

Suivi spatiotemporel de l'érosivité des pluies au Maroc à l'aide des données satellitaires libres

A. LO¹, H. GUEJJOU¹, M. CHIKHAOUI¹, H. EZZINE^{1,2}, M. NAIMI¹, Y. PEPIN³

(Reçu le 13/12/2018; Accepté le 05/03/2019)

Résumé

La présente étude a pour objectif principal de répondre à un besoin pressant des données pluviométriques à l'aide des données satellitaires libres et par conséquent, faciliter les prises de décision pour les gestionnaires des ressources naturelles. Par le biais des séries chronologiques couvrant la période 2000 - 2016, le suivi spatiotemporel de l'érosivité des pluies a été étudié. Les produits satellitaires CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) et TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) ont été choisis pour suivre l'évolution de l'érosivité des pluies. Les études de corrélations effectuées entre les données satellitaires et les données pluviométriques mesurées ont montré que les données CHIRPS sont les mieux corrélées. La validation de ces résultats a donné un coefficient de détermination de 0,81. Les données retenues ont été ensuite calibrées avec une équation de régression. Le choix de la formule de Renard et Freimund comme modèle de calcul du facteur d'érosivité a montré une forte disparité géographique et une faible évolution de l'érosivité à l'échelle annuelle. De même, elle fait ressortir une très forte évolution de celle-ci selon les saisons avec une diminution de 3% en été et de 24% au printemps et une augmentation marquée de celle-ci pendant l'automne (33%) et l'hiver (39%). Le 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: érosion, érosivité, précipitation, modélisation, CHIRPS, TRMM, Maroc.

Spatiotemporal monitoring of rainfall erosivity in Morocco using free satellite data

Abstract

This study aims particularly to overcome the lack of rainfall measurements and to demonstrate the usefulness of open satellite data rainfall-erosivity estimation in Morocco. For this purpose, a short time series of two satellite products, namely CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data) and TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), were used and correlated to in-situ measurements of a period of 17 years (2000- 2016). This analysis revealed a relatively better correlation between monthly CHIRPS product and in-situ measurements, the coefficient of determination is around 0.81. After its calibration using regression equations, this product were used to estimate the rainfall-erosivity over Morocco according to Renard and Freimund equation. The result showed a geographical disparity and an annually weak evolution of erosivity. Likewise, the study pointed out a significant difference in the estimated erosivity across seasons. This imply a reduction of 3% in summer and 15% in spring and a remarkable increase of 33% in autumn and 39% in winter. The prominent change of the seasonality of rainfall erosivity is very significant in the course of agricultural practices' evolution and the adoption of adequate measures of soil protection.

Keywords: Erosion, erosivity, rainfall, modelling, CHIRPS, TRMM, Morocco.

INTRODUCTION

Au Maroc, l'érosion du sol connaît, surtout ces dernières décennies, une extension spectaculaire à cause des effets de plus en plus inquiétants, suite à la concomitance des conditions naturelles et de l'impact humain surtout au nord du pays (Chikhaoui et Naimi, 2012). Il est cependant crucial de savoir que la variabilité du climat et les modifications de l'occupation du sol soulèvent des questions de développement, notamment en ce qui concerne la disponibilité des ressources en eau, la sécurité alimentaire, la santé et la dégradation des terres et des écosystèmes. L'approche générale pour évaluer l'érosion à des échelles plus importantes, selon Vrieling (2006), est d'utiliser des modèles ou des méthodes qualitatives pour intégrer les données spatiales des facteurs de l'érosion, à savoir: le couvert végétal, la topographie, les pratiques culturelles, l'érosivité du climat et l'érodabilité du sol. Les précipitations et la

couverture végétale sont les facteurs qui affichent généralement une forte variabilité intra-saisonnière (Nyssen *et al.*, 2005; Vrieling *et al.*, 2008). L'érosivité des pluies (facteur R) est définie dans l'équation universelle de perte en sol comme la perte potentielle du sol causée par les précipitations (Wischmeier et Smith, 1978). 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. En l'absence de données sur le diamètre et la vitesse de chute des gouttes, Wischmeier et Smith (1978) proposent d'évaluer l'érosivité des pluies pour chaque averse en multipliant l'intensité maximale en 30 minutes (I_{30}) 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). Ces données ne sont pas toujours disponibles sur de longues chroniques (Renard *et al.*, 1991). L'absence

¹ Département des Ressources Naturelles et Environnement, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

² Geographic Information System for Decision Support - Systèmes d'Information Géographique pour l'Aide à la Décision (GIS4DSsarl)

³ Institut de Recherche pour le Développement, UMR-LISAH, Montpellier, France

de séries de données de pluviographie a conduit certains auteurs à trouver des relations entre l'érosivité du facteur de pluie R et:

- Les précipitations journalières (Richardson et al., 1983; Bagarello et D'Assaro, 1994; Petkovsek et Mikos, 2004);
- Les précipitations mensuelles (Leprun, 1981; Val et al., 1986; Oliveira Jr. et Medina, 1990; Silva, 2001; Grimm et al., 2003; Morais et al., 1991);
- Les précipitations annuelles (Renard et Freimund, 1994; Oliver, 1980);
- Les précipitations interannuelles (Arnoldus, 1977; Kassam et al., 1992).

Cependant, la problématique réside dans le fait que le Maroc ne dispose que d'une faible densité de stations pluviométriques mal réparties, d'où l'utilisation de la méthode de Thiessen pour la spatialisation de la pluviométrie. De plus, tous les efforts actuels consentis pour cartographier l'érosivité des pluies reposent sur des approches d'interpolation spatiale telles que le krigeage. Les seules données utilisées sont celles tirées des enregistrements des pluviomètres avec des formulations simplifiées de calcul de R. Pourtant, dans de nombreuses régions du monde, l'approche d'interpolation n'est pas idéale en raison d'un manque de pluviomètres fonctionnels.

