

Assessing indicators of runoff and erosion by rain simulation in the Ben Ahmed watershed (Central Morocco)

Asserar Nazha^{1,2*}, Moussadek Rachid², El Azzouzi Fatiha³, Zouahri Abdelmjid², Douira Allal¹

¹Department of Biology, Laboratory of Botany and Plant Protection, Ibn Tofail University, Faculty of Science, B.P 242, Kenitra, Morocco. [*asserar.nezha@gmail.com](mailto:asserar.nezha@gmail.com)

²Department of Environment and Natural Resource Conservation, National Institute of Agricultural Research, B.P: 6356, Instituts, 10101 - Rabat, Morocco

³Department of Biology, Faculty of Science, Laboratory of Nutrition, Health and Environment, BP. 133, Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco.

Abstract— The objective of this study was to investigate the risks of runoff and erosion of soils in the Ben Ahmed watershed, it's located in the region of casa-settat, 70 km south-east of Casablanca, and characterized by a semi-arid climate. The study consists of measuring on 1 m² plot, the volumes of runoff and sediments, under the influence of rainfall generation (60mm/30 min). Soil samples were collected from each plot to determine texture, organic matter and humidity. Results obtained show that the detachability varies between 19 and 34 g/l, infiltrability oscillate between 15 and 37 mm.h⁻¹. Pearson correlation test shows that infiltration was negatively correlated with runoff and soil detachability (R=-0.99, R=-0.87 respectively). It's significantly correlated with the proportions of sand(R=0.69), silt (R= -0.98) an clay (R= 0.92), however, is weakly correlated with organic matter (R=-0.32). Infiltration and detachability were significantly correlated with humidity (R = -0.99, R = -0.63 respectively).

Keywords— detachability, runoff, infiltration, rain simulation, Ben Ahmed watershed, central Morocco.

Recherche d'indicateurs de ruissellement et d'érosion au moyen de simulation de pluie dans le bassin versant de Ben Ahmed (Maroc central)

Résumé— L'objectif de ce travail est d'étudier les risques de ruissellement et d'érosion dans le bassin versant de Ben Ahmed, au moyen d'un simulateur de pluie. Le bassin se situe dans la région de Casa-Settat, à 70 km au Sud-Est de Casablanca, caractérisé par un climat de type semi-aride. L'étude consiste à mesurer sur une parcelle de 1m² les volumes d'eau ruisselés et les quantités des sédiments érodés sous l'influence d'une averse générée avec une intensité érosive de 60 mm pendant 30 min. Ainsi, des échantillons de sol ont été prélevés de chaque parcelle, pour déterminer la texture, la matière organique et l'humidité. Les résultats obtenus montrent que la détachabilité varie entre 19 et 34 g.l⁻¹, l'infiltrabilité oscille entre 15 et 37 mm.h⁻¹. Le test de corrélation de Pearson montre que l'infiltration est négativement corrélée avec le coefficient de ruissellement et la détachabilité (R= - 0.99, R= -0.87 respectivement). Elle est corrélée significativement avec les proportions de sable (R= 0.69), limon (R= -0.98) et avec celle de l'argile (R= 0.92), par contre une faible corrélation est observée avec la matière organique (R=-0,32). L'infiltration et la détachabilité étaient significativement corrélées avec l'humidité (R= -0.99, R= - 0.63 respectivement).

Mots clé — détachabilité, ruissellement, infiltration, simulation de pluie, Ben Ahmed, Maroc central.

I. INTRODUCTION

Le sol est un milieu vivant issu de l'altération physique et chimique de la roche mère sous l'action des agents climatiques (température, précipitation, humidité...) et biologiques. Il assure plusieurs fonctions écologiques (Thiombiano, 2015) : fonctions biologique, fonction de stockage et de support et fonction alimentaire.

La dégradation des terres peut résulter de la fragilité des écosystèmes des terres, qui, sous la pression humaine excessive ou des changements drastiques dans l'utilisation des terres, réduisent leur productivité et leur résilience (Turkelboom *et al.*, 2008). Pour la plupart des sols, l'érosion hydrique est le processus le plus commun entraînant la dégradation des sols. (Stocking et Niamh, 2000).

