



HAL
open science

Impact du changement climatique sur l'évolution de l'érosivité des pluies dans le Rif Occidental (Nord du Maroc)

Fatiha Choukri, Mohamed Chikhaoui, Mustapha Naimi, Damien D. Raclot, Yannick Pépin, Kifayath Lafia

► **To cite this version:**

Fatiha Choukri, Mohamed Chikhaoui, Mustapha Naimi, Damien D. Raclot, Yannick Pépin, et al.. Impact du changement climatique sur l'évolution de l'érosivité des pluies dans le Rif Occidental (Nord du Maroc). *European Scientific Journal*, 2016, 12 (32), pp.79-93. 10.19044/esj.2016.v12n32p79 . hal-02634046

HAL Id: hal-02634046

<https://hal.inrae.fr/hal-02634046>

Submitted on 27 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Impact Du Changement Climatique Sur L'évolution De L'érosivité Des Pluies Dans Le Rif Occidental (Nord Du Maroc)

Fatiha Choukri (Etudiante doctorat)

Pr. Mohamed Chikhaoui

Pr. Mustapha Naimi

Département des Ressources Naturelles et Environnement,
Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

Dr. Damien Raclot

Ing. Yannick Pepin

Institut de Recherche pour le Développement, UMR LISAH, Montpellier,
France

Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

Ing. Kifayath Lafia

Département des Ressources Naturelles et Environnement,
Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

doi: 10.19044/esj.2016.v12n32p79 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n32p79](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n32p79)

Abstract

The rainfall erosivity factor (R factor in Universal Soil Loss Equation), denoting rain energy, is a key factor for soil loss modeling. Its present and future estimation is thus significant for any action related to soil and water conservation and planning. The extended series of precipitations at high temporal resolution, essential to its evaluation, are not readily available in Morocco. The objective of this study is to predict the evolution of rainfall erosivity by 2080 in the Western Rif, based on predictions of daily rain provided by the General Climatic Models (GCMs). To reflect the seasonal variability of rainfall, and thus of R factor, a series of instantaneous rain measured over 35 consecutive years was used to monthly calibrate a model to calculate erosivity based of daily rainfall. The application of this model to the predictions of different GCMs and for various scenarios of climate evolution in Western Rif shows a weak evolution of erosivity on an annual timescale but a very strong evolution of the latter according to seasons with a reduction in R factor during winter and spring, and a pronounced increase during summer and autumn. This discernable change of the seasonality of

rainfall erosivity is very useful for adjusting the evolution of agricultural practices and for selecting appropriate soil protection measures.

Keywords: Climate change, R factor, GCMs, rainfall erosivity, Morocco

Résumé

Le facteur d'érosivité des pluies (facteur R de l'équation universelle de pertes en sol), traduisant l'énergie de la pluie, est un facteur clé dans la modélisation des pertes en sol. Son estimation actuelle et future est donc importante pour toute action liée à la conservation et la planification des ressources en eau et en sol. Les longues séries de précipitations à une résolution temporelle très fine, nécessaires à son évaluation actuelle, sont rarement disponibles à l'échelle du Maroc. L'objectif de cette étude est la prédiction de l'évolution de l'érosivité des pluies à l'horizon 2080 dans le Rif Occidental en ayant recours aux prévisions journalières de pluie fournies par les modèles climatiques généraux (MCGs). Pour refléter la variabilité saisonnière des pluies, et donc du facteur R, on a utilisé une chronique de pluie instantanée mesurée sur 34 années consécutives pour caler, mois par mois, un modèle de calcul de ce facteur à partir des pluies journalières. L'application de ce modèle d'évaluation de l'érosivité aux prévisions fournies par différents MCGs et pour différents scénarios d'évolution du climat dans le Rif Occidental montre une faible évolution de l'érosivité à l'échelle annuelle, mais une très forte évolution de celle-ci selon les saisons avec une diminution du facteur R en hiver et au printemps et une augmentation marquée de celle-ci pendant l'été et l'automne. Ce changement prononcé de la saisonnalité de l'érosivité des pluies est très déterminant dans l'orientation de l'évolution des pratiques agricoles et le choix des mesures adéquates de protection des sols.

Mots-clés : Changement climatique, facteur R, MCGs, érosivité de la pluie, Maroc

Introduction

Les Modèles Climatiques Généraux (MCGs), basés sur des modèles de circulation générale couplés atmosphère-océan, fournissent une représentation de l'ensemble du système climatique. Ils présentent des outils de recherche pour l'étude et la simulation du climat, ainsi que pour les prévisions climatiques journalières, mensuelles, saisonnières et interannuelles (GIEC, 2013). Plusieurs MCGs sont actuellement utilisés pour simuler la sensibilité climatique à l'augmentation de la concentration du dioxyde de carbone et d'autres paramètres importants (Zhang et al., 2005). Ces simulations peuvent fournir des données réalistes sur le climat (GIEC,

2013). Des études antérieures ont utilisé les MCGs pour la simulation des températures et des précipitations à différentes échelles spatiales et temporelles (Wilby, 2005 ; Wilby, 2007 ; Zhang et al., 2010).