Dans cette étude, l'interpolation spatiale des valeurs ponctuelles ne constitue pas une bonne option. Nous émettons donc l'hypothèse que le recours aux produits de précipitations satellitaires pourrait être utile afin d'aboutir à la cartographie de l'érosivité à long terme.

L'objectif central de cette étude est de répondre à un besoin pressant de manque de données pluviométriques en exploitant les données pluviométriques satellitaires libres. Il s'agit dans une première phase d'analyser les données de pluies mesurées fournies par le Ministère délégué chargé de l'eau, d'étudier dans une deuxième étape, les données de précipitation des satellitaires libres et enfin de déterminer dans une troisième étape l'approche validée de l'érosivité des pluies.

Les données de télédétection peuvent détecter des informations multi-temporelles qui reflètent tout changement à la surface de la Terre (Richards, 2013). De plus, l'intégration des systèmes d'information géographique (SIG) offre une large gamme d'installations pour une meilleure analyse et interprétation des données (Weng, 2002).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Zone d'étude

Le Maroc est situé au nord du continent africain, il s'ouvre à la fois sur l'océan Atlantique et la mer Méditerranée, ce qui lui permet de bénéficier de 3500 km de côte.

Avec une extension latitudinale allant du 37^{ème} au 21^{ème} parallèle, il s'étend sur une superficie de 710 850 km². Il est délimité au Nord par le détroit de Gibraltar et la mer Méditerranée, au sud par la Mauritanie, à l'est par l'Algérie et à l'ouest par l'océan Atlantique.

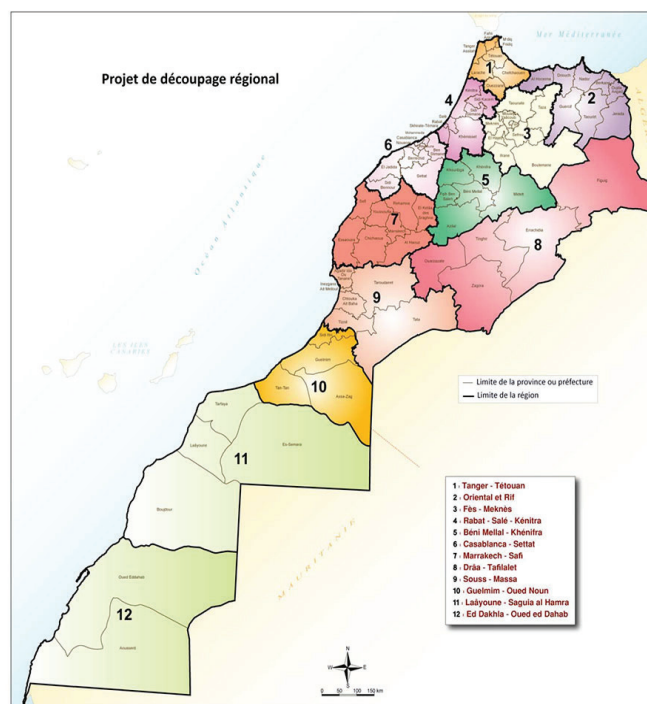


Figure 1. Carte du Maroc

Le Maroc est un pays de la zone subtropicale du Nord-Ouest africain. Il est caractérisé par un climat très différent selon les régions. En effet, les zones littorales bénéficient d'un climat tempéré, alors que le climat est désertique dans le sud et l'est du pays. Le climat marocain comporte beaucoup de nuances: méditerranéen au nord, océanique à l'ouest, continental à l'intérieur des terres et saharien au sud. Le climat varie aussi en fonction des saisons.

Données satellitaires et climatiques utilisées

TRMM

La Mission de Mesure des Pluies Tropicales (ou TRMM) est un satellite de la NASA consacré à la détermination de la pluviosité dans les régions tropicales et subtropicales de la Terre de 1998 à nos jours. Il est le premier satellite entièrement dédié à la mesure des précipitations. Il recueille initialement des données pour le programme de recherche sur le long terme destiné à modéliser les processus climatiques globaux. Les données TRMM peuvent être utiles pour cartographier à long terme et pour toutes les régions, les précipitations satellitaires grâce à la qualité de données recueillies (Vrieling et al., 2010).

CHIRPS

CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data) permet d'intégrer les images des précipitations observées depuis l'espace au sein d'une base de données sur les précipitations collectées dans des stations localisées au sol à travers le monde. Les données CHIRPS peuvent être intégrées dans des modèles climatiques, avec d'autres données météorologiques et environnementales, afin de prévoir les conditions futures de l'agriculture et de la végétation. CHIRPS incorpore une imagerie de résolution par satellite de 5 km avec les données des stations *in-situ* pour créer une série temporelle des précipitations pour l'analyse de tendance et de suivi de la sécheresse saisonnière.

2.3. Méthodologie

La méthodologie adoptée pour estimer l'érosivité sur tout le Maroc se présente comme suit:

- Choix de la formule adéquate de calcul du facteur R;
- Validation et calibration des données pluviométriques;
- Spatialisation du facteur R et de la densité d'érosivité.

Modèles d'estimation du facteur R

Pour estimer le facteur R, plusieurs formules simplifiées sont utilisées pour relier l'érosivité des pluies et les précipitations journalières, mensuelles, annuelles ou interannuelles. 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 O). 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 O), 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 du calcul du facteur R.

