

JOURNAL INTERNATIONAL

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

ISSN (electronic): 1737-9350

ISSN (printed): 1737-6688

Volume 1 - Numéro 3 - Décembre 2014

Eau-Climat'2014



**Ressources en Eau et Changement
Climatique en Région Méditerranéenne**

Changements Climatiques en Région Méditerranéenne

Rédacteur en Chef : Pr Noureddine 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>INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Noureddine Gaaloul</i>	<i>INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Zouhaier Nasr</i>	<i>INRGREF (Tunisie)</i>
<i>Zohra Lilli Chabaane</i>	<i>INAT (Tunisie)</i>
<i>Mohamed Mechergui</i>	<i>INAT (Tunisie)</i>
<i>Jamila Tarhouni</i>	<i>INAT (Tunisie)</i>
<i>Abderazek Souissi</i>	<i>INAT (Tunisie)</i>
<i>Mohamed Habib Sellami</i>	<i>ESIER (Tunisie)</i>
<i>Raouf Mahjoub</i>	<i>ESIER (Tunisie)</i>
<i>Kamel Zouari</i>	<i>ENIS (Tunisie)</i>
<i>Habib Abida</i>	<i>FSSfax (Tunisie)</i>
<i>Raoudha Gafrej</i>	<i>ISSBAT (Tunisie)</i>
<i>Yadh Zaher</i>	<i>ISTEUB (Tunisie)</i>
<i>Salwa Saidi</i>	<i>FSTunis (Tunisie)</i>
<i>Lotfi Frigui</i>	<i>DGRE (Tunisie)</i>
<i>Mohamed Meddi</i>	<i>ENSH, (Algérie)</i>
<i>Ahmed Kettab</i>	<i>ENP, (Algérie)</i>
<i>Azeddine Mebarki</i>	<i>Univ. Constantine (Algérie)</i>
<i>Nabil Chabour</i>	<i>Univ. Constantine.(Algérie)</i>
<i>Larbi Djabri</i>	<i>Univ. Annaba (Algérie)</i>
<i>Redha Mennani</i>	<i>Univ. Betna (Algérie)</i>
<i>Nadia Machouri</i>	<i>Univ. Mohammed V (Maroc)</i>
<i>Abdelmajid Moumen</i>	<i>Univ. Mohamed I (Maroc)</i>
<i>Mhamed Amyay</i>	<i>Univ. Fès (Maroc)</i>
<i>Saeid Eslamian</i>	<i>Univ. Isfahan (Iran)</i>
<i>Diop Ngom Fatou</i>	<i>UCAD FST (Sénégal)</i>
<i>Sousou Sambou</i>	<i>Univ. Cheikh Diop (Sénégal)</i>
<i>Gil Mahé</i>	<i>IRD (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>Nadia Amraoui</i>	<i>BRGM (France)</i>
<i>Zineddine Nouaceur</i>	<i>Univ. Rouen (France)</i>
<i>Christophe Cudennec</i>	<i>Agrocampus Ouest (France)</i>
<i>Pierre Hubert</i>	<i>IAHS (France)</i>
<i>Jean Pierre Laborde</i>	<i>Professeur Émérite (France)</i>
<i>Abdelwahab Belloum</i>	<i>FAO (Tunisie)</i>
<i>Mohamed Ennabli</i>	<i>Expert (Tunisie)</i>

Préface



L'eau, élément essentiel à la vie et au développement humain, est une ressource critique dans la région méditerranéenne. Dès le début des années 70, au moment de l'émergence des questions d'environnement comme élément important de l'agenda international, la Méditerranée apparaissait naturellement comme une zone particulièrement fragile à la fois en raison de la forte pollution de la Méditerranée et des contraintes d'approvisionnement en eau douce. Aujourd'hui la région méditerranéenne ne dispose que de 3% des ressources en eau

mondiales, alors qu'elle représente 7% de la population mondiale, et on y trouve 60% de la population mondiale dite pauvre en eau.

Au début du XXI^e siècle, les pressions exercées sur les ressources en eau sont de plus en plus fortes, en particulier dû à une demande croissante ainsi qu'en ce qui concerne la qualité de l'eau. L'extension des terres agricoles irriguées et l'utilisation de techniques d'irrigation non économes, la diversification des produits agricoles, l'urbanisation, le développement industriel et le tourisme sont parmi les nombreux facteurs qui contribuent à augmenter la pression sur les ressources en eau, et sont aggravés par les effets incertains du changement climatique. L'allocation des ressources en eau est donc devenue une priorité pour de nombreux pays de la Méditerranée et en particulier les pays de Maghreb, et elle a besoin des informations fournies par la recherche scientifique pour guider une gestion durable et équitable.

Les ressources en eau dans la région de Maghreb sont rares, inégalement réparties et se caractérisent par une grande variabilité temporelle et des sécheresses récurrentes au cours des dernières décennies. Pendant des décennies les ressources en eaux souterraines ont permis aux collectivités de s'adapter à des pénuries saisonnières ou pérennes de l'eau de surface en fournissant de l'eau pour les ménages, l'élevage et l'irrigation. La surexploitation excessive de ces ressources et leur vulnérabilité à la pollution sont, cependant, une préoccupation grandissante et elles incitent à reconsidérer les politiques de gestion des ressources hydrauliques. Cette gestion doit être basée sur une approche intégrée de l'approvisionnement en eau et la demande, dépendant donc d'un bon contrôle des entrées et sorties au niveau des bassins versants. Le concept de gestion intégrée des ressources en eau nécessite l'utilisation conjointe des eaux de surface et souterraines pour satisfaire la demande pour le développement socio-économique dans de nombreux pays, mais aussi l'utilisation des ressources en eau non conventionnelles telles que la revalorisation (recyclage) des eaux usées, le dessalement d'eau de mer et d'eau salée et la recharge artificielle des aquifères.

Dans un contexte de pénurie croissante pour certains et face aux incertitudes liées au changement climatique, bon nombre de pays méditerranéens doivent revisiter leurs modes de gestion de l'eau et les stratégies de parade contre les risques, afin de réduire la vulnérabilité, les pertes et les dommages sur les court, moyen et long termes. S'adapter aux effets du changement climatique sur les ressources en eau nécessite des ajustements techniques, mais surtout politiques, institutionnels et comportementaux. Enfin, une stratégie adaptative de la gestion de l'eau doit être flexible et réversible pour mieux gérer l'incertitude

Les pays de Maghreb (Tunis, Algérie, Maroc) ont soutenu les efforts en visant à gérer durablement leurs ressources en eau. Cela se traduit par le soutien à l'amélioration des connaissances scientifiques qui permettent une prise de décisions éclairée sur les processus, et à la facilitation des opportunités de coopération et d'échange de connaissances et d'expériences qui permettent de mieux répondre aux questions difficiles auxquelles sont confrontés, en particulier, les zones arides et semi-arides.

Nous espérons que les découvertes scientifiques et des discussions qui s'y rapportent seront utiles pour orienter la gestion intégrée de l'eau dans la région et au-delà. Ainsi, dans la mise en œuvre des politiques d'adaptation de la gestion de l'eau, les défis politiques et institutionnels pourraient en définitive apparaître plus grands que ceux liés aux innovations techniques ou à l'accès aux technologies.

Noureddine Gaaloul
Professeur de l'Enseignement Supérieur Agricole (INRGRF)
Président de l'ASTEE *Tunisie*
Coordinateur Eau-Climat'2014

Sommaire

Changements Climatiques en Région Méditerranéenne	6
Zouhaier Nasr (INRGRAF – Tunisie), King L. <i>Projections des températures moyennes sous différents scénarios de changement climatique et conséquence sur l'évapotranspiration en Tunisie</i>	7
Laila Oualkacha (FST Mohamedia - Maroc), Stour L., Agoumi A. <i>Intégration du Changement Climatique dans la Gouvernance du Secteur de l'Eau : Contexte et Besoins des Pays du Maghreb</i>	12
Kouidri Sofiane (Université Abou bekr Belkaid Tlemcen, Algérie) DAHMANI Abdelmajid, MEGNOUNIF Abdesselam, GHENIM Abderrahmane Nekkache <i>Evolution des paramètres climatiques dans le nord ouest de l'Algérie</i>	16
Sarra Lakehal (Univ. Abou Bakr Belkaid - Algérie) <i>Le climat et la dégradation du sol agricole dans la région de Tlemcen</i>	19
Atchade A. (Université d'Abomey-Calavi, Bénin) <i>Evaluation endogène des phénomènes hydro-climatiques en pays mina dans les communes de Come et de Grand-Popo au Bénin</i>	22
Sabri Kanzari (INRGRAF - Tunisie) <i>Simulation de la dynamique de l'eau et des sels dans une région semi-aride en Tunisie – Etude de l'effet d'un changement climatique</i>	28
Khaoula Melki (ENIT - Tunisie), Bjo Okez N., Mouillot F., Bargaoui Z. <i>Estimation du bilan en eau et carbone en Tunisie septentrionale en adoptant le modèle de cycle biogéochimique CASA.</i>	31
Salim Djerbouai (LEGHYD - Algérie), Doudja SOUAG-GAMANE. <i>Drought forecasting using artificial neural network and stochastic models, application in the algerois catchment.</i>	36
Houcine Jeder (IRA - Tunisie), Ben Khalifa A., Sghaier M. <i>Impact des changements climatiques sur l'agriculture : Application de l'approche Ricardienne, Cas de la plaine de Jeffara.</i>	41
Nadia Amraoui (BRGM - France): Olivier Douez, Philippe Stollsteiner <i>Modélisation des impacts potentiels du changement climatique sur la ressource en eau de deux systèmes aquifères régionaux Français.</i>	45
Mohamed Rata (Université Djillali Bounaama de Khemis-Miliana, Algérie) <i>Contribution à l'étude de la variabilité temporelle du régime pluviométrique dans le cadre du changement climatique « cas la plaine du Bas Chelif »</i>	49



Changement Climatique en Région Méditerranéenne

Projections des températures moyennes sous différents scénarios de changement climatique et conséquence sur l'évapotranspiration en Tunisie

ZOUHAIR NASR¹ et LORENZ KING²

¹ Institut National de la Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts, BP 10, 2049 Ariana, Tunisie nasr.zouhair@iresa.agrinet.tn

² Justus-Liebig-Universität, D-35390 Giessen, Allemagne Lorenz.King@geogr.uni-giessen.de

Résumé

D'après les résultats du modèle de circulation globale HadCM3, la Tunisie peut subir une augmentation générale des températures de l'ordre de (+1.0 °C) par rapport à la période référence (1961-1990). Où l'on peut distinguer d'après le scénario A2 trois zones d'influences. Concernant les variations saisonnières, le modèle indique que l'automne subira les plus fortes augmentations allant de +0.9°C à +1.4°C du nord au sud.

Les conséquences sur l'évapotranspiration potentielle indiquent des augmentations assez conséquentes de celle-ci allant de +75 mm à +180 mm/an. On peut noter également que ces augmentations se feront avec une forte disparité régionale du nord au sud.

Mots-clés : réchauffement, évapotranspiration potentielle, déficit hydrique

Abstract

Projected mean temperatures under climate change scenarios and effects on evapotranspiration in Tunisia.

Based on the results of global circulation model HadCM3, Tunisia may undergo a general increase in temperature of the order of (+1.0 °C) compared to the reference period (1961-1990). Which can be distinguished from the A2 scenario three zones of influence.

On seasonal variations, the model indicates that the fall will suffer the highest increases ranging from +0.9 °C to +1.4°C from north to south. The impact on potential evapotranspiration indicates fairly substantial increases in the latter ranging from 75 mm to 180 mm / year.

One can also note that these increases will be with a strong regional disparity from north to south.

Keywords: warming, evapotranspiration, water deficit

Introduction

Située sur la rive sud de la méditerranée et au nord de l'Afrique, la Tunisie est un pays dominé par un climat semi-aride caractérisé par une forte variabilité. L'analyse des cycles et des tendances des températures pour différentes régions de la Tunisie (ACT, 1999 ; Boussnina 1992) ne montre pas de tendance significative ni vers la hausse ni vers la baisse sur l'ensemble du siècle passé. Il ressort cependant deux points importants, (i) un début de réchauffement depuis l'année 1975 pour la plupart des stations, (ii) une tendance assez nette à la hausse si on considère la période 1950-2004. Cette phase de réchauffement sur la période mentionnée est caractérisée par une forte pente variant de $+0.65\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ à $0.95\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ d'après les données des stations de Jendouba, Tunis, Kairouan, Gafsa et Gabes représentant les grandes régions du pays (King et Nasr, 2005).

Concernant les projections futures, la plupart des modèles testés pour la Tunisie (Timolty, 2003) prévoient une augmentation quasi-certaine des températures au cours des prochaines décennies. L'une des conséquences les plus redoutables de ce réchauffement étant l'augmentation de l'évaporation de l'eau à partir des surfaces naturelles (lacs, barrages rivières, sols et végétation,...). A travers cette analyse, nous voudrions quantifier l'effet de ce réchauffement sur l'évapotranspiration potentielle pour les différentes régions de la Tunisie ainsi qu'analyser les conséquences possibles sur l'agriculture.

2. Méthodologie

Les résultats ci-dessous présentés sont issus de la simulation par le modèle couplé de circulation générale de Hadley Centre (UK), largement décrit par Gordon et al. (2000). Le HadCM₃ est l'un des modèles les plus utilisés par le GIEC lors du troisième et du quatrième rapport. Ce modèle utilise un maillage de $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$, soit sous nos altitudes, une superficie élémentaire de $55\text{ km} \times 55\text{ km}$. Ainsi, pour la Tunisie plus que 56 grilles ont été utilisées. Les scénarios de projection choisis sont les scénarios moyens A2 et B2 (IPCC, 2001). Pour montrer la disparité régionale, le pays a été subdivisé en 6 zones géographiques, à savoir le nord ouest (NO), le nord est (NE), le centre ouest (CO), le centre est (CE), le sud ouest (SO) et le sud est (SE). Nous nous intéressons dans cette partie à l'analyse des températures moyennes annuelles de l'horizon proche 2030 (2011-2040). Les variations sont données par rapport à la période climatique de référence 1961-1990. L'évapotranspiration potentielle est calculée par la formule de Turc (Turc, 1961), formule basée essentiellement sur la variation de la température. On admet que la température est l'élément ayant le plus de poids sur la variabilité de celle-ci (FAO, 1956).

3. Projection de la température moyenne selon HadCM₃

3.1. Projections des températures moyennes annuelles et saisonnières à l'horizon 2030

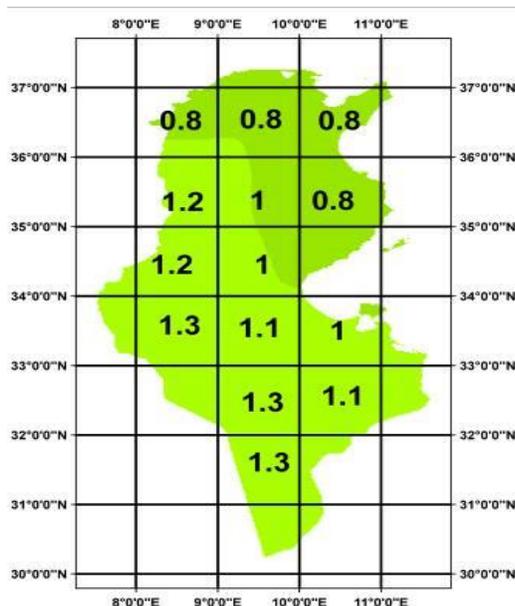


Figure 1: Augmentation des températures moyennes annuelles aux horizons 2030 pour le scénario A2 par rapport à la période (1961-1990) d'après les résultats de simulation du modèle HadCM₃.

D'après les résultats du modèle, à l'horizon 2030, on obtient une élévation générale de température de +1.0 °C par rapport à la période référence (figure 1). Où l'on peut distinguer d'après le scénario A2 trois zones d'augmentation. Une première zone constituée du Nord, Cap-bon et Centre-ouest où cette élévation est la plus faible (+0.8°C). Une zone avec des augmentations plus importantes (+1.3°C selon A2) correspond au Sud-ouest et l'extrême sud. Enfin, une zone intermédiaire de la limite du Nord-ouest au Sud-est (+1.0°C d'après A2). Les résultats du scénario B2 indiquent les mêmes tendances avec des élévations légèrement plus importantes qui varient de 0.9°C à 1.5°C.

Concernant les variations saisonnières, le modèle indique qu'à l'horizon 2030 c'est l'automne qui subira les plus fortes augmentations allant de +0.9°C à +1.4°C. Le printemps peut subir des augmentations plus faibles (+0.6°C à +0.9°C du nord au sud). L'hiver et le été seront intermédiaires avec des augmentations respectives de (+0.7°C à +1.0°C) et de (+0.9°C à +1.1°C).

3.2. Conséquences sur l'évapotranspiration

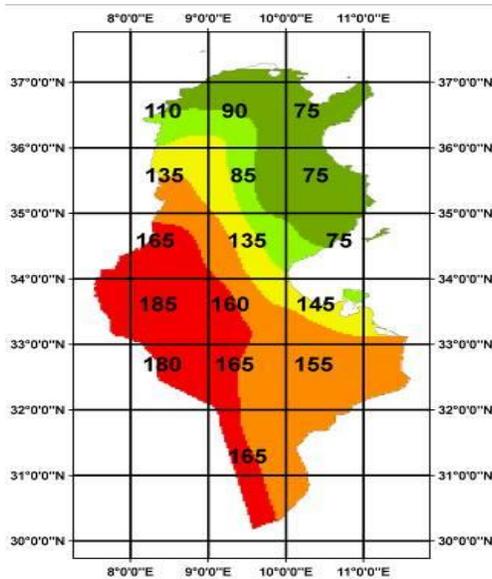


Figure 2 : Augmentation de l'évapotranspiration estimée par la formule de Turc (mm/an) à l'horizon 2030 selon le scénario A2 par rapport à la période référence 1961-1990.

Les résultats du modèle HadCM3 indiquent des augmentations assez conséquentes des valeurs de l'évapotranspiration sur l'ensemble du pays (figure 2). On peut noter également que ces augmentations se feront avec une forte disparité régionale du nord au sud. Les zones d'influence sont presque celle des champs des températures. On distingue une zone à augmentation modérée de ETp de l'ordre de +75 mm/an à +100 mm/an. Cette zone est formée par le Nord, le Cap-bon et le Sahel. Le Sud-ouest subira les augmentations les plus fortes allant de +160 mm/an à +190 mm/an. Trois autres zones intermédiaires sont illustrées dans la direction NO-SE avec des valeurs de ETp allant de +100 mm/an à +150 mm/an.

4. Discussions

4.1. Validité des élévations des températures projetées par le modèle HadCM3

Les incertitudes constituent une donnée des projections futures du climat. Les sources de cette incertitude sont multiples (Hulme et Timolty, 1999). Celles inhérentes à la projection de la dynamique des populations des sociétés et de l'évolution économique, des incertitudes liées à la représentation du climat observé, des incertitudes d'ordre physiques sur la projection du climat (échelle spatiale), prédictibilité et surprise (phénomènes extrêmes).

Afin de tester la validité des résultats du modèle HadCM3 sur la période de simulation 2001 à 2005 dont on dispose des données mesurées, nous comparons (figure 3) les valeurs des températures observées et estimées par le modèle HadCM3 (King et al, 2007). Cette corrélation est globalement satisfaisante. Le coefficient de détermination ($R^2=0.71$) pourrait s'expliquer par le fait que d'une part, la période de validation est très courte, et d'autre part les comparaisons sont faites uniquement sur une donnée de la station la plus proche alors que théoriquement le modèle indique la température d'une maille de 55x55 km.

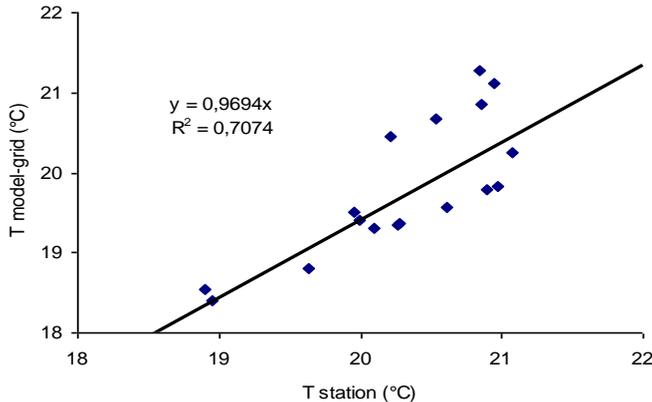


Figure 3 : Corrélation linéaire entre valeurs des températures mesurées sur les stations les plus proches de Jendouba, Kairouan, Tunis-Carthage, Gabes et Gafsa et valeurs estimées par le modèle sur les grid-data pour les températures moyennes annuelles (2001 à 2005).

4.2. Comparaison avec d'autres résultats

Les élévations des températures projetées dans cette étude sont tout à fait comparables et mêmes assez proches de l'ensemble des projections du climat future en pays Méditerranéens. L'étude du WWF (Gianokopoulos et al., 2005) partant de l'hypothèse d'une élévation globale de température de 2°C donne des résultats pour la Tunisie assez proches des ceux présentés. Celles-ci prévoient des augmentations pour la température annuelle de +1.5°C à 2.8°C du nord au sud. Les augmentations saisonnières peuvent varier de +1.7°C à 2.8°C pour l'automne, de 1.8°C à 3.5°C pour l'été, de 1.2°C à 2.2°C pour le printemps et de 1.3°C à 2.3°C en hiver, ceci pour la période 2031-2060 par rapport à la période référence 1961-1990.

L'étude Algérienne (AGL/98/G31, 2001) en utilisant d'autres modèles UHKI de l'Institut Allemand max Mayer et ECHAMAR3 projette pour la Tunisie des élévations des températures saisonnières pour la période climatique 1990-2020 également très proches des résultats de notre modèle. Le modèle ECHAMAR3 indique pour la Tunisie des augmentations de températures allant de +0.8°C à 1.0°C en automne, +0.8°C à +0.95°C en hiver, au printemps de +0.85°C à 0.95 °C et pour l'été +0.9°C à +1.6°C.

Pare ailleurs, dans un contexte Méditerranéen, on peut citer l'étude faite sur la Péninsule Ibérique (CRU et WWF, 1999). En combinant plusieurs modèles et scénarios, l'étude indique des élévations de température même légèrement supérieures à nos résultats. Ces augmentations annuelles sont de +1.8°C à 2.1°C pour A2, de 1.2°C à 1.4°C pour B2 à l'horizon 2030.

4.3. Etudes tendances de la température sur la période récente 1950-2004

Cette analyse a été faite à partir des données des stations principales de Tunis, Kairouan, Gafsa, Jedouba et Gabès. L'ensemble de ces stations présentent une tendance à la hausse statistiquement significative durant la période 1950-2004 selon le test de Mann-Kandell (King et Nasr, 2005). Les pentes des droites varient de +0.65°C/10 ans à 0.95°C/10 ans. Il est certes difficile d'extrapoler des telles corrélations mais si cette tendance est maintenue, les températures moyennes augmenteront de +1°C en moyenne dans 30 ans.

Les conclusions relatives à la tendance de la température sont à prendre avec réserve. En effet la longueur des séries de 40 à 54 ans ainsi que le choix de la période, sont des facteurs déterminants de la signification statistique d'une tendance. Les émissions des gaz à effet de serre dans l'atmosphère pourraient être une des principales causes de cette tendance. La variabilité naturelle interannuelle de notre climat illustrée par des études des longues séries chronologiques serait également une cause plausible de cette tendance (Lebane et al, 1996).

5. Conséquences possibles sur les systèmes des cultures

Les conséquences de cette élévation de la température sur les systèmes des cultures seront directes. Comme, la plupart des cultures pratiquées dans notre pays et pour une raison d'utilisation de l'eau, sont des cultures à métabolisme C3 (blé, orge, ...). Ces espèces peuvent subir une chute de leur activité de photosynthèse. En effet les espèces à métabolisme C4 ont une meilleure adaptation à un optimum de température plus élevé. A moins que la fertilisation carbonée, avec

l'hypothèse de dédoublement du CO₂ de l'air pourrait être bénéfique à la photosynthèse et récompenser cet effet négatif dû à l'élévation des températures (Tans et al., 1990).

Sur le plan physiologique, une température nocturne plus élevée peut accroître la respiration obscure des plantes, ce qui diminuerait la production nette de biomasse. Des hautes températures en saison froide conduiraient à un mûrissement précoce des récoltes annuelles, ce qui diminuerait le rendement par culture mais qui permettrait localement la croissance de plusieurs cultures par an due au fait à un allongement de la saison de croissance.

D'autres conséquences néfastes sont attendues, on peut s'attendre à des raccourcissements des cycles notamment pour les cultures annuelles. Dans ce cas un raccourcissement du cycle de blé de 10 à 30 jours est simulé (Mansour et al., 2007). Pour les cultures pérennes, des perturbations sur la durée de vernalisation et besoins en froid seront les plus redoutables pour des espèces telle que le pommier ou le poirier. Ainsi que des accidents suite à des vagues extrêmes de chaud et de froid sur la floraison, nouaison et autres stades sensibles.

Les conséquences d'une augmentation de l'évapotranspiration sont directes sur le cycle de l'eau avec plus des pertes par évaporation au niveau des barrages, lacs, rivières, zones humides et sols. Mais surtout des consommations d'eau plus importantes des cultures irriguées notamment en régions arides et semi-arides et probablement une productivité de l'eau plus faible comparée à la période de référence.