L'érosion des sols associé à la dégradation des terres sont des phénomènes spatio-temporels qui prennent de l'ampleur dans un plusieurs pays du monde (Hoyos, 2005; Pandey *et al.*, 2009).

L'érosion des sols en termes réels met en danger la sécurité alimentaire, la productivité subsistance du sol, la surface stockage de l'eau, la qualité de l'eau de surface, la beauté du paysage et l'équilibre écologique naturel. Sa solution réside dans l'adaptation des pratiques de conservation (Toumi, 2013).

Depuis les années trente, l'érosion des sols a reçu une attention importante des chercheurs et aménagistes. Ceci a permis de bien comprendre et de quantifier les processus de l'érosion dans différents environnements pédologiques, climatiques et culturelles. En outre, un grand nombre de techniques de quantification ont été développées et adaptées à ces différents environnements.

Les méthodes utilisées dans la quantification de l'érosion varient en fonction des objectifs, des moyens et des échelles d'étude. La simulation de pluie constitue l'une des méthodes les plus fréquemment utilisée sur terrain pour déterminer, à une petite échelle correspondant à la surface élémentaire représentative d'une parcelle (cultivée ou non) et sous diverses conditions de pluie et de sol, certaines caractéristiques hydrodynamiques des sols, et mesurer le ruissellement et les pertes en sol induites. Plusieurs types de simulateur de pluie existent et peuvent arroser des surfaces allant d'un mètre carré à une cinquantaine de mètres carrés (Benkhelil *et al.*, 2004). Ces simulateurs de pluie présentent l'avantage d'être des dispositifs mobiles, d'avoir la capacité de produire des averses avec les fréquences, les intensités et les quantités de pluies semblables à des pluies naturelles ou à des événements rares.

Notre objectif est l'étude de l'érosion et du ruissellement des sols au niveau du bassin versant de Ben Ahmed. Une étude quantitative basée sur une campagne de simulation de pluie, a été réalisée dans le bassin versant de Ben Ahmed, situé à 70 km au sud-est de

Casablanca. Les expérimentations consistent à mesurer sur des sites expérimentaux les volumes d'eau ruisselés et les quantités des sédiments érodés sous l'influence d'une averse générée par un simulateur de pluie.

II. MATERIEL ET METHODE

Zone d'étude

La zone d'étude se située dans la région de Casa-Settat, à 70 km au Sud-Est de Casablanca, au centre du Maroc (33°06'43''N, 7°24'21'' W), sur une superficie de 545 ha. Le climat est de type semi-aride, influencé par l'océan Atlantique, avec des hivers tempérés et des étés chauds. L'étude des séries chronologiques des précipitations fournies par l'Agence de Bassin Hydraulique de Bouregreg (ABHBC), qui couvre une période de 40 ans (1968 à 2010), nous a permis de constater que le bassins versant jouisse dans l'ensemble d'une pluviométrie moyenne pour des latitudes semi aride. De l'Ouest à l'Est, les exutoires de ce bassin reçoivent annuellement en moyenne 328 mm.

Simulation de pluie

L'étude des phénomènes de ruissellement et de transports solides a été menée par méthode expérimental sur terrain pour deux types de sol du bassin versant de Ben Ahmed. La méthode employée consiste à provoquer du ruissellement sur des parcelles de 1m², à l'aide d'un simulateur de pluie de type ORSTOM.

Les mesures de l'intensité du ruissellement et des transports solides ainsi provoqués, correspondent à une intensité d'averse de 60 mm pendant 30 minutes.

Les éléments de la structure du simulateur sont **1/** la tête du simulateur, suspendue dans la partie supérieure de la tour et constitue le moteur de l'asperseur, **2/** un manomètre qui permet le contrôle de la pression de l'eau, **3/** une bâche pour isoler le simulateur des effets du vent ou d'une éventuelle pluie naturelle, **4/** des tuyaux d'arrivée et de sortie de l'eau et **5/** des câbles de commande de la tête (G).