Validation et calibration des données pluviométriques

Les données des deux cents stations pluviométriques recueillies sont traitées sur Hydraccess afin de s'assurer de leur cohérence. Dans le cas contraire, les stations sont éliminées de la liste. Seules 113 stations présentaient des données fiables après ce prétraitement.

Etant donné que l'avènement des données de précipitations spatialisées CHIRPS et TRMM n'a eu lieu que respectivement vers les années 1981 et 1998, il est nécessaire de choisir des stations qui présentent des données à partir de 1998 afin que l'on puisse obtenir une série de données homogènes de CHIRPS et de TRMM. Par conséquent 52 stations pluviométriques ont été retenues présentant ainsi des données continues entre 1998 à 2003. Ces stations serviront de repères (coordonnées) pour l'extraction des données pluviométriques satellitaires et par la suite, l'établissement de corrélations avec les données mesurées dans le but de choisir la source de données la plus fiable pour spatialiser le facteur d'érosivité R. Les corrélations ont été réalisées au niveau de chaque station, année par année, en utilisant les cumuls de précipitations annuelles. L'étape de validation est nécessaire pour s'assurer de la qualité des données et pour déterminer la résolution temporelle optimale pour leur utilisation.

Spatialisation du facteur d'érosivité des pluies

La spatialisation du facteur R a été obtenue grâce à quelques requêtes effectuées sur «Raster Calculator de ArcToolbox». Cette fonction permet de calculer, pixel par pixel, la valeur de l'érosivité grâce à la formule d'érosivité retenue. L'érosivité annuelle a été calculée directement à partir des pluies annuelles. Par contre, nous avons adopté la méthode de l'Analyse de Différence Géographique (GDA) pour le calcul de l'érosivité saisonnière. Cette méthode, développée par Cheema et Bastiaanssen (2012),

permet de minimiser la différence des valeurs de précipitations obtenue entre les données satellitaires et les données mesurées sur le terrain.

La densité d'érosivité

La densité de l'érosivité est le rapport du facteur R sur les précipitations (Kinnell, 2010). En pratique, elle mesure l'érosivité par mm de pluie et est exprimée en MJ/ha.h. Au niveau de chaque pixel, la densité d'érosivité est donnée par la formule:

$$\text{Densité d'érosivité} = \frac{R_j}{P_j}$$

Où j présente l'année ou la saison.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Formule retenue de calcul de R

La formule de Renard et Freimund est celle qui donne un résultat satisfaisant de l'érosivité. Elle est aussi la plus corrélée avec les résultats de Foster et Wischmeier. C'est une formule annuelle et elle est de la forme :

$$R = 0,0483 \times P^{1,610}$$

Si $P < 850$ mm et

$$R = 587,8 - 1,219 \times P + 0,004105 \times P^2$$

Si $P > 850$ mm

Où P représente les précipitations annuelles.

Tableau 1. Formules de calcul de l'érosivité des pluies

Formules d'érosivité	Corrélation avec Foster	Corrélation avec Wischmeier
Grimm 1.5	0,67	0,72
Grimm 1.4	0,67	0,72
Grimm 1.3	0,67	0,72
Grimm 1.2	0,67	0,72
Grimm 1.1 etc.	0,67	0,72
Renard et Freimund (1994)	0,69	0,73
Silva (2001)	0,54	0,58
Roose (1994)	0,67	0,72
Oliveira Jr. et Medina (1990)	0,54	0,58
Leprun (1981)	0,68	0,37
Val <i>et al.</i> (1986)	0,54	0,20
Morais <i>et al.</i> (1991)	0,54	0,20
Arnoldus (1980)	0,29	0,32
Kassam <i>et al.</i> (1992)	0,42	0,45

Calibration des données pluviométriques

L'équation de régression entre les données pluviométriques satellitaires et les données mesurées montre un coefficient de détermination égal à 0,79. Cette équation a été utilisée pour calibrer les données satellitaires de CHIRPS pixel par pixel, sur une période de 19 ans (1998

- 2016). En d'autres termes il s'agit d'une méthode de correction des valeurs pluviométriques satellitaires.

$$\text{Pluie corrigée} = 0,9466 * \text{Pluie brute} + 21,3$$

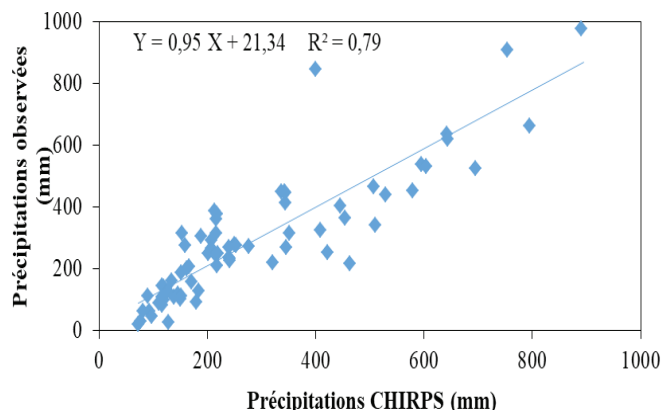


Figure 2. Ajustement de la droite de régression entre les précipitations CHIRPS et les précipitations observées