Bibliographie

- [1] ACT ATLAS CLIMATIQUE DE LA TUNISIE (1999) – Edit. Institut National météorologique de Tunisie.
- [2] BOUSSINA, A, 1992 - Variation et variabilité de Températures en Tunisie. Thèse de doctorat en Climatologie. Université de Tunis I.
- [3] LEBANE, Y. HSOUIMI, N., KERKENI, H. & FRAY, B.(1996) - Evolution de la Température en Tunisie, p125-135 - La Variabilité du Climat et l'Homme en Tunisie, Colloque VI Fac. des Sc. Hum. et Soc. de Tunis. Edit. L. Henia
- [4] KING L. & NASR Z (2005) - Elaboration d'une stratégie nationale d'adaptation de
- [5] L'agriculture Tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques, GTZ-MARH, 2005, rapport climat, phase diagnostic, 2005; 28 p.
- [6] TIMOLTY D. MITCHELL (2003) - Tunisia 21st Century Climate Changes. Feb.10.2003. www.tyndall.ac.uk
- [7] HULME M, DOHERTY R, NGARA T, NEW M, LISTER D (2001) - African Climate Change 1900–2100. Climate Research, 2001;17: 145-168.
- [8] FAO (1956) - FAOCLIM I.2, World-wide agroclimatic data. FAO Agrometeorology Working Paper Series No. 11. FAO, Rome. 1 CD-Rom and 66 pp.
- [9] GORDON, C, COOPER C, SENIORETAL C.A (2000) - The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of Hadley Centre coupled mode without flux
- [10] adjustments. Climate Dynamics, 2000; 16: 147-168.
- [11] IPCC (2001) - Climate Change: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the third assessment report of the IPCC. Cambridge (Royaume-Uni : Cambridge University Press), 2001; 881p.
- [12] TURC L (1961) - Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mis à jour. Ann. Agron., n12, p13-19.
- [13] KING L, NASR Z, H. ELMOHAMMED AND C. MAAG (2007) - Elaboration d'une stratégie nationale d'adaptation de l'agriculture Tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques, GTZ-MARH-GOPA-EXA. Projection Climat future pour la Tunisie cahier 7.2.
- [14] HULME M AND TIMOLTHY R.C (1999) - Representing Uncertainty in Climate Change scenarios and impact studies. Report 1- Proceeding of the ECLAT-2, Helsinki Workshop, 14-16 April 1999, p13-39.
- [15] RICHARD W.KATZ (1999) - Techniques for estimating Uncertainty in Climate Change scenarios and Impact studies. Report 2- Proceeding of the ECLAT-2, Helsinki Workshop, 14-16 April 1999, p40-55.
- [16] GIANNAKOPOULOS C, BINDI M, MORIONDO M, LESAGER P, TIN T (2005) - Climate change impacts in the Mediterranean resulting from 2°C global temperature rise, a report for WWF, 2005; 66 p.
- [17] PROJET NATIONAL ALGERIE -AGL/98/G31(2001) - Elaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques. Communication Nationale Initiale, Mars 2001.
- [18] CRU et WWF (1999) - Escenarios de Cambio Climatico para la Peninsula Iberica (Rapport sur les scénarios de Changements Climatiques de la Péninsule Ibérique), Octobre 1999. <http://www.panda.org/climate>
- [19] TANS, PP, H.M. FUNG AND T. TAKAHACHI (1990) - Carbon dioxide effects on plants: uncertainties and implications for modelling crop response to climate change in Agricultural Dimensions of Global Change. H.M. Kaiser and T.E. Drennen (eds.). pp. 153-178.
- [20] MANSOUR M, MOUGOU R ET MARC JIHENE (2007) - Les scénarios climatiques un outil d'aide à la décision. Communication orale, Journées scientifiques de INRGREF, 21-22 nov 2007.

Intégration du Changement Climatique dans la Gouvernance du Secteur de l'Eau : Contexte et Besoins des Pays du Maghreb

Laila OUALKACHA¹, Laila STOUR¹, Ali AGOUMI²

¹ Laboratoire Génie de Procédés et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques de Mohammedia, Université Hassan II de Casablanca, B.P. 146, Mohammedia, Maroc.

E-mail : lailaoualkacha@gmail.com; stourl@gmail.com

² Laboratoire du Génie Civil, Hydraulique, Environnement et Climat, Ecole Hassania des Travaux Publics, Km 7. Route d'El Jadida, Casablanca, Maroc. agoumi.ali@gmail.com

Résumé

La croissance économique et le développement de la majorité des pays du Maghreb sont très liés aux ressources en eau qui contribuent fortement à l'équilibre socio-économique et au produit intérieur brut de ces pays. Cependant, la région du Maghreb est menacée par le Changement Climatique (CC) et semble être l'une des régions les plus vulnérables du monde au niveau hydrique face à ce fléau, conformément aux résultats du cinquième rapport de Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. Au Maghreb, le besoin d'intégrer le CC dans les politiques de développement est déjà reconnu dans les nouvelles constitutions qui ont adopté le concept du développement durable. Les organismes internationaux ont développé des guides et principes pour aider les pays à réussir le processus d'intégration du CC, cependant, la mise en œuvre de ce processus reste un défi majeur et les projets et actions d'adaptation au CC sont généralement pilotés en dehors des processus existants de planification et de développement. C'est le cas en particulier dans le secteur de l'eau. L'objet de cet article est d'analyser le niveau d'intégration du CC dans les politiques de l'eau au Maghreb. L'analyse concerne le Maroc et la Tunisie qui ont déjà initié la mise en place du processus d'adaptation au CC. Elle consiste à dresser une comparaison qualitative de la manière dont le CC est considéré aux niveaux institutionnels, législatifs, financiers et techniques. Le cas de l'Allemagne, pays européen performant dans le domaine de l'intégration du CC dans les processus de développement, est pris comme référence pour tirer des leçons et proposer des voies d'amélioration. Les voies d'amélioration et actions proposées sont de nature diverses et peuvent servir de base pour le développement d'un guide d'intégration du CC dans les politiques de l'eau dans les pays du Maghreb.

Mots clés: Eau, Changement Climatique, Gouvernance, Intégration.

Integration of Climate Change into the Water Governance: Context and Needs of Maghreb Countries

Abstract

Economic growth and development of most Maghreb countries are related to water resources which contribute significantly to the socio-economic balance and Gross Domestic Product. The Maghreb region is threatened by Climate Change (CC) and seems to be one of the most vulnerable regions in the world, with the regard to water resources, according to the fifth report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In the Maghreb region, the need to integrate CC into development policies is already recognized in the new constitutions that have already adopted the sustainable development concept. International organizations have developed guidelines and principles to support countries to integrate CC, however, the implementation of this process remains a major challenge, CC adaptation projects and actions are generally managed outside existing development planning. This is particularly the case of water sector. The objective of this article is to analyze the level of CC integration into water policies in the Maghreb region. The analysis focuses on Morocco and Tunisia case that have already initiated the implementation of the CC adaptation process. It focuses on a qualitative comparison of how CC is integrated at institutional, legislative, financial and technical levels. The case of Germany, European country, with efficient skills on CC integration into development plans, is used as reference for drawing lessons and ways for improvement. The improving proposed actions are diversified and can be used as a basis to develop a guide for the CC integration into the water development plans within the region.

Key Words: Water, Climate Change, Governance, Integration.

Introduction

Les pays du Maghreb se trouvent dans une région aride à semi-aride avec un climat saharien dans la partie sud, océanique dans la partie ouest et méditerranéen dans la partie Nord. Les données climatiques relevées dans la région pendant le 20^{ème} siècle indiquent un réchauffement de l'ordre de 1°C, avec une tendance accentuée de réchauffement pendant les 40 dernières années et une augmentation nette de la fréquence des sécheresses et inondations [1A].

La croissance économique et le développement du Maroc et de la Tunisie sont très liés aux ressources en eau qui contribuent fortement à l'équilibre socio-économique et au produit intérieur brut. Cependant, les projections climatiques faites pour le 21^{ème} siècle, prévoient une accentuation du réchauffement et une réduction des précipitations moyennes. En effet, on prévoit une augmentation de la température moyenne de +1°C à +3°C à l'horizon 2070 pour le Maroc [1C] et [2A] et de +1.8°C à +2.7°C à l'horizon 2050 pour la Tunisie [1L]. En plus, on prévoit également une baisse des précipitations moyennes de -5% à -40% à l'horizon 2070 pour le Maroc [1C] et de -10% à -30% à l'horizon 2050 pour la Tunisie [1L].

Pour s'adapter au nouveau contexte du CC, le Maroc s'est doté en 2009 d'un Plan National de lutte contre le Réchauffement Climatique (PNRC) qui implique tous les secteurs et associe tous les acteurs actifs de la société [2L]. De son côté, le Ministère de l'Environnement Tunisien a lancé en 2010 la Stratégie Nationale sur le CC (SNCC) avec un large processus de concertation impliquant l'ensemble des acteurs concernés [1L].

Malgré les efforts déployés par les deux pays et l'aide des organismes internationaux qui ont développé des guides ([3L], [4L], [5L]) et principes pour aider les pays à réussir le processus d'intégration du CC, la mise en œuvre de ce processus reste un défi majeur et les projets et actions d'adaptation au CC sont généralement pilotés en dehors des processus existants de planification et de développement. C'est le cas en particulier dans le secteur de l'eau.

L'objet de cet article est d'analyser l'intégration du CC dans les politiques de l'eau au Maghreb. L'analyse concerne le Maroc et la Tunisie qui ont déjà initié la mise en place du processus d'adaptation au CC. Elle consiste à dresser une comparaison qualitative de la manière dont le CC est considéré aux niveaux institutionnels, législatifs, financiers et techniques. Le cas de l'Allemagne, pays européen performant dans le domaine de l'intégration du CC dans les processus de développement, est pris comme référence pour tirer des leçons et proposer des voix d'amélioration.

1. Analyse des Politiques de l'Eau

1.1. Aspects Institutionnels

L'analyse des Politiques de l'Eau montre que les risques liés au CC ne sont pris en compte que récemment dans les stratégies ambitieuses adoptées au niveau des deux pays, notamment au niveau de la Stratégie Nationale de l'Eau (SNE) au Maroc [6L] et de la SNCC en Tunisie [1L]. Cependant, l'opérationnalisation de ces Stratégies nécessite le recours à un certain nombre d'instruments de gouvernance, d'outils économiques et financiers, d'instruments de suivi et évaluation et de mesures de communication et de renforcement de capacités. Ces instruments doivent être activés selon un échéancier compatible avec les conditions de faisabilité et de mise en œuvre de ces dernières.

Dans les deux pays, l'analyse des structures de planification et de décision, de consultation et de coordination dans le secteur de l'eau, montrent que des efforts considérables ont été entrepris pour la mise en place de ces structures depuis le début des années 80, ces structures ont acquis une grande expérience dans le domaine de la gestion de l'eau [4A], mais restent insuffisamment tournées vers les aspects et enjeux du CC. Les institutions régionales/locales manquent d'autonomie décisionnelles et financières et le secteur privé a montré récemment, plus d'intérêts aux services environnementaux demandeurs et utilisateurs de technologies comme l'assainissement.

1.2. Aspects Financiers

Les processus de financement ont de véritables lacunes liées à l'insuffisance d'instruments nationaux d'incitations économiques directes (aides financières directes) et indirectes (avantages fiscaux) en faveur de l'adaptation au CC dans le secteur de l'eau. En outre, le manque de promotion des plans existants, d'une connaissance et d'une capacité analytique parmi les planificateurs financiers empêchent les deux pays de bénéficier de nombreuses opportunités internationales, à l'exception de financements dans le cadre de projets de Mécanisme du Développement Propre.

1.3. Aspects Techniques

Le Maroc et la Tunisie disposent d'informations et de données climatiques variées, développées et fournies par les services météorologiques nationaux, cependant, les usagers ne sont pas toujours informés de la disponibilité de ces produits. La fiabilité des informations, leurs coûts, leurs interprétations, leurs transmissions dans des délais opportuns, sont les défis majeurs qui se posent à une utilisation optimale de ces informations par les usagers de l'eau. En plus, dans les deux pays, le réseau d'observations hydrographique nécessite une réhabilitation tant au niveau quantitatif

qu'au niveau des techniques utilisées. Les projections climatiques sont généralisées à l'échelle nationale pour les deux pays, cependant, le manque de réseaux au niveau des provinces sud et de projections climatiques fiables à l'échelle locale constitue un frein quant à la prise de décisions qui nécessite souvent de disposer de données actualisées.

2. L'Expérience Allemande dans le Domaine de l'Intégration du CC dans les Processus de Développement: Cas du secteur de l'Eau

Adoptée en décembre 2008 par le Gouvernement Fédéral, la Stratégie Allemande d'Adaptation au CC (SAA) repose sur un processus global qui intègre les politiques de développement sectorielles (notamment pour le secteur de l'eau reconnu vulnérable au CC en Allemagne) et qui vise la réduction de la vulnérabilité des populations [7L].

La SAA a été mise en œuvre via: a) l'identification des synergies entre l'adaptation sectorielle; b) la définition des objectifs, des indicateurs de Suivi-Evaluation et des actions prioritaires; c) la création d'un Comité Interministériel pour assurer la coordination du processus d'intégration; d) la création d'un Centre National (KomPass) pour le développement des capacités et des recherches dans le domaine du CC; e) l'intégration de mécanismes de financements durables de l'adaptation au CC dans les budgets nationaux ; f) l'information, la participation et l'engagement de tous les acteurs publics et privés; g) la création des processus additionnels et opérationnels, par la banque Allemande KfW, pour la coordination des investissements liés au CC dans le secteur de l'eau; h) l'intégration du CC dans l'agenda des gouvernements régionaux des seize Länder Allemands, i) le développement des projections climatiques allant jusqu'à 2100 (via le Modèle Climatique REMO); j) la révision des plans régionaux de gestion de l'eau tous les 6 ans [7L].

La mise en œuvre du processus global d'intégration du CC a été aussi soutenu par l'adoption d'une nouvelle approche pour la réalisation des projets qui a donné ces fruits dans le secteur de l'eau et qui consiste à: i) assurer la flexibilité des objectifs visés par les projets; ii) définir les seuils des risques acceptables par les projets sur le plan économique, social et écologique; iii) mettre en place les investissements dites «sans regret» vis-à-vis de l'impact du CC et/ou les ressources financières pour couvrir les coûts supplémentaires de l'adaptation [7L].

3. Voies d'Amélioration des Politiques de l'Eau

Considérant l'analyse précédente, des voies d'amélioration ont été développées pour faciliter l'intégration du CC dans les politiques de l'Eau des pays du Maghreb, notamment au Maroc et en Tunisie.

3.1. Aspects institutionnels et réglementaires

Le développement des pays du Maghreb doit s'inscrire dans une approche globale de l'Economie Verte. Dans ce sens, Il faut renforcer les impératifs de la compétitivité verte et élaborer une feuille de route pour assurer la croissance économique «verte». L'intégration du CC dans l'Agenda Politique du pays doit tenir compte des synergies entre l'eau et les autres secteurs d'activités tout en favorisant la réduction de la vulnérabilité des populations et la réhabilitation des écosystèmes dégradés qui assurent des services critiques pour la gestion durable et efficace des ressources en eau.

La mise en œuvre du processus d'intégration du CC doit se faire via des structures de coordination placées au haut niveau possible pour assurer une intégration transversale du CC, toute en activant les anciennes structures déjà mises en place et en clarifiant leur rôle et leur fonctionnement. En plus, les gouvernements peuvent récolter les fruits des efforts qu'ils ont déjà consentis au cours des dernières années via : a) l'application des cadres législatif et leur révisions; b) la promotion des opérateurs privés spécialisés dans le domaine des ressources en eau, c) la promotion des programmes de sensibilisation, de communication et de formation des populations vulnérables, d) l'encouragement de la participation de tous les partenaires à la prise de décision concertée.

3.2. Aspects Financiers

La mise en œuvre du processus d'intégration du CC doit bénéficier des opportunités d'appui internationales récemment mis en place dans le cadre des négociations internationales (Fonds Climat) et l'exploration du potentiel du marché du carbone. Dans ce sens, des modèles de gestion équitables et économiquement viables peuvent être mis en place pour dégager des budgets pour l'adaptation au CC dans le secteur de l'eau (paiements pour les services écosystémiques, adoption d'une fiscalité environnementale incitative, révision des redevances de pollution.....). En plus, la mise en œuvre du processus d'intégration du CC doit se faire via: a) l'intégration des coûts de l'adaptation au CC dans les mécanismes financiers nationaux et locaux; b) la réintégration des migrants ruraux tout en garantissant des emplois qui contribuent à la réhabilitation des services écologiques; c) la mise en place des régimes d'assurance ou micro-assurances pour contribuer à la protection des populations rurales vulnérables.

3.3. Aspects Techniques

Les pays du Maghreb peuvent récolter les fruits des efforts qu'ils ont déjà consentis au cours des dernières années et continuer à: i) renforcer la mobilisation des eaux non conventionnelles; ii) protéger les nappes souterraines; iii) favoriser les techniques économes d'eau; vi) renforcer l'approche de la gestion de la demande.

La réduction des risques de catastrophes liés à l'eau doit être intégrée dans les processus de la planification, tout en assurant la protection du domaine public hydraulique et des zones de stockage naturels, en adoptant une approche flexible pour la réalisation des infrastructures hydrauliques et en tenant compte des mesures du contrôle climatique robustes et flexibles «sans regret». En plus, les plans régionaux et territoriaux doivent être actualisés et révisés tous les cinq ou six ans pour tenir compte des niveaux d'incertitude et des seuils des risques acceptables sur le plan économique, social et écologique.

Les pays du Maghreb doivent améliorer les observations climatiques et développer des processus nationaux et locaux pour assurer la disponibilité de l'information climatologique à faible coût et la dissémination des connaissances relatives à l'adaptation au CC à tous les partenaires du développement. En plus; ces pays doivent renforcer les capacités nationales et régionales et favoriser la coordination entre les entités de recherches et de formation. La création d'une plateforme Maghrébine (site Web) est recommandée pour renforcer le partage de l'information, le suivi de la vulnérabilité de l'eau et le partage des leçons et d'expériences.

4. Conclusion

L'analyse de l'intégration du CC dans les politiques nationales de l'eau au Maroc et en Tunisie, montre une prise de conscience politique des enjeux liés au CC. La mise en œuvre des stratégies et plans ambitieux adoptés au niveau des deux pays pour l'adaptation au CC dans le secteur de l'eau, nécessite le recours à un certain nombre d'instruments de gouvernance, d'outils économiques et financiers, d'instruments de suivi et évaluation et de mesures de communication et de renforcement de capacités. Ces instruments doivent être activés selon un échéancier compatible avec les conditions de faisabilité et de mise en œuvre de ces dernières.

Les deux pays ont acquis une grande expérience dans le domaine de la planification et la gestion de l'eau, cependant cette expérience est insuffisamment tournée vers le processus d'intégration du CC. L'intégration du CC dans les plans de développement des ressources en eau est extrêmement liée à l'interconnexion avec l'adaptation au CC d'autres secteurs d'activités. Les voies d'amélioration proposées dans cet article ont tenu compte de cette interconnexion et peuvent servir de base pour le développement d'un guide d'intégration du CC dans les politiques de l'eau des pays du Maghreb.

Références

- [1] [1A], Stour L., et Agoumi A, Sécheresse climatique au Maroc durant les dernières décennies. *Revue Hydro écologie Appliquée*, tome 16, (2008), p. 215-232. DOI : 10.1051/hydro/2009003.
- [2] [2A], Moujahid M., Stour L., et Agoumi A, Drainage urbain et changements climatiques : Limites de la modélisation, *Revue internationale de l'eau «La Houille Blanche»*, N° 1, (2015), p. 71-75. DOI 10.1051/lhb/2015009.
- [3] [3A], Stour L., et Agoumi A., Réchauffement climatique et sécheresse au Maroc en 2050, *Revue Marocaine de Génie Civil*, N°119, 3ème trimestre (2007), p. 37-45.
- [4] [4A], Agoumi A., Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques : Besoin réel et urgent d'une stratégie d'adaptation et de moyens pour sa mise en œuvre, USAID / IISD (2003).
- [5] [1C], Ministère délégué en charge de l'Environnement au Maroc, *Etude de Vulnérabilité et d'adaptation du Maroc au changement climatique sous la Seconde Communication Nationale. Rapport de synthèse* (2009).
- [6] [1L], Ministère de l'Environnement de la Tunisie, *Stratégie Nationale sur le Changement Climatique*. Projet élaboré avec l'appui de la GIZ, (2012).
- [7] [2L], Ministère délégué en charge de l'Environnement au Maroc, *Plan National de Lutte Contre le Réchauffement Climatique*, (2009).
- [8] [3L], Organization for Economic Cooperation and Development, *Integrating Climate Change Adaptation into Development Co-operation: Policy Guidance*. (2009) ISBN-978-92-64-05476-9.
- [9] [4L], United Nations Economic Commission for Europe, *Guidance on Water and Adaptation to Climate Change*, (2009), ISBN: 978-92-1-117010-8.
- [10] [5L], United States Agency for International Development, *Climate Change Adaptation Guidance Manual* (2009).
- [11] [6L], Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau au MAROC, *Stratégie Nationale de l'Eau*, (2009).
- [12] [7L], German Federal Cabinet, *German Strategy for Adaptation to Climate Change*, (2008).

Evolution des paramètres climatiques dans le nord ouest de l'Algérie

KOUIDRI Sofiane¹, DAHMANI Abdelmajid², MEGNOUNIF Abdesselam¹, GHENIM Abderrahmane Nekkache¹

¹Faculté de technologie, Université Abou bekr Belkaid Tlemcen, Algérie, Laboratoire « Eau et Ouvrages dans Leur Environnement », sofihydro@gmail.com

² Université Abou bekr Belkaid Tlemcen, fayoul01@yahoo.fr

Résumé

L'étude des paramètres climatiques est souvent concentrée sur l'aspect particulier de la variabilité des valeurs extrêmes, Cependant, la disponibilité de bonnes estimations de ces paramètres est essentielle aussi bien pour la gestion des ressources en eau que la protection des ouvrages d'art ou encore la lutte contre les inondations, Dans ce travail, on examine l'évolution des paramètres climatiques enregistrés à la station de Zenata au nord-ouest de l'Algérie, L'étude investie quatre paramètres à savoir la température journalière maximale annuelle, la température journalière maximale annuelle au sol, la pluie journalière maximale annuelle et la vitesse de vent maximal couvrant une période de 31 années allant de 1981 à 2011, L'objectif est de modéliser ces quatre paramètres par des lois de probabilités pour une description adéquate des fréquences et périodes de retour.

Mots clés : Paramètres climatiques, événements extrêmes, loi de probabilité, période de retour

Evolution of climate parameters in north-west of Algeria

Abstract

The study of climatic parameters is often based on the particular aspect variability of extreme values. However, the availability of the good estimations of these parameters is essential, also good for the management of water resources and the protection of structures and floods control. In this work, we will examine the climatic parameters evolution recorded at Zenata station in the north-west of Algeria. The study invested four parameters namely the annual maximum daily temperature, annual maximum daily soil temperature, annual maximum daily rainfall and maximum wind speed over a period of 31 years from 1981 to 2011. The objective is to model these four parameters by law of probabilities for an adequate description of frequencies and return periods.

Key Words: climate parameters, extreme event, probability law, return period

Introduction

L'estimation adéquate des événements climatiques extrêmes est primordiale en raison des risques importants associés à une connaissance insuffisante de leur ampleur. De nombreuses méthodologies se sont développées durant ces dernières décennies pour améliorer l'estimation de l'amplitude et l'occurrence des extrêmes climatiques. De plus, la disponibilité de bonnes estimations est essentielle pour une conception rationnelle des structures hydrauliques, la gestion de la qualité de l'eau ou encore la prévention des inondations,

Dans ce contexte, l'analyse fréquentielle des données climatiques est une approche couramment utilisée [1] et constitue une étape indispensable pour évaluer les risques d'inondation et la protection de la ressource en eau et l'environnement en général [2]

Cette étude est une contribution dans le diagnostic des principales caractéristiques des paramètres extrêmes à savoir la température journalière maximale annuelle, la température journalière maximale annuelle au sol, la pluie journalière maximale annuelle et la vitesse de vent maximal qui sévissent dans le nord-ouest de l'Algérie.

1. Zone d'étude, données de mesure et méthodologie

La station de Zenata est située au Nord-Ouest de l'Algérie à environ 19 km de la ville de Tlemcen, Elle est à 35,02°N et à -1,47°E et à une altitude de 247m. L'étude porte sur 4 séries climatiques à savoir : la température journalière maximale annuelle, la température journalière maximale annuelle au sol, la pluie journalière maximale annuelle et la vitesse de vent maximal. Les séries utilisées couvrent la période allant de septembre 1981 à août 2011.

L'étude commence par une analyse des 4 paramètres suscités, La tendance temporelle de chaque paramètre est appréciée par la droite moyenne obtenue par simple régression. La pente de la droite permet une estimation de la tendance recherchée. Chacune des séries est assujettie aux différentes lois de probabilités à savoir : Loi Normal, Log Normal, Gumbel, Weibull et Pearson III

L'ajustement aux lois de probabilité est confirmé par le test de Kolmogorov-Smirnov [3] au risque d'erreur de 5%.Après adéquation, les lois retenues sont utilisées pour calculer les périodes de retour à différentes hauteurs annuelles.

2. Résultats

L'étude a montré que la température maximale à l'abri et au sol s'ajustent mieux à la loi de Weibull, tandis que la pluviométrie et le vent à la loi de Gumbel. Les modèles acceptés sont ceux qui minimisent l'écart entre la fonction de répartition et les probabilités fréquentielle suivant le test de Kolmogorov-Smirnov au seuil de confiance de 95%,

A partir des droites de simple régression obtenues par la méthode des moindres carrés on remarque que la température journalière maximale annuelle a, en moyenne, augmenté durant la période 1981-2011 de 2,71°C. La valeur maximale, 47°C, est enregistrée durant l'année 2009. La minimale 37,1°C est enregistrée en 1997. La température journalière maximale annuelle au sol a augmenté de 3,93°. La maximale (58,70°C) et la minimale (45°C) sont observées respectivement en 1989 et 1997.

De même, durant les 31 années d'étude, la pluviométrie journalière maximale annuelle a, en moyenne, augmenté de 3,94 mm. La valeur maximale en 1989 a atteint 70mm et la valeur minimale 15,2 mm en 1985. Quant à la vitesse du vent a connu une diminution moyenne de l'ordre de 0,92 m/s. La vitesse maximale, 36 m/s soit 130 km/h, est observée en 2011. La vitesse journalière maximale annuelle la plus faible durant la période d'étude a été de 16 m/s (58 km/h) enregistrée en 2000.

