

Etude du transport solide au niveau du bassin versant de Merguellil, Tunisie centrale : cas des bassins versants d'Ettiour et de Rajela

Taoufik HERMASSI¹, Mohamed Amine CHERIF², et Hamadi HABAIEB³

¹ Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts, taoufikhermassi@yahoo.com

² Institut National Agronomique de Tunisie, cherif.mohamed.amine.inat@hotmail.com

³ Institut National Agronomique de Tunisie, habaieb.hamadi@yahoo.fr

RÉSUMÉ. – L'étude a pour finalité de chercher une approche à la fois analytique et synthétique des modalités de l'érosion due au ruissellement et du transport des sédiments afin de permettre la cartographie et la quantification des pertes en sol dans deux sous-bassins du bassin Merguellil Amont, situés dans la région de Haffouz du centre de la Tunisie.

Les modèles USLE, MUSLE et RUSLE sont couramment utilisés pour calculer la perte en sol annuelle moyenne par unité de surface terrestre résultant de l'érosion en nappe et de rigoles. Cette perte dépend de plusieurs facteurs : l'érosivité des pluies, l'érodibilité du sol, le couvert végétal, la topographie et les pratiques de conservation.

L'analyse, la combinaison des données et la modélisation ont été opérées dans un Système d'Information Géographique (SIG). La superposition des couches des différents facteurs a permis d'obtenir une carte qui présente l'aléa moyen de l'érosion. Les résultats obtenus montrent que le modèle RUSLE est le plus adéquat pour les deux bassins versants, avec quelques modifications des paramètres du facteur topographique combiné, puisqu'il donne des résultats de perte en terre acceptables.

Mots-clés : Erosion, modélisation, SIG, Semi-aride, Tunisie.

Solid Transport study at the Merguellil watershed, central Tunisia: case study of Ettiour and Rajela watersheds

ABSTRACT. – This study aims to develop an analytic and synthetic approach for erosion modalities generated by runoff and sediment transport in order to set a mapping and quantification of soil erosion in two sub-watersheds of Merguellil catchment, located in the central region of Tunisia.

USLE, MUSLE and RUSLE Models are widely used to calculate annual average of soil loss per area unit resulting from sheet and rill erosion. This soil loss depends on several factors including: rainfall erosivity, soil erodibility, vegetation, topography and conservation practices.

The analysis, combining data and modeling were carried out using a Geographic Information System (GIS). The layering of different factors has yielded a map showing the average of annual erosion. The results show that the model RUSLE is the most appropriate for the two watersheds, with some parameter changes on the combined topographic factor, since it gives acceptable results of soil loss.

Key-words: Erosion, modelling, GIS, Semi-arid, Tunisia.

I. INTRODUCTION

La dégradation des terres constitue un problème crucial qui menace le patrimoine agro-pédologique de la presque totalité de la Tunisie. Le Centre tunisien est caractérisé par l'agressivité et la diversité de ses processus érosifs, particulièrement hydriques. Cette érosion est en grande partie due, en plus des conditions naturelles telles l'agressivité des pluies et du ruissellement, à l'inadaptation des activités anthropiques aux exigences d'équilibre des écosystèmes. Les conséquences de l'érosion sont multiples et variées telles que la perte du capital en sol, l'envasement et le colmatage des infrastructures hydrauliques, notamment les retenues collinaires. En 2009, le Ministère Tunisien de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques a tiré la sonnette d'alarme en annonçant que 74 % des sols agricoles sont menacés par les érosions hydrique et éolienne, soit environ 4 millions d'hectares de terres fertiles.

Ce problème a pris des dimensions inquiétantes pour la gestion durable dans tout le monde, en effet, selon des études de la FAO, la situation continue à se détériorer dans de nombreux pays méditerranéens, il touche environ 35 % des terres de la Grèce, 40 % au Maroc et 50 % en Turquie [Roose *et al.*, 2012]. Selon les Nations Unies [2002], l'érosion hydrique touche 14,3 % du territoire d'Amérique du Sud et 26 % de l'Amérique centrale. En Europe, selon l'Agence européenne pour l'environnement (AEE), le problème affecte presque 17 % de la surface du territoire [Institut français de l'environnement, 2005]. En ce qui concerne l'Asie, l'érosion touche 40 % de la surface de la Chine [Agence de presse Xinhua, 2008].