Spatialisation du facteur R

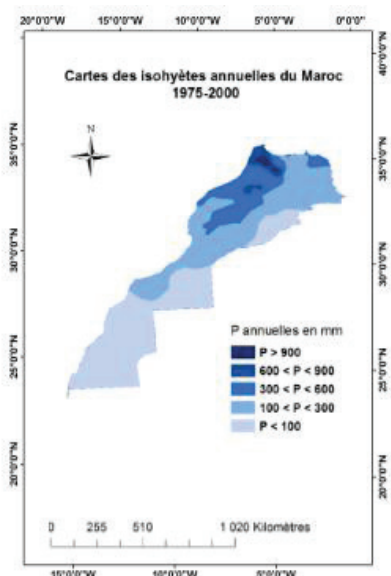
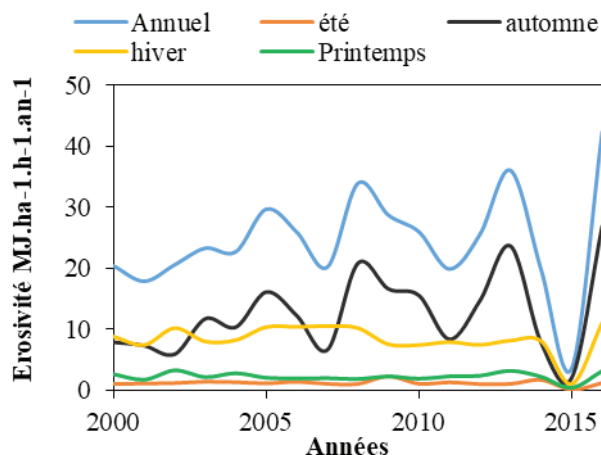


Figure 3. Carte des isohyètes annuelles du Maroc (1975-2000)

La spatialisation du facteur R (cartographie) a été faite en tenant compte de la carte des isohyètes (Figure 3).



Variabilité intra-annuelle de l'érosivité

L'analyse des résultats montrent que:

Dans la zone où la pluie est inférieure à 100 mm (Figure 4), l'érosivité atteint presque 50% de l'érosivité annuelle en automne et elle avoisine 35% en hiver soit 85% pour ces deux saisons. Au contraire, ce facteur ne représente que 15% de l'érosivité annuelle pour les deux saisons d'été et du printemps.

Dans la zone de pluie comprise entre 100 et 300 mm (Figure 5), l'érosivité est de 37% en hiver et elle atteint 32% de l'érosivité annuelle en automne, tandis qu'elle n'est que 27% au printemps.

Dans la zone de pluie comprise entre 300 et 600 mm (Figure 6), l'érosivité est plus accentuée en hiver et elle atteint 37%. Elle est également élevée au printemps et en automne avec des pourcentages respectifs de 31% et 29% de l'érosivité annuelle.

Dans la zone de pluie comprise entre 600 et 900 mm (Figure 7), l'érosivité est plus importante en hiver puisqu'elle avoisine 43% de l'érosivité annuelle. Les érosivités automnale et printanière représentent 30% et 25% respectivement.

La même tendance que précédemment est notée dans la zone de pluie supérieure à 900 mm (Figure 8). En effet les valeurs d'érosivité sont de 42%, 29% et 28% respectivement en hiver, en automne et au printemps. L'érosivité ne représente que 1% pendant la saison estivale.

Il faut noter que cette variabilité se réfère à la variation naturelle intra et interannuelle du climat. La chronique de mesures permet de faire les conclusions suivantes:

Les zones du nord affichent des valeurs d'érosivité très fortes. Par contre, les régions du sud où la plupart des mois sont secs n'enregistrent que de faibles valeurs d'érosivité.

La topographie peut être aussi un facteur important pour expliquer la variabilité de l'érosivité. En effet elle accentue l'impact des pluies sur le sol à travers la pente. Les régions du nord sont en grande partie montagneuses.

La saison la plus érosive est l'hiver suivie de l'automne et du printemps. En effet la part de l'érosivité hivernale par rapport à l'érosivité annuelle au Maroc est de 39% en moyenne. Cette proportion ne représente que 33% en

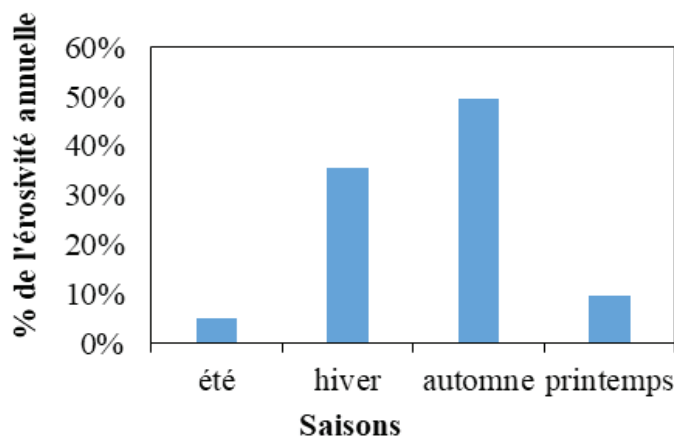


Figure 4. Variabilité saisonnière de l'érosivité dans la zone de pluie inférieure à 100 mm