Les projections d'augmentation des gaz à effet de serre devraient non seulement augmenter la température moyenne mondiale, mais également influencer les caractéristiques des précipitations (Sauerborn et al., 1999). Les variations du régime des précipitations, à savoir la quantité de pluie par événement, l'intensité, la fréquence et la saisonnalité des précipitations, peuvent contrôler l'érosion du sol (Pruski & Nearing, 2002) et amener une hausse de la perte en sol (Sauerborn et al., 1999). En 2007, le GIEC a conclu que l'homme contribue à l'augmentation de l'occurrence des événements extrêmes (inondations et sécheresses). Ces derniers peuvent être considérés comme les enjeux majeurs associés aux changements climatiques (Hitz & Smith, 2004). Les investigations scientifiques réalisées par Easterling et al. (2000) prévoient une augmentation des événements extrêmes de précipitation dans de nombreuses régions du monde. En impactant le volume et l'érosivité des précipitations, l'intensité et la fréquence de ces événements accélèrent l'érosion des sols (Zhang et al., 2010). Le changement de saisonnalité des pluies, associé avec une augmentation de la fréquence des événements extrêmes, se traduit souvent par une hausse des pluies intenses après des périodes de sécheresse, ce qui constitue une combinaison dangereuse à l'égard de l'érosion hydrique (Zhang et al., 2005).

Au Maroc, la région du Rif constitue une zone assurant une partie importante des ressources en eau du pays. Malheureusement, l'érosion hydrique y est très marquée du fait d'une combinaison des facteurs défavorables : une topographie accidentée, un réseau hydrographique très ramifié et très encaissé, une lithologie marneuse imperméable et très érodable, un régime de pluie comprenant des averses intenses et une activité anthropique très marquée mettant par exemple à nu de très grandes étendues de sols à l'automne lors des labours. Cette forme de dégradation des sols réduit fortement la performance agricole en amont du fait de la perte de la partie la plus fertile du sol, mais aussi la durabilité des infrastructures en aval (barrages, canaux, etc.) du fait de l'envasement de celles-ci.

L'érosivité des pluies (facteur R) est définie dans l'équation universelle de perte en sol ($A = R * K * LS * C * P$; Wischmeier & Smith, 1978), comme la perte potentielle du sol causée par les précipitations. Ce facteur dépend de l'intensité des pluies et de son énergie cinétique qui découle directement du diamètre des gouttes de pluie et de leur vitesse de chute (Stengel & Gelin, 1998). En l'absence de données sur le diamètre et la vitesse de chute des gouttes, Wischmeier & Smith (1978) proposent d'évaluer l'érosivité des pluies pour chaque averse en multipliant l'intensité maximale en 30 minutes (I30) de l'averse par l'énergie cinétique (E) qui est

estimée à partir de l'intensité instantanée de la pluie par une équation empirique. Le calcul de l'érosivité requiert donc des mesures instantanées de la pluie (pluviogrammes), données qui ne sont pas toujours disponibles sur de longues chroniques (Renard et al., 1991). L'absence de séries de données de pluviographie a conduit certains auteurs à trouver des relations entre l'érosivité de la pluie R et les précipitations i) journalières (Richardson et al., 1983 ; Bagarello & D'Assaro, 1994 ; Petkovsek & Mikos, 2004), ii) mensuelles (Leprun, 1981 ; Val et al., 1986 ; Oliveira Jr. & Medina, 1990; Silva, 2001; Grimm et al., 2003 ; Morais et al., 1991), iii) annuelles (Renard & Freimund, 1994 ; Oliver, 1980), voire iv) interannuelles (Arnoldus, 1977 ; Kassam et al., 1992).

L'impact du changement climatique sur le régime des pluies peut engendrer des modifications majeures de l'érosivité des pluies, tant en valeur annuelle qu'en répartition saisonnière, qui peuvent avoir des effets considérables sur les pertes en terre. Afin de pouvoir orienter les activités anthropiques (pratiques agricoles par exemple) et les aménagements de protection du sol, il est indispensable de prévoir l'évolution probable de l'érosivité des précipitations selon les principaux scénarios d'évolution climatique envisagés aujourd'hui.

Dans ce contexte, l'objectif de ce papier est d'évaluer l'impact du changement climatique sur la dégradation des sols par l'érosion hydrique en analysant l'évolution du facteur R dans le Rif Occidental. Pour ce faire nous avons reconstitué une chronique continue de mesures haute-fréquence des précipitations sur une station de la région (bassin versant de Saboun) allant de 1981 à 2016 et en avons dérivé l'érosivité de la pluie pour chaque averse, que nous avons agrégé pour calculer une érosivité journalière. Le calcul du facteur R a été réalisé en utilisant la formule empirique proposée dans le modèle de l'équation universelle révisée des pertes en sol (RUSLE) (Brown & Foster, 1987). À partir de cette même chronique de mesure, nous avons calculé la pluie journalière et calé un modèle prédictif de l'érosivité basé sur les pluies journalières et suivant le modèle exponentiel proposé par Richardson et al. (1983). Le calage des deux paramètres de ce modèle sur la chronique de pluies mesurées a été effectué mois par mois afin de tenir compte des changements saisonniers de la nature des pluies propres au site d'étude. Ce modèle prédictif de l'érosivité des précipitations, basé sur des valeurs de pluies journalières nous a permis de quantifier l'évolution de l'érosivité des pluies en utilisant les prévisions actuelles et futures des valeurs journalières des précipitations fournies par les modèles climatiques. Pour être exhaustif, nous avons testé les prévisions fournies par quatre modèles climatiques et deux scénarios d'évolutions du climat.