Les coefficients de variation montrent que les séries de pluviométrie et le vent accusent une grande variation d'une année à l'autre. Par contre, les séries de la température maximale à l'abri et la température maximale au sol accusent de faibles variations,

Les fortes valeurs du coefficient d'asymétrie correspondant à la pluviométrie et la vitesse du vent soulignent d'une part la rareté des valeurs fortes, mais très excédentaires par rapport aux valeurs centrales,

Discussions et Conclusion

L'étude a montré que la température maximale à l'abri et au sol s'ajustent mieux à la loi de Weibull, tandis que la pluviométrie et le vent à la loi de Gumbel,

Durant les 31 années d'étude, la période de retour décennale calculée sur la base de la loi de Weibull s'est répétée en quatre fois pour la température maximale à l'abri et deux fois pour la température maximale au sol. Alors que pour la loi de Gumbel, elle s'est répétée quatre fois pour la pluviométrie maximale et deux fois pour la vitesse du vent,

L'évolution future de ces paramètres climatiques, montre que ces derniers peuvent augmenter de façon drastique dans les prochaines années. Les estimations à l'aide de ces ajustements montrent que dans 50 ans c'est-à-dire durant les années 2020 l'accroissement de la valeur maximale identifiée pour chaque série étudiée sera de 0,5°C pour la température maximale à l'abri, 0,4°C pour la température maximale au sol, 4,73 mm pour la pluviométrie maximale et 0,49 m/s pour le vent maximal. Durant les années 2080, les augmentations seront respectivement de 1,07°C, 1,01°C, 12,64 mm et 2,85 m/s,

Le rapport du GIEC révèle que la valeur extrême de la température maximale quotidienne dont la période de retour est de 20 ans s'élèvera de 1 à 3 °C d'ici au milieu du XXI^e siècle et de 2 à 5 °C d'ici à la fin du XXI^e siècle, Les résultats de notre étude fournit les mêmes ordres de grandeur et montrent que les températures maximales à l'abri et au sol seront à la hausse avec un accroissement entre 1 et 1,1 °C,

L'ensemble des études menées aussi bien dans l'ouest de la Méditerranée que dans le Sahel, confirment une tendance à la baisse dans les apports pluviométriques, Cependant, notre étude montre que la contribution des pluies maximales journalières dans les totaux annuels est en nette progression, De ce fait, le temps d'occurrence de pluies est en diminution, d'où des pluies plus concentrées, intenses et agressives.

Références

- [1] T. Ouarda, A. St-Hilaire et B. Bernard, Synthèse des développements récents en analyse régionale des extrêmes hydrologiques, Revue des sciences de l'eau, Volume 21, numéro 2 (2008), p 219-232
- [2] A. Guillou, et P. WillemS, Application de la théorie des valeurs extrêmes en hydrologie, Rev Statistique Appliquée, Tome 54 n°02 (2004), 5-31.
- [3] J. Llamas, R. Charbonneau, et J. C. Rassam, Analyse statistique d'événements extrêmes, Water for the Future : Hydrology in Perspective, IAHS Publ. no. 164 (1987) 1-16.

Le climat et la dégradation du sol agricole dans la région de Tlemcen (Algérie)

Sarra LAKEHAL,

Faculté des sciences de la Nature et de Vie et Sciences de la Terre et l'Univers. Université de Tlemcen (Algérie) Téléphone E-mail : sara5agro@hotmail.fr

Résumé

L'érosion est le produit d'une vulnérabilité de la couverture pédologique et par la pression des conditions climatiques. Les pluies orageuses tombent sur les sols pauvres en humus. La sécheresse estivale contribue à désagréger les éléments de ces sols. Cette sécheresse met fin prématurément à la végétation des plantes au moment où la protection superficielle du sol au début de l'automne serait nécessaire. Le but de notre étude climatique est de mettre en évidence les effets du climat de notre zone d'étude sur la dégradation des sols dans les terrains agricoles.

Mots clés : climat, sol agricole, érosion, Tlemcen.

Climate and soil's degradation in the region of Tlemcen (Algeria)

Abstract

Erosion is the product of vulnerability of the soil cover and the pressure of climatic conditions. Stormy rains fall on soils low in humus. The summer drought contributes to disintegrate the elements of the soils. This drought prematurely terminates the vegetation of plants at a time when early soil protection is needed. The purpose of our climate study is to highlight the effects of the climate of our study area on the degradation of soils in agricultural lands.

Key Words: climate, agricultural soil, erosion, Tlemcen.

Introduction

Le changement climatique peut contribuer à la dégradation des terres en exposant les sols non protégés à des phénomènes violents en contribuant au déboisement, à l'érosion des sols, à l'appauvrissement en matières organiques et à d'autres formes de dégradation.

À cause de ces changements, les pratiques de gestion des terres qui, sous d'autres conditions climatiques, étaient durables, ne le sont plus, et elles provoquent une conversion accélérée des terres à vocation agricole.

Dans ce contexte ce travail examine les liens entre le changement climatique et la dégradation des terres agricoles dans la région de Tlemcen (Algérie). La dégradation des terres peut aggraver ces changements climatiques, mais elle peut également être exacerbée par ces derniers.

1. Description du milieu de la wilaya de Tlemcen

La wilaya de Tlemcen occupe une position originale au sein de l'ensemble national algérien, à la fois frontalière et côtière, elle est située à l'extrême Nord- Ouest algérien entre 34° et 35° 40' de latitude Nord et 0° 30' et 2° 30' de longitude Ouest. Elle couvre une superficie globale de 9017.69 km² pour une population de l'ordre de 979745 habitants [1].

La wilaya même si elle présente un aspect agricole prononcé, dispose d'une base industrielle large et diversifiée.

La région de Tlemcen est marquée par une hétérogénéité orographique offrant une diversité de son paysage [2], géologiquement, cette zone est surtout formée à base de roches calcaires présentés sous différentes formes (calcaire cristallin, travertin, dolomie, calcaire marneux ou de croûte) [3].

L'interdépendance du climat et de la géologie ont favorisé l'apparition de sols diversifiés. Ils sont extrêmement hétérogènes. Il est noté cependant que la majeure partie des sols de la zone Nord sont des sols calcaires et que les sols de la bordure Sud dans les hauts plateaux sont des sols calciques à croûtes.

2. Le climat de Tlemcen

2.1. Considérations générales

Selon Alcaraz (1982) [4]; le climat de l'Oranie s'avère partout méditerranéen. L'orographie générale du pays paraît conditionner le climat ; la position méridionale relativement basse inerviendrait aussi à un degré moindre.

Le climat de Tlemcen constitue une pauvreté naturelle caractérisé essentiellement par une longue période de sécheresse. L'aridité quasi générale et prolongée réduit d'une manière drastique les ressources en eau qui sont déjà rares [5].

L'influence qu'il exerce sur le sol et sur la production végétale varie fortement d'un lieu à un autre et d'une année à l'autre. La variabilité interannuelle est en effet une caractéristique importante à prendre en considération dans l'évaluation des aptitudes culturales d'un milieu.

2.2. Choix des stations

Afin de montrer les variations climatiques dans le temps, on a procédé à l'analyse des données climatiques de deux périodes différentes au niveau des stations suivantes : Saf- saf, Zenata, Maghnia, Ghazaouet. L'une ancienne (1913 – 1983 selon les données de Seltzer ; 1946) [6] et l'autre nouvelle (1986 – 2012).

2.3. Les facteurs climatiques

2.2.1. Les précipitations

La pluviométrie varie en fonction de l'éloignement de la mer et l'exposition des versants par rapport aux vents humides. Cette dernière agit d'une manière directe sur la végétation et le sol. En effet, le régime pluviométrique dans une proportion importante au maintien et la répartition du couvert végétal, de plus elle joue un rôle primordial dans la dégradation du sol par le phénomène d'érosion [7].

Les résultats obtenus montrent que juillet est le mois le plus sec au niveau de toutes les stations étudiées (exemple : dans la station de Zenata on a 1.00 mm au niveau de l'ancienne période et 2.3 mm au niveau de la nouvelle période). Par contre les mois de Novembre sont les plus arrosés (exemple : Zenata, 68 mm au niveau de l'ancienne période et 54.7 mm au niveau de la nouvelle période) [8].

Concernant le régime saisonnier, l'analyse climatique révèle que la région de Tlemcen est soumise à un régime à maximum pluviométrique centré sur la saison hivernale. Les précipitations d'origine cycloniques tombent principalement en hiver, entre décembre et février, et fournissent plus de 35% de pluies annuelles.

2.2.2. Les températures

Il convient de noter que ce sont les températures extrêmes plutôt que les moyennes qui jouent le rôle essentiel. Nos résultats montrent que les moyennes des maxima varient entre 30°C et 32°C dans toutes les stations. Dans les deux périodes le mois le plus chaud est Août. Cette période coïncide avec une absence de pluviosité [8].

2.2.3. Le vent

D'après nos résultats, la vitesse du vent varie d'une année à une autre, les valeurs moyennes mensuelles les plus fortes notés en (Km/h) à Tlemcen durant la période de 1981- 1987 varient entre 17.2 durant les mois de Juin et 29.75 durant les mois de Janvier [8]. Par contre au niveau de la période 2012 – 2013, les valeurs moyennes de cette vitesse varie entre 07 durant le mois d'Octobre et 26.4 durant le mois d'Avril [8].

En hiver, les vents d'Ouest dominant, ils apportent les nuages, la pluie. En été, ce sont les vents Nord- Est beaucoup moins importants et surtout le vent du Sud (Sirocco).

2.3. Synthèse bioclimatique

En comparaison avec tous les stations de référence, dans les deux périodes de référence, la Wilaya de Tlemcen s'identifie par une sécheresse accentuée.

Les différents indices utilisés dans notre travail montrent un changement d'un étage ou d'un sous étage bioclimatique de la station d'étude d'une période (1913 – 1938) à une autre (1982 – 2012) faisant ressortir l'intense aridité qui est exprimée par une saison sèche de plus étalée dans l'année ainsi qu'une évapotranspiration potentielle élevée, la pluviosité n'étant absolument capable de combler ce déficit.

Conclusion

La semi aridité du climat de notre zone d'étude, contribue à rendre difficile la situation de nombreux végétaux, mais ces mêmes facteurs interviennent plus efficacement dans l'érosion des sols. Pour tous les sols, le processus de la destruction par érosion hydrique commence par la disparition de la couverture végétale qui en y la meilleure protection. Les pluies orageuses tombent sur les sols pauvres en humus. La sécheresse estivale contribue à désagréger et déliter les éléments du sol. Cette même sécheresse met fin prématurément à la végétation des plantes au moment où la protection superficielle du sol au début de l'automne serait spécialement nécessaire.

Si le couvert végétal disparaît, que ce soit pour la culture ou à la suite de surpâturage d'incendies ou d'aléas climatiques, des changements vont survenir dans le sol. La vitesse de ce changement dépend de la température, de la topographie, des précipitations, du sol lui-même et du mode d'aménagement. En général sous climats chauds, surtout quand les résidus agricoles sont enlevés et que le fumier animal ne retourne pas à la terre, la teneur en matière organique tombe au-dessous de 0.5 %, ce qui favorise la détérioration de la structure de sol et de leur fertilité, l'eau des pluies colmate la surface des sols, l'infiltration diminue, le ruissellement et l'érosion démarrent, puis s'accroissent.

Références

- [1] D.S.A, Présentation de la wilaya de Tlemcen. Direction des services agricoles, 2007. P 18.
- [2] D.P.A.T, Plan d'aménagement et d'urbanisme pour le groupement de Tlemcen, Chetouane et Beni Master. Direction de planification et aménagement du territoire, 2000. 180 P + cartes.
- [3] A. Gaouar, Dégradation des écosystèmes forestiers et conception d'un développement in cahier géographique, special séminaire: Développement et aménagement du territoire en Algérie. N°5 – 6 (1980), 151 – 163.
- [4] C. Alcaraz, La végétation de l'Ouest algérien, Thèse de doctorat d'état, Université Perpignan 1982.
- [5] M. Moumani, Problématique de l'utilisation des espaces agraires dans une aire protégée (Cas du parc national de Tlemcen). Thèse de Magistère en foresterie. Université de Tlemcen 2006.
- [6] P. Seltzer, Le climat de l'Algérie. Institut météorologique et de physique du globe. Université d'Alger, 1946. 219 p.
- [7] J. Greco, L'érosion: la défense et la restauration des sols, reboisement en Algérie. eds, Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire. Alger, 1966. 393 p.
- [8] O.N.M, Données climatiques de la wilaya de Tlemcen. Office national de la météorologie. 2013

Evaluation endogène des phénomènes hydro-climatiques en pays mina dans les communes de Come et de Grand-Popo au Bénin

ATCHADE A. A. G. ²,

¹ Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université d'Abomey-Calavi, République du Bénin, mekjohnny@yahoo.fr

² Laboratoire Pierre Pagny : Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey Calavi, B.P 526, Cotonou République du Bénin, gachl2@yahoo.fr, exlaure@yahoo.fr, djaphdom@gmail.com

Résumé

La présente recherche a pour but d'évaluer les connaissances ethno-hydroclimatiques des Mina puis d'établir la relation entre ces connaissances endogènes et les réalités scientifiques. L'approche méthodologique utilisée s'est focalisée sur les données climatiques puis les perceptions paysannes des phénomènes hydro-climatiques recueillies auprès de 352 ménages répartis dans cinq des douze arrondissements que comptent les communes de Comé et de Grand-Popo. Les phénomènes hydro-climatiques tels que l'inondation (esidɔɔ), la sécheresse (ekuɔiɔi), les vents violents (ayásinsín) et l'érosion (esidékɔ) sont connus de 72 % de la population Mina. Cette population dispose des connaissances pouvant permettre d'évaluer les phénomènes hydro-climatiques qui sont conformes aux réalités scientifiques.

Mots clés : évaluation endogène, phénomènes hydro-climatiques, pays Mina.

Assessment of endogenously of hydro-climatic phenomena among the mina ethnic group at come and grand-Popo municipalities.

Abstract:

This research has carried out with the aim of evaluating the Mina ethno-hydroclimatic knowledge and to establish the relationship between these knowledge and the scientific realities. The methodology used has been based on the climatologic data and the local knowledge about phenomena hydro-climatic collected beside 352 households shout out on five of twelve districts of Comé and Grand-Popo. The phenomena hydro-climatic like flood (esí dɔɔ), drought (ekuɔiɔi), violent winds (ayásinsín) and erosion (esidékɔ) have known by 72 % of population Mina. This population has knowledge one's disposal which can allow to evaluate the phenomena hydro-climatic and which are in accordance with scientific realities.

Keywords: local evaluation, phenomena hydro-climatique, Mina area.

Introduction

Les changements climatiques constituent aujourd'hui, une menace potentielle majeure pour l'environnement et le développement durable (MEPN, 2008). Les catastrophes d'origine hydro-climatiques émanant des changements climatiques constituent 79 % des catastrophes naturelles du XX^e siècle (Veyret et Chocat, 2005). Face à l'ampleur de cette situation, la collaboration de tous (la communauté scientifique et des populations paysannes) est nécessaire. Pour (Boko, 1988), les populations paysannes ont une perception relative et conjoncturelle différente de celle quantitative qu'ont les climatologues "statisticiens" des changements climatiques. Il faut donc aller à l'écoute de la population à la base afin de mieux cerner leur perception des phénomènes hydro-climatiques car pour (Akindélé, 2009), il existe plusieurs éléments ou faits physiques qui indiquent à la population le début et la fin d'une saison ou d'une autre. La présente réflexion s'est focalisée sur l'évaluation endogène des phénomènes hydro-climatiques (tels que l'inondation, la sécheresse, les vents violents et l'érosion) en pays Mina dans les communes de Comé et de Grand-Popo situé au Sud du département du Mono, plus précisément entre les parallèles 6°10' et 6°35' de latitude Nord d'une part et les méridiens 1°35' et 2° de longitude Est d'autre part.

I. Approche méthodologique

Deux types de données notamment les données climatologiques et les données socioculturelles ont été utilisés dans cette étude. Les données climatologiques (pluies et ETP) sont respectivement extraites de la base de données des CeCPA Comé et Grand-Popo puis de l'ASECNA (station de Cotonou en tant que station la plus proche de la zone d'étude). Les données socioculturelles ont été obtenues après une enquête de terrain qui a pris en compte 100 ménages répartis sur cinq des douze arrondissements de la zone d'étude notamment Comé, Oumako, Adjaha, Grand-Popo et Agoué. Lors des interviews, seules les personnes Mina ayant au moins 18 ans d'âge ont été questionnées. Pour traiter les données, plusieurs méthodes ont été utilisées. Ainsi, la moyenne arithmétique de la pluviométrie a été calculée par le protocole suivant :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Avec \bar{x} = moyenne, n = nombre total d'année et x_i = pluviométrie annuelle. Le bilan climatique calculé par le protocole suivant a permis de déterminer les mois secs et humides.

$$Bc = P - ETP$$

Avec : Bc = bilan climatique, P = total des abats pluviométriques et ETP = Evapotranspiration potentielle

Les protocoles suivants ont permis de calculer respectivement les années sèches et les années humides.

$h_1 = \bar{x} - 20\% \bar{x}$ (pour les années déficitaires c'est-à-dire ayant moins de pluie)

$h_2 = \bar{x} + 20\% \bar{x}$ (pour les années excédentaires c'est-à-dire ayant connues plus de pluie).

Avec h_1 et h_2 les hauteurs pluviométriques et \bar{x} la moyenne pluviométrique.

2. Résultats et Discussions

2.1. Evaluation endogène de l'inondation

Plusieurs données pouvant permettre d'évaluer les connaissances endogènes en matière d'inondation ont été recueillies. L'inondation correspondant localement au vocable «esiḍḍḍ» est connue de la quasi-totalité des personnes interviewées. La reconnaissance du phénomène par la quasi-totalité des enquêtés est la preuve que le cadre d'étude est fréquemment le théâtre de ce phénomène. En effet, ce secteur d'étude est un ensemble formé de plusieurs cours d'eau ensablés, des marécages et des bas-fonds. En plus de ce relief favorable à l'inondation, s'ajoutent les lâchées de vannes du barrage de Nangbéto qui communique directement avec le fleuve Mono; ce qui avec l'abondance des pluies contribue à la montée exceptionnelle des cours d'eau qui débordent du lit majeur. Caractérisée par les pluies abondantes, le débordement des cours d'eau de leur lit majeur, la présence abondante des eaux de pluie dans les champs et dans les maisons puis la prolifération des maladies hydriques ; l'inondation est d'une forte intensité dans le secteur d'étude. Elle a lieu probablement entre la seconde moitié de la grande saison des pluies et la première moitié de la petite saison sèche couvrant ainsi trois à quatre mois. Pour 80 % des populations enquêtées, elle a lieu de juillet (atitḍén) à août (afó) lorsqu'elle est de faible intensité puis de juillet (atitḍén) à octobre (kelé) quand elle est de forte intensité. Il est à noter que le secteur d'étude connaît trois types d'inondation : les inondations causées par la non infiltration des eaux de pluie : ce type d'inondation est vécu dans presque toutes les zones ayant un sol argileux et située en zone marécageuse, les inondations causées par l'abondance des pluies : ce type d'inondation est fréquente dans les zones intermédiaires entre la plaine côtière et le plateau et ceci parce que ces zones constituent la zone de chute des eaux provenant du plateau ; les inondations causées par le débordement des cours d'eau de leurs lits : ce type d'inondation touche les zones riveraines des cours d'eau. Il

s'explique par le fait que le fleuve Mono est un canal de transit des eaux du mont Alédjo où il prend sa source avant de se jeter dans la lagune de Grand-Popo qui lui sert de relais vers l'océan.

2.1.1. Conséquences socio-économiques des inondations

Les conséquences de l'inondation sont de loin celles qui surpassent les conséquences des autres phénomènes selon 80 % des enquêtés. Ils justifient cette affirmation par le fait que les inondations marquent plus les esprits à cause des dégâts qu'elles engendrent. Les interviewés situent ces dégâts à quatre niveaux à savoir : les dégâts au niveau des finages : les inondations constituent un obstacle à la bonne tenue des travaux champêtres. En effet, quand il y a excès de précipitation, les champs sont inondés et les cultures sont détruites. Cette situation entraîne une crise alimentaire. A cet effet, 27 % des interviewés affirment avoir perdu toute leur production de 2010 à cause des inondations. Les dégâts au niveau du cheptel : les éleveurs ne sont pas épargnés par ce fléau qui décime la plupart du temps leurs bétails. En effet, pour 28 % des enquêtés, en période d'inondation, il est difficile pour les éleveurs d'éprouver des abris à leur troupeau et d'amener les animaux au pâturage. Les dégâts immobiliers : selon 95 % des enquêtés, la période des inondations est la plus crainte, car pendant cette période, les populations se retrouvent sans abris parce que l'eau démolit leur maison ou la rend temporairement inhabitable. Les maladies : pour 75 % des interviewés, c'est la période des maladies liées à l'eau qui sont réputées graves et souvent épidémiques. Les inondations favorisent la prolifération des moustiques anophèles vecteurs du plasmodium qui est l'agent responsable du paludisme. Plusieurs maladies hydriques comme le choléra et le paludisme sont également favorisées pendant cette période. Ces maladies jouent sur la santé de toutes les couches de la population et agissent sur la productivité de chaque composante dans cette période de façon spécifique.

2.2. Evaluation endogène de la sécheresse

Pour 92 % de la population interviewée, la sécheresse est appelée (ekuđíj) et est caractérisée par une absence totale de pluie, une chaleur intense, un vent mélangé à la poussière et un assèchement des cultures. On distingue trois variantes. La première a une intensité très faible et cause moins de dommage à la population. Elle dure en moyenne une quinzaine de jours notamment de mi-juillet «atitɔ́ɛ́nbemámɛvevɔ́n» à fin juillet «atitɔ́ɛ́nbɛvɔ́vɔ́nu» et sert de transition entre la grande saison des pluies et la petite saison des pluies. La deuxième a une intensité moyenne et dure en moyenne un mois (de mi-septembre «kpesɔ́jibemámɛvevɔ́n» à mi-octobre «kelébemámɛcucugbɔ́n»). Elle sert d'union entre la petite saison sèche et la petite saison des pluies. La troisième a une forte intensité, a lieu pendant la saison sèche et dure deux mois (février «fy» à mars «vuvukeké»). Cette dernière peut se révéler très vulnérable lorsqu'elle se manifeste à une température relativement plus élevée. Pour 65 % des enquêtés, elle devient vulnérable lorsque pendant la saison de pluie précédente il y a eu une très faible quantité d'eau de pluie tombée. Mais pour 35 % des enquêtés (majoritairement des personnes du troisième âge), ces calamités sont dues au non-respect des prescriptions divines et ancestrales. Pour 70 % des personnes interviewées, au cours de certaines années dont elles gardent encore le souvenir la sécheresse a occasionné beaucoup de dégâts. Il s'agit des années 1986, 1989, 1990, 1995, 1998, 2000 et 2006 qui sont des années au cours desquelles la chaleur, le manque de nourriture et d'eau ont décimé les animaux.

2.2.1. Conséquences socio-économiques de la sécheresse

La sécheresse présente plusieurs conséquences sur le plan socio-économique dans les communes de Comé et de Grand-Popo. Pour 62 % des interviewés, la sécheresse affecte le maraîchage, le cheptel et l'agriculture.

- sur le maraîchage : elle endommage par sa température élevée les jeunes plants des maraîchers qui pratiquent le maraîchage de contre saison. Selon 27 % des enquêtés, le cas s'est produit en 2000, année au cours de laquelle, les maraîchers n'ont pu mener leur activité jusqu'à la récolte,
- sur le cheptel : les éleveurs affirment que la période de la sécheresse est très difficile à vivre, car les points de retenues d'eau qui servent de breuvage pour les troupeaux tarissent complètement et ils sont obligés d'aller vers les cours d'eau qui sont un peu plus loin avant de faire abreuver leur troupeau. De même, pour faire paître leurs bétails, ils rencontrent beaucoup de difficulté, car les plantes et les herbes servant de nourriture aux animaux herbivores s'assèchent,
- sur le plan agricole : les enquêtés affirment que lorsque la sécheresse est accentuée et précoce c'est-à-dire lorsqu'elle survient un peu plus tôt que d'habitude, elle constitue une menace grave à la récolte. En réalité, lorsque ce cas se présente les fruits s'assèchent avant maturité et la récolte n'est plus rentable. Cette situation peut entraîner une perte économique énorme pour les agriculteurs et provoquer plus tard la famine au sein de la société.

2.3. Evaluation endogène des vents violents

Après l'analyse de ce tableau, on comprend aisément que les vents violents sont dénommés «ayásinsín»; ce qui signifie littéralement «vents violents» et traduit très bien l'exceptionnalité de ce vent. Il se manifeste avec une intensité élevée et est subi par les populations deux fois par an et ceci de juillet «atitɔ́ɛ́n» à septembre «kpesɔ́jɔ́» puis de décembre «baluwé» à janvier «tɔ́kwɔ́» pendant l'harmattan. Il faut signaler que les caractéristiques de ce vent (vent à grande vitesse, vent accompagné de pluie, vent chargé de poussière, vent contenant une humidité élevée) en disent long sur son aspect

extraordinaire. Vents violents de la période de l'harmattan : ce vent de direction nord-sud est souvent chargé de poussière et parfois désagréable, car il peut être source de la destruction des maisons et la prolifération des conjonctivites.

Vents violents de juin « avulèn » à septembre « kpesòdji » : ce vent est relativement chargé d'humidité et précède souvent les ouragans. En effet, de juin à juillet, les vents violents sont moins humides et s'accompagnent le plus souvent d'ouragans contrairement à la période d'août à septembre où les vents sont plus humides et accompagnés de fines pluies localement appelées afòdji ce qui littéralement signifie pluie de mousson. Pour 68 % des interviewés, ces vents violents sont dus à la déforestation, à la profanation des divinités et au prélèvement du sable marin pour diverses activités anthropiques notamment la construction des maisons.