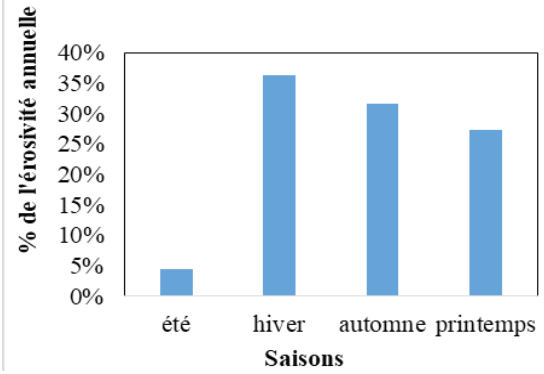
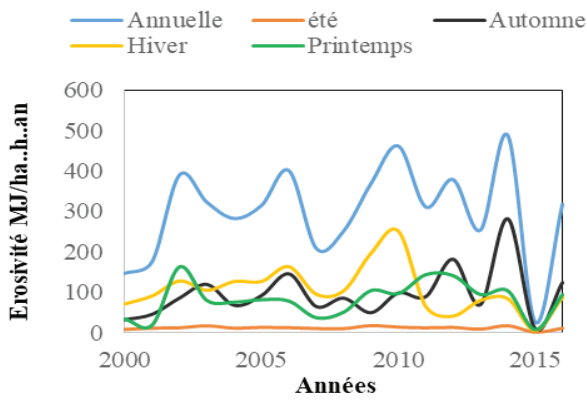


Figure 5. Variabilité saisonnière de l'érosivité dans la zone de pluie comprise entre 100 et 300 mm

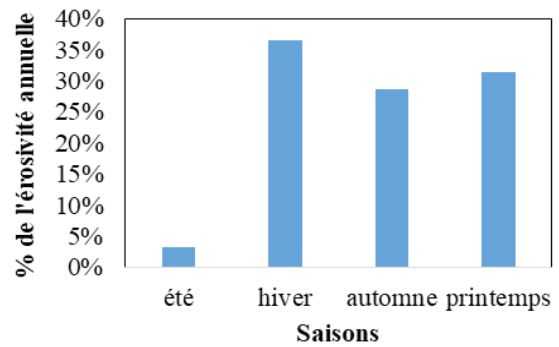
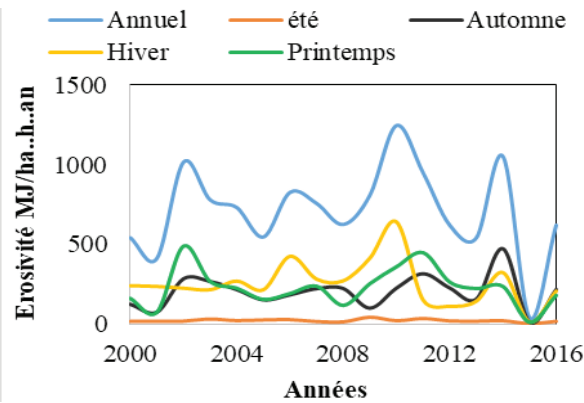


Figure 6. Variabilité saisonnière de l'érosivité dans la zone de pluie comprise entre 300 et 600 mm

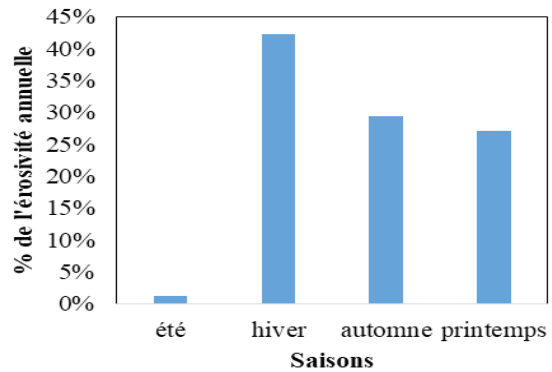
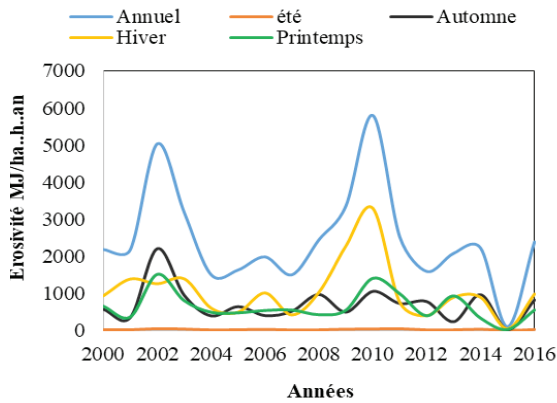


Figure 7. Variabilité saisonnière de l'érosivité dans la zone de pluie comprise entre 600 et 900 mm

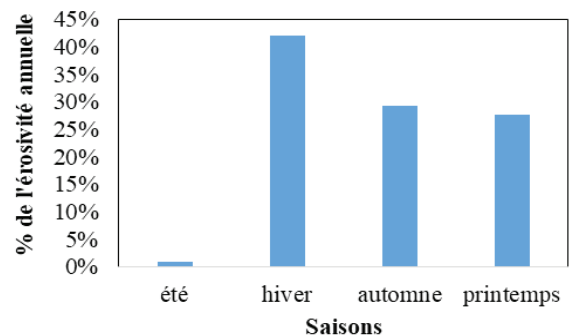
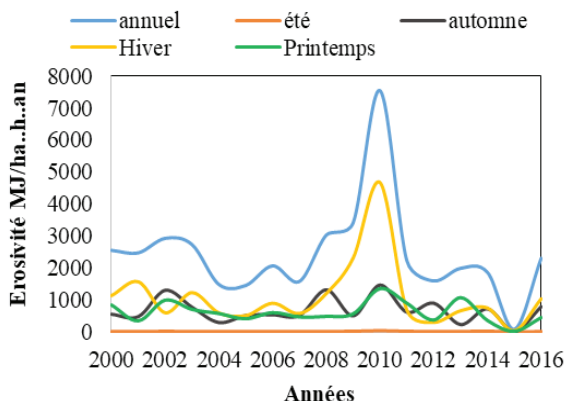


Figure 8. Variabilité saisonnière de l'érosivité dans la zone de pluie supérieure à 900 mm

automne, 24% au printemps et 3% en été. Ces résultats peuvent s'expliquer comme suit:

L'érosivité hivernale

En effet, à la fin de la saison hivernale, les pluies tombant sur des sols saturés et encroûtés provoquent de forts ruissellements, des rigoles évoluant rapidement en ravines (Roose, 1994). Les crues conséquentes dévastent les berges des oueds et entraînent des inondations, des glissements de terrain, l'envasement rapide des barrages et la destruction des routes et autres ouvrages d'art.