Matériel et méthodes

Zone d'étude

La zone d'étude fait partie du Rif Occidental, représentée ici par la station de Saboun (**Fig. 1**). Elle appartient à l'étage bioclimatique subhumide à hiver doux et été sec, caractérisé par une période sèche entre mai et septembre et une période humide qui s'étale d'octobre à mars. C'est l'une des régions les plus arrosées du pays, connaissant ainsi une activité hydrologique très importante. Les précipitations moyennes annuelles sont de 751 mm à Saboun (1981-2016) et la température moyenne est de 18 °C à Kalaya (1984-2004).

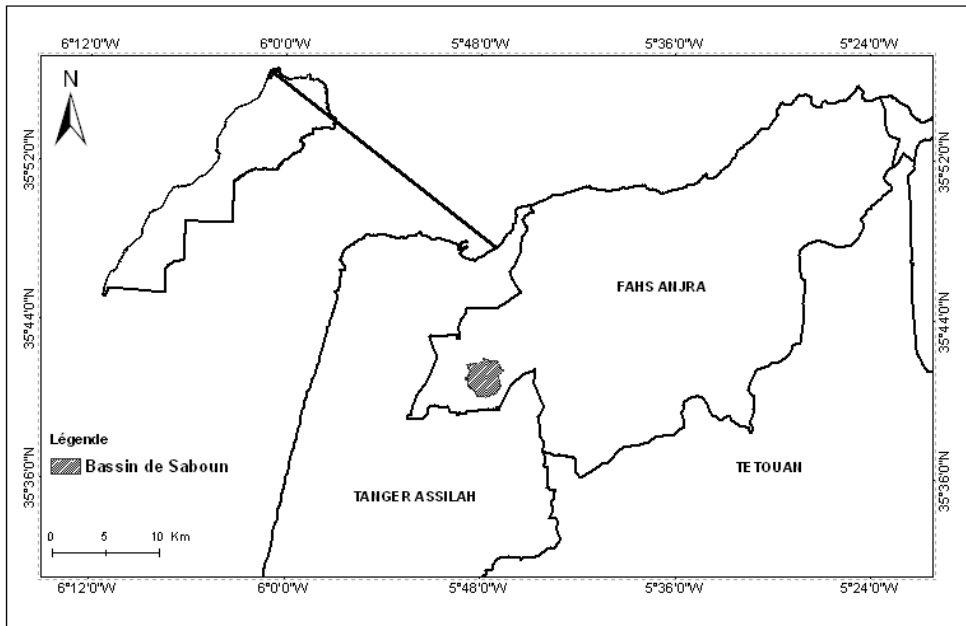


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.

Calcul de l'érosivité des pluies mesurées : Facteur R

Les mesures de précipitation proviennent d'un enregistrement haute-fréquence de la pluie (pluviographe basé sur des basculements d'augets chaque 0.1 mm de pluie) de la station de Saboun (35.6668 N, 5.7970 W). Quelques rares périodes de lacunes de données à Saboun ont été complétées avec les données de la station de Romane (35.7040 N, 5.6560 W), située à proximité et présentant des caractéristiques très proches en matière de pluie journalière et d'intensité. L'existence de plusieurs lacunes dans l'année hydrologique 2006-2007 sur les deux stations nous a amené à exclure cette année de la chronique de mesures et donc du calcul du facteur R. La chronique continue ainsi constituée révèle une moyenne annuelle de 751 mm pour la période de 1981-2016 (hors 2006-2007). Une valeur journalière de la pluie, calculée de 8h00 à 8h00 le lendemain, a tout d'abord été évaluée. Le

calcul du facteur R d'érosivité des pluies nécessite, en premier lieu, d'identifier les différentes averses. Pour ce faire, un critère de séparation entre deux évènements de pluie, en l'occurrence la présence d'un intervalle de deux heures avec une intensité inférieure à 1 mm/h a été appliqué. Les averses dont le cumul de pluies est inférieur à 2 mm ont été éliminées. Le calcul de R pour chaque averse a été ensuite basé sur le produit de l'intensité maximale de l'averse durant 30 minutes et le calcul de l'énergie cinétique E (MJ ha⁻¹ mm⁻¹) en fonction de l'intensité instantanée de la pluie I (mm h⁻¹) selon le modèle RUSLE (Brown & Foster, 1987) :

$$E = 0.29*(I - 0.72 e^{-I/20}) \quad (eq. 1)$$

Une valeur journalière de R, calculée comme la pluie journalière de 8h00 à 8h00 le lendemain, a été déduite des valeurs de R par averse. En cas d'averse à cheval entre deux jours, la valeur de R pour l'averse a été partagée entre les deux jours au prorata de la durée de l'averse sur chacune des journées.