2.3.1. Conséquences socio-économiques des vents violents

Les vents violents constituent pour 100 % des enquêtés, un facteur de destruction des immobiliers et des cultures. Pour 88 % de ces enquêtés, les vents constituent après l'inondation, le facteur le plus gênant qui soit. En effet, ils détruisent les toits des maisons et contribuent fortement à l'écroulement des maisons et des hangars, à la cassure des piquets servants de poteaux électriques dans les zones où les poteaux de la S.B.E.E font défaut. Sur le plan de la santé, ces vents violents sont de véritables facilitateurs du transport des microbes contenus dans la poussière. Ainsi, 53 % des enquêtés affirment qu'après leurs passages, certaines maladies liées aux conjonctivites se font remarquer. Sur le plan de la faune, les vents violents déracinent les arbres, détruisent les plans des maraichers et entraînent pour ces derniers un déficit économique.

2.4. Evaluation endogène de l'érosion

Connu localement sous l'appellation «esiqéko», l'érosion est bien ancrée dans la conscience des populations Mina du secteur d'étude. Ce phénomène est caractérisé par l'eau de ruissellement, le prélèvement et le transport du sable puis la dégradation du sol. Elle dure au total 6 mois soit 4 mois pendant la grande saison des pluies et 2 mois pendant la petite saison des pluies. Elle est plus ou moins forte selon le relief. Elle est causée par la pluie, la destruction du couvert végétal, le prélèvement du sable et le relief qui constitue avec le ruissellement les facteurs facilitateurs. Pour 29 % des enquêtés, l'érosion résulte aussi du système d'évacuation des eaux au niveau des maisons à dalle où les tuyaux d'évacuation évacuent une quantité importante d'eau simultanément ce qui favorisent l'érosion à proximité de ces maisons.

2.4.1. Conséquences socio-économiques de l'érosion

Les conséquences de l'érosion sur le plan socio-économique selon presque la quasi-totalité des enquêtés (98 %) sont nombreuses. En effet, selon ces derniers, l'érosion n'apporte rien de bénéfique à la population. Mais, bien au contraire, elle détruit non seulement les maisons, mais aussi et surtout elle est source de plusieurs accidents de circulations sur les voies et bitumes qu'elle endommage. En effet, à cause des méfaits de l'érosion, les maisons sont la plupart du temps démolies et dans leurs chutes, elles font des victimes qui restent sans abris le temps de rebâtir une nouvelle maison ou dans le pire des cas, ces victimes passent de la vie à trépas. De même, les populations assistent souvent impuissantes à la destruction totale de certaines voies et pistes sous l'action de l'érosion. Cette situation ne facilite guère une bonne circulation des personnes et des biens à cause des accidents de circulation que cette situation crée. Dès lors, les activités commerciales dans le secteur d'étude ralentissent et par ricochet agissent négativement sur l'économie. Les agriculteurs pour leur part, surtout ceux dont les exploitations sont proches des maisons se plaignent de la qualité très pauvre du sol. Pour 48 %, c'est l'érosion qui est la cause d'un tel problème, car elle lessive les sols et les dépossède des matières minérales et organiques dont les cultures ont besoin pour leurs croissances et une bonne productivité.

2.5. Relation entre évaluation endogène et réalité scientifique

Dans le souci de vérifier la conformité ou non des informations issues de l'évaluation endogène des phénomènes hydro-climatiques en l'occurrence l'inondation et la sécheresse, les données climatologiques ont été mises à contribution. Les mois les plus secs, témoins du déficit entre les abats pluviométriques et l'évaporation qui sont ceux de juillet à avril. Durant cette période, les activités agricoles ne sont pas intenses ; surtout de mi-juillet à mi-septembre et de mi-novembre à mi-mars qui correspondent respectivement à la petite saison sèche et à la grande saison sèche. Par contre, les mois de mai et de juin sont les mois les plus humides ; ils témoignent en ce sens de l'excédent entre les abats pluviométriques et l'évapotranspiration. C'est la période favorable aux travaux agricoles. Les hauteurs élevées de pluie enregistrées au cours de cette période sont la première cause de l'érosion et des inondations qu'on remarque plus tard entre juillet et octobre comme l'ont mentionné les populations Mina.

Le total des précipitations de chaque année est considéré pour déterminer les années humides et les années sèches. Il est considéré comme année humide ou excédentaire, toute année ayant une somme arithmétique des précipitations supérieures à 1126,19 mm à Comé et 1090,33 mm à Grand-Popo et comme année sèche, toute année ayant une somme arithmétique des précipitations inférieure à 750,79 mm à Comé et 726,89 mm à Grand-Popo (le seuil étant la moyenne augmentée ou diminuée de 20 %). Les années humides c'est-à-dire les années ayant connu des hauteurs de pluie excédentaire sont : 1982, 1997, 1999, 2004, 2005, 2008 et 2010 soit 23,33 % à Comé puis 1982, 1993, 1997, 2002, 2004, 2008, 2009 et 2010 soit 26,67 % à Grand-Popo. Sur cette même période de 1982-2011, les années déficitaires c'est-à-dire

les plus sèches sont les suivantes : 1986, 1989, 1990, 1995, 1998 et 2000 soit 20 % à Comé et 1986, 1989, 1990, 1998, 2000 et 2006 soit 20 % à Grand-Popo. Le reste des années constitue les années normales soit au total 56,67 % à Comé et 53,33 % à Grand-Popo. Les déficits pluviométriques et les excès majeurs posent énormément de difficultés à la population notamment aux producteurs agricoles qui doivent faire face pendant cette période aux inondations qui font plusieurs sinistrés et des pertes en vies humaines.

2.6. Mode de transmission des connaissances

La transmission du savoir est un processus primordial dans la pérennisation des acquis et du savoir-vivre dans toute société. A l'image d'une course de relais, la pérennisation des connaissances nécessite un bon passage de témoin d'une génération à une autre. Il est malséant de briser le lien des acquis d'une génération à une autre. Abondant dans ce sens (Pliya, 1987) dira dans les tresseurs de corde : « C'est au bout de l'ancienne corde qu'on tisse la nouvelle ». Il urge donc que l'ancienne génération puisse transmettre les connaissances acquises à la génération présente qui à son tour se chargera de les transmettre à la génération future. De tous les canaux de transmission, celui de l'oralité est resté primordial en Afrique notamment en pays Mina dans les communes de Comé et de Grand-Popo. Ainsi, dans ces localités, les connaissances endogènes sont transmises de bouche à oreille et au cœur de ce mécanisme se trouvent les personnes âgées qui sont détentrices du savoir.

Malheureusement, ce transfert de connaissances ne se fait ni complètement ni fidèlement soit parce que les personnes âgées meurent sans avoir légué tous les acquis à leurs progénitures ou parce que lors du transfert certaines données sont léguées avec des modifications d'une personne à une autre. Ainsi, il apparaît clairement que chaque fois qu'une personne âgée meurt en Afrique, c'est toute une série de connaissances qui se perd. C'est donc à juste titre que (Hampate Ba, 1995) affirme : « Un vieillard qui meurt en Afrique est une bibliothèque qui brûle ». En Afrique, la transmission des connaissances par écrit faisant défaut, le vieillard qui par expérience a acquis les connaissances est considéré comme une source irréfutable de savoirs.

2.7. Stratégies d'adaptation des populations paysannes aux phénomènes hydro-climatiques

Les populations pour faire face aux contraintes climatiques, ont développé des stratégies visant à atténuer les effets des phénomènes hydro-climatiques.

✓ stratégies d'adaptation aux inondations

Pour réduire les effets néfastes des inondations, les populations font des rigoles dans les maisons et autour des cases pour évacuer l'eau. Elles font aussi le choix des terrains situés en altitude pour la construction de leurs maisons. Les paysans construisent également des chambres en matériaux définitifs ou semi- définitifs auxquelles ils prévoient des terrasses pour éviter que leurs chambres ne s'écroulent sous l'effet de l'inondation. En plus, ils élèvent la devanture de leurs maisons par des escaliers pour éviter que la stagnation de l'eau. A tous cela s'ajoute, le reboisement des berges des cours d'eau par les populations riveraines afin de réduire le débordement des eaux de leur lit.

✓ Stratégies d'adaptation à la sécheresse

Pour lutter contre la sécheresse, les populations disposent de très peu de stratégies. Cependant, grâce à la journée mondiale de l'arbre, tous les 1^{er} juin, les autorités communales et les populations plantent des arbres. 70 % des ménages enquêtés ont affirmé que ce sont les arbres plantés dans leur maison qui leur permettent de résister à la sécheresse, car pendant cette période de chaleur, ils abandonnent leurs chambres pour rester à l'ombre des arbres. Pour atténuer les effets de la chaleur, 22% des interviewés affirment avoir construit des pailotes pouvant leur permettre de se reposer en dehors de leur chambre.

✓ Stratégies d'adaptation à l'érosion

Pour éviter les méfaits de l'érosion, les populations prennent pour plusieurs dispositions. Elles renforcent la fondation des maisons ; ce qui augmente la résistance de ces maisons face à l'érosion. De même des ponts de fortunes (photo5b) sont érigés par les populations pour joindre deux points situés de part et d'autre des fossés créés par l'érosion. Les populations, dans le souci de canaliser l'eau et de diminuer les effets de l'érosion, remplissent de sable les sacs de 100 kilogrammes, disposent des briques qui leur servent de digues et des branchages qui leur servent de ponts de fortune.

✓ Stratégies d'adaptation aux vents violents

Les populations, plusieurs fois victimes des vents violents, ont acquis certaines connaissances endogènes dont ils se servent aujourd'hui pour lutter contre les effets néfastes de ces vents dévastateurs. Ainsi, pour construire leurs maisons, les paysans se basent sur la direction du vent. Les maisons sont donc construites suivant une direction parallèle à celle du vent de sorte que les toitures des maisons n'y sont plus exposées. Aussi, constate-t-on que les populations préfèrent utiliser les

tuiles (photos 6a et 6b) au lieu des tôles pour coiffer leur maisons, car selon elles, les tuiles sont non seulement plus résistantes à la rouille mais aussi et surtout à la dévastation des vents violents. Quelques fois aussi, les populations changent la toiture de leurs maisons quand celle-ci devient vétuste pour éviter que les vents violents les emportent.

Conclusion

Au terme de cette recherche, il faut retenir que l'évaluation endogène des phénomènes hydro-climatiques par les Mina dans les communes de Comé et de Grand-Popo entre dans la dynamique de la collaboration entre les connaissances paysannes et les réalités scientifiques. Au terme de cette recherche, il convient de noter que les Mina sont détenteurs de certains savoirs en matière de phénomènes hydro-climatiques. Aussi est-il important de souligner que la conformité entre les années repères d'apparition de l'inondation et de la sécheresse par les enquêtés et les réalités climatiques dénote de la concordance entre ces savoirs locaux et les connaissances scientifiques.

Bibliographie

- [1] Akindélé A., (2009) - *Interprétation socio-anthropologiques des indicateurs environnementaux de la dynamique du climat dans le département du plateau, Mémoire de maîtrise de Géographie, UAC/FLASH/DGAT, 65p.*
- [2] Alamou A.(2011)-Perception des phénomènes hydro-climatique en milieu Nagot dans la commune de Ouèssè, Mémoire de Maîtrise, FLASH/UAC, 93 p.
- [3] Amoussou E., (2010)- Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest) Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 313 p.
- [4] Boko M. (1988) : *Climat et communautés rurales du Bénin : Rythme climatique et rythme de développement, Thèse d'Etat ès-lettres 2 volumes, Dijon, 607p.*
- [5] Hampateba A.(1995):Aspects de la civilisation africaine ,présence africaine, Paris, 139 p.
- [6] Khaly, S. (2011)- "Rites, mythes et symboles dans la lutte traditionnelle sénégalaise. Approche socio-anthropologique." *Présence Africaine* 1 149-163pp
- [7] MEPN, (2008) - Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature : *Programme d'Action National d'Adaptation aux changements climatiques au Bénin (PANA-Bénin), 81p.*
- [8] Metonou J., (2013) - *Perception des phénomènes hydro-climatiques en pays Mina sur les plateaux de Comé et de Grand-Popo, Mémoire de maîtrise de Géographie, UAC/FLASH/DGAT, 76p.*
- [9] PERARD J., (1992)- Orages au Bénin. Modèle scientifique, modèle traditionnel. Cahier du Centre de recherche de Climatologie, n° 14. URA 909 du CNRS. Université de Bourgogne, Dijon. Pp 33-40.
- [10] Pliya J. (1987)-Les tresseurs de corde, Edition Hatier, 6^e Edition, Inde, 1987, 240p.
- [11] Veyret Y. et Chocat B., (2005)- *Les mégapoles face aux risques et aux catastrophes naturelles, notion de vulnérabilité [en ligne], consulté le 10/06/2011. URL : [http : //www. ecosysteme.vulnerability.htm](http://www.ecosysteme.vulnerability.htm)*

Simulation de la dynamique de l'eau et des sels dans une région semi-aride en Tunisie – Etude de l'effet d'un changement climatique

Sabri Kanzari

Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts, 17 rue Hédi Karray BP n°10 Ariana
2080 Tunisie, sabri.kanzari@gmail.com

Résumé

Une étude du mouvement de l'eau et du transfert des sels a été menée dans une parcelle au Sud de Kairouan dans la Tunisie Centrale. Le suivi jusqu'à 4 m de profondeur de la dynamique de l'eau a été réalisée par des sondes TDR et celui des sels par des prélèvements d'échantillons de sol (Avril 2006 – Juillet 2008). Les profils hydriques et salins mettent en évidence le rôle d'une couche argilo-limoneuse dans l'infiltration de l'eau et le transfert des sels. Cette couche réduit l'entraînement des sels mais ne les arrête pas ce qui augmente le risque de salinisation de l'aquifère. Ces processus sont simulés à l'aide du code HYDRUS-1D avec sucées à court et à moyen terme. L'effet d'un évènement très pluvieux (>50 mm/j) sur la dynamique des sels a été étudié. Ce type d'évènement permet le lessivage d'une importante quantité de sels accumulés auparavant dans la zone arable et favorise leur entraînement en profondeur ce qui réduit le risque de salinisation du sol mais augmente celui de l'aquifère.

Mots clés : salinisation, sol, aquifère, Tunisie

Simulation of water and salts dynamics in a semi arid region of Tunisia – Effect of climate change

Abstract

A study of the movement of water and salt transfer was carried out in a parcel in the South of Kairouan. The monitoring up to 4 m of water dynamic was carried out by TDR probes that and of salts by soil sampling (April 2006 - July 2008). Water and salt profiles highlight the role of a silty clay layer in the infiltration of water and salt transfer. This layer reduces salt's training but do not stop it which increases the risk of the aquifer salinization. The simulation was carried out successfully by HYDRUS- in the short and the medium term. It allowed the analysis of the effect of a very rainy event (> 50 mm/d) on the dynamics of salts. This type of event allows the leaching of the accumulated salts in the topsoil which promotes their burial in depth. This reduces the risk of salinization of soil but increases that of the aquifer.

Key Words: salinization, soil, aquifer, Tunisia

Introduction

Dans les régions arides et semi arides, l'irrigation est le facteur déterminant de l'intensification agricole. Cette intensification s'est accompagnée par l'extension des surfaces irriguées. Cependant, cette opération a induit l'anthropisation des milieux et l'endoreisation des bassins hydro-pédologiques. Ceci est d'autant plus grave, que l'eau employée est généralement chargée en sels ce qui a conduit selon à la salinisation à court terme, de la couche arable du sol et de la zone racinaire et à long terme, de l'aquifère par entraînement progressif des sels de la couche arable au sous sol et enfin vers la nappe [1]. Ces aspects s'expriment fortement dans la Tunisie centrale et plus particulièrement dans la région de Bou Hajla dans la plaine de Kairouan, caractérisée par une forte pression sur les ressources en eau souterraine et en sols et par des eaux peu aptes à l'irrigation avec un résidu sec de 6 g/l. Afin d'évaluer ces risques de salinisation des sols et de l'aquifère, on a recours à la modélisation qui permet en plus de l'amélioration des connaissances sur les processus à travers la simulation du mouvement des sels de la zone non saturée vers l'aquifère, de prédire l'évolution à long terme de la salinité et de concevoir des scénarios de gestion durable [2,3].

I. Matériel et méthodes

L'étude a été réalisée dans une parcelle située dans le contexte semi-aride de la Tunisie centrale et caractérisée par des sols salés et des nappes vulnérables à la salinisation. La parcelle est irriguée par l'eau d'un puits de surface de 6 m de profondeur. L'eau du puits est à 6,5 g/L, soit environ 7,5 dS/m. Une batterie de 7 sondes TDR (Soil Moisture Corp.) a été installée depuis la surface jusqu'à 4 m de profondeur permettant le suivi de la teneur en eau du sol. La salinité du sol a été déterminée à partir de quatre prélèvements de sol : 26/12/06, 20/02/07, 08/05/07 et 22/07/08. Un apport d'eau du puits de 140 mm a été effectué par submersion le 22/07/08. Le suivi de l'évolution du profil hydrique a été assuré par les sondes TDR et par des prélèvements du sol avant l'apport d'eau et un jour, deux jours et dix jours après cet apport. Sur les échantillons prélevés, l'humidité du sol a été déterminée par la méthode gravimétrique et la salinité du sol sur l'extrait dilué du sol (rapport sol/eau = 1/5) reconverties ensuite en conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée (CEe) par une corrélation déterminée préalablement. Chaque analyse a été répétée trois fois. Enfin, une station métrologique a permis le suivi des paramètres climatiques.

La dynamique de l'eau et des sels a été simulée à l'aide du modèle Hydrus-1D [4] qui permet la modélisation numérique du mouvement de l'eau par la résolution de l'équation de Richards et celle du transport des solutés par la résolution de l'équation d'advection-dispersion. Les conditions à la limite supérieure du profil de sol correspondent aux apports en eau par irrigation et par les pluies ont été spécifiés ainsi que l'évaporation potentielle qui est calculée à partir des données climatiques. La limite inférieure est celle d'un drainage libre. Pour le transport des solutés, les conditions aux limites sont du type d'une concentration de flux. Les paramètres d'entrée du modèle ont été déterminés comme suit :

- les paramètres hydrodynamiques : la densité apparente (D_a) a été déterminée sur des échantillons de sol reconstitués au laboratoire pour chaque 30 cm par la méthode des cylindres et la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) a été évaluée sur les mêmes échantillons par la méthode de Müntz à charge fixe. Les relations $\theta(h)/K(h)$ ont été établies à partir de monolithes de sols pour chaque couche de 30 cm en ajustant les valeurs de l'humidité et de la tension d'eau sur les équations de van Genuchten et Mualem grâce au logiciel RETC [5] qui permet de fournir les paramètres : θ_r , θ_s , K_{sat} , α et n .
- les paramètres de transport des solutés : coefficient de dispersion (Disp) et coefficient de diffusion moléculaire (D_w) proviennent de la littérature [6]. Le coefficient d'adsorption (K_d) des sels contenus dans l'eau du puits a été déterminé par des essais Batch à l'équilibre pour les différentes couches.

Quatre indices statistiques ont été calculés pour l'évaluation des résultats du modèle. Il s'agit de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), du coefficient de détermination (CD), de l'efficacité de modélisation (EF) et du coefficient de masse résiduelle (CRM). Les valeurs de RMSE, CRM, CD, EF doivent être égales respectivement à 0, 0, 1 et 1 pour une parfaite adéquation entre les valeurs mesurées et celles simulées [7].

2. Résultats et discussion

2.1. Caractérisation du mouvement de l'eau et du transfert des sels

Les profils hydriques au cours de l'essai d'irrigation mettent en évidence 4 niveaux de variation de la teneur en eau :

- une couche limono-sableuse de surface (entre 0 et 0,7 m de profondeur) se sature au bout de 15 mn après l'apport d'eau. Elle subit ensuite un dessèchement rapide.
 - une couche située vers 1 m de profondeur, de même texture que la précédente, constitue un premier plan de flux nul.
 - vers 2 m, une couche limono-argileuse atteint la saturation après 24 h du début de l'essai. Elle se dessèche progressivement par la suite.
 - une couche située vers 3 m de profondeur sablo-limoneuse et assez perméable, constitue un second plan de flux nul.
- Nous pouvons alors concevoir que l'eau, contrôlée par l'état de la surface du sol et la texture sablo-limoneuse, s'infiltrer très rapidement. La couche limono-argileuse située vers 2 m joue un rôle modérateur de l'infiltration de l'eau. La couche sablo-limoneuse située en-dessous joue alors un rôle accélérateur qui se manifeste par l'infiltration profonde de l'eau.

La variation de la concentration en sels au cours de l'essai d'irrigation montre un certain équilibre entre la salinité du sol et celle de l'eau d'irrigation variant autour de 7,5 dS/m depuis la surface et jusqu'à 1 m de profondeur. Vers 2 m de profondeur, la salinité atteint des valeurs supérieures à 20 dS/m ; cela coïncide avec la couche peu perméable à texture fine. En dessous, la salinité baisse puis augmente de nouveau vers 4 m.

2.2. Simulation du mouvement de l'eau et du transfert des sels

La simulation à court terme de l'essai d'irrigation a été effectuée avec un pas de temps journalier pour une durée totale de 10 jours. Le domaine géométrique modélisé est de 4 m de profondeur divisé en 13 couches de 30 cm. Les conditions initiales ont été introduites en termes d'humidité volumique et de conductivité électrique. Les paramètres hydrodynamiques mesurés montrent une stratification des couches ayant des valeurs de porosités et de perméabilités différentes. Les isothermes d'adsorption présentent aussi cette distinction en couches ce qui montre une hétérogénéité d'adsorption des sels. Ces isothermes s'ajustent mieux sur le modèle linéaire. Les valeurs du coefficient d'adsorption K_d obtenues sont introduites comme paramètres d'entrée dans le modèle. Au cours de l'essai d'infiltration, l'eau du puits utilisée avait une conductivité électrique de 7,5 dS/m. Lors du calage du modèle, le paramètre α a été ajusté à une valeur de 0,03 pour les sept premières couches ainsi que le paramètre $Disp$ et K_d .

Les profils hydriques et salins à 10 jours, simulés correspondent à ceux mesurés. Les valeurs des indices statistiques RMSE (%), CD, EF et CRM calculées pour cette date de sortie sont respectivement 3,21, 0,93, 0,99 et 0,01 pour les profils hydriques et 15,4, 1,05, 0,97 et -0,01 pour les profils salins. Elles sont proches de leurs valeurs optimales montrant ainsi la fiabilité du modèle pour la reproduction du mouvement de l'eau et du transfert des sels à court terme. La simulation à moyen terme s'est déroulée sur une durée de 577 jours. Les mêmes paramètres d'entrée ont été utilisés pour la simulation à court terme sauf pour les conditions initiales et les conditions à la limite supérieure où les valeurs journalières d'évaporation et des pluies ont été introduites. Lors du calage du modèle, les paramètres n et K_d ont été ajustés. Les profils hydriques et salins simulés pour le 577ième jour sont relativement proches de ceux mesurés. Ce résultat est confirmé par les indices statistiques RMSE (%), CD, EF et CRM dont les valeurs sont respectivement 26,92, 0,84, 0,60 et 0,01 pour les profils hydriques et 14,76, 1,06, 0,98 et - 0,03 pour les profils salins.

Une pluie exceptionnelle de 50 mm/j est survenue le 74ème jour de la période simulée. Pour analyser l'effet de ce genre d'évènement, un scénario a été testé. Les mêmes fichiers d'entrée du modèle ont été utilisés sauf au niveau de la condition à la limite supérieure où cet évènement pluvieux a été supprimé. Cela s'est traduit par une diminution considérable du stock en eau dans la zone non saturée d'environ 35 mm par rapport au stock obtenu avec cette pluie. Les profils salins simulés sans cet évènement pluvieux montrent une absence totale du lessivage des sels (Figure 5). Ce résultat met en évidence le rôle régulateur de ce genre d'évènement très pluvieux sur le lessivage des sels et sur l'alimentation en eau des aquifères.

Conclusion

La caractérisation de la dynamique de l'eau des sels en profondeur met en évidence la réponse du sol face aux épisodes d'infiltration importante. Le résultat dépend du climat qui influence la demande évaporatoire du sol. Cet effet du climat est perceptible même dans les couches profondes (>3 m) mais surtout vers 2 m où une couche argileuse est intercalée entre des matériaux sablo-limoneux. Cette couche semble jouer un rôle important dans le mouvement de l'eau et le transfert des sels. En effet, les profils salins montrent la réversibilité de la salinisation en surface et l'accumulation des sels au niveau de la couche argileuse. Cette couche réduit le transfert des sels vers l'aquifère. L'application du modèle HYDRUS-ID a permis de bien reproduire les processus d'écoulement et de transfert de sels à court et à moyen terme. Les valeurs obtenues des RMSE, CD, EF et CRM traduisent la validation du modèle. L'effet des pluies torrentielles caractéristiques des milieux semi-arides a été évalué. Ce type d'évènement climatique alimente considérablement le sol en eau et entraîne d'importantes quantités de sels vers les couches profondes réduisant la salinisation du sol mais augmentant le risque de salinisation de l'aquifère.

Références

- [1] A. Mhiri, J. Tarhouni, F. Lebdi, Approche systématique des risques de salinisation par endoréisme anthropique, Revue d'Etude et Gestion des sols, 5 (1998) 257-268.
- [2] E. Milnes, Modeling groundwater salinization in irrigated coastal areas: from solute recycling concepts to quantitative risk assessment. PhD Thesis, Faculty of Sc. at the Univ. of Neuchâtel 2005.
- [3] M.C. Gonçalves, J. Simunek, T.B. Ramos, J.C. Martins, M.J. Neves, F.P. Pires, Multicomponent solute transport in soil lysimeters irrigated with waters of different quality, Water Resources Review, (2006) 42-17.
- [4] J. Simunek, K. Huang, M. Sejna, M.T. van Genuchten, The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably - saturated media. Inter. ground water model, Center Colorado Sch. of Mines, Golden Colorado 2005.
- [5] M.T. van Genuchten, F.T. Leij, S.R. Yates, The RETC Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. U.S. Depart. of Agri., Agri. Res. Service Riverside 1991.
- [6] J. Vanderbroght, H. Vereecken, Review of Dispersivities for Transport Modeling in Soils. Vadose Zone Journal, 6 (2007) 29-52.
- [7] R. Hagi-Bishow, B. Bonell, Assessment of LEACHM-C Model for semi-arid saline irrigation. ICID Journal, 49 (2000) 29-42.