L'érosivité automnale

Les premières averses d'automne, généralement brutales, arrivent sur un sol nu et imperméable. Il en résulte un fort ruissellement initial tandis que l'eau s'infiltré dans les fissures et prépare des plans de glissement qui agiront par la suite.

L'érosivité printanière

Le printemps, cette saison, marquant traditionnellement le renouveau dans la nature, se caractérise par un radoucissement progressif de la température, la fonte des neiges en montagnes, le bourgeonnement et la floraison des plantes. Cette renaissance du couvert végétal fait que l'érosivité au printemps est peu significative. Si on prend le cas du Haut Atlas occidental, les températures y descendent parfois au-dessous de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. La neige y est fréquente. Le débit des oueds y est très variable et on ne peut compter sur une eau abondante qu'en bien peu d'endroits (fonte des neiges). C'est ce qui justifie le fait qu'au printemps, dans cette zone, l'érosivité augmente.

L'érosivité estivale

L'influence des fortes températures prend le relais et coïncide avec le minimum pluviométrique. Les températures dépassent souvent $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui provoque un excès d'évapotranspiration et exerce une forte influence sur le régime hydrique des sols. Ces derniers se dessèchent, se durcissent et/ou se fendillent faisant que le pouvoir érosif en été devient très faible.

Densité de l'érosivité

Les valeurs de densité d'érosivité supérieures à 1 signifient qu'une certaine quantité de précipitation peut provoquer une érosivité relativement plus élevée. Les valeurs de densité d'érosivité sont directement proportionnelles à l'intensité moyenne annuelle de pluie de 30 minutes (Foster et al., 2008) et impliquent donc la variation saisonnière de l'intensité des précipitations à un endroit. Selon Dabney et al. (2011), les valeurs de densité d'érosivité très élevées ($>3\text{ MJ/ha.h}$) contribuent de manière significative à des prédictions beaucoup plus élevées du ruissellement. Cela signifie que les régions à forte densité d'érosivité sont exposées au risque d'inondation et même à la pénurie d'eau en raison des tempêtes de pluie rares, mais très intenses et érosives.

Les régions du nord du Maroc sont plus confrontées à ces risques étant donné que les densités d'érosivité fortes sont plus concentrées à ce niveau. La densité est plus forte dans la zone de pluie supérieure à 900 mm. Ceci permet d'indiquer que le nord du Maroc enregistre plus de risque d'érosion. Cependant, l'hiver montre une densité plus élevée par rapport aux autres saisons et représente 27% de la densité totale.

Différents modèles spatiaux de densité d'érosivité sont remarqués pendant les quatre saisons. La prédominance de la densité d'érosivité est surtout observée en hiver et en automne. L'estimation de la densité d'érosivité contribue à identifier les tendances de l'évolution des précipitations et des signaux possibles du changement climatique. La densité d'érosivité saisonnière indique les périodes et les points chauds des pluies intenses par rapport aux pluies de faibles intensités. La répartition temporelle de l'érosivité des précipitations peut être très importante pour identifier les périodes à risque élevé lorsque l'exposition du sol coïncide avec des mois érosifs élevés (Sheridan et Rosewell, 2003).

Tableau 2. Densité d'érosivité selon les saisons et selon les isohyètes

Saisons	0<P<100	100<P<300	300<P<600	600<P<900	P>900
	mm				
Hiver	0,52	1,30	1,82	2,97	3,16
Automne	0,45	0,99	1,47	2,37	2,57
Printemps	0,51	1,29	1,84	2,85	2,90
Été	0,52	1,24	1,71	2,75	2,85

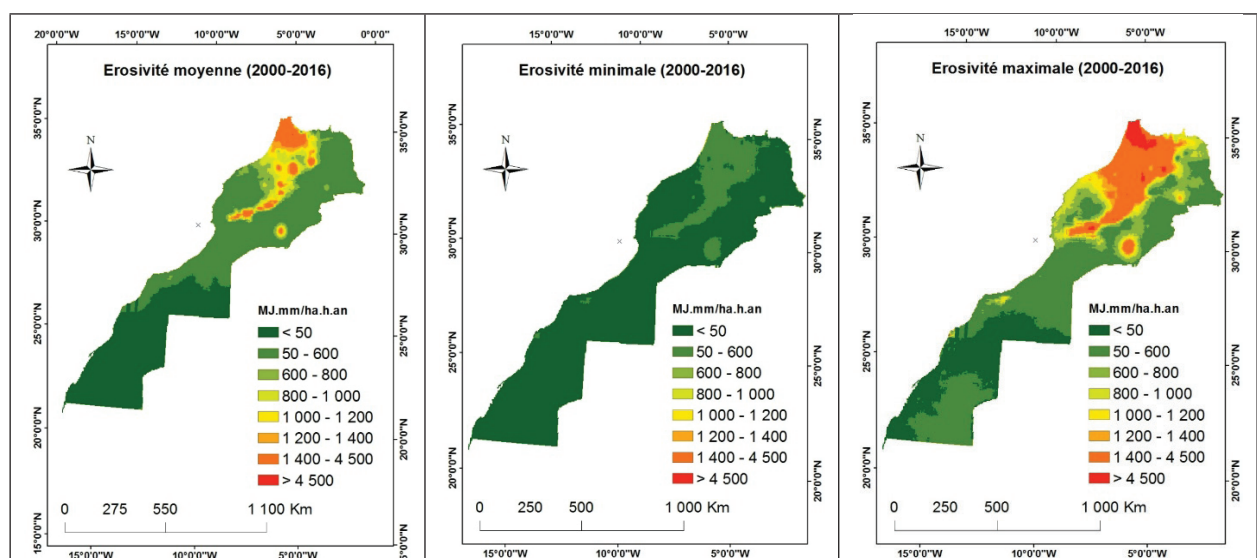


Figure 9. Cartes de l'érosivité moyenne, minimale et maximale sur la série chronologique 2000 – 2016