Modèle d'estimation du facteur R à partir des pluies journalières

La mesure haute-fréquence de la pluie à Saboun a permis de constituer une base de données journalières associant une érosivité journalière E_j avec une pluie journalière P_j sur l'ensemble de la chronique de 34 années de suivi. Cette base a été utilisée pour caler un modèle de prédiction de l'érosivité journalière E_j sous la forme d'une relation exponentielle proposée par Richardson et al. (1983) :

$$E_j = a P_j^b + \mathcal{E} \quad (eq. 2)$$

Avec a et b des paramètres empiriques ayant une validité locale et \mathcal{E} une erreur aléatoire.

Pour prendre en compte la saisonnalité de la nature des pluies, nous avons opté pour deux méthodes d'ajustement : caler une valeur de a et b pour chaque mois de l'année comme Angulo-Martínez & Beguería (2009), ou imposer b = 2 et ajuster une valeur de a pour chaque mois de l'année comme Brown & Foster (1987) et Petkovsek & Mikos (2004).

Prévision des pluies journalières pour la période 2070-2095

Les MCGs sont capables de fournir, pour différents scénarios d'évolution du climat, des prévisions de variables climatiques au pas de temps journalier pour les prévisions les plus fines. Dans cette étude, nous avons considéré les scénarios A2 (pessimiste) et A1B (moyennement optimiste) qui correspondent à différentes évolutions des émissions de gaz à effet de serre (GIEC, 2007) et quatre MCGs décrits dans le tableau 1. Les prévisions journalières de pluie à l'emplacement de la station de Saboun pour ces quatre modèles et les deux scénarios retenus pour la période future cible (2070-2095) ont été extraites en avril 2014 du site interactif

(<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>). Ce site recense les prévisions de différents modèles climatiques généraux pour différents scénarios de changement climatique à l'échelle de la planète à un pas de temps journalier. Au final nous avons donc recueilli huit séries de précipitations journalières pour la période 2070-2095. Nous avons également téléchargé sur ce site la série prévision des pluies journalières pour la station de Saboun pour la période de référence 1960-1990, série commune pour tous les modèles et scénarios. C'est cette série pluviométrique prédite pour la période actuelle (1960-1990), et non la série mesurée, qui a été utilisée dans ce papier comme référence pour établir les évolutions de l'érosivité et s'affranchir des erreurs et incertitudes de prédiction des modèles MCGs par rapport aux valeurs observées localement.

Modèle	Pays	Référence
CNRM_CM3	France	(Salas-Mélia et al., 2005)
CSIRO-MK3.5	Australie	(Gordon &Scientific, 2002)
ECHAM5	Allemagne	(Roeckner et al., 2003)
MIROC 3.2 (medres)	Japon	(Hasumi & Emori, 2004)

Tableau 1 : Modèles de circulations générales utilisés dans cette étude.

Analyse de l'évolution de l'érosivité

L'équation 2, permettant d'estimer le facteur R à partir des pluies journalières, a tout d'abord été ajustée localement (Saboun) avec les données mesurées. L'utilisation de cette équation a ensuite permis d'évaluer l'érosivité des pluies pour les huit séries de pluies journalières récupérées pour la période 2070-2095, ainsi que pour la série concernant la période de référence 1960-1990. Des statistiques classiques de l'évolution du facteur R ont alors été réalisées à l'échelle de l'année, du mois et de la saison afin de tirer les principaux enseignements sur l'impact du changement climatique sur le facteur R dans le Rif Occidental.

Résultats et discussions

Calcul du facteur R observé

La chronique de mesures fait apparaître que la saison la plus érosive est l'automne, avec $322,1 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ comme valeur maximale en octobre, alors que la saison la plus pluvieuse est l'hiver (**Fig. 2**). Annuellement, la station de Saboun enregistre une valeur moyenne du facteur R_RUSLE de $1551,2 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ pour la période 1981-2016.

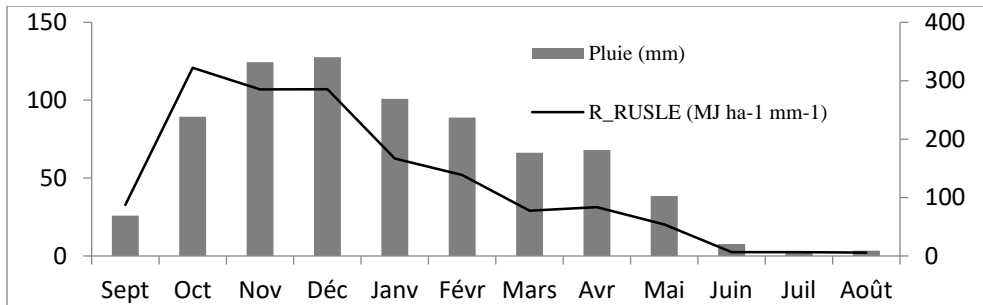


Figure 2 : Distribution mensuelle des pluies et du facteur R déduit de la chronique de mesures de la pluie à Saboun (1981-2016).

Modèle prédictif du facteur R à partir des données de pluie journalière

Nous avons procédé à l'ajustement des paramètres a et b du modèle exponentiel en utilisant la base de données journalières, combinant pluie et érosivité, constituées à partir de la chronique des pluies mesurées à Saboun (1981-2016). Les indices statiques RMSE et Nash ont été retenus pour évaluer la qualité de prédiction de l'érosivité. Ces deux indices ont été calculés à partir de données journalières et à partir de données agrégées au mois. L'analyse de ces deux indices a montré que l'ajustement, en fixant b à 2 fournissait une qualité d'ajustement extrêmement proche de celui avec b variable.