Estimation du bilan en eau et carbone en Tunisie septentrionale en adoptant le modèle de cycle biogéochimique CASA

Khaoula Melki¹, Nahla Béji Okez¹, Florent Mouillot², Zoubeida Bargaoui¹

¹ Université de Tunis El Manar, Laboratoire de modélisation en Hydraulique et Environnement (LMHE), ENIT, Campus Universitaire, BP 37 1002 Tunis, Tunisie

² Institut de Recherche pour le Développement IRD UR060 CEFE/CNRS (DREAM) 1919 Route de Mende, 34293 Montpellier Cedex 5, France

Résumé

L'objectif de ce travail est de proposer une estimation du bilan en eau et carbone en Tunisie septentrionale en adoptant un modèle de cycle biogéochimique CASA (Carnegie Ames Stanford Approach) [1]. CASA est un modèle spatialement explicite qui utilise comme variables d'entrée une représentation spatiale de plusieurs variables climatiques, ainsi que les informations cartographiques de types de végétation, d'indice foliaire et de pédologie. Les variables climatiques contrôlant les processus sont la température de l'air, le rayonnement solaire global et la pluviométrie que nous considérons à l'échelle mensuelle, interpolées régionalement à 1 km de résolution à l'aide de Spline en plaques minces. La texture du sol, le LAI mensuel et les types de formation végétale constituent des paramètres physiques introduits dans le modèle et estimés hors modèle. Comme principal résultat, le modèle CASA simule des valeurs spatialisées des facteurs de stress thermique et hydrique, principaux contrôles des flux de carbone. Le carbone est calculé et validé sous trois formes : le bilan des flux de photosynthèse et respiration (NPP), le stock de carbone dans l'écosystème forestier (bois et feuilles) et le carbone stocké dans le sol en utilisant des informations de terrain issues de l'inventaire forestier national Tunisien (DGF) et de la carte des sols (Direction générale des sols). Suite à cette approche, l'évapotranspiration réelle des forêts de Chêne liège et de Pin d'Alep a été respectivement estimée à 800 et 850 mm/an en moyenne. D'autre part, le stock de carbone dans la biomasse des forêts de Chêne liège et de Pin d'Alep a été estimée à 600 gCm⁻²an⁻¹ pour chaque espèce alors que de stock de carbone dans le sol est évalué à 10000 gCm⁻². Ces estimations obtenues par modélisation sont comparables à celles obtenues par des approches quantitatives expérimentales rapportées dans la littérature. Cependant, pour l'écosystème Pin d'Alep du centre Tunisien semi aride, le carbone dans le bois, estimé à 2300 gCm⁻², dépasse les estimations présentées par l'inventaire forestier du Ministère de l'Agriculture alors que l'estimation de la moyenne annuelle de biomasse de bois est comparable pour les forêts de chênes liège (2900 gCm⁻²).

Mots-clés : échanges atmosphère-sol, bilan hydrique, Carbone, CASA, modélisation.

Estimation of the water balance and carbon in northern Tunisia by adopting a model of biogeochemical cycling CASA

Abstract

The objective of this work is to provide an estimation of the water balance and carbon in northern Tunisia by adopting a model of biogeochemical cycling CASA (Carnegie Ames Stanford Approach) [1]. The simulation of biogeochemical model depends on several climatic and soil variables. Climatic variables controlling the process are air temperature, global solar radiation and rainfall estimated using the monthly scale, and interpolated using spline functions. The soil texture and the vegetation constitute physical parameters and are introduced into the model and estimated out of the model. As a main result, the CASA model simulates spatial values of heat and drought stress, some key drivers of carbon flows. Carbon is calculated and validated in three forms; budget of carbon fluxes from photosynthesis and respiration (NPP), carbon stocks (wood and leaves) and carbon stored in the soil. Accordingly, the actual evapotranspiration of cork oak forests and Aleppo pine is estimated respectively at 800 and 850 mm / year on average. On the other hand, the stock of carbon in forest biomass of cork oak and Aleppo pine was estimated at 600gCm⁻²an⁻¹ for each species, while the stock of carbon in the soil is estimated at 10000 gCm⁻². These model estimations are comparable to those obtained by experimental quantitative approaches reported in the literature. However, the stock of carbon in the wood in the Aleppo pine ecosystem of semi-arid Tunisian center which is estimated at 2300 gCm⁻² exceeds the estimation provided by the forest inventory of the Ministry of Agriculture, while estimations are comparable regarding average annual wood biomass for cork oak forests (2900 gCm⁻²).

Keywords: soil-atmosphere exchange, water balance, carbon, CASA, modeling.

Introduction

Le cycle du Carbone sur Terre fait intervenir trois réservoirs: l'atmosphère, l'océan et le stock de calcaire (roche principale constituant le stock de carbone de la croûte terrestre). Les forêts jouent un rôle important dans le cycle du carbone et dans le système climatique. L'activité de photosynthèse de la végétation absorbe en effet une part du CO₂ atmosphérique et le stock sous forme de biomasse. Le CO₂ est produit lors de la respiration des végétaux ainsi que des animaux et lors de la fermentation aérobie ou de la combustion de composés organiques (feux de forêts par exemple). Mais la photosynthèse des végétaux piège beaucoup plus de CO₂ que leur respiration n'en produit. On trouve une évaluation des éléments du cycle du carbone faite aux USA faite en 2012 [2]. En 2003, une étude avait estimé la production primaire nette globale (NPP), qui représente la quantité d'énergie produite par les végétaux par photosynthèse moins la quantité perdue par respiration en utilisant l'imagerie satellitaire et les observations climatiques au sol. Pour la période 1982 – 1999, ils ont conclu à un accroissement global de 6% (soit 3.4 milliards de tonnes de carbone sur la période de 18 ans) dont 80% provient des écosystèmes de la zone tropicale. Récemment, le carbone absorbé par les forêts a été estimé à partir d'inventaires de biomasse à l'échelle du globe pour la période 1990 -2007 dans une étude concernant les principales forêts de la planète [3]. La quantité absorbée est estimée à 2.4 milliards de tonnes de carbone à l'échelle du globe, représentant environ le tiers des rejets de CO₂ fossile (<http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu2228.htm>). L'Afrique du Nord, à laquelle appartient notre région d'étude, ne fait pas partie des régions investiguées par Pan et al. [2], d'où l'intérêt d'étudier en combinant la modélisation et les résultats d'inventaires forestiers, le cycle du carbone en zone forestière en Tunisie. Les modèles dynamiques évaluant les échanges biosphère-atmosphère dont les flux de chaleur latente et flux de Carbone présent, en effet, un intérêt certain pour le suivi des écosystèmes. Le modèle BIOME-BGC figure parmi les plus anciens et a été modifié à plusieurs reprises pour prendre en compte les effets d'échelle spatiale des processus [4].

Nous utiliserons dans ce travail le modèle CASA Carnegie Ames Stanford Approach [1], [5] est un modèle d'échange biosphère-atmosphère qui simule le bilan hydrique et les flux de carbone. Il est composé de 3 sous-modèles : un sous-modèle pour calculer l'humidité du sol et les indices de stress dérivés, un second pour calculer les flux de Carbone dans la végétation, un troisième pour le stockage du carbone et l'estimation des flux de respiration dans le sol.

Notre étude a pour objectifs d'utiliser le modèle de cycles biogéochimiques (eau et carbone) CASA afin d'estimer les flux de carbone de écosystèmes forestiers situés en Tunisie septentrionale et centrale, sous climat subhumide et semi- aride. La section suivante présente les données climatiques et d'inventaire forestier disponibles. Ensuite la méthodologie est développée sur deux parties à savoir la mise en forme des données climatiques entrées du modèle puis l'ajustement du modèle. Enfin, les résultats sont présentés en mettant l'accent sur l'estimation de l'évapotranspiration réelle et sur les flux et stocks de carbone pour deux écosystèmes particuliers : le chêne liège et le pin d'Alep.

I. Données d'étude

La région d'étude (8.5 – 12.5°E, 32-37°N), concerne la zone forestière de la Tunisie, au Nord et au Centre. La zone est bordée au Nord et à l'Est par la Méditerranée et au Sud par l'Atlas.

I.1. Données topographiques et édaphiques

Les informations topographiques sont issues du modèle numérique de terrain ASTER GDEM v2 à 30 m ré-échantillonné à 1 km. L'occupation du sol contrôlant les principaux flux de transpiration de la végétation est issue de l'Inventaire Forestier Tunisien IFT [6]. Nous avons retenu cinq principales espèces forestières : (1) *Quercus suber*, (2) *Pinus halepensis*, (3) *Pinus pinaster* [7], (4) les zones de buissons maquis/garrigue, les zones herbacées et (5) les zones de culture comme principales composantes. Leurs couverts respectifs ont été restitués à partir d'une représentation à 1 km de résolution. La carte pédologique de Tunisie à l'échelle 1/500.000 a permis de déterminer les sols et d'y associer une profondeur et une texture en vue d'une estimation de la capacité au champ et du point de flétrissement, paramètres utilisés dans le modèle CASA.

I.2. Données climatologiques

Les données pluviométriques proviennent de 45 stations appartenant au réseau climatique de l'Institut National de la Météorologie (www.meteo.tn) ainsi que de stations pluviométriques de la Direction générale des ressources en eau (DGRE) (<http://www.semide.tn>) du Ministère de l'Agriculture. Les stations pluviométriques retenues pour l'étude sont sans lacunes pour la période 1986-2005, qui est la période d'étude de 20 ans adoptée dans ce travail. Pour la température moyenne mensuelle de l'air, les séries portent sur neuf stations (Béja, Jendouba, Siliana, Bizerte, Tabarka, Tunis Carthage, Kairouan, Kasserine, Le Kef) pour la même période de 20 ans (1986-2005). Des données sur la durée d'insolation mensuelle sont disponibles pour cinq stations (Béja, Jendouba, Siliana, Bizerte, Tabarka) et permettront l'évaluation du rayonnement global mensuel sur la période de 20 ans (1986-2005). Il s'agit du réseau d'observation climatique tel qu'il existe en Tunisie. Nous avons utilisé l'ensemble des données disponibles. Ainsi, la densité du réseau pluviométrique est 5 à 7 fois plus

importante que celle des réseaux de température et de durée d'insolation dans notre cas d'étude, ce qui est assez courant en pratique. Ces variables présentent en effet des échelles de variabilité spatiales différentes que la densité du réseau reflète partiellement.

1.3. Données sur le carbone

L'estimation de la quantité de carbone stockée dans le bois (CSB) utilise le volume du bois sur pieds (m^3ha^{-1}) et la densité volumique du bois (gcm^{-3}). L'Inventaire Forestier National (IFN) de 2010 donne ces caractéristiques pour les forêts chênes lièges et pin d'Alep pour les gouvernorats de Jendouba et Kasserine où ces espèces sont les plus présentes. Ces données sont relatives aux forêts de chêne liège de la région de Tabarka (Gouvernorat de Jendouba) et aux forêts de Pin d'Alep du gouvernorat de Kasserine en général (Centre Ouest) [8].

2. Méthodologie

La méthodologie consiste en deux parties : la première concerne l'élaboration des données climatiques d'entrée du modèle CASA en procédant à leur interpolation spatiale, avec une précision acceptable, en vue de leur cartographie. La deuxième partie concerne le calage du modèle CASA et sa validation. Tout d'abord, les variables climatiques d'entrée du modèle à savoir le rayonnement solaire global, la température moyenne de l'air et la pluviométrie sont cartographiées. La qualité des cartes résultantes est évaluée en utilisant une approche par validation croisée (cross-validation). L'actualisation du contenu en eau du sol W au cours du temps (au pas mensuel) assume que si sur un mois fixé $ETP > P$, un taux d'assèchement relatif RDR se produit selon une fonction non linéaire introduisant deux paramètres α et β dépendant de la texture du sol. Pour la prédiction de l'humidité du sol, le modèle adopte un réservoir unique représentant le sol. Les entrées sont la température moyenne mensuelle de l'air T , le rayonnement global moyen mensuel, la précipitation mensuelle P et l'évapotranspiration potentielle ETP estimé selon le modèle de Thornthwaite (1948) [9]. Le modèle de bilan hydrique dans CASA est contraint par deux paramètres : la capacité au champ et le point de flétrissement, tous deux évalués en fonction de la texture du sol (pourcentages de sable, limon, argile, matière organique). Les paramètres de porosité du sol, et les paramètres de la courbe de rétention pression-teneur en eau sont estimés dans le modèle en fonction de la texture. Le modèle de Saxton et al. (1986) est utilisé pour les courbes de rétention [10].

3. Résultats

3.1. Variabilité spatiale des variables climatiques

D'après le corrélogramme des pluies mensuelles pour la période de 1986 à 2005, La décroissance en fonction de la distance est faible jusqu'à une interdistance de 70 km puis elle s'accélère. Une distance de 95 km a été adoptée comme distance critique de voisinage. Au-delà il est supposé que les stations sont décorréliées. Cette distance est calculée comme la médiane des distances pour lesquelles le coefficient de corrélation est estimé à 0.6.

Pour les températures de l'air corrigées par rapport à l'altitude en considérant un gradient de $6.6\text{ }^{\circ}C$ par 1000 m d'altitude [11], la décroissance du corrélogramme est très lente et sa concavité est vers le bas. A l'interdistance 250 km, le coefficient de corrélation est encore autour de 0.96, ce qui montre bien la différence de variabilité entre les deux phénomènes, pluie mensuelle et température moyenne mensuelle de l'air. Pour le rayonnement global, la décroissance du corrélogramme est très lente et sa concavité est aussi vers le bas. A l'inter-distance 140 km, le coefficient de corrélation est encore autour de 0.97. Ainsi il apparaît que les distances de décorrélation sont de 95 km pour les pluies mensuelles, 140 km pour le rayonnement global mensuel et 250 km pour les anomalies de températures moyennes mensuelles par rapport au gradient d'altitude. Ces résultats suggèrent que le gradient spatial du rayonnement global est plus fort que celui des températures moyennes. Paradoxalement, le réseau d'étude de l'insolation est moins dense que celui des thermographes. Pour y remédier, il faudrait intensifier le réseau de solarimètres ou d'héliographes.

3.2. Performance des interpolations estimée par validation croisée

La validation croisée consiste à éliminer une station et comparer la valeur estimée à la valeur observée sur les 20 ans d'observation pour les 12 mois de l'année. Ce principe est répété pour toutes les stations d'où le calcul d'un coefficient de corrélation entre les valeurs estimées et observées de toutes les stations fictivement enlevées. Il faut vérifier que le nuage des points composé des données interpolées et observées est bien réparti autour de la première bissectrice et que le coefficient de corrélation multiple du nuage de points soit significatif.

Par exemple, la reproduction de température de l'air par la méthode de Spline en Plaque Mince pour le cas de deux stations : Tunis Carthage et Béja qui sont restituées avec des coefficients de corrélation multiple R^2 supérieurs à 0.9, ce qui représente un très bon score. On en déduit que pour la température de l'air, la méthode d'interpolation est fiable.

La validation croisée donne de bonne qualité des reconstitutions du rayonnement global. On compare le rayonnement global calculé à partir de l'observation de la durée d'insolation (rayonnement global « enregistré ») à celui calculé par validation croisée pour chaque station sur 20 ans et pour les 12 mois de l'année. Par exemple, pour les stations de Bizerte

et Jendouba, une reconstitution des valeurs observées du rayonnement global mensuel jugée acceptable est obtenue avec des coefficients de corrélation multiple supérieurs à 0.9 bien que quelques mois soient restitués avec une forte erreur (pour Jendouba).

La validation des précipitations par la méthode de Spline en Plaque Minces s'avère plus problématique. En effet, les coefficients de corrélation multiple R^2 résultant de l'application de la méthode de validation croisée pour la pluviométrie varient entre 0.2 et 0.6, ce qui reste insuffisant. Les coefficients de corrélation la station de Béja INRAT est acceptable et celle de Tabarka forêt est faible (avec une sous-estimation de la pluie). La validation de la méthode spline est faible à moyenne, peut-être à cause d'une densité insuffisante du réseau d'observation vis-à-vis de la variabilité du champ de la pluie. Il est également possible que la méthode Spline soit inadéquate dans ce cas et qu'il soit nécessaire d'utiliser d'autres méthodes (comme inverse des distances ou krigeage). Le nombre de points aberrants (c'est-à-dire ayant une erreur de validation trop forte) est important dans le cas de la pluviométrie contrairement au cas des autres variables. Il est possible aussi que les erreurs de mesure soient plus fortes pour le réseau pluviométrique. En tous cas, ceci reste une piste d'amélioration du modèle.

3.3. Cartes régionales interpolées

Les cartes mensuelles pour les trois variables à la résolution de 1 km ont permis de générer l'ETR en chaque point de grille. Puis la simulation du contenu en eau du sol en continu par le modèle CASA en partant d'une humidité initiale à la capacité au champ, a conduit à l'estimation de l'ETR moyenné sur 20 ans. Les estimations d'ETR et celles de travaux d'Allard en 2008 sont très similaires. Le stress hydrique calculé reflète la variabilité spatio-temporelle estimée par un autre modèle de bilan hydrique journalier dans la forêt de chêne liège de Kroumirie [12].

Les paramètres par défaut dans le modèle sont; T_{opt} , la température la plus optimale pour la photosynthèse et est égale à 20°C, W_p , est le point de flétrissement. C'est le seuil au dessous duquel la plante se fane. W_p est pris égal à 80 mm et SS_c , la capacité de stockage en eau du sol qui est égale à 250 mm.

Q_{10} est l'effet de la température de sol sur le flux de respiration de ce dernier. $W_p = 80$ mm et $SS_c = 250$ mm sont les paramètres adoptés pour un sol superficiel calcaire en France. Ils sont pris uniformes sur tout le domaine d'étude. Il y a une hiérarchie dans les facteurs contrôlant les processus du cycle du carbone et ce sont principalement les facteurs climatiques et les indices de végétation (ici c'est LAI déduit de NDVI qui est le paramètre de végétation) qui représentent les plus importants facteurs. Ceci peut justifier notre hypothèse de prendre W_p et SS_c fixes sur tout le domaine d'étude. Les autres facteurs par ordre d'importance sont ceux liés à la végétation (LAI) [4]. Le modèle CASA démarre les simulations avec des stocks de carbone à 0 pour converger automatiquement vers des stocks d'équilibre qui dépendent des valeurs des paramètres du modèle. Nous avons procédé par essais et erreurs en ajustant les paramètres relatifs à la végétation tels que : Âge du bois et fraction de bois au dessus du sol, les paramètres du sol (constante de dégradation du carbone dans le sol) et d'efficacité énergétique (LUE_{max} , Q_{10}) ainsi que la période d'équilibre afin d'obtenir des moyennes interannuelles les plus proches possibles en terme de moyenne des estimations expérimentales.

Dans Potter et al. (1993), $Q_{10}=2$; $LUE_{max}=0,389$; $Annk_slow=0,2$; $Annk_armored=0,0045$. Pour l'âge du bois, c'est-à-dire l'âge moyen des forêts la valeur 75 ans est considéré dans Potter et al. (1993). D'autre part, la période d'équilibre (lorsque les flux de carbone entrants sont égaux aux flux sortants) par défaut est 300 ans mais cette période ne permet pas d'atteindre l'équilibre dans les simulations dans ce cas d'étude. Aussi, après plusieurs essais pour atteindre le stade d'équilibre, les paramètres ont été ajustés pour trouver des estimations des stocks de carbone dans différentes formes acceptables. Par exemple, l'augmentation de l'âge moyen du bois fait diminuer le stock de carbone dans le bois. Celle des paramètres de sol ($annk_slow$ et $armored$), fait diminuer le carbone dans le sol. LUE_{max} agit sur la NPP puisque selon Kumar et Monteith. (1981), l'augmentation de LUE_{max} fait que la production primaire nette augmente [13].

La période d'équilibre a été ajustée à 4000 ans car la période de 300 ans ne suffit qu'à équilibrer les stocks de biomasse. $Annk_slow$: Coefficient de dégradation du carbone en lente décomposition. $Annk_armored$: Coefficient de dégradation du carbone des cadavres des animaux. Pour Q_{10} nous avons obtenu 2.3 alors que Running et Hunt (1993) ont adopté 2.0 prise par défaut dans CASA dans leur étude qui intègre des conifères. Pour LUE_{max} , le modèle CASA adopte par défaut 0.39 [1] alors que nous avons retenu une valeur égale à 0.30.

3.4. Calage des flux de carbone estimés

Le calage du modèle consiste à vérifier si les résultats de simulations sont en accord avec des références expérimentales et bibliographiques se rapportant à des travaux dans le même contexte en Tunisie ou en région méditerranéenne. Nous avons utilisé notamment les travaux de Brahimi et al. 2010 se rapportant à une estimation du stock organique du sol Tunisien, le travail de Allard 2008 se rapportant à la variation saisonnière et annuelle de bilan du carbone à une forêt Sempervirent (à feuillage persistant) méditerranéenne dans Sud de la France et les résultats de l'Inventaire Forestier National Tunisien (IFN) de 2010 qui estime les biomasses de bois et feuilles des Chênes lièges et Pin d'Alep. Les estimations par le modèle CASA se trouvent dans la fourchette présentée par Allard 2008 [15]. A titre comparatif avec leur modèle,

Running et Hunt (1993) trouvent NPP égal à 3.7 kg/hect/an (c'est-à-dire 370 gCm²an⁻¹) pour les conifères dans la région du Montana sous 337 mm de pluie et 4232 MJ m² par an (c'est-à-dire 134 Wm⁻²) [4]. Le calcul de la quantité de carbone stocké dans le bois CSB s'effectue selon :

$$CSB = (VBP * DVB * 0.5) ; \text{Où } VBP : \text{volume du bois sur pieds (gcm}^{-3}\text{)} \text{ et } DVB : \text{Densité volumique du bois (m}^3\text{ha}^{-1}\text{)}$$

Où VBP et DVB sont données d'après l'IFN. Le stock de carbone dans la biomasse aérienne estimé par CASA est comparé à CSB calculé dans IFN,2010. Les valeurs de CSB sont comparables pour le Chêne liège (région de Tabarka). Elles sont très surestimées pour le Pin d'Alep (région de Kasserine), en supposant que les données de l'inventaire sont estimées avec la même précision pour les deux régions.

Pour vérifier l'estimation du carbone du sol, nous nous sommes reportés aux travaux de Brahim et al (2010) qui consistaient en une analyse de la base de données du carbone organique et de sol et à une estimation du stock de carbone pour la plupart des types des sols représentatifs de la zone Méditerranéenne. La comparaison est favorable entre les deux méthodes d'approche. [15]

Conclusion

CASA est un modèle qui a permis de simuler les stocks de carbone dans différents compartiments de la forêt de Chêne Liège et Pin d'Alep en Tunisie septentrionale. D'après la littérature, à partir des expérimentations d>Allard 2008, la production primaire nette varie entre 500 et 1000 gCm²an⁻¹ pour les forêts de chênes lièges et les Pin d'Alep ce qui est en harmonie avec la moyenne interannuelle simulée par cette étude qui est d'environ 600 gCm²an⁻¹ pour les deux types des forêts. Les estimations par CASA pour les forêts de chêne liège de Tabarka et les forêts de Pin d'Alep de Kasserine ont été comparées à celles publiées par la DGF 2010 (Direction générale des Forêts). Nous obtenons une moyenne annuelle de biomasse de bois égale à 2900 gCm⁻² pour les forêts de chênes liège du Nord qui se déploient sous un climat sub-humide méditerranéen. Cette estimation est validée par l'IFN 2010 (Inventaire Forestier Tunisie) qui propose une valeur de 2800 gCm⁻². Pour le système à Pin d'Alep du centre Tunisien, semi-aride, le carbone dans le bois estimé par CASA est égal à 2300 gCm⁻². Cette estimation surestime celle proposée par la DGF (1000 gCm⁻²), ce qui laisse ouverte la question et appelle à continuer cette recherche.

En effet, si cette première approche du bilan de Carbone à l'échelle régionale en Tunisie permet d'obtenir une cartographie à 1 km de résolution des principaux flux et stocks de carbone, ainsi que leur variabilité interannuelle, des mesures de terrain devraient maintenant venir compléter cette première approche pour une meilleure calibration du modèle. Le modèle CASA intègre aussi les processus de pâturage et de combustion qu'il faudrait prendre en considération, alors que ce n'était pas le cas dans cette étude.

References

- [1] Potter, C. S., Randerson, J. T., Field, C. B., Matson, P. A., Vitousek, P. M., Mooney, H. A., & Klooster, S. A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(4), (1993) 811–841.
- [2] Yose J. M., D. L. Peterson, and T. Patel-Weynand. Effects of Climatic Variability and Change on Forest. A Comprehensive Science Synthesis for the U.S. Forest Sector Ecosystems. USDA (2012).
- [3] Pan et al. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests, *Science* Vol. 333 no. 6045 (2011) pp. 988-993.
- [4] Running, S.W. et Hunt, E.R. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global scale models, Academic Press, Inc (1993).
- [5] Field, C. B., Randerson, J. T., & Malmstrom, C. M. Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51, (1995) 74–88.
- [6] Direction Générale des Forêts (DGF). Deuxième inventaire forestier et pastoral tunisien : inventaire des forêts par télédétection. Ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques, Tunisie (2005).
- [7] Ennajah A., Guibal F., Hanchi B., Mouillot F., Garchi S, croissance radiale du chêne liège et climats en Tunisie. *Sécheresse*. Vol. 21(1), (2010) p:34-41.
- [8] DGF, Deuxième inventaire forestier et pastoral national : Inventaire des forêts par télédétection : Résultats du deuxième inventaire forestier et pastoral national en Tunisie, (2010).
- [9] Thornthwaite C.W. An approach towards a rational classification of climates. *Geographical review*, 38:55-102. (1948).
- [10] Saxton, K., Rawls, W., JS, R., & Papendick, R. Estimating Generalized Soil Water characteristics from Texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 1031–1036. (1986).
- [11] Todd S. G. Glossary of Meteorology (2nd ed.). American Meteorological Society, Boston, (2000).
- [12] Chakroun H., Mouillot F., Nasr Z., Nouri M., Ennajah A., Ourcival JM. Performance of LAI MODIS and the influence on drought simulation in a Mediterranean forest. *Ecophysiology* DOI 10.1002/eco.1426. In press. (2014).
- [13] Kumar M., Monteith J., L. Remote sensing of crop growth in plants and the daylight spectrum, edited by Smith H, pp.133-144, Academic, San Diego, Calif, (1981).
- [14] Allard, Seasonal and annual variation of carbon exchange in an evergreen Mediterranean forest in southern France. *J Global Change Biology* 14, 714–725. (2008)
- [15] Brahim N., Bernoux M., Blavet D. and Gallali T. (2010) Tunisian Soil Organic Stocks. *International Journal of Soil Sciences* 5 (1): 34-40.