Ce simulateur de pluie est constitué d'un système d'arrosage fixé au sommet d'une tour pyramidale de 2 m de haut. L'aspersion est assurée par un gicleur calibré monté sur un bras mobile. L'angle de balancement du bras permet d'ajuster l'intensité de pluie nécessaire tombant sur la parcelle d'étude.

Les variations de cet angle modifient la surface arrosée et, de ce fait, l'intensité de la pluie sur la parcelle d'un mètre carré, étudiée.

L'alimentation en eau est assurée par une motopompe. L'installation d'un manomètre dans la tour permet de régler la pression d'admission de l'eau (0,8-0,9 bar) au gicleur.

La parcelle étudiée est limitée par un cadre métallique d'un mètre carré enfoncé dans la terre jusqu'à une

profondeur de 10 cm. Un système de recueil des eaux, constitué d'une gouttière collectrice limite la parcelle à sa base et reçoit l'eau ruisselée et les sédiments. Pour chacune des micro-parcelles, une séquence de pluie érosive de 60 mm/h a été simulée pendant 30 min. Les volumes de ruissellement ont été prélevés pendant chaque minute grâce à un système gouttières installé au niveau des micro-parcelles. Les volumes des charges solides ont été prélevés durant chaque 5 min.

D'autres paramètres ont été mesurés et calculés lors de la simulation de pluie, notamment :

- Les lames ruisselées (LR en mm);
- Les lames infiltrées, calculées comme suit: $L_{inf} = \text{Pluie} - LR$ (en mm);
- Les coefficients d'écoulement : $K_e = (LR/\text{pluie}) \times 100$ (%);
- Les concentrations en sédiments de l'eau de ruissellement (Conc) (en g. l⁻¹);

Echantillonnage du sol

Des échantillons de sol ont été prélevés de chaque site expérimental à une profondeur de 0-20 cm. Ces échantillons ont été séchés à l'air libre et analysés après au laboratoire d'analyse des sols de l'INRA de Rabat pour déterminer leur teneur en matière organique, texture et l'humidité.

La distribution granulométrique a été déterminée en utilisant la méthode de pipette Robinson, alors que la teneur en matière organique a été estimée en utilisant la méthode de walkley-Black (Walkley et Black 1934).

Tests statistiques

Un moyen de variance a été utilisé pour déterminer la différence entre les sols étudiés (ANOVA). Les relations entre les différents paramètres du sol étaient déterminées par le test de corrélation de Pearson. Tous les tests ont été réalisés à l'aide du logiciel SPSS.

III. RESULTATS

Granulométrie

L'analyse granulométrique montre qu'il y a une différence de texture des sols entre les sites expérimentaux. L'argile et le limon sont les fractions granulométriques les plus représentatives dans la couche arable sur les quatre sites. Le sable reste la fraction la moins représentée avec moins de 20 % de terre fine (Tableau. 1). Selon les limites des classes granulométriques utilisées dans le système USDA/FAO, les sols étudiés entrent dans les classes « Argileuse » pour les deux premiers sites « Limono-Argileuse » pour le site3, Limoneuse pour le site 4.

Tableau.1 : Résultats de l'analyse granulométrique

Sites	Sols	Granulométrie			CaCo3(%)	Texture
		Argile(%)	Limon(%)	Sable(%)		
1	Peu Evolués d'Apport	47.1	36.2	16.7	2.2	Argileuse
2	Rendzines	47.1	26.1	26.8	1.4	Argileuse Limon
3	Peu Evolués d'Apport	41.7	45.1	13.2	3.5	Argileuse
4	Rendzines	22.6	61.7	15.7	4	Limoneuse

Matière organique et humidité

Les résultats de la matière organique (%) et l'humidité (%) sont présentés dans le tableau 2. Les teneurs en matière organique mesurés sur l'ensemble des échantillons du sol prélevés de chaque site expérimental, sont compris entre 1.2 % 3.3%. La teneur la plus faible a été trouvée dans les sols du site 2, tandis que le site 4 enregistre une teneur de 3% (Tableau.2). Ces résultats montrent que les sites d'expérimentation sont

caractérisés par des sols pauvres à moyennement pourvus en matières organique.