Dans ce qui suit, nous considérons uniquement les résultats obtenus avec un modèle exponentiel avec b fixé à 2. Nous présentons d'abord la comparaison, au pas de temps journalier, entre valeurs simulées et valeurs observées de l'érosivité R (**Fig. 3**).

Les valeurs ajustées de a , la moyenne de l'érosivité observée et les indices de qualité de l'ajustement, calculés sur la base des données agrégées au mois, sont synthétisés mois par mois dans le tableau 3.

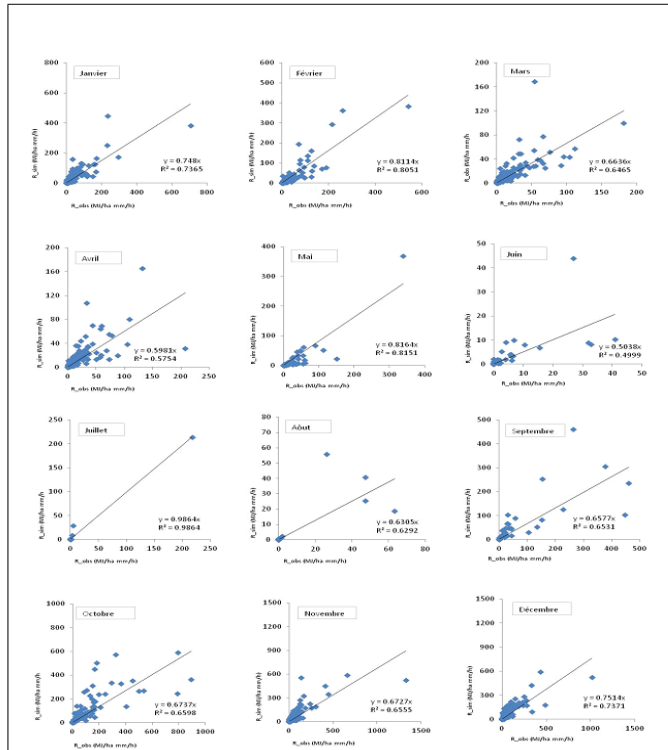


Figure 3 : Comparaison, mois par mois, des valeurs journalières de R observé et de R simulé par l'équation 2 (b fixé à 2).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
a	0,14	0,12	0,08	0,08	0,07	0,05	0,06	0,06	0,04	0,06	0,23	0,10
Moy	92,7	342,3	293,7	313,2	182,5	156,4	78,0	83,4	63,3	12,3	56,2	21,1
RMSE	126	151,7	196,1	144,6	92,7	55,3	33,6	56,3	43,4	8,9	15,4	20,2
Nash	0,60	0,91	0,58	0,83	0,79	0,88	0,86	0,52	0,77	0,80	0,97	0,62

Tableau 2 : Qualité de l'ajustement du modèle exponentiel avec b=2, selon les mois, calculée sur la base des érosivités mensuelles.

La qualité de l'ajustement est variable selon les mois, avec une prédiction moins bonne pour le mois d'avril d'après le critère de Nash. La figure 4 illustre l'évolution du paramètre « a » au cours de l'année pour la station de Saboun. Cette évolution apparaît tout à fait conforme avec ce que l'on sait des pluies sur la région. En effet les valeurs fortes de a, et donc de l'érosivité des pluies, trouvées en été et en automne, avec un maximum en juillet, sont bien cohérentes avec le caractère orageux des pluies au cours de ces saisons. A l'opposé, les pluies d'hiver et du printemps sont généralement plus longues et plus volumineuses, mais moins intenses.

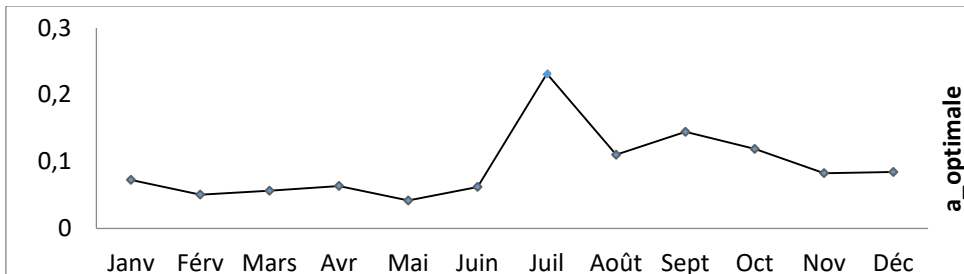


Figure 4 : Évolution mensuelle de la valeur du paramètre **a** ajusté de l'équation 2 (**b** étant fixé à 2).

La figure (5, A) présente les précipitations moyennes annuelles et saisonnières pour la période 2070-2095 et la période de référence (1960-1990) pour les différents modèles et scénarios climatiques testés. Les précipitations moyennes annuelles au niveau de Saboun connaîtraient une diminution oscillerait entre 14 et 23 % selon les modèles adoptés. Cette tendance à la baisse des précipitations annuelles ne se fait pas uniformément au cours des saisons, mais un net changement de répartition des pluies saisonnières est clairement visible, avec une augmentation des pluies d'été et d'automne et une diminution des pluies d'hiver et du printemps (Fig. 6, B et 6, C).