Prévision de la sécheresse par les réseaux de neurones artificiels et les modèles stochastiques, application sur le bassin versant côtier Algérois

Salim DJERBOUAI, Doudja SOUAG-GAMANE

¹LEGHYD Laboratory, University of Science and Technology Houari Boumediene, BP 32 Bab-Ezzouar Algiers, Algeria. S.djerbouai@yahoo.fr

²LEGHYD Laboratory, University of Science and Technology Houari Boumediene, BP 32 Bab-Ezzouar Algiers, Algeria. Souagd@yahoo.fr

Résumé

La prévision de la sécheresse joue un rôle primordial dans les plans gestion et de planification. Le présent travail a pour objectif, la comparaison entre les modèles stochastiques linéaires SARIMA (multiplicative seasonal autoregressive integrated moving average) et le modèle à base de réseaux de neurones artificiels RMSNN (Recursive multi-step neural network) pour la prévision de la sécheresse, en utilisant l'indice de précipitation standardisé (SPI) pour quantifier la sécheresse, dans le bassin versant côtier Algérois, Algérie. Les résultats obtenus par les deux modèles sont présentés dans le présent document.

Mots-clés: Sécheresse; SARIMA; RMSNN; Prévision.

Drought forecasting using artificial neural network and stochastic models, application in the Algerois catchment.

Abstract

Drought forecasting is a major component of a drought preparedness and mitigation plan. This study compares linear stochastic models known as multiplicative seasonal autoregressive integrated moving average (SARIMA) and recursive multistep neural network (RMSNN) for drought forecasting in the Algerois catchment in Algeria, using standardized precipitation index (SPI) as a drought quantifying parameter. The results obtained from two models are presented in this paper.

Keywords : Drought; SARIMA; RMSNN; Forecasting.

Introduction

Drought is an insidious natural hazard that results from a deficiency of precipitation from expected or "normal" such that when it is extended over a season or longer period of time, the amount of precipitation is insufficient to meet the demands of human activities and the environment [1]. Drought differs from other natural hazards in several ways. First, since the effects of drought often accumulate slowly over a considerable period of time and may linger for years after the termination of the event, the onset and end of drought is difficult to determine. Second, the absence of a precise and universally accepted definition of drought adds to the confusion about whether or not a drought exists and, if it does, its degree of severity. Third, drought impacts are nonstructural, in contrast to, the impacts of floods, hurricanes, and most other natural hazards. Its impacts are spread over a larger geographical area than are damages that result from other natural hazards. For these reasons, the quantification of impacts and the provision of disaster relief are far more difficult tasks for drought than they are for other natural hazards. Drought also tends to affect large numbers of people principally because of its impact on both water supply and demand [2]. The Mediterranean is one of the regions where the impacts of drought events have shown an exponential increase during the last 20 years. Like other Mediterranean countries, Algeria has witnessed during the last twenty years an intense and persistent drought. This drought which is characterized by an important rainfall deficit has affected the whole of Algeria particularly the north - west part. Similar droughts in amplitude and intensity have yet been noticed at the beginning of the century, between 1910 and 1940 [3]. Forecasting future dry events in a region is very important for finding sustainable solutions to water management and risk assessment of drought occurrences. The SPI drought index was chosen to forecast drought in this study because it is a powerful, flexible index that is simple to calculate, also because its ability to represent drought on multiple times scales. Traditionally, stochastic models introduced by Box and Jenkins, have been used for drought forecasting using time series of a drought quantifying parameter ([4]; [5]; [6]; [7]).

In recent decades, artificial neural networks (ANN) have shown great ability in modeling and forecasting nonlinear and non-stationary time series in hydrology and water resource engineering due to their innate nonlinear property and flexibility for modeling. Some of the applications of ANN models in drought forecasting include: ([8]; [9]). The main objective of the present study is to develop time series of standardized precipitation index (SPI) and to compare neural networks models with linear stochastic models to forecast drought using SPI as drought index in the Algerois catchment in Algeria.

1. Study area and database

The case study area comprises of the western part of the The Algerois catchment, it has an area of 5225.3 km², a Mediterranean climate with an average annual rainfall between 600 and 800 mm in the coastal regions and between 500 and 1000 mm in the interior regions. In this study, Thiessen polygon method is used to estimate areal average of precipitation using historical monthly rainfall data from year 1936 to 2008 available at 17 rainfall gauging stations.

2. Methodology

2.1. Development of SPI series in Algerois catchment

The Standardized Precipitation Index (SPI) was developed for the purpose of defining and monitoring drought. The SPI drought index was chosen to forecast drought in this study due to its simplicity, versatility, consistency and its independence from geographical position.

2.1.1. Computation of the SPI

The SPI calculation for any location is based on the long-term precipitation record for a desired period. This long-term record is fitted to a probability distribution, which is then transformed through equiprobability transformation to the standard normal random variable Z with mean zero and variance of one, which is the value of the SPI [10]. For a given time scale, SPI values are positive (negative) for greater (less) than median precipitation. A value of zero corresponds to the median precipitation [11].

2.2. Artificial Neural Networks

An Artificial Neural Network (ANN) is an information processing system that resembles the structure and operation of the brain [12] Some of the advantages of ANNs are: (1) They are able to recognize the relation between the input and output variables without explicit physical considerations. (2) They work well even when the training sets contain noise and measurement errors. (3) They are able to adapt to solutions over time to compensate for changing circumstances. (4) They possess other inherent information processing characteristics and once trained are easy to use [13].

There are a variety of ANN models developed for applications in applied science and engineering. The most popular one for time series forecasting is the feed-forward model. Fig. 1 shows a typical three-layer feed-forward model used for forecasting purposes.

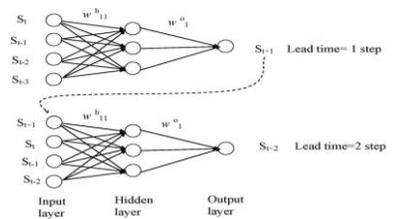


Fig. 1 Feed-forward recursive multi-step Neural Network approach.

The input nodes are the previous lagged observations while the output provides the forecast for the future value. Hidden nodes with appropriate nonlinear transfer functions are used to process the information received by the input nodes. ANN application basically consists of three steps: network architecture definition, network training, and network testing. To prevent overfitting, the early stopping technique was used in this study. In this technique the available data is divided into three subsets. The first subset is the training set, which is used for computing the gradient and updating the network weights and biases. The second subset is the validation set. The error on the validation set is monitored during the training process. The validation error normally decreases during the initial phase of training, as does the training set error. However, when the network begins to overfit the data, the error on the validation set typically begins to rise. When the validation error increases for a specified number of iterations, the training is stopped, and the weights and biases at the minimum of the validation error are returned. The test set error is not used during training, but it is used to compare different models.

2.2.1. Developed forecasting model

In the present study, Recursive multi-step neural network approach (RMSNN) was used for drought forecasting. This forecasting technique can have a single neuron or multiple neurons in both input and hidden layers. However, it consists of only a single neuron in the output

layer, representing one month lead time forecast. The network is first designed and calibrated considering only 1 month ahead forecasts based on the present and several months of past SPI values as inputs. This network (with the same number of input variables) is then used for forecasting SPI values for multiple lead times recursively as shown in Fig.1.

2.3. Stochastic SARIMA models

The general form of seasonal model SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)_s model is given by:

$$\phi_p(B)\Phi_P(B^S)\nabla^d\nabla_S^Dx_t = \theta_q(B)\Theta_Q(B^S)a_t$$

where, {x_t} is the nonstationary time series; {a_t} is the usual Gaussian white noise process;

φ_p(B) and θ_q(B) are nonseasonal AR and MA operators of orders p and q, respectively; Φ_P(B^S) and Θ_Q(B^S) are seasonal AR and MA operators in B of orders P and Q, respectively; p is the order of nonseasonal autoregression; d is the number of nonseasonal differences; q is the order of nonseasonal moving average; P is the order of seasonal autoregression; D is the number of seasonal differences; Q is the order of seasonal moving average; S is the length of season ; ∇^d and ∇_S^D are nonseasonal and seasonal difference operators; B is the backshift operator.

2.3.1. Model development

The time series model development consists of three stages, i.e. identification, estimation and diagnostic check [14]. The purpose of the identification stage is to determine the nonseasonal and seasonal differencing required to produce stationarity and also the orders of both the nonseasonal and the seasonal AR and MA parameters required, and possibly to decide if a Box-Cox transformation is needed.

At the estimation stage, the model parameters are calculated using least square methods. The objective of diagnostic check is to ensure that this model adequately describes the time series under consideration by subjecting the calibrated model to a range of statistical tests.

3. Results and discussions

The regional times series of SPI is calculated based on areal average precipitation estimated using Thiessen polygon method. SPI time series for 12 months time scale (SPI-12) is shown Fig.2 .

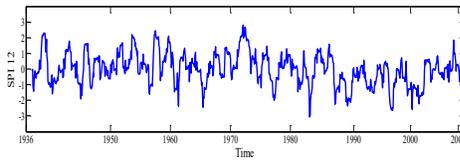


Fig.2 SPI-12 Time series based on the average precipitation

3.1. Stochastic SARIMA models

Data set from 1936 to 1994 is used to estimate the model parameters and the data from 1995 to 2008 is used to check the forecast accuracy. The ACF and the PACF of the original time series of SPI-12, indicates a nonstationary behavior and suggests a Differencing. So first difference was used to remove the trend and difference at lag 12 was used to remove the seasonal variation. The plot of ACF and PACF after Differencing is shown in Fig.3. In the differenced series of SPI-12, it is observed that the ACF curve decays fast with significant spikes at lag 12, 24, indicating a stationary behavior. In the PACF there are significant spikes at lag 12, 24, 36, 48. So the SARIMA (0, 1, 0)(P, 1, Q)₁₂ model could be fitted to the differenced SPI-12 series.

The model that gives the minimum Akaike Information Criterion (AIC) and Schwarz Bayesian Criterion (SBC) is selected as best fit model.

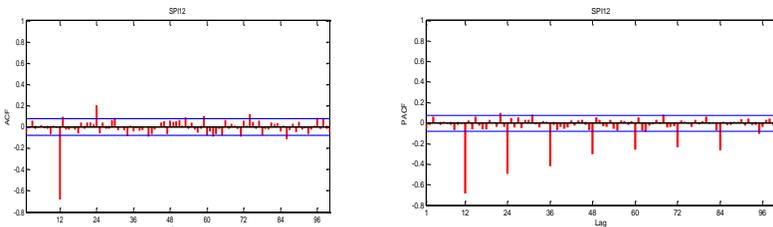


Fig.3 ACF and PACF plots used for the selection of candidate models for SPI-12 series

The identification of best model for SPI-12 series based on minimum AIC and BIC criteria is shown in Table 2

Table 2. Comparison of AIC and SBC for selected candidate models

Model	AIC	SBC
SARIMA (0,1,0)(1,1, 0) ₁₂	1,704	1,711
SARIMA (0,1,0)(2,1,0) ₁₂	1,398	1,412
SARIMA (0,1,0)(3 ,1, 0) ₁₂	1,184	1,205

SARIMA (0,1,0)(4,1,0) ₁₂	1,115	1,143
SARIMA (0,1,0)(0,1,1) ₁₂	1,255	1,261
SARIMA (0,1,0)(0,1,2) ₁₂	0,775	0,788
SARIMA (0,1,0)(1,1,1) ₁₂	0,926	0,940
SARIMA (0,1,0)(1,1,2) ₁₂	0,718	0,738
SARIMA (0,1,0)(2,1,1) ₁₂	0,811	0,831
SARIMA (0,1,0)(2,1,2) ₁₂	0,955	0,982
SARIMA (0,1,0)(3,1,1) ₁₂	0,832	0,860
SARIMA (0,1,0)(3,1,2) ₁₂	0,834	0,869
SARIMA (0,1,0)(4,1,1) ₁₂	0,775	0,810
SARIMA (0,1,0)(4,1,2) ₁₂	0,831	0,873

The model SARIMA (0,1,0)(1,1,2)₁₂ is chosen because it has the smallest value of AIC and BIC. Diagnostic checks are then applied to verify that this model is adequate.

3.2. Artificial Neural Networks

In the proposed RMSNN, available data from 1936 to 2008 was divided into three subsets. first 60% of the samples are assigned to the training set, the next 20% to the validation set, and the last 20% to the test set. One of the most commonly-used algorithms for ANN training is the Levenberg Marquardt (LM) Back propagation algorithm, which is applied in the present study, only one hidden layer was considered, with a tangent sigmoid activation function between the input and hidden layers, and a linear activation function between hidden and output layers.

The number of neurons in the input and hidden layer were determined by experimentation. The best network was chosen based on performance criteria: Nash Sutcliffe Efficiency (NSE), coefficient of correlation (R), root mean square error (RMSE) and mean absolute error (MAE).

Nash-Sutcliffe efficiency with different combination of input neurons for SPI-12, based on the recursive multi-step neural network approach is shown in Fig4.

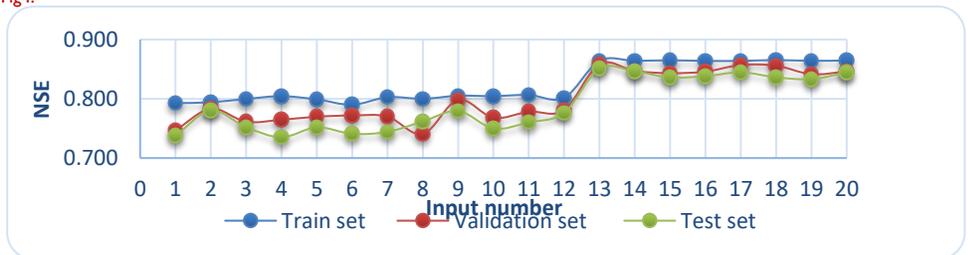


Fig4. Evolution of Nash-Sutcliffe efficiency for different input number

Results indicate that all of the performance criteria (NSE, R, RMSE, MAE) exhibit the same evolution as indicated by the Nash-Sutcliffe efficiency shown in Fig4. Based on performance criteria, it's observed that Beyond 13 input neurons, there is no improvement. So RMSNN with 13 input neurons and 4 hidden neurons is chosen to forecast drought.

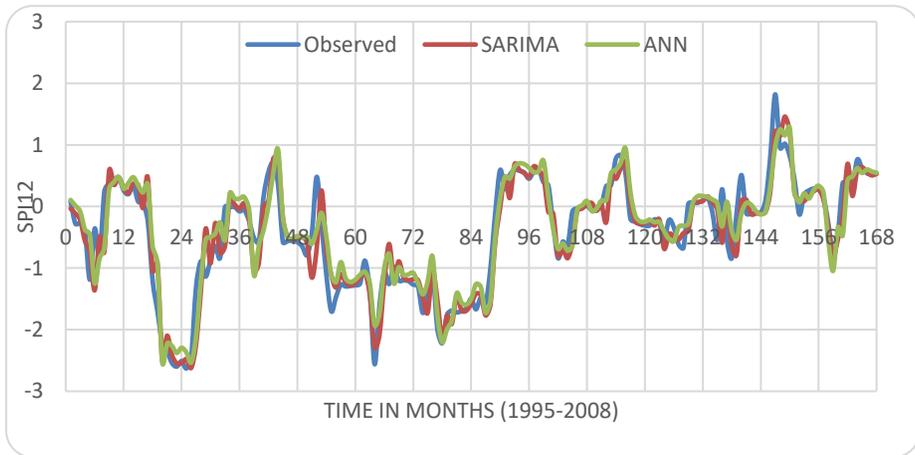
3.3. Drought forecasting from selected models

The forecast was done for 1-month lead-time using the best models. Comparison of forecasting measures between observed and predicted data is shown in table 3. The plot between observed data and predicted data using the selected SARIMA and RMSNN models for SPI-12 series is shown in Fig. 5. It is observed that the predicted data follows the observed data very closely.

Table 3. Comparison of forecasting measures between observed and predicted data for 1-month lead time

Forecasting measure	SARIMA (0,1,0)(1,1,2) ₁₂	RMSNN (13-4-1)
R	0,928	0,929
NSE	0,858	0,861
RMSE	0,329	0,325
MAE	0,227	0,222

Fig. 5 A comparison between observed data and predicted data over 1-month lead time using SARIMA and RMSNN for SPI-12 series.



Conclusions

Early indication of possible drought can help to set out drought mitigation strategies and measures in advance. Therefore drought forecasting plays an important role in the planning and management of water resource systems. The main objective of present study is to develop time series of standardized precipitation index (SPI) and to compare neural networks model with linear stochastic models to forecast drought using SPI as drought index in the Algerois catchment in Algeria. SPI was used as drought index, due to its several advantages as mentioned earlier.

The forecast was done for 1-month lead-time using stochastic SARIMA models and RMSNN using SPI time series for 12 months time scale (SPI-12). The results indicate that models developed to forecast drought found to give reasonably good results, and that the RMSNN performed slightly better than SARIMA models.

References

- [1] D.A. Wilhite, Drought monitoring as a component of drought preparedness planning in : Coping with Drought Risk in Agriculture and Water Supply Systems: Drought Management and Policy Development in the Mediterranean Springer Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2009, pp.3-19.
- [2] D.A. Wilhite, C.L Knutson, Drought management planning: Conditions for success, Options Méditerranéennes Series A, 80, 2008, 141–148.
- [3] A. Medejerab, L. Henia, Variations spatio-temporelles de la sécheresse climatique en Algérie Nord occidentale, Courrier du savoir, 11(2011) 71-79.
- [4] A.K. Mishra, V.R. Desai, Drought forecasting using stochastic models, J.Stoch. Environ. Res. Risk Assess, 19 (2005) 326–339.
- [5] O.F Durdu, Application of linear stochastic models for drought forecasting in the Büyük Menderes river basin, western Turkey, Stoch. Environ. Res. Risk Assess, 24 (2010) 1145–1162.
- [6] R. Modarres, Streamflow drought time series forecasting, Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 15 (21)(2007), 223–233.
- [7] P. Han, P.X. Wang, S.Y. Zhang, D.H. Zhu, Drought forecasting based on the remote sensing data using ARIMA Models, 51 (11–12)(2010) 1398–1403.
- [8] S. Morid, V. Smakhtin, K. Bagherzadeh, Drought forecasting using artificial neural networks and time series of drought indices, Int. J. Climatol, 27 (15)(2007) 2103.
- [9] A.K Mishra, V.R Desai, Drought forecasting using feed forward recursive neural network, Int. J. Ecol. Model. 198 (2006)127–138.
- [10] D.C Edwards, T.B. McKee, Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple timescales. Colorado State University, Fort Collins, CO,USA, Climatology Report No. 97-2, (1997).
- [11] N.B Guttman, Accepting the standardized precipitation index : a calculation algorithm, Journal of the American WaterResources Association, 35(2) (1999) 311–322.
- [12] H.R. Maier, A. Jain, G.C. Dandy and K.P. Sudheer, Methods used for the development of neural networks for the prediction of water resource variables in river systems: Current status and future directions, Environmental Modelling & Software, 25 (8) (2010) 891-909.
- [13] ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, Artificial neural networks in hydrology. I. Preliminary concepts, J. Hydrol. Eng. 5 (2)(2000)124–137.
- [14] G.E.P. Box, G.M. Jenkins, Time Series Analysis, Forecasting and Control. Holden-Day, San Francisco, 1976.

Impact des changements climatiques sur l'agriculture : Application de l'approche Ricardienne, Cas de la plaine de Jeffara.

Houcine Jeder^{1,2}, Ahmed Ben Khalifa², Mongi Sghaier¹

¹Laboratoire d'économie et sociétés rurales. Institut des Régions Arides IRA, Route du Jorf, 4119, Médenine, Tunisie, diederhoucine@yahoo.fr

²Unité de recherche Environnement Ressources Naturelles Agriculture, Faculté des Sciences Economiques et de Gestion, Tunis, Ahmed.khalifa@fsegt.mu.tn

Résumé

Cette étude évalue la vulnérabilité de l'agriculture dans la plaine de Jeffara (sud-est tunisien) aux changements climatiques en utilisant la méthode Ricardienne. Cette méthode consiste à exprimer les revenus nets agricoles en fonction des variables climatiques, édaphiques et socio-économiques. Ces modèles ricardiens ont été testés sur la base des données d'une enquête réalisée dans le cadre d'un projet de développement dans la plaine Jeffara pour la campagne agricole 2002-2003. Des simulations ont été faites sur la base des résultats du scénario A2 de la projection qui a été réalisé par le modèle HadCM3 à l'échelle nationale et régionale de la Tunisie. Les résultats de l'étude ont montré que la relation entre le revenu et le climat est non linéaire. L'augmentation des précipitations de 1% entraîne une hausse des revenus agricoles de 5,9%. Cependant, une augmentation des températures de 1% entraîne une baisse des revenus agricoles de 1,68%. Les analyses de sensibilité ont montré que les paysans perdront 75% de leurs revenus selon le scénario extrême A2 (Température +2,1 et précipitation -18%). Du fait des conditions climatiques déjà difficiles, les Scenarios de diminution des précipitations oulet d'augmentation des températures sont très dommageables à l'agriculture en zones arides. Par ailleurs, l'étude a montré que l'agriculture dans la plaine de Jeffara est une agriculture paysanne basée sur le travail familial qui nécessite une marge de modernisation afin d'améliorer l'activité agricole dans les années futures. Mais, les effets positifs de certaines autres options peuvent servir comme des points de réflexion dans l'élaboration des stratégies d'adaptation aux changements climatiques comme l'utilisation des nouvelles technologies d'irrigation et l'intégration de l'activité de l'élevage dans l'exploitation agricole.

Mots clés : Changements climatiques, agriculture, modele Ricardien, Sud-est tunisen

Climate change and agriculture: impacts and adaptation options, Case of Jeffara plain in southeastern Tunisia

Abstract

This study assesses the vulnerability of agriculture in the Jeffara plain (southeastern Tunisia) to climate change using the Ricardian method. This method consists of expressing net agricultural income according to climatic, edaphic and socio-economic variables. These Ricardian models were tested on the basis of data from a survey carried out as part of a development project in the Jeffara plain for the 2002-2003 farming season. Simulations were made on the basis of the results of the A2 scenario of the projection that was carried out by the HadCM3 model at the national and regional level of Tunisia. The results of the study showed that the relationship between income and climate is non-linear. The marginal impact of temperature on agricultural income is -3.82 Tunisian Dinars per hectare while that of precipitation is +23.43 Tunisian Dinars per hectare. Sensitivity analyzes showed that farmers will lose 75% of their income according to extreme scenario A2 (Temperature +2.1 and precipitation -18%). Because of the already difficult climatic conditions, the Scenarios of decrease of the precipitations and / or increase of the temperatures are very damaging to agriculture in arid zones. In addition, the study showed that agriculture in the plain of Jeffara is a peasant agriculture based on family work which today requires a large financial capital and a margin of modernization to improve the agricultural activity in the future years. But, the positive effects of some other options can serve as points of reflection in developing climate change adaptation strategies such as the use of new irrigation technologies and the integration of livestock at the farm level.

Key Words: Climate change, agriculture, Rcardien model, Southeastern Tunisia

Introduction

La Tunisie, qui fait partie de la rive méditerranéenne, est considérée parmi les pays en voie de développement qui sont les plus vulnérables aux changements climatiques à cause de la prédominance de l'agriculture à faible capital naturel et des activités économiques affectées par un climat relativement chaud (Nefzi et Bouzidi, 2009). Conscient des effets possibles des changements climatiques sur l'activité économique en particulier l'agriculture, la Tunisie a porté durant ces dernières années un grand intérêt à toutes les actions menées dans le cadre de lutte contre les effets des changements climatiques en particulier dans les zones arides du pays. L'objectif de ce papier est d'évaluer, en premier lieu, la sensibilité de l'agriculture en zones arides aux changements climatiques à travers l'approche Ricardienne et en deuxième lieu, de percevoir la viabilité de certaines mesures d'adaptation à mettre en œuvre pour limiter les effets néfastes de ces changements dans le futur.

2. Changements climatiques en Tunisie

Le climat de la Tunisie est très variable. La variabilité la plus importante qui caractérise ce pays est la sécheresse qui peut affecter plusieurs milieux et domaines en particulier les ressources hydrauliques, les écosystèmes, l'agriculture et l'économie de façon générale. De même, la tension sur les agriculteurs et sur leurs exploitations seront accentuées avec le risque que certaines activités agricoles ne pourraient pas s'adapter, à l'avenir, aux phénomènes extrêmes des changements climatiques. La plaine de Jaffara qui fait partie de ces zones arides du sud tunisien présente des caractéristiques d'aridité agressive qui la rendent particulièrement très sensible au phénomène des changements climatiques dans le futur. Les sociétés locales ont, de tout temps, su s'adapter à cet environnement contraignant mais l'intensification agricole, les concurrences intersectorielles autour des ressources en eau, l'intervention publique pour l'intégration de la région à une économie mondialisée posent aujourd'hui des questions cruciales en termes d'adaptabilité des systèmes de production pratiqués aux défis des changements climatiques. Sachant que, la région est confrontée à des formes de compétition accrue sur les ressources naturelles et à des risques amplifiés par la dégradation du milieu et la désertification qui peuvent s'accroître dans l'avenir sous l'effet des changements climatiques ; il est donc opportun de réfléchir dès maintenant dans le cadre d'une politique régionale ou nationale sur la viabilité des mesures d'adaptation à mettre en œuvre pour atténuer ces effets dans ces régions arides .