Les valeurs de l'humidité varient de 31 à 44,5% et la valeur la plus élevée (44%) est observée dans les rendzines (sol du site 4), tandis que la valeur la plus faible de l'humidité caractérise le sol peu évolué d'apport (site 3). Les tests de comparaison des moyennes effectués à travers les analyses statistiques indiquent une différence significative entre les sols pour la teneur en matière que pour l'humidité.

Tableau.2 : Résultats de la matière organique

Sites	Sols	MO%		H%	
		M	SD	M	SD
1	Peu Evolués d'Apport	2.9c	0.15	33a	1.00
2	Rendzines	1.2a	0.10	38.3c	0.57
3	Peu Evolués d'Apport	1.9b	0.10	31b	0.16
4	Rendzines	3.3d	0.10	44,5d	0.50

Mo matière organique (%) H humidité (%), M moyen, SD coefficient de variance

a, b, c, d : les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes ($p < 0,05$)

Infiltration et ruissellement

Le ruissellement est mesuré pendant chaque minute et l'infiltration est calculée à partir d'eau par soustraction du ruissellement de l'eau apportée. On observe, en général, en fin d'expérience une stabilisation de cette

valeur que l'on nomme infiltrabilité finale (Figure 1) et dont les valeurs observées sont très variables selon les sols (Tableau 3). Les sols les plus infiltrants sont les sols peu évolués d'apport (de 33 à 37 mm.h^{-1}) et les moins infiltrants sont les Rendzines (15 à 24 mm.h^{-1}).

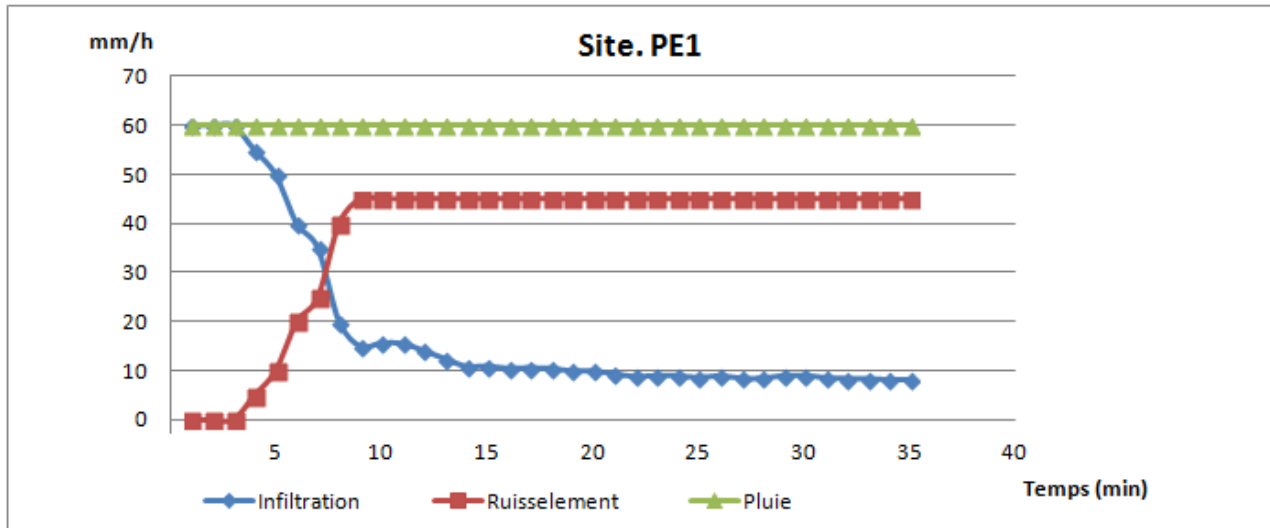


Fig.1: Évolution du ruissellement et de l'infiltrabilité durant un test de simulation de pluie