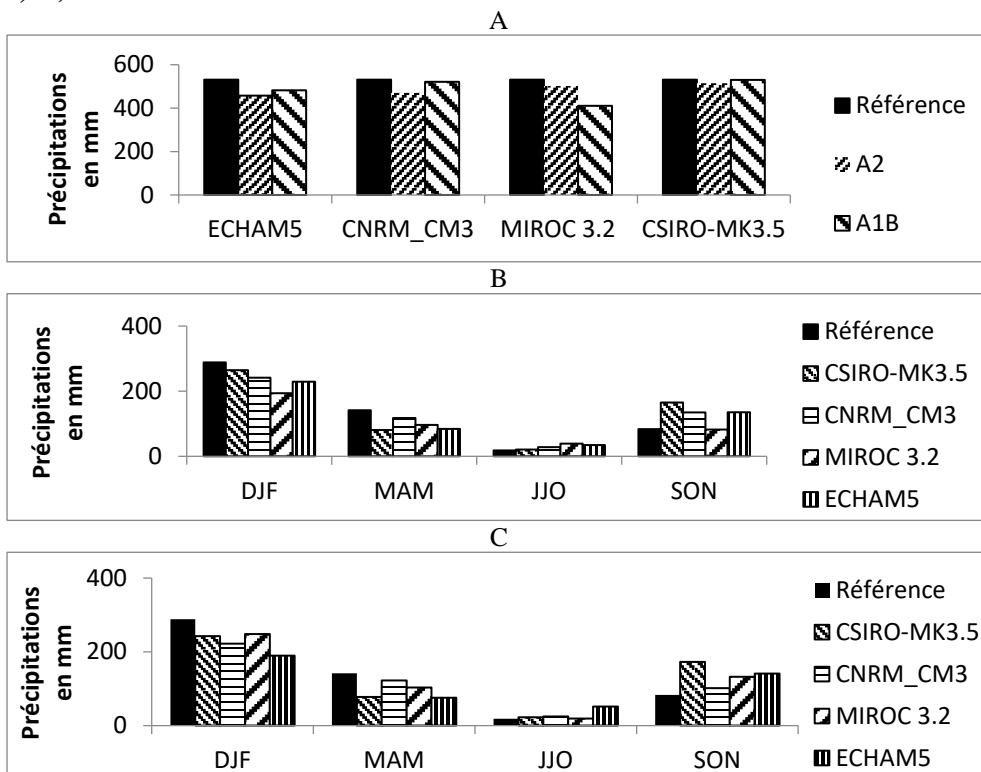


Figure 5 : Tendances futures des précipitations par rapport à la référence. **A** : annuelles, **B** : saisonnières selon le scénario A1B, **C** : saisonnières selon le scénario A2.

L'analyse de l'évolution du facteur R évalué à l'aide de l'équation 2 fait apparaître une variabilité selon les huit combinaisons de modèles et de scénarios adoptés : une diminution qui pourrait atteindre 42% selon le modèle MIROC 3.2 contre une augmentation de l'ordre de 33% suivant le modèle CSIRO-MK3.5 (Fig. 6, A). Un changement annuel moyen très faible est prévu pour le facteur R au niveau de la région et qui varierait entre -8 et 1% respectivement suivant les scénarios A2 et A1B.