Le recours aux outils de modélisation est incontournable pour l'aide à la prise de décision et à la gestion des ressources en sols ou pour l'établissement de plans d'aménagement et d'évaluation des risques d'érosion. Initialement, la modélisation de l'érosion concernait principalement l'estimation de la perte

de la couche arable de point de vue agronomique. Cette motivation a donné lieu au développement du dispositif expérimental à partir des parcelles de mesures puis au modèle empirique de l'équation universelle de pertes de sol (USLE) de Wischmeier et Smith [1978]. Cette équation regroupe toutes les variables sous six facteurs majeurs [Wischmeier & Smith, 1965]. Elle prédit les pertes moyennes de sol qui sont occasionnées par l'érosion en nappe. Bien que conçue aux États-Unis, l'équation universelle de perte en sols constitue un des modèles les plus adaptés pour l'estimation annuelle de l'érosion hydrique potentielle des sols. En effet, il a été appliqué dans de nombreux pays et adapté en fonction du contexte climatique, pédologique, topographique [Renard et Freimund, 1994 ; Roose, 1994 ; Mati *et al.*, 2000 ; Boggs *et al.*, 2001 ; Cohen *et al.*, 2005 ; Dumas *et al.*, 2010 ; Dumas et Printemps, 2010 ; Fengyin *et al.*, 2010]. Afin de tenir compte de tous ces contextes, différentes équations dérivées ont été proposées. L'application du modèle à une région donnée consiste donc à choisir les méthodes les plus adaptées pour le calcul des facteurs.

Malgré les critiques faites sur la transposabilité du modèle USLE, la robustesse de cette approche réside dans son pouvoir à donner des résultats pertinents et pratiques pour l'évaluation potentielle de l'érosion hydrique des sols même pour des territoires peu renseignés. L'avantage de ces modèles réside aussi dans le fait qu'ils prennent en compte tous les facteurs jouant un rôle dans les processus d'érosion, à savoir l'érodibilité des sols, la topographie, l'occupation du sol, l'érosivité des pluies, les aménagements antiérosifs. L'intégration de l'équation USLE dans les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) a beaucoup facilité la compréhension de l'interaction des différents facteurs dans l'analyse du risque d'érosion et l'évaluation de leurs impacts.

Ainsi, la modélisation de l'érosion hydrique, notamment la quantification et la cartographie de ce phénomène, constituent des outils indispensables pour la détermination des zones d'interventions prioritaires dans le cadre des programmes de stratégie de conservation des eaux et des sols.

L'objectif principal de cette étude est l'estimation et la cartographie de la perte en terre sur deux bassins versants de la Tunisie centrale, à partir d'une analyse des facteurs de l'érosion. A ce propos, nous avons choisi des méthodes qui

utilisent l'équation universelle de perte en sol de Wischmeier et Smith [1958] à savoir :

- USLE (Universal Soil Loss Equation)
- MUSLE : la version modifiée d'USLE, développée par Williams et Berndt [1977]
- RUSLE : version révisée d'USLE, développée par Renard *et al.*, [1991].

Ces trois modèles ont été intégrés sous un Système d'Information Géographique (SIG) afin de quantifier et de cartographier l'aléa de l'érosion hydrique au niveau des bassins des oueds Rajela et Ettieur.

II. SITE D'ÉTUDE

La zone d'étude est constituée par les deux bassins versants des oueds Rajela et Ettieur, qui font partie du grand bassin versant de l'oued Merguellil amont qui couvre une superficie de 343 km² (Figure 1). En effet, le bassin versant de Merguellil se présente comme une grande vallée relativement homogène avec des hauts reliefs assez boisés à l'amont et de larges plaines alluviales à l'aval bordées par des massifs montagneux de faible altitude. Le bassin versant de Merguellil est classé comme étant très sensible à l'érosion [Kingumbi, 2002], on observe ainsi un important taux d'envasement au niveau du barrage El Haouareb situé à l'exutoire de ce bassin versant, en moyenne les apports solides sont estimés à 1,21 Mm³/an ce qui correspond à une érosion spécifique équivalente à 1500 tonnes/Km²/an [Virrion, 2006]. Les deux bassins versants des oueds Rajela et Ettieur ont été choisis et équipés de stations de mesures hydropluviométriques et des dispositifs de mesure du transport solide en février 1989 dans le cadre du programme « Etude d'Evaluation des Impacts des Aménagements de Conservation des Eaux et du Sol dans le bassin versant de Merguellil », qui a été financé par le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD/FAO/TUN/86/020) [FAO, 2011].

Ces deux bassins versants appartiennent à l'étage bioclimatique semi-aride inférieur avec une pluviométrie moyenne annuelle d'environ 300 mm. La distance qui sépare ces deux bassins versants ne dépasse pas cinq kilomètres.