Tableau.3 : Le ruissellement et l'infiltration lors de la simulation de pluie

Sites	Sols	LR(mm)		Ke(%)	Inf (mm/h)	
		M	SD		M	SD
1	Peu Evolués d'Apport	27b	1	45	33c	1
2	Rendzines	36c	1	60	24b	1
3	Peu Evolués d'Apport	22a	1	37	37d	1
4	Rendzines	43d	0,58	72	15a	1

LR : lame ruisselé Ke : coefficient d'écoulement Inf : infiltration

Ainsi, avec une pluie de 60 mm durant 30 minutes sur le sol peu évolué d'apport (site 1), le ruissellement est plus important et atteint 27 mm, indiquant que 45% de pluie se transformait en ruissellement. Par contre, la lame infiltrée est de l'ordre de 33mm. Pour les rendzines (site2) la lame ruisselée est de l'ordre de 36 mm indiquant que 60% de pluie se transformait en ruissellement. Pour le sol peu évolué d'apport (site 3), la lame ruisselée est de l'ordre de 23 mm/h, la lame infiltrée atteint 37 mm/h, ce qui implique que 38% de pluie se transformait en ruissellement. En ce qui concerne le site 4 (Rendzines), plus de 70% de pluie se transformait en ruissellement avec un débit ruisselé de 43mm/h.

Détachabilité

La collecte des particules solides à l'exutoire de la parcelle permet de quantifier l'érosion, bien qu'on ne puisse pas parler d'érosion à l'échelle d'une parcelle d'un mètre carré. Valentin (1981), propose le terme de détachabilité et la définit comme l'aptitude d'un sol à être fractionner en particules susceptibles d'être transportées.

Le tableau 4 illustre une différence significative entre les sols des quatre sites expérimentaux, les valeurs moyennes de la détachabilité pour chaque type de sol, obtenues sur les 30 minutes du test de simulation de pluie, varient de 19 g.L⁻¹ au niveau des sols Peu Evolués d'Apport (site 3), à 34,4g.L⁻¹ sur les Rendzines du site 2 (Tableau 4).

Tableau 4. Evolution de la détachabilité des sols

Sites	Sols	CS (g/l)	
		M	SD
1	Peu Evolués d'Apport	30.4d	0.72
2	Rendzines	34.4b	0.81
3	Peu Evolués d'Apport	19a	1

CS : concentration des sédiments (g.l^{-1})

Relation entre les paramètres hydrologique et les paramètres de sol

L'étude de la relation entre les paramètres déterminés (Tableau 5) montre que l'infiltration est négativement corrélée avec le coefficient de ruissellement et la détachabilité ($R = -0,99$, $R = -0,87$ respectivement). La texture montre également des corrélations significatives avec l'infiltrabilité. On observe dans le tableau 5 une corrélation positive avec la proportion de sable ($R = 0,69$), argile ($R = 0,92$) et négative avec celle de limon ($R = -0,98$). Ces relations significatives sont dues en partie au fait que les sols observés ont des textures très contrastées et que la corrélation n'est pas masquée par d'autres facteurs.

Le coefficient de ruissellement, d'autre part, est négativement corrélé avec l'infiltration ($R = -0,99$) et positivement corrélé avec la détachabilité ($R = 0,90$).

La détachabilité était positivement corrélée avec le coefficient de ruissellement ($R = 0,90$) et négativement corrélée avec l'infiltration ($R = -0,87$).

L'infiltration et la détachabilité étaient corrélés négativement avec l'humidité ($R = -0,99$, $R = -0,63$ respectivement). Par contre, le coefficient de ruissellement est corrélé positivement ($R = 0,99$). Ces résultats montrent que l'humidité est un facteur qui influence l'infiltration et l'apparition du ruissellement au niveau du sol dans le bassin versant de ben Ahmed. Les paramètres hydrodynamiques et la matière organique étaient faiblement corrélés.