CONCLUSION

La présente étude s'est penchée sur l'évaluation de l'érosivité des pluies en se basant sur les données satellitaires libres, notamment CHIRPS et TRMM et a permis d'estimer la répartition spatiale de l'érosivité des pluies au cours d'une série chronologique de 2000 - 2016. Les premières mesures d'érosivité des précipitations (basées sur des données de résolution temporelle élevée) et l'évaluation

saisonnnière de la densité d'érosivité sur l'ensemble du pays sont importantes pour évaluer le risque d'érosion des sols, l'application des mesures de conservation des sols et les tendances régionales du changement climatique.

Une grande variabilité intra-annuelle de l'érosivité est constatée avec les valeurs les plus élevées en hiver et en automne constituant donc les saisons les plus érosives du Maroc. La contribution de la période hivernale est de

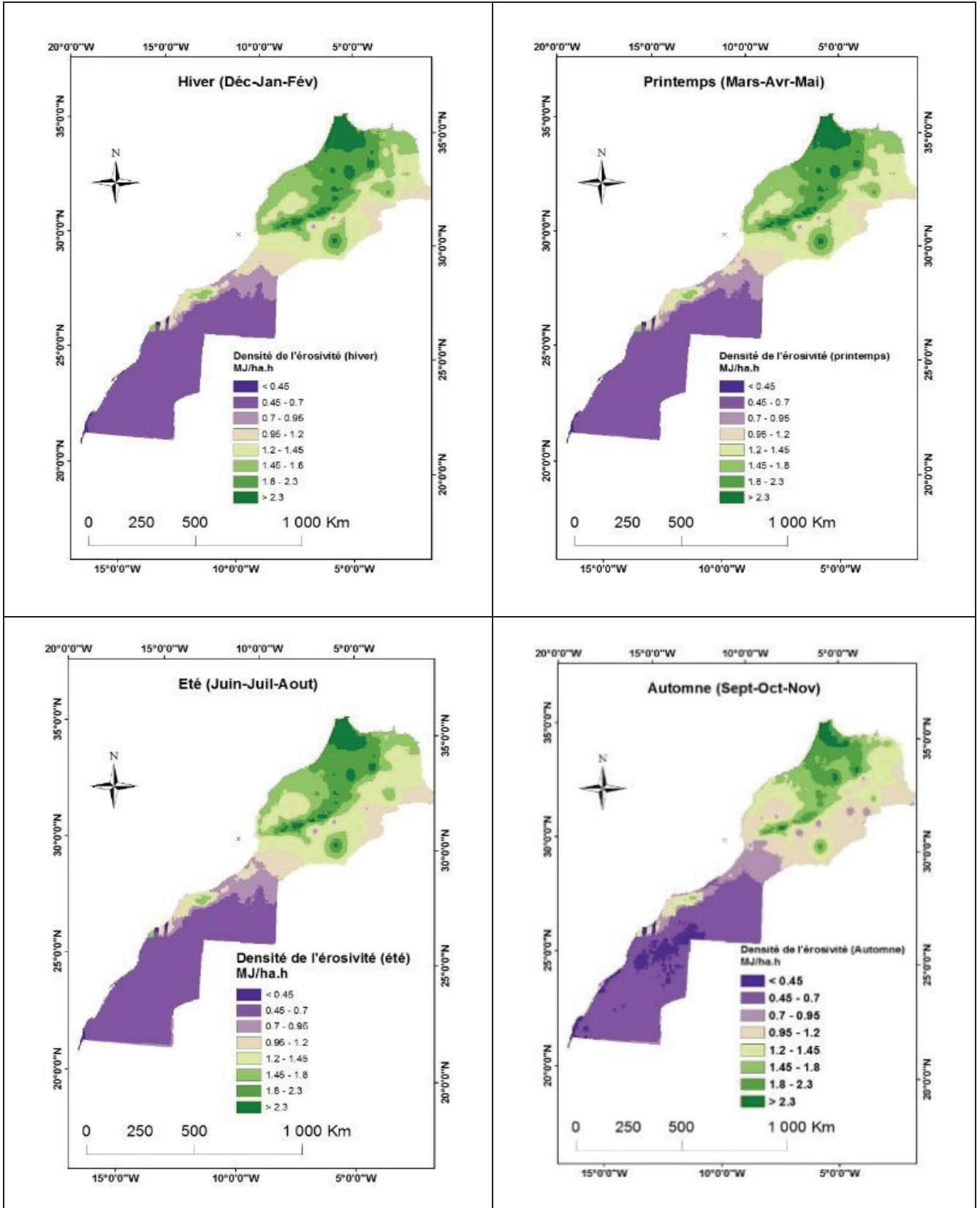


Figure 10. Carte de la tendance de la densité d'érosivité selon les saisons

39%, et celle d'automne est de 33% par rapport à l'érosivité annuelle totale des précipitations. La saison la moins érosive est l'été puisqu'elle ne représente que 3% durant 2000 - 2016. Par contre et suite à l'analyse de la densité d'érosivité, il s'avère que les sols sont plus exposés au risque d'érosion pendant la saison hivernale. Par ailleurs, pour mieux comprendre les modifications inéluctables des écosystèmes, le développement des connaissances sur les interactions qui existent entre végétation et climat est nécessaire.

