Hydrogéologie

Jean-Francois Vernoux (BRGM - France), *F. Horriche, R. Ghoudi*

Outils de gestion des aquifères de la Jeffara de Gabès

Otmane Abd-el-Kader (Agence spatiale Algérienne - Algérie), *Baba-Hamed Kamila, Bouanana Abderrazak, Kebir Lahcen Wahib*

Apport de la télédétection et le système d'information géographique à la modélisation hydrologique pluie-débit dans le bassin de la Mekerra (MACTA- NW ALGERIEN).

Boyossoro Hélène Kouadio (Université de Cocody, Abidjan - Côte d'Ivoire) *Vami Hermann N'guessan Bi, Kouakou Bernard Djè, Gabriel Etienne Aké, Assa Yapi, Sika Brice, Jean Biémi*

Analyse spatio-temporelle des extrêmes climatiques dans la région semi-montagneuse de Man-Danané par utilisation du programme RClimDEX

Brou Loukou Alexis (Université Jean Lorougnon Guédé - Côte d'Ivoire), *Kouassi Kouakou Lazare, Konan Kouakou Séraphin, Kouadio Zilé Alex, Dongo Téhua Fiedi, Konan Koffi Félix, Kamagate Bamory*

Modélisation Pluie-Débit à l'aide des Réseaux de Neurones Artificiels Multicouches sur le Bassin Versant du Fleuve Cavally à la station d'Ity (Zouan-Hounien, Côte d'Ivoire)

Kouassi Kouakou Lazare (Université Jean Lorougnon Guédé, - Côte d'Ivoires), *Brou Loukou Alexis, Konan Kouakou Séraphin, Kouadio Zilé Alex, Dongo Kobena Tehua Fiedi, Konan Koffi Félix, Kamagate Bamory, Koné Diakaria*

Modélisation de la propagation des crues du fleuve Cavally dans le périmètre d'exploitation de la Société des Mines d'Ity (Zouan-Hounien, Côte d'Ivoire)

Dahmani Meriem Nadia (Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen – Algérie), *Baba-Hamed Kamila, Safa Aissa*

Modélisation hydrologique d'Oued Saida (NW algérien)

Mohamed Rata (Université Djillali Bounaama. Khemis Miliana - Algérie), *Abdelkader Douaoui*

Analyse spatiale de la pluviométrie annuelle en utilisant des techniques de krigeage ordinaires et un krigeage lognormal dans le bassin hydrographique de Cheliff. Algérie

Najat Serhir (Ecole Hassania des Travaux Publics, Casablanca - Maroc), *Abdelhamid Fadil, El Hassan El Brirchi, Bachir Alami*

Couplage SIG-modèles hydrologiques pour la prévision hydrométéorologique Application au bassin versant de Bouregreg –Maroc

Tchékpo Théodore Adjaka (Centre Interfacultaire de Formation et de Recherche en Environnement pour le Développement Durable (CIFRED)- Bénin), *Idelbert Dagbégnon Behanzin, Abraham Ayédon Ayena, Toupta Boguena*

Facteurs de la recrudescence des crues et des inondations en Afrique : Cas du bassin du fleuve Niger au Bénin

Sofiane Kourat (Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique Blida- Algérie), *Bénina Touaïbia, Abdelhalim Yahiaoui*

Vulnérabilité aux Inondations. Cartographie pour une aide à la décision. Cas de la Mitidja ouest – Algérie

Abdelaziz Abdallaoui (Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, Meknès - Maroc), *Kaoutar*

Elazhari, Hicham El Babaoui, Hamid Zineddine

Perceptrons multicouches avec algorithme d'apprentissage de Levenberg-Marquardt pour la prédiction des teneurs en métaux lourds des sédiments marins