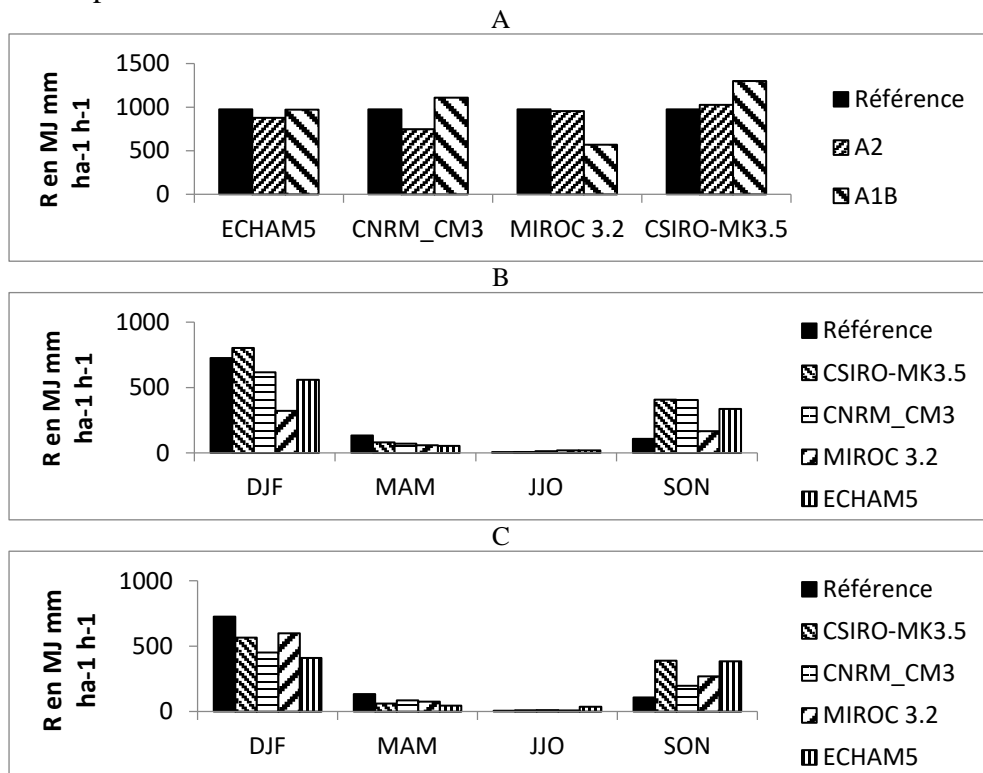


Figure 6 : Tendances futurs du facteur R par rapport à la référence. A : annuelles, B : saisonnières selon le scénario A1B, C : saisonnières selon le scénario A2.

L'examen des évolutions saison par saison (Fig. 6, B et 6, C) montre une très forte augmentation du facteur R au niveau du Rif Occidental pendant l'été avec des évolutions positives pour les quatre modèles allant de 8 à 184% et de 46 à 410%, respectivement pour les scénarios A1B et A2. L'augmentation est encore plus marquée pour l'automne, avec des écarts variant de 154 à 376% et de 182 à 360% pour les scénarios A1B et A2 respectivement. En contrepartie, cette analyse montre une diminution du facteur R pendant le printemps pour les deux scénarios climatiques de 50% en moyenne. L'hiver, quant à lui, devrait connaître une diminution de 21% selon le scénario moyen A1B et de 30% selon le scénario A2. Si

l'augmentation prévue de l'érosivité des pluies à l'échelle annuelle reste limitée +33% au maximum selon le modèle CSIRO-MK3.5, l'évolution de la saisonnalité des pluies va engendrer des évolutions très prononcées de l'érosivité des pluies pendant les saisons d'été et d'automne pour le Rif Occidental. Ce résultat est très préoccupant car ces deux saisons représentent des périodes à fort risque d'érosion des sols, étant donné la faible couverture végétale des sols à ce moment de l'année. Il est donc nécessaire d'anticiper ces évolutions et de chercher par exemple à modifier les pratiques agricoles ou d'introduire de nouvelles cultures pour éviter de mettre à nu le sol au moment des labours d'automne. Des solutions d'adaptation permettant de maintenir un couvert végétal élevé en été et en automne doivent être trouvées si l'on veut éviter un accroissement des vitesses de sédimentation des barrages dans la région rifaine, zone la plus humide au Maroc.

Conclusion

La présente étude a permis d'évaluer les évolutions de l'érosivité des pluies dans le Rif Occidental à partir des projections climatiques produites par quatre Modèles Climatiques Globaux selon deux scénarios de changement climatique. À l'échelle annuelle, les prédictions nous montrent que l'érosivité annuelle des pluies allait probablement peu évoluer (moyenne des quatre modèles). Par contre, l'analyse des évolutions de l'érosivité selon les saisons a fait apparaître une hausse de l'érosivité de pluies au cours de l'été et de l'automne pour les différents modèles et scénarios utilisés dans cette étude. Cette hausse est très préoccupante et le risque d'érosion est le plus élevé compte tenu de la faible couverture végétale du sol pendant ces saisons. La recherche de techniques ou mesures d'atténuation et d'adaptation pour lutter contre cette augmentation probable des flux érosifs, et donc des vitesses de sédimentation des barrages de la région, doit mobiliser l'ensemble des acteurs si l'on veut protéger les ressources en eau et en sol du Maroc.

Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre de la JEAI Vecteur soutenu par l'IRD. Il a bénéficié du soutien financier des projets ANR-Transmed "ALMIRA" et Arimnet2 "MASCC".

References:

1. Angulo-Martínez, M., & Beguería, S. (2009). *Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: a comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain)*. J. of Hydrology.

2. Arnoldus, H.M.J. (1977). *Methodology used to determine the maximum potential average 547 annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco*. FAO Soils Bulletin, 34: 39-51.
3. Bagarello, V., & D'Asaro, F. (1994). *Estimating single storm erosion index*. Trans. Am. Soc. Agric. Engrs 37, 785–791.
4. Benbrahim, K.F., Ismaili, M., Benbrahim, S.F., & Tribak, A. (2004). *Problèmes de dégradation de l'environnement par la désertification et la déforestation : impact du phénomène au Maroc*. Science et changements planétaires/Sécheresse 15, 307-320.
5. Brown, L.C. & Foster, G. R. (1987). *Storm erosivity using idealised intensity distributions*. Trans. Am. Soc. Agric. Engrs 30, 293–307.
6. Easterling, D.R., Meehl, G.A., Parmesan, C., Changnon, S.A., Karl T.R., & Mearns, L.O. (2000). *Climate extremes: observations, modeling, and impacts*. Science 289, 2068-2074.
7. Furevik, T., Bentsen, M., Drange, H., Kindem, I., Kvamstø, N.G., & Sorteberg, A. (2003). *Description and evaluation of the Bergen climate model: ARPEGE coupled with MICOM*. Climate Dynamics 21, 27-51.
8. GIEC. (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]*. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages.
9. GIEC. (2013). *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. OMM / PNUE. 204 pp.
10. Gordon, H.B., & Scientific, C. (2002). *The CSIRO Mk3 climate system model*. CSIRO Atmospheric Research Aspendale, Victoria, Australia.
11. Grimm, M., Jones, R.J.A., Rusco, E., & Montanarella, L. (2003). *Soil erosion risk in Italy: a revised USLE approach*. EUR 20677 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, Luxemburg, 26p.
12. Hasumi, H., & Emori, S. (2004). *K-1 coupled gcm (miroc) description*. Center for Climate System Research, University of Tokyo, Tokyo.
13. Hitz, S., & Smith, J. (2004). *Estimating global impacts from climate change*. Global Environmental Change 14, 201-218.
14. Kassam, A.H., Velthuizen, H.T., Mitchell, A.J.B., Fishcher, G.W. & Shah, M.M. (1992). *Agro-Ecological Land Ressources Assessment ford Agricultural Development Planning*.
15. Leprun, J.C. (1981). *A erosao, a conservacao e o manejo do solo no Nordeste Brasileiro*. Recife: Ministerio do Interior. SUDENE, Brasil.