RÉFÉRENCES

- Ardoin, B.S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 330 p.
- 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.
- Bagarello, V., and D'Asaro, F. (1994). Estimating single storm erosion index. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 37: 785-791.
- Bannari, A., El-Harti, A., Haboudane, D., Bachaoui, M., & El-Ghmari, A. (2007) Intégration des variables spectrales et géomorphométriques dans un SIG pour la cartographie des zones exposées à l'érosion. *Revue Télédétection*, 7: 393-404.
- Bezuayehu, T. & Sterk, G. (2010). Land management, erosion problems and soil and water conservation in Fincha'a watershed, western Ethiopia. *Land Use Policy* 27: 1027-1037.
- Cheema, M. J. M., & Bastiaanssen, W. G. M. (2012). Local calibration of remotely sensed rainfall from the TRMM satellite for different periods and spatial scales in the Indus Basin. *International Journal of Remote Sensing*, 33: 2603-2627.
- Chikhaoui, M. & Naimi, M. (2012). Dégradation des sols dans le Rif marocain. *Revue : Homme, Terre & Eau*, 149: 56-60.
- Dabney, S.M., Yoder, D.C., Vieira, D.A.N. & Bingner, R.L. (2011). Enhancing RUSLE to include runoff-driven phenomena. *Hydrol. Process*, 25: 1373-1390.
- Foster, G.R., Yoder, D.C., Weesies, G.A., McCool, D.K., McGregor, K.C. & Bingner, R.L. (2008). Draft user's guide, revised universal soil loss equation Version 2 (RUSLE-2). USDA-Agricultural Research Service, Washington. 444 p.
- 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, 26 p.
- Hammi, S., Simonneau, V., Alifriqui, M., Auclair, L. & Montes, N (2007). Évolution des recouvrements forestiers et de l'occupation des sols entre 1964 et 2002 dans la haute vallée des Ait Bouguemez (Haut Atlas central, Maroc). *Sécheresse*, 18: 1-7.
- Kassam, A.H., Velthuisen, H.T, Mitchell, A.J.B, Fishcher, G.W. & Shah, M.M. (1992). Agro-Ecological land resources assessment for agricultural development planning.
- Kinnell, P.I.A. (2010). Event soil loss, runoff and the universal soil loss equation family of models: a review. *J. Hydrol.* 385: 384-397.
- Leprun, J.C. (1981). A erosao, a conservacao e o manejo do solo no Nordeste Brasileiro. Recife: Ministerio do Interior. SUDENE, Brasil.
- 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). Indice EI30 e sua relação com o coeficiente de chuva do sudoeste de Mato Grosso. *R. Bras. Ci. Solo* 15: 339-344 (in Portuguese).
- Munro, R.N., Deckers, J., Haile, M., Grove, A.T., Poesen, J. & Nyssen, J. (2008). Soil landscapes, land cover change and erosion features of the Central Plateau region of Tigray, Ethiopia: photo-monitoring with an interval of 30 years. *Catena* 75: 55-64.
- Nyssen, J., Vandenreyken, H., Poesen, J., Moeyersons, J., Deckers, J., Haile, M., Salles, C., & Govers, G. (2005). Rainfall erosivity and variability in the northern Ethiopian highlands.
- Oliveira Jr, R.C. & Medina, B.F. (1990). A erosividade das chuvas em Manaus (AM). *Rev. Bras. Cienc. Solo* 14: 235-239.
- Oliver, J.E. (1980). Monthly precipitation distribution: A comparative index. *Professional Geographer* 32: 300-309.
- 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: 869-877.
- 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.
- Richards, J.A. (2013). Remote sensing digital image analysis: an Introduction, 5th ed. Springer, Heidelberg, 494p.
- Richardson, C.W., Foster, G.R., & Wright, D.A. (1983). Estimation of erosion index from daily rainfall amount. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 26: 153-160.
- Roose, E. (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. *Bulletin Pédologique* FAO, n° 70, 420 p.
- Sheridan, G.J. & Rosewell, C.J. (2003). An improved Victorian erosivity map. *Aust. J. Soil Res.* 41: 141-149.
- 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).
- Val, L.A., Bahia, V.G., Freire, J.C. & Dias Junior, M.S. (1986). Erosividade das chuvas em Lavras, MG. *Cienc. Prat.* 10: 199-209.
- Vrieling, A. (2006). Satellite remote sensing for water erosion assessment: a review. *Catena* 65: 2-18.
- Vrieling, A., de Jong, S.M., Sterk, G. & Rodrigues, S.C. (2008). Timing of erosion and satellite data: a multi-resolution approach to soil erosion risk mapping. *International Journal of Applied Earth Observations and Geo-information* 10: 267-281.
- Vrieling, A., Sterk, G. & M. de Jong, S. (2010). Satellite-based estimation of rainfall erosivity for Africa. *Journal of Hydrology* 395: 235-241.
- Weng, Q. (2002). Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. *J. Environ. Manag.* 64: 273-284.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1978). Prediction rainfall erosion losses, a guide to conservation planning Science. U.S. Dept. Agriculture. Agric. Handbook 537, 60 p.