3. Méthodologie

Spécification du modèle

En partant du modèle standard développé par Mondelsohn (1993), la forme fonctionnelle retenue dans le cadre de ce travail est la suivante :

$$RN_{ha} = ct^e + \beta_1 temp_{sh} + \beta_2 temp_{sh}^2 + \beta_3 temp_{ss} + \beta_4 temp_{ss}^2 + \beta_5 precip_{sh} + \beta_6 precip_{sh}^2 + \beta_7 precip_{ss} + \beta_8 precip_{ss}^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i sol_i + \sum_{j=1}^m u_j z_j \quad (5)$$

La variable dépendante

La variable dépendante est le revenu net agricole noté : RN_{ha} en Dinars tunisien / hectare. Il est calculé pour chaque ménage et se définit comme étant la valeur de la production végétale moins les coûts de production. Le coût de la main d'œuvre familiale et l'utilisation de la terre ne sont pas pris en compte dans le calcul du revenu. Le revenu moyen de l'échantillon est de 185 DT/ha et par an et de 125 DT/ha pour l'agriculture pluviale qui compte 122 exploitations.

Les variables indépendantes

$Temp$ = Température moyenne pour la saison humide et la saison sèche

$Precip$ = Précipitation moyenne pour la saison humide et la saison sèche. La saison humide : sh = Octobre à Avril, la saison sèche : ss = Mai à Septembre.

Sol = types de sols, ($Sol1$: minéraux bruts d'érosion ; $Sol2$: peu évolués ; $Sol3$: calcimagnésiques et $Sol4$: isohumiques).

Ces variables édaphiques sont exprimées en pourcentage du type des sols par rapport à la superficie de la zone d'étude.

Z_i = Caractéristiques des exploitations se rapportent au niveau d'utilisation des facteurs de production : Taille du ménage (log taille de ménage), superficie de l'exploitation (en hectare), irrigation (1/0), pratique de l'élevage (1/0), vulgarisation (accès à la vulgarisation), traction animale (1/0), main d'œuvre salariée (1/0). Ces variables sont des variables dichotomiques qui prennent la valeur de (1) si l'individu a recours à cette pratique et (0) si non, de même pour l'accès à la vulgarisation (1) si l'individu a accès à la vulgarisation et (0) dans le cas contraire.

Collecte des données

Les données ont été collectées à partir d'enquête réalisée dans le cadre de projet de Jeffara dans le sud-est tunisien (2002-2003). Les données primaires ont été obtenues à partir d'un échantillon touchant 250 exploitations agricoles retenues de

l'enquête du projet. Elles ont concerné les caractéristiques socio-économiques des exploitations. Les données secondaires portent sur les données climatiques et les données édaphiques. Les données climatiques ont été obtenues à partir de deux stations météorologiques : la station de Médenine et Gabès pour la campagne agricole 2002-2003 (Mai 2002 à Avril 2003). Quant aux données édaphiques, elles ont été tirées des résultats pédologiques trouvés dans le cadre de ce projet (Taâmallah, et al. 2006).

4. Résultats et discussion

Les résultats présentés dans le tableau I sont tirés de l'estimation du modèle Ricardien par MCO. Le test de Fisher-Snedcor montre que les régressions sont globalement significatives. Le coefficient de détermination (R^2) du modèle physique sans adaptation est de 0,71. L'intégration des variables d'adaptation améliore la qualité de l'ajustement ($R^2 = 0.82$). Pour le cas du modèle portant sur l'agriculture pluviale, le coefficient de détermination R^2 est moins élevé (de l'ordre de 0.62). Pourtant, ces modèles restent satisfaisants au regard des résultats obtenus dans le cadre des études similaires dans diverses régions du monde (Mondelson et al. 1994 en Amérique ; Da Sliva, 2009, en Canada ; Nefzi, 2009 en Tunisie et Ouédraogo, en Burkina Faso 2012).

Tableau I. Résultats des modèles de régression (variable dépendante = revenu net agricole)

Variables	Modèle physique sans adaptation		Modèle avec adaptation			
	Ensemble des exploitations		Ensemble des exploitations		Exploitations pluviales	
	Coef.	T. Statistique	Coef.	T. Stat	Coef.	T. Stat
Nombre d'observations	250		250		122	
F	49,05		58,53		9,34	
R^2	0,71		0,82		0,62	

*Significatif au seuil de 10 % ; ** Significatif au seuil de 5 % ; *** Significatif au seuil de 1 % ;

Impacts prévisionnels des changements climatiques sur les revenus agricoles

Pour évaluer l'impact prévisionnel des changements climatiques sur le revenu agricole dans la plaine de Jeffara au sud-est tunisien, nous avons fait des simulations en se basant sur les résultats du modèle HadCM3 appliqué à la Tunisie, qui prévoit une projection des températures et des précipitations moyennes annuelles aux horizons des années 2020 et 2050. Les résultats des simulations sont présentés dans le tableau 3. Il ressort qu'une augmentation de la température de 1,1 °C combinée à une diminution de la précipitation de 7% engendrera une perte de revenu de 20,40 %. Cette perte sera plus importante à long terme. Elle est plus de 60 % du revenu agricole si la précipitation diminuera de 18 %. Tandis qu'une augmentation de la température 2,1 °C combinée à une diminution de précipitation de 7 % engendrera une perte de l'ordre de 35,39 % qui pourra atteindre 77,95 % si la précipitation diminuerait de 18 %. En supposant que toute chose égale par ailleurs,

ces résultats montrent que si les changements climatiques dans le sud tunisien se manifestent par la diminution des précipitations, l'agriculture de la Jeffara sera menacée par la détérioration de la rentabilité agricole; ce qui engendrera d'une manière directe ou indirecte des impacts négatifs sur l'économie régionale en termes de satisfaction alimentaire ainsi que l'augmentation des prix des produits agricoles qui va détériorer le pouvoir d'achat des consommateurs en particulier dans les périodes des sécheresses .

La situation devient plus alarmante pour l'agriculture pluviale en particulier l'oléiculture qui est la culture la plus dominante dans la plaine de Jeffara. En effet, une augmentation de la température de plus de 1,1 °C combinée à une baisse de précipitation de 18 % va engendrer une perte de plus 3/4 si non la quasi totalité du revenu agricole.

Tableau 3. Impact des scénarios climatiques GIEC (Scénario A2) sur le revenu net agricole dans la plaine de Jeffara

	Ensemble des exploitations		Exploitations pluviales	
	Variation de revenu net		Variation de revenu net	
	(DT/ha)	(%)	(DT/ha)	(%)
Température +1,1 et précipitation -7 %	- 31,44	- 20,40	- 48,82	- 41,12
Température +1,1 et précipitation -18 %	- 73,99	- 66,35	- 159,05	- 76,89
Température +2,1 et précipitation -7 %	- 23,57	- 35,39	- 85,72	- 57,80
Température +2,1 et précipitation -18 %	- 72,47	- 77,95	- 259,57	- 93,57

5. Conclusion

Cette étude a permis de quantifier l'impact des changements climatiques sur les revenus agricoles dans la plaine de la Jeffara au sud-est tunisien. Les résultats ont montré que le climat a un effet non linéaire et significatif sur le revenu agricole et que l'agriculture dans la plaine de Jeffara est dépendante des précipitations et de la température avec l'apport important des conditions édaphiques dans l'amélioration de la productivité de la terre. Pour le cas de l'agriculture pluviale, l'augmentation de la température affecte énormément le revenu agricole, bien que cette agriculture a montré depuis le passé une capacité d'adaptation et de résistante importante en particulier pour l'oléiculture, mais l'absence de la précipitation pour de longues durées rend la situation difficile et inquiétante dans certains cas. Ces résultats qui sont montrés par le modèle Ricardien expriment la relation significative entre la rentabilité économique, les conditions climatiques et les conditions édaphiques pour le cas de l'agriculture et confirment la réalité observée dans les années de sécheresse.

References

- [1] Da Silva, L., (2009). L'impact économique des changements climatiques sur l'agriculture canadienne. Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de maître en sciences (M. SC.)
- [2] Dinar, A.; Mendelsohn, R.; Evenson, R.; Prikh, J. ; Sanghi, A.; Kumar, K.; Mckinsey, J. Et Lonergan, S. (1999). Measuring the Impact of Climate Change on Indian Agriculture. *World Bank Technical Paper* No. 42.
- [3] Gbetibouo G. And Hassan R. (2005). Measuring the Economic Impact of Climate Change on Major South African Field Crops: A Ricardian Approach. *Global and Planetary Change* 47(2-4): 143-52.
- [4] Mendelsohn R.; Nordhaus W.D. Et Shaw D. (1994). "The impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis", *The American Economic Review*, 4 (84), pp 755-771.
- [5] GTZ (Allemagne), Ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques (MARH, Tunisie), 2007. Stratégie nationale d'adaptation de l'agriculture tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques, GTZ-MARH.28p.
- [6] Nefzi, A Et Bouzidi, F., (2009). Evaluation de l'impact économique du changement climatique sur l'agriculture au Maghreb. Cinquième Colloque International « Énergie, Changements climatiques Et développement durable ». Hammamet, Tunisie, 15-16 et 17 juin 2009.
- [7] Ouédraogo M. Somé L. & Dembele Y. (2006). Economic impact assessment of climate change on agriculture in Burkina Faso: A Ricardian Approach. *CEEPA Discussion Paper* No. 24, Centre for Environmental Economics and Policy in Africa, University of Pretoria.
- [8] Ouédraogo, M., (2012). Impact des changements climatiques sur les revenus agricoles au Burkina Faso. *Journal of Agricultural and Environment for International Development-JAEID-2012*, 106 (1).
- [9] Taamallah, H, Genin D., Guillaume, H., Hajji A., Ouelid Belgacem A., Picouet, M., (2006). Environnement et sociétés dans le Jeffara : état de lieux. Rapport scientifiques du thème 3 du programme "Jaffera", IRA-IRD

Modélisation des impacts potentiels du changement climatique sur la ressource en eau de deux systèmes aquifères régionaux Français.

Nadia Amraoui¹, Olivier Douez², Philippe Stollsteiner¹

¹ BRGM Orléans, 3 avenue Claude Guillemin-BP- 36009 – 45060 Orléans cedex 2. n.amraoui@brgm.fr ; ph.stollsteiner@brgm.fr

² BRGM Poitou-Charentes, 5 rue de la Goélette, 86280 Saint-Benoit. o.douez@brgm.fr

Résumé

Dans le département de la Somme et en Région Poitou-Charentes, les eaux souterraines représentent la principale ressource utilisée pour l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation. Face au changement climatique annoncé, il est important pour les décideurs de connaître les impacts potentiels du changement climatique sur cette ressource afin de planifier des stratégies d'adaptation appropriées. Deux modèles hydrodynamiques régionaux, ceux de l'aquifère crayeux du bassin de la Somme et des nappes du Jurassique en Poitou-Charentes, ont été utilisés afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur la recharge, les niveaux de nappes et les débits de cours d'eau à partir des données de projections climatiques désagrégées issues de sept modèles de climat utilisant un scénario médian d'émission de gaz à effet de serre (A1B). A horizon 2065, les simulations montrent une baisse de la recharge moyenne annuelle de la nappe de la craie et du débit des cours d'eau dans le bassin de la Somme, cependant, pour les nappes du Jurassique en Poitou-Charentes des situations assez différentes sont obtenues selon les bassins versants et les scénarios climatiques.

Mots clés : Aquifères régionaux, ressources en eau souterraine, changement climatique, modélisation hydrodynamique.

Modeling the potential impacts of climate change on water resources of two French regional aquifers

Abstract

In the Somme department and Poitou-Charentes, groundwater is the main resource used for drinking water supply and irrigation. With the climate change announced, it is important for policymakers to know the climate change impacts on this resource to plan appropriate adaptation strategies. Two hydrodynamic models, the chalky aquifer of the Somme basin and the Jurassic aquifers in Poitou-Charentes, were used to assess the impact of climate change on recharge, groundwater levels and rivers flows. These hydrodynamic models used data from disaggregated climate projections from seven climate models using a median scenario of greenhouse gas emissions IPCC/(A1B). The simulation results show, at the 2065 horizon, a reduction of the average annual groundwater recharge and rivers discharge in Somme basin, however, for Jurassic aquifers in Poitou-Charentes, different situations are obtained according to the watersheds and climate scenarios.

Key Words: Regional aquifers, groundwater resources, climate change, hydrodynamic modeling.

Introduction

En France, bien qu'une étude récente [1] sur l'impact du changement climatique à l'Horizon 2030 ait montré que la France ne devrait pas connaître de rupture structurelle dans son équilibre besoins/ressources en eau, il n'en demeure pas moins que les conséquences du changement climatique vont se poursuivre au-delà de cet horizon et certainement s'aggraver [2]. Dans certaines régions, une sévérité accrue des étiages des cours d'eau serait observée dès 2030 [3], par ailleurs des travaux récents sur le bassin de la Seine [4] ont montré une baisse sensible de la recharge des aquifères de ce bassin avec comme conséquence une baisse du niveau des nappes d'eau souterraine et une diminution du débit de base des cours d'eau. Comprendre et évaluer la réponse des hydrosystèmes régionaux au changement climatique à moyen et long terme s'avère nécessaire pour évaluer leurs vulnérabilités face au changement climatique et planifier des stratégies d'adaptation.

Les systèmes aquifères sont très diversifiés, leur fonctionnement, souvent complexe, est généralement appréhendé au travers de modèles hydrodynamiques. Prévoir les impacts du changement climatique sur les aquifères nécessite généralement le recours à de tels outils.

1. Approche utilisée pour évaluer les effets du changement climatique sur la ressource en eau

Deux régions ont fait l'objet d'évaluation de l'impact potentiel du changement climatique sur la ressource en eau souterraine : le Poitou-Charentes et le bassin de la Somme. Pour ces deux régions, des modèles hydrodynamiques régionaux sont disponibles [5] & [6]. Ils ont été développés avec le code de calcul Marthe du Brgm [7].

Pour évaluer l'impact potentiel du climat futur sur les ressources en eau souterraine, des projections climatiques issues de 7 modèles de climat (4^{ème} rapport du GIEC) et les modèles hydrodynamiques régionaux des nappes du Jurassique en Poitou-Charentes et de la craie dans le bassin de la Somme ont été utilisés. Ces modèles distribués, développés pour simuler en régime transitoire la dynamique des nappes et des cours d'eau associés, utilisent les sorties désagrégées de plusieurs modèles de climat du temps présent et du temps futur comme données d'entrée.

L'impact du changement climatique sur les eaux souterraines est quantifié en comparant les résultats des modélisations hydrodynamiques obtenus avec les données fournies par chaque modèle climatique sur le temps futur (2046-2065) à ceux obtenus sur le temps présent ou période de référence (1961-1990) en considérant les prélèvements actuels comme constants, la variabilité des résultats obtenus pour l'ensemble des modèles climatiques permet de cerner les incertitudes sur les projections climatiques.

1.1. Modèle hydrodynamique de la nappe de la craie du bassin la Somme

Le modèle hydrodynamique de la Somme s'étend sur une superficie de 7400 km² et couvre tout le bassin de la Somme, la moitié sud-ouest du bassin de l'Authie au nord et la moitié nord-ouest du bassin de la Bresle au sud-ouest (figure 1). La nappe de la craie est modélisée en monocouche. Le modèle prend en compte les écoulements dans la nappe de la craie, les écoulements dans le réseau hydrographique associé et les interactions entre ces deux systèmes. Plus de 1100 prélèvements en nappe (agricoles, alimentation en eau potable et industriels) sont intégrés soit un volume annuel prélevé de 100 à 150 millions de m³/an selon les années. Le modèle est calibré en régime transitoire sur la période 1989-2006 au pas de temps hebdomadaire. Il permet de restituer les niveaux de la nappe dans plus de 50 piézomètres et le débit des cours d'eau dans les stations de jaugeage.

1.2. Modèle hydrodynamique des nappes du Jurassique en Poitou Charentes

Le modèle hydrodynamique des nappes du Jurassique s'étend de Châtelleraut au nord à Angoulême/Rochefort au sud, en incorporant les bassins versants au nord du Marais Poitevin (figure 1), il couvre une superficie d'environ 19 200km². Il comporte 8 couches géologiques (de haut en bas) : Bri du Marais, Jurassique supérieur altéré, Jurassique supérieur non altéré, Dogger, Toarcien, Infra-Toarcien et le socle. Les nappes d'extension régionale rencontrées sur le secteur d'étude sont celles de l'Infra-Toarcien, du Dogger, du Jurassique supérieur et du Crétacé. Ces aquifères sont en étroite relation avec les cours d'eau. Le modèle permet de simuler l'écoulement dans les nappes et les principaux cours d'eau, il prend en compte environ 4200 prélèvements en nappe, ce qui représente un volume d'environ 208 millions de m³/an. Sur les cours d'eau les prélèvements intégrés représentent 50 millions de m³/an. Le modèle est calibré sur la période 2000 - 2007 au pas de temps mensuel aussi bien sur le niveau des nappes et le débit des cours d'eau aux stations de suivi [5].

1.3. Projections climatiques

Sept modèles de climat utilisant le scénario médian d'émission de gaz à effet de serre et d'aérosols (A1B) (issus du 4^{ème} exercice du GIEC) ont été traités dans le cadre du projet EXPLORE 2070 et désagrégés par la méthode des « régimes de temps » [8]. Six des sept modèles de climat utilisés (CCCMA-GCGM3-1, GFDL-CM2-0, GFDL-CM2-1, GISS-MODEL-E-R, MPI-ECHAM5, MRI-CGCM2-3-2A) couvrent uniquement la période 1961-1990 pour la simulation du climat actuel et la période 2046-2065 pour le climat futur. Seul le modèle ARPEGE couvre de manière continue, la période 1950-2065. Les principales données climatiques « temps présent (1961-1990) » et « temps futurs (2045-2065) » ont été fournies par Météo

France, au pas de temps journalier, par maille de 8 km par 8 km, pour les différents modèles de climat. Ces données concernent les précipitations, la température et l'évapotranspiration potentielle.

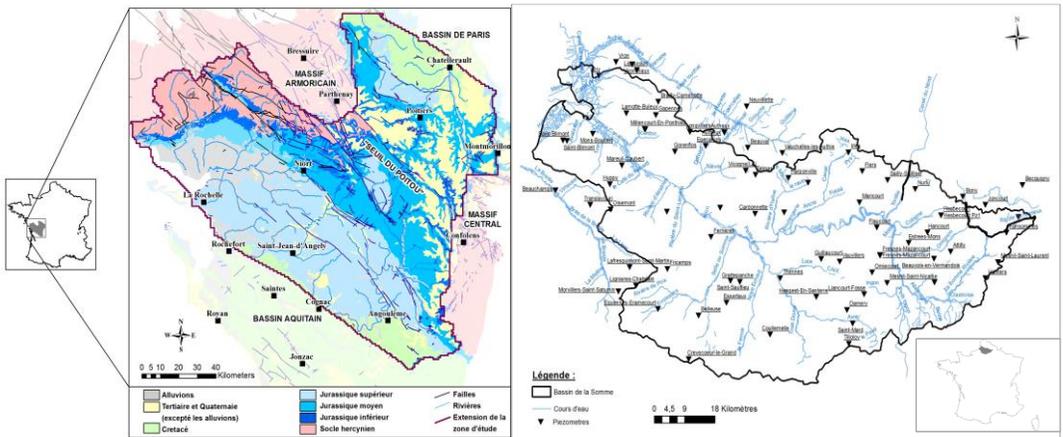


Figure 1 Situation géographique, géologie à l'affleurement et étendu du modèle du Poitou Charentes à gauche et du bassin de la Somme à droite.

2. Résultats et discussion

2.1. Effets du changement climatique sur la ressource en eau du bassin de la Somme

A l'échelle du bassin versant de la Somme, les précipitations à horizon 2065, seraient en baisse entre mai et octobre de -17% (moyenne des 7 modèles de climat) et hausse entre janvier et février (+11%), par ailleurs l'évapotranspiration moyenne serait en hausse de 20% l'hiver et 33% l'été et l'automne (moyenne des 7 modèles de climat). La baisse de la recharge de la nappe à l'horizon 2065, serait d'environ -18% (moyenne pour les 7 modèles climatiques) avec cependant une disparité importante entre les modèles.

Cinq des sept modèles climatiques montrent que la baisse du niveau moyen de la nappe de la craie serait importante sur les plateaux de l'ordre de -8 à -10 mètres selon les modèles. Cependant, elle est assez faible dans les vallées humides (entre -0.2 et -0.5 mètre). Pour les modèles les plus optimistes (CFDL-CM2.1 et GISS), la baisse du niveau moyen de la nappe resterait faible (de l'ordre de -0.2 mètre dans les vallées et -1.5 à -2 mètres sur les plateaux).

L'ensemble des modèles climatiques montrent une baisse du débit mensuel interannuel de la Somme à l'exutoire (station de Boismont) à l'horizon 2065. Le débit à l'étiage serait réduit de -23% (moyenne des 7 modèles) avec néanmoins des disparités entre les modèles (-33.7% pour ARPV3 et -8.5% pour GISS).

2.2. Effets du changement climatique sur les nappes du jurassique et les cours d'eau associés

En Poitou-Charentes, l'analyse des variables climatiques (précipitations et évapotranspiration potentielle) montre que, par rapport à la période de référence (1961-1990), les précipitations futures seraient en baisse en moyenne de $8\% \pm 7\%$ selon les modèles climatiques. Par ailleurs, l'ETP serait en hausse en moyenne de $28\% \pm 10\%$.

Pour la plupart des modèles de climat utilisés, le niveau piézométrique moyen des nappes du Jurassique, simulé à horizon 2065 serait en baisse dans les secteurs où les aquifères affleurent. La baisse est plus importante sur les plateaux et assez faible dans les vallées. Pour les zones captives des nappes du Dogger et de l'Infra-Toarcien, cette diminution est de plus en plus faible au fur et à mesure de l'éloignement des secteurs d'affleurement (zones captives).

Les résultats des différentes simulations s'accordent sur une diminution des débits des cours d'eau mais avec des ordres de grandeur différents (pour un même scénario climatique). Ainsi, la baisse du débit moyen annuel serait de l'ordre de -10% à -40% selon les cours d'eau. En ce qui concerne les étiages, ils devraient être plus sévères.

En fonction des caractéristiques des bassins versant, la réponse simulée par le modèle peut être différente. Ainsi, le débit de la Vienne à Ingrandes (figure 2) paraît assez peu impacté en hautes eaux (baisse de -10% à -20% pour les modèles les plus pessimistes), certaines simulations indiquent même des débits mensuels interannuels supérieurs à ceux de la période de référence (GFLD-CM2.1 et GFLD-CM2.0). A contrario, sur la période estivale et pour toutes les simulations le débit mensuel interannuel est inférieur à celui de la période de référence.

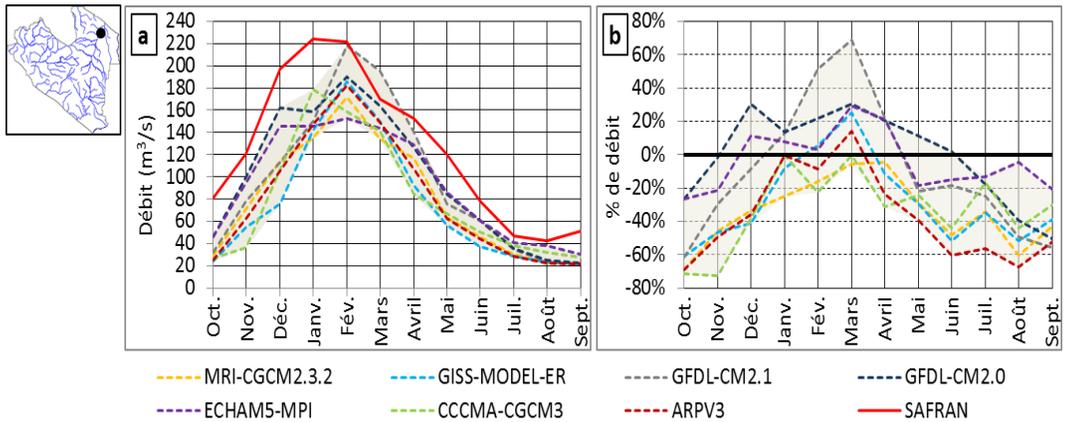


Figure 2 : La Vienne à Ingrandes. a) débits mensuel interannuel en m³/s à horizon 2065. b) pourcentage de gain ou de baisse de débit par rapport à la période de référence (1961-1990).

Conclusion

Les modèles hydrodynamiques régionaux constituent des outils précieux pour comprendre et évaluer l'impact potentiel du changement climatique sur les eaux souterraines et les eaux de surface. Les simulations réalisées dans deux régions en France sur la base des résultats de 7 modèles climatiques utilisant un scénario médian d'émissions de gaz à effet de serre (A1B) du 4^{ème} rapport du GIEC ont permis d'avoir une fourchette de l'évolution du niveau des nappes d'eau souterraine et du débit des cours d'eau à l'horizon 2065. A l'échelle du bassin versant de la Somme, l'ensemble des modèles climatiques s'accordent sur une baisse du niveau moyen de la nappe de la craie (notamment sur les plateaux) et du débit moyen des cours d'eau à l'horizon 2065. La moyenne des 7 modèles montre que le débit d'étiage à l'exutoire du bassin serait réduit de -23% avec cependant des disparités entre les modèles.

En Poitou-Charentes, les modèles climatiques montrent globalement une baisse générale du niveau des nappes de quelques mètres à une dizaine de mètres notamment sur les zones de plateaux. Seules les simulations réalisées à partir du modèle climatique le plus optimiste (GFDL-CM2.1) montrent un niveau des nappes qui varieraient peu par rapport à l'actuel. Concernant le débit des cours d'eau, les différentes simulations indiquent une diminution moyenne des débits des cours d'eau (-10% à -40% selon les cours d'eau) et ceux particulièrement sur les périodes d'étiages avec des baisses pouvant atteindre -60% à -80% pour les scénarios les plus pessimistes. A noter que pour la majorité des modèles, cette baisse de débit est simulée également en période hivernale mais avec des ordres de grandeurs moindres. Enfin, les modèles les plus « optimistes » indiquent une augmentation des débits des cours d'eau par rapport à la période référence.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet EXPLORE 2070 initié en 2010 par le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer (France).