16. Morais, L.F.B., Silva, V. da, Naschienveng, T.M. da C., Hardoin, P.C., Almeida, J. Ede, Weber, O. dos S., Boel, E., & Durigon, V. (1991). *Índice EI30 e sua relação com o coeficiente de chuva do sudoeste de Mato Grosso*. R. Bras. Ci. Solo 15, 339-344 (in Portuguese).
17. Oliveira, Jr.R.C., & Medina, B.F. (1990). *A erosividade das chuvas em Manaus (AM)*. Rev. Bras. Cienc. Solo 14, 235–239.
18. Oliver JE. (1980). *Monthly precipitation distribution: A comparative index*. Professional Geographer 32, p:300–309.
19. Petkovsek, G., & Mikos, M. (2004). *Estimating the R factor from daily rainfall data in the sub-Mediterranean climate of southwest Slovenia*. Hydrological sciences journal, 49 (5): 869-877.
20. Pruski, F., & Nearing, M. (2002). *Climate induced changes in erosion during the 21st century for eight US locations*. Water Resources Research 38, 34-31-34-11.
21. Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., & Porter, J.P. (1991). *RUSLE: Revised universal soil loss equation*. Journal of soil and water conservation 46, 30-33.
22. Renard, K.G., & Freimund, J. R. (1994). *Using Monthly Precipitation Data to Estimate the R factor in the Revised USLE*. J. Hydrol. 157:287–306 p.
23. Richardson, C.W., Foster, G.R., & Wright, D.A. (1983). *Estimation of erosion index from daily rainfall amount*. Trans. Am. Soc. Agric. Engrs 26, 153–160.
24. Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch M., Giorgetta, M., Hagemann S., Kirchner I., Kornblueh L., & Manzini, E. (2003). *The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description*.
25. Salas-Mélia, D., Chauvin, F., Déqué, M., Douville H., Gueremy, J., Marquet P., Planton, S., Royer, J., & Tyteca, S. (2005). *Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model*. Climate Dynamics 103, 1-36.
26. Sauerborn, P., Klein, A., Botschek, J., & Skowronek, A. (1999). *Future rainfall erosivity derived from large-scale climate models: methods and scenarios for a humid region*. Elsevier, geoderma 93 (1999), pp 269-273.
27. Silva, A.M. (2001). *Índice de erosividade e sua relação com a pluviometria e coeficiente de chuva em Juazeiro (BA)*. Piracicaba, Sao Paulo, Brazil (unpublished).
28. Stengel, P. & Gelin, S. (1998). *Sol : interface fragile* (Editions Quae).
29. Val, L.A., Bahia, V.G., Freire, J.C., & Dias Junior, M.S. (1986). *Erosividade das chuvas em Lavras, MG*. Cienc. Prat.10, p: 199–209.

30. Volodin, E., Dianskii, N., & Gusev A. (2010). *Simulating present-day climate with the INMCM4. coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations*. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics 46, 414-431.
31. Wilby, R. (2005). *Constructing wet season precipitation scenarios for a site in the Anti Atlas Mountains, Morocco*. Paper presented at Proc. Conf. on Optimizing Land and Water Resources in Arid Environments.
32. Wilby, R. (2007). *Decadal climate forecasting techniques for adaptation and development planning: a briefing document on available methods, constraints, risks and opportunities*. Department for International Development, UK.
33. Wischmeier, W.H. & Smith D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses*. A guide to conservation planning.
34. Zhang, G., Nearing, M., & Liu, B. (2005). *Potential effects of climate change on rainfall erosivity in the Yellow River basin of China*. Transactions of the ASAE 48, 511-517.
35. Zhang, Y., Hernandez M., Anson, E., Nearing M., Wei, H., Stone J., & Heilman P. (2012). *Modeling climate change effects on runoff and soil erosion in southeastern Arizona rangelands and implications for mitigation with conservation practices*. Journal of soil and water conservation 67, 390-405.
36. Zhang, Y.G., Nearing, M., Zhang, X.C., Xie, Y., & Wei, H. (2010). *Projected rainfall erosivity changes under climate change from multimodel and multiscenario projections in Northeast China*. Journal of Hydrology 384: 97-106.