Tableau 1. Corrélation de Person entre les paramètres hydrologiques et les paramètres de sol

Paramètres de sol		If (mm/h)	Ke(%)	D ($\text{g/m}^2/\text{h}$)
Paramètres	If	1		
	Kr	-0,99**	1	
	D	-0,87**	0,90**	1
Paramètre physico-chimique	H ₂₀	-0,99* *	0,99**	-0,63*
	MO	-0,32	-0,34	0,37
	A	0,92**	-0,47	0,43
	S	0,69*	0,58*	0,021
	L	-0,98**	0,03	0,21

If : infiltration (mm/h) ; Ke : coefficient (%) d'écoulement ; D : détachabilité (g/m^2) ; H : humidité (%) ; Mo : matière organique (%) ; S : sable (%) ; L : limon (%) , A : argile (%).

IV. DISCUSSION

Nos résultats montrent que la détachabilité du sol varie entre 19 et 34 g/l, ces valeurs sont faibles par rapport à celles trouvées par Maïga-Yaleu (18,4 -177,1g/l) (Maïga-Yaleu *et al.*, 2015) en Sahel, et sont supérieures aux valeurs trouvées en moyen de 12g/l par Mathys (Mathys *et al.*, 2005) et par Martinez-Mena (1,29-18,09 g/l) (Martinez-Mena *et al.*, 2001) dans une zone semi-aride d'Espagne.

Les tests de corrélation montrent que la détachabilité était positivement corrélée avec le coefficient de ruissellement ($R = 0,90$) et négativement corrélée avec l'infiltration ($R = -0,87$). Nous remarquons aussi que l'infiltration est négativement corrélée avec le coefficient de ruissellement et la détachabilité ($R = -0,99$, $R = -0,87$ respectivement). Nos résultats sont similaires avec ceux obtenus par Mehilo *et al.*, 2017, qui ont réalisés des tests d'infiltrabilité dans le bassin versant d'Ourika, Haut-Atlas (Maroc).

L'infiltration est déterminée principalement par la texture du sol, qui détermine correctement la perméabilité du profil en l'absence d'intervention déterminante de la structure du sol, ce qui concorde avec les résultats de Marston et Dolan (1999) obtenus à partir de simulations de pluie et par Cheggour *et al.* (2008) qui ont réalisé des tests d'infiltrabilité dans le bassin versant du Rhéraya (Haut-Atlas occidental, Maroc). En revanche, aucune relation significative n'a été observée par Sabir *et al.* (2004) qui ont réalisé aussi des tests d'infiltrabilité sur des sols peu évolués du Rif central au Maroc. Contrairement à ce qui est signalé par Sabir *et al.* (2007), l'infiltrabilité est faiblement corrélée avec la matière organique ($R = -0,32$).

Il est intéressant de noter que l'infiltration et la détachabilité étaient également corrélées significativement avec l'humidité ($R = -0,99$, $R = -0,63$ respectivement). Ces résultats concordent avec ceux de Kouamé Antoine *et al.* (2015) et de Mehilo *et al.* (2017).

Les auteurs qui ont étudié l'infiltrabilité et la détachabilité en relation avec les caractéristiques du sol, ont noté que

les relations prépondérantes ne sont pas toujours les mêmes. Ces différences peuvent s'expliquer en partie par le fait que ces expériences n'ont pas toujours été faites avec les mêmes dispositifs, et donc avec un possible effet de mode opératoire. Toutefois, ces variations dans les relations observées sont aussi dues aux différences entre les milieux étudiés; chaque contexte étant l'objet de processus dont l'importance relative varie, les processus dominants masquant les autres dans leur relation aux indicateurs mesurés.

V. CONCLUSION

Les résultats de cette étude montrent que l'infiltration permet d'identifier les facteurs responsables du ruissellement et donc de l'érosion hydrique. Grâce au dispositif expérimental utilisé, les résultats obtenus sont utiles pour comprendre les risques de ruissellement et d'érosion dans le bassin versant de Ben Ahmed.

Ainsi, ces résultats montrent que l'infiltration est négativement corrélée avec le coefficient de ruissellement et la détachabilité ($R = -0,99$, $R = -0,87$ respectivement). De la même manière elle est corrélée significativement avec l'humidité ($R = -0,99$) et les proportions de sable ($R = 0,69$), limon ($R = -0,98$) et avec celle de l'argile ($R = 0,92$).