Références

- [1] S. Chazot, I. Terrasson, A. Drocourt, Ressources et besoins en eau en France à l'horizon 2030, BRL Ingénierie, rapport final, 2012, 167 p.
- [2] Centre d'analyse stratégique, Pour une gestion durable de l'eau en France : Volet 3 les risques stratégiques de la gestion quantitative de l'eau en France et les perspectives d'adaptation à l'horizon 2030. Note d'analyse n° 328 (Avril 2013).
- [3] E. Sauquet, A. Dupeyrat, F. Hendrickx, C. Perrin, R. Samie, J.P. Vidal. IMAGINE 2030, climat et aménagements de la Garonne : quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030? Rapport de recherche final (2010).
- [4] A. Ducharne, F. Habets et al., Projet RExHySS - Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme (2009).
- [5] O. Douez, F. Bichot, L. Petit. (2011) – Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau à l'aide du modèle Jurassique de Poitou-Charentes. BRGM/RP-59288-FR, (2011) 411 p.
- [6] N. Amraoui, C. Golaz, V. Mardhel, P. Negrel, V. Petit, Th. Pointet. Simulation par modèle des hautes eaux de la Somme. BRGM/RP-51827-FR, 2002, 184p.
- [7] D. Thiéry. Modélisation des écoulements souterrains en milieu poreux avec MARTHE. in Traité d'hydraulique environnementale – Volume 9 – Logiciels d'ingénierie du cycle de l'eau. Tanguy J.M. (Ed.) - Éditions Hermès - Lavoisier. Chapitre 4, 2010, pp. 77-94. ISBN 978-2-7462-2339-4.
- [8] J. Boe, L. Terray, F. Habets, E. Martin. A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. Journal of Geophysical Research, (2006) 111 D23106.

Contribution à l'étude de la variabilité temporelle du régime pluviométrique dans le cadre du changement climatique « cas la plaine du Bas Cheliff »

Mohamed RATA¹, Djamel BELLAGUE², Abdelkader DOUAOUI³

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

² Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA), bellague@yahoo.fr

³ Centre universitaire Morsli Abdallah de Tipaza, Tipaza-Algérie, ab.douaoui@yahoo.fr

Résumé

La région Nord- Ouest de l'Algérie, en particulier la plaine du bas Cheliff a connu des moyennes des précipitations annuelles irrégulières durant les dernières décennies. Dans ce travail, on a étudié la variabilité temporelle du régime pluviométrique et on tente de le caractériser sur l'extension mensuelle, saisonnière et annuelle. Le changement du régime pluviométrique est observé au cours de la période de mesure la plus complète disponible de 1972 à 2010, à l'aide du test d'Hubert on a caractérisé le régime pluviométrique pour six postes pluviométriques, chaque poste correspond à un sous bassin versant. Les résultats obtenus montrent qu'il y a des changements du régime pluviométrique dans la région Nord-Est de la plaine du Bas Cheliff, et un régime presque stationnaire dans les autres régions qui sont caractérisées par des sols nus. Ce changement du régime pluviométrique résulte de la présence d'une chaîne montagneuse et un couvert végétal permanent dans le Nord-Est de la plaine, on a conclu que la direction du changement du régime pluviométrique est de l'Ouest à l'Est pour les trois régimes : mensuel, saisonnière et annuel.

Mots clés : Bas Chéliff, milieu naturel, régime pluviométrique et microclimat.

Contribution to the study of the temporal variability of the rainfall regime in the context of climate change "the case of the lower Cheliff plain"

Abstract

The northwestern region of Algeria, especially the plain bottom Cheliff experienced irregular average annual rainfall in recent decades. In this work, we studied the temporal rainfall variability and attempt to characterize the extension monthly, seasonal and annual. The change in rainfall was observed during the measurement period the most comprehensive available from 1972 to 2010 using the test Hubert was characterized rainfall for the six rainfall stations, each station is a sub-basin slope. The results show that there are changes in rainfall in the Northeast region of the full Lower Cheliff, and an almost steady in other regions that are characterized by bare soil. This change in rainfall patterns due to the presence of a mountain range and a permanent vegetation cover in the north-east of the plain, it was concluded that the direction of change of rainfall is from West to East for three plans: monthly, seasonal and annual.

Key Words: lower Cheliff, natural environment, rainfall regime and microclimate.

Introduction

Dans les zones arides et semi-arides d'Afrique du Nord, notamment en Algérie, la notion de précarité des ressources en eau n'est pas récente. Néanmoins, le Bassin méditerranéen a connu des perturbations de précipitations lors des dernières décennies s'est manifestée d'une manière particulièrement sévère, persistante et avec une extension remarquable. Dans différentes régions du globe, de nombreuses études ont été menées pour étudier les ressources en eau et caractériser l'évolution du régime pluviométrique. [1], on détectés la fluctuation la plus brutale et la plus significative observée en Algérie, autour des années 1980, au cours desquelles ils ont noté une réduction assez importante de la pluviométrie. Ce travail a pour objet d'étudier l'évolution récente du régime pluviométrique et son impact sur le couvert végétal de la plaine du Bas Chélif- Algérie. Il s'agit de détecter les ruptures au cours de la période de mesure 1972-2010, en utilisant des tests statistiques recommandés par l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Pour réaliser cette étude, les données de quelques postes climatologiques ont été traitées, ce qui a permis de constituer une base de données pluviométriques géographiquement représentative de la zone d'étude.

I. Présentation de la zone d'étude

La plaine du Bas Chélif est située au Nord-Ouest de l'Algérie. Elle fait partie du grand bassin hydrographique Chélif-Zahrez et occupe sa partie ouest. Elle se trouve à trente cinq kilomètres (35 Km) à vol d'oiseau de la méditerranée et 250 Km d'Alger (Figure 1). Avec en son centre la ville de Oued Rhiou (wilaya de Relizane). Le périmètre lui même est d'environ 32 km de longueur sur une largeur qui va de 2 à 10 km et à une surface totalement plate avec une altitude d'environ 70 m au dessus du niveau de la mer. Elle se trouve entre $0^{\circ} 40'$ et $1^{\circ} 6' 8''$ de longitude est et $34^{\circ} 3' 12''$ et $36^{\circ} 5' 57''$ de latitude nord. Notre zone d'étude basé sur les sous bassin versant qui sont trouvés dans la plaine du bas Chélif et occupée par les stations pluviométrique.

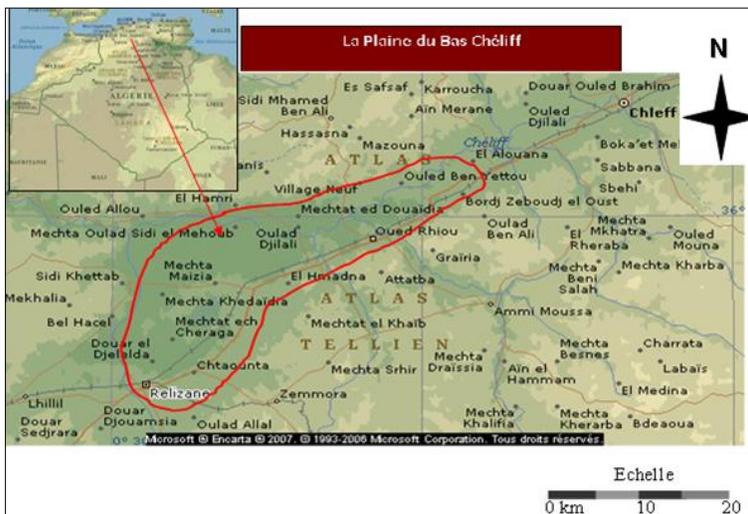


Figure 1. Localisation géographique de la zone d'étude [2]

2. Matériels et méthodes

2.1. La collecte des données

Les données pluviométriques ont été recueillies auprès des secteurs de l'Agence national des ressources hydriques) et l'Institut national de recherches Agronomiques Algérienne (Station de Hmadna), sous forme de tableaux des cumuls mensuels et annuels, elles étaient très hétérogènes du point de vue statistique. Ce qui a conduit à définir une période la plus longue possible et d'apporter le soin et le traitement nécessaire, afin qu'on puisse disposer de données suffisantes du point de vue qualité que quantité ou la réalisation de notre travail.

2.2. Choix des stations pluviométriques

Pour diverses raisons, les lacunes insupportables à travers les années et les longues périodes de mesures dans la plupart des données des stations appartenant à ce bassin, on s'est basé sur six stations pluviométriques équivalentes à chaque sous bassins durant 39 années d'observations (de 1972 - 1973 à 2009 - 2010).

2.3. Localisation des postes pluviométriques

La répartition des postes pluviométriques reste hétérogène. Les stations sont considérablement distribuées presque dans tout le périmètre du Bas Chélif (Figure 2).

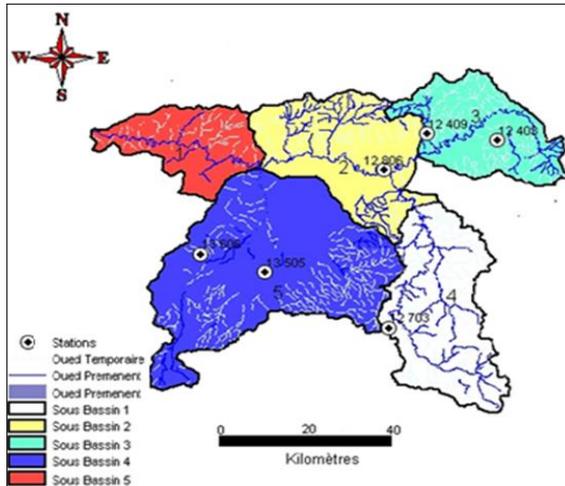


Figure 2. Localisation des postes pluviométriques du Bas Chélif

2.4. Méthodes de comblement de lacunes et de détection de rupture dans la série chronologique

Pour les besoins de l'étude et pour une bonne répartition spatio-temporelle, nous avons procédé au comblement des lacunes, en utilisant le logiciel Hydrolab (version 98.2). Une approche statistique a été réalisée par Logiciel Khronostat pour nous aider à mieux analyser les précipitations mensuelles, saisonnières et annuelles. L'étude de la stationnarité des séries pluviométriques annuelles, appliquées à chaque série chronologique de chaque sous bassin, est un outil d'identification de la variabilité de la pluviométrie du Bas Chélif. On a choisie la méthode d'Hubert permettant de déterminer des dates de ruptures.

3. Résultats et discussions

3.1. La pluviométrie annuelle des stations pluviométriques

Une rupture peut être définie de façon générale par un changement climatique réel, par le changement des conditions de mesures (déplacement de station, apparition de constructions devant cette station, développement de grandes arbres non présent auparavant, outil endommagé ...), dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu. La figure 3 montre qu'il y a des changements des précipitations annuelles dans le bas Chélif durant la période 1972-2010.

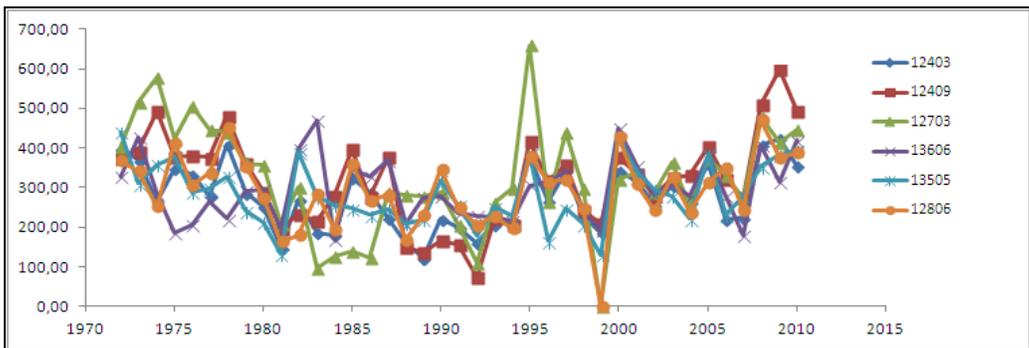


Figure 3. Variation de la pluviométrie annuelle dans la plaine du Bas-Cheliff (1972-2010)

3.2. Détections des changements pluviométriques annuels

La figure 4a représenté la détection de changement pluviométrique da la station de Merdja Sidi Abed, on remarquer trois périodes de ruptures. La première de 1972 à 1979 avec un taux de précipitation moyenne d'environ 335,97mm, la deuxième période (1980-1994) les précipitations moyennes baissent à environ 210,14 mm (-37,45%). Une troisième période entre 1995 à 2010, les précipitations moyennes ont connu une augmentation de 94,16 mm, le gain pour cette période est de 30,95%, cette augmentation reste loin de la valeur enregistré durant la première période.

La figure 4b représenté la détection de changement pluviométrique da la station de Ouarizane village et montre qu'il y a Cinq périodes. La première du 1972 à 1979 où le taux de précipitation moyenne atteint les 404,52 mm, en deuxième période (1980-1987) il y a un baisseement de précipitation moyenne à 283,04 mm, par un déficit de 37,45%. En troisième période (1995-2007), les précipitations moyennes ont continué à diminuer vers 157,92 mm avec un déficit 44,20%, la quatrième période a marqué une augmentation de précipitation à 322,19 mm avec un gain de 50,98%, et la cinquième période aussi a marqué une augmentation à 533,23 mm avec un gain de 39,57%. Cette augmentation de précipitation moyenne dans la dernière période a dépassé celle donnée en première période.

La figure 4c déterminé la détection de changement pluviométrique da la station de Kenenda Ferme et montre qu'il y a trois périodes. La première du 1972 à 1980 où le taux de précipitation moyenne atteint les 499 mm, une deuxième période (1981-1993) il y a une diminution des précipitations moyennes à 209,3 mm, avec un déficit de 58,09%. En troisième période (1994-2010), les précipitations moyennes ont augmenté à 344,29 mm le déficit est réduit, cette période a marqué un gain de précipitation à 39,20%, Malgré cette augmentation, les précipitations moyennes de cette période n'ont pas dépassé celles qui ont marqué dans la première période.

Les autres stations caractérisées par un régime pluviométrique annuel homogène durant la période étudié de 1972 à 2010.

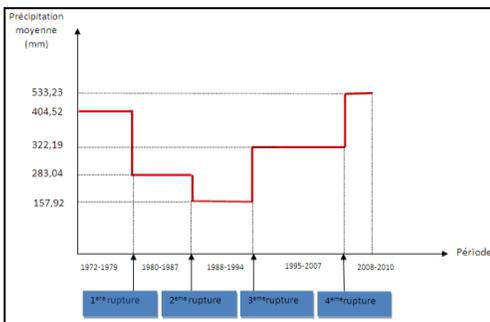


Figure 4a. Régime pluviométrique annuel
(Station Merdja Sidi Abed)

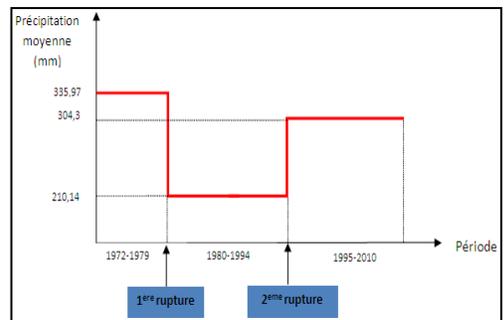


Figure 4b. Régime pluviométrique annuel
(Station Ouarizane village)

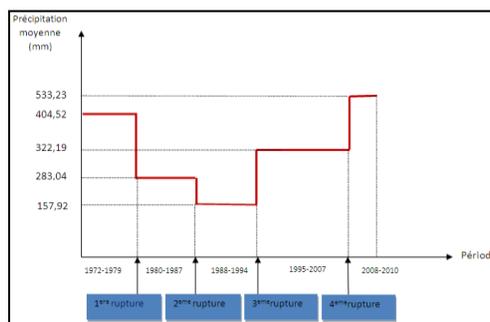


Figure 4c. Régime pluviométrique annuel
(Station Kenenda Ferme)

3.3. Présentation cartographique de régime pluviométrique

La carte ci-dessous (Figure 5), montre que les stations situées à l'ouest de la zone possèdent un régime pluviométrique homogène donnant l'information que cette région est caractérisé par un couvert végétal faible exprimé par un taux de salinité est très élevé [3] (>14 dS/m) et une géomorphologie plate. Par contre la région Est, on observe de 3 à 5 régimes pluviométriques, ce changement est du aux facteurs topographiques, surfaces d'eaux (Barrage Gargar et Merdja Sidi Abed) plus la présence des cultures agricoles (l'arboriculture) les sols sont moins salé par rapport à la zone d'Ouest [4].

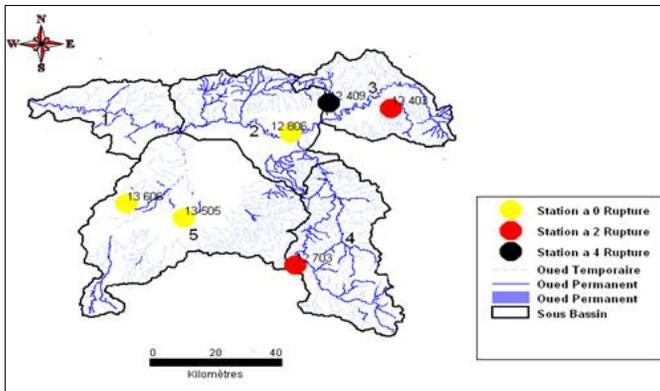


Figure 5. Carte représentant le changement des régimes pluviométriques annuels

3.4. Détections des changements pluviométriques saisonniers

L'hiver : Selon la carte ci-dessous (Figure 6a), on remarque que quatre stations sont caractérisées par un régime pluviométrique saisonnier homogène, sauf deux stations qui se caractérisent par deux régimes pluviométrique. L'homogénéité du régime est expliquée par la régularité des pluies dans la saison hivernale (forte précipitation) et l'homogénéité de la pleine, Le changement du régime dans la station d'Ouarizane village, est du à la situation géographique de la station au Nord de la zone (facteur de longitude). Le changement du régime dans la station de Kenenda Ferme, est influencé par la longitude neanmoins l'altitude de la station (509 m au dessus de niveau de la mer). **Le printemps :** La carte de la Figure 6b, on remarque que les stations de l'ouest de la zone sont caractérisées par un régime pluviométrique saisonnier qui varie entre un à deux régimes ou il est presque homogène parce que ces stations sont localisées dans la dépression de Gaa qui se caractérise par une homogénéité des reliefs et non pas du couvert végétal ; Par contre la station de l'Est montre trois régimes pluviométriques, cette variation du régime est en relation avec le microclimat créé par la Merdja Sidi Abed [5].

L'été : Les stations situées à l'Ouest de la zone ont un régime pluviométrique homogène sauf la station de Relizane DEMRH (Figure 6c) qui se caractérise par trois régimes pluviométriques, parce que cette région (la dépression de Gaa) est caractérisée par un couvert végétal faible surtout en été, et une géomorphologie plate et on prend en compte la rareté des pluies en été. Par contre la région Est, on a observé cinq régimes pluviométriques, ce changement est du aux facteurs topographique et surfaces d'eaux [2].

L'automne : les six stations connus un régime pluviométrique homogène, par ce que cette région est caractérisée par des moyennes de précipitations un peux stable durant cette saison [6].

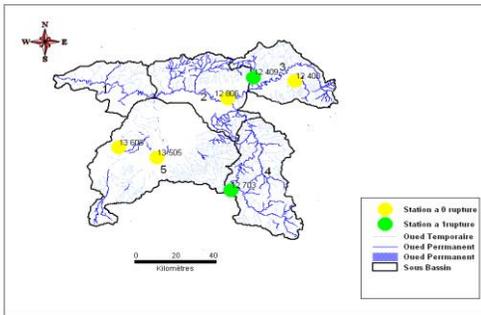


Figure 6a. Régime pluviométrique saisonnier (Période hivernale)

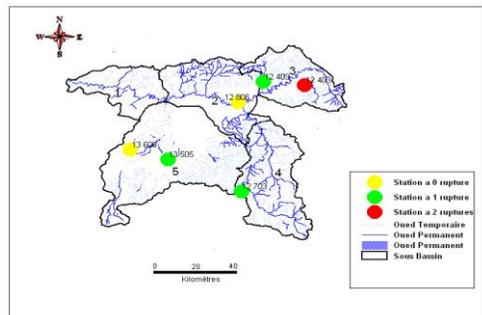


Figure 6b. Régime pluviométrique saisonnier (Période printanière)

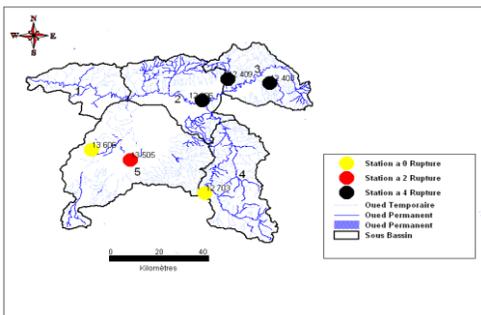


Figure 6c. Régime pluviométrique saisonnier (Période estivale)

Conclusion

Les variations temporelles des régimes pluviométriques des six stations dans la plaine du Bas Chéiff sont très hétérogènes. On a expliqué ce changement du régime pluviométrique par l'irrégularité des moyennes des précipitations mensuelles, saisonnières et annuelles. Les précipitations s'évaluent de l'Ouest à Est avec la latitude, longitude et l'altitude, par contre le régime se change de l'Est en Ouest. Le régime pluviométrique est hétérogène dans la partie Nord-Est de la zone d'étude, plusieurs facteurs influencent ce changement, les plus importants sont : la topographie de la zone, les microclimats créés par les surfaces d'eau et le couvert végétal.

La stabilité du régime pluviométrique au Sud-Ouest de la zone revient à la topographie plate de la dépression de Gâa qui se caractérise par le relief plat et salinité très élevée qui influence le développement de la végétation. Comme perspective, ce travail sera beaucoup plus intéressant et même valorisé à travers l'application de la géostatistique en faisant intervenir un nombre élevé de données pluviométriques en favorisant l'étude des ruptures à des petites échelles spatiale (échelle de la parcelle).

Références

- [1] H. Meddi H., M. Meddi, Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algérie, Géographia Technica, 2 (2007) 49-55.
- [2] M. Rata, Variabilité spatio-temporelle de la salinité dans la plaine du Bas Chéiff : Etablissement d'une Banque de Données, Thèse de magister, Université Hassiba Benbouali (Chlef, Algérie) 2010.
- [3] A. Douaoui, Variabilité spatiale de la salinité et sa relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Chéiff : Apport de la géostatistique et de la télédétection, Thèse de doctorat d'état, Institut National d'Agronomie (Alger, Algérie) 2005.
- [4] D. Mokhtari, Apport de la télédétection dans l'évaluation de la dégradation des états de surface en milieu salin (Le Bas-Chéiff), Thèse de magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Alger, Algérie) 2009.
- [5] I. Yahiaoui, Evaluation de la dynamique spatiale de l'occupation du sol dans la plaine du Bas-Chéiff (Algérie) : Apport de la Télédétection. Thèse de magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Alger, Algérie) 2011.
- [6] R. Amrani, Variabilité spatio-temporelle de la sécheresse dans le bassin versant de l'Oued Chéiff, Algérie. Thèse de magister. Université Hassiba Benbouali (Chlef, Algérie) 2011.



Colloque International

Ressources en Eau et Changement Climatique en Région Méditerranéenne

Eau - Climat'2014

Hammamet 21,22 et 23 Octobre 2014

Sommaire

Changements Climatiques en Région Méditerranéenne

Zouhaier Nasr (INRGREF – Tunisie), King L.

Projections des températures moyennes sous différents scénarios de changement climatique et conséquence sur l'évapotranspiration en Tunisie

Laila Oualkacha (FST Mohamedia - Maroc), Stour L., Agoumi A.

Intégration du Changement Climatique dans la Gouvernance du Secteur de l'Eau : Contexte et Besoins des Pays du Maghreb

Kouidri Sofiane (Université Abou bekr Belkaid Tlemcen, Algérie) DAHMANI Abdelmajid, MEGNOUNIF Abdesselam, GHENIM Abderrahmane Nekkache

Evolution des paramètres climatiques dans le nord ouest de l'Algérie

Sarra Lakehal (Univ. Abou Bakr Belkaid - Algérie)

Le climat et la dégradation du sol agricole dans la région de Tlemcen

Atchade A. (Université d'Abomey-Calavi, Bénin)

Evaluation endogène des phénomènes hydro-climatiques en pays mina dans les communes de Come et de Grand-Popo au Bénin

Sabri Kanzari (INRGREF - Tunisie)

Simulation de la dynamique de l'eau et des sels dans une région semi-aride en Tunisie – Etude de l'effet d'un changement climatique

Khaoula Melki (ENIT - Tunisie), Bjo Okez N., Mouillot F., Bargaoui Z.

Estimation du bilan en eau et carbone en Tunisie septentrionale en adoptant le modèle de cycle biogéochimique CASA.

Salim Djerbouai (LEGHYD - Algérie), Doudja SOUAG-GAMANE.

Drought forecasting using artificial neural network and stochastic models, application in the algerois catchment.

Houcine Jeder (IRA - Tunisie), Ben Khalifa A., Sghaier M.

Impact des changements climatiques sur l'agriculture : Application de l'approche Ricardienne, Cas de la plaine de Jeffara.

Nadia Amraoui (BRGM - France): Olivier Douez, Philippe Stollsteiner

Modélisation des impacts potentiels du changement climatique sur la ressource en eau de deux systèmes aquifères régionaux Français.

Mohamed Rata (Université Djillali Bounaama de Khemis-Miliana, Algérie)

Contribution à l'étude de la variabilité temporelle du régime pluviométrique dans le cadre du changement climatique « cas la plaine du Bas Cheliff »