Ces relations permettent une première analyse des processus dominants de l'érosion et une hiérarchisation des facteurs dans le bassin versant de Ben Ahmed.

REFERENCES

- [1] Benkhelil H., Abriak NE., Masson F.X., Boulemia C., Henry E., 2004. Démarche méthodologique pour la conception d'un Micro- simulateur de pluie pour les milieux rural et urbain. Applications aux phénomènes d'infiltration et de ruissellement. VIIIème Journées Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne, 7-9 septembre, 7p.
- [2] Cheggour A., Simonneaux V., Asma S., Yaro Y., Sadik E., Sabir M. & Roose E., 2008. Recherche d'indicateurs de ruissellement et des risques d'érosion au moyen de tests d'infiltrométrie dans le bassin versant du Rhéraya (Haut-Atlas occidental, Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau*, 21(3): 311–322.
- [3] Hoyos N., 2005. Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes. *CATENA*, 63 (1) : 85 – 108.
- [4] Kouamé Antoine .N, Diarrassouba. N., Alui. K , Krobga Y, Fofana. I et Yao-Kouame A., 2015. Indicateurs de dégradation physique des sols dans le Nord de la Côte d'Ivoire : cas de Boundiali et Ferkessédougou. *Afrique Science*, 11(3) : 115 – 128.
- [5] Maïga-Yaleu S.B., Chivenge P., Yacouba P., Guiguemde H., Karambiri I., Ribolzi H., Bary O., Chaplot V., 2015. Impact of sheet erosion mechanisms on organic carbon losses from crusted soils in the Sahel. *CATENA*, 126 : 60 –67.
- [6] Marston R.A. et Dolan L.S., 1999. Effectiveness of sediment control structures relative to spatial patterns of upland soil loss in an arid watershed, Wyoming. *Geomorph.*, 31: 313–323.
- [7] Martinez-Mena M., Castillo V., Albaladejo J., 2002. Relations between inter rill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain. *Geomorphology* 45: 261 – 275.
- [8] Mathys N., Klotz S, Esteves M, Descroix L, Lapetite J.M. (2005). Runoff and erosion in the Black Marls of the French Alps: Observations and measurements at the plot scale. *Catena*; 63 (2-3): 261:281.
- [9] Meliho M., Khattabi A., Mhammdi N., Sabir M., 2017. Effects of land use and cover type on the risks of run of and water erosion: infiltration tests in the Ourika watershed (High Atlas, Morocco). *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 3: 8.
- [10] Pandey A., Mathur A., Mishra S.K., Mal B .C., 2009. Soil erosion modeling of a Himalayan watershed using RS and GIS. *Environmental Earth Sciences*, 59 (2): 399- 410.
- [11] Sabir M., Barthès B., Roose E., 2004. Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). *Sécheresse*, 15:105–110.
- [12] Sabir M. Roose, E. Ouagga T., Bensalah N, Dore L., 2007. Utilisations des terres et risques de ruissellement et d'érosion dans les montagnes au Maroc. Actes des JSIRAUF, Hanoi.
- [13] Stocking M. et Niamh M., 2000. Land Degradation-Guidelines for Field Assessment, Overseas Development Group, University of East Anglia, Norwich, UK.
- [14] Thiombiano L., 2015. The living soils of Africa.in Sustainable Soil Management: Key to Food Security and Nutrition in Africa; Nature & Faune, Foday Bojang, Ada Ndeso-Atanga. FAO Regional Office for Africa (eds), 30 (1) : 13-14 pp.
- [15] Toumi S., 2013. Application des techniques nucléaires et de la télédétection à l'étude de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Mina. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale de l'Hydraulique, Algérie, p 9 et 36.
- [16] Turkelboom F., Poesen J., et Trébuil G., 2008. The multiple land degradation effects caused by land-use intensification in tropical steepplands: a catchment study from northern Thailand. *CATENA*, 75: 102–116.

- [17] Valentin C., 1981. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques (Agadez, Niger). Thèse 3ème cycle, pédologie, Univ. Paris-VII, 229 p.
- [18] Walkey A. et Black I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.*, 63:251-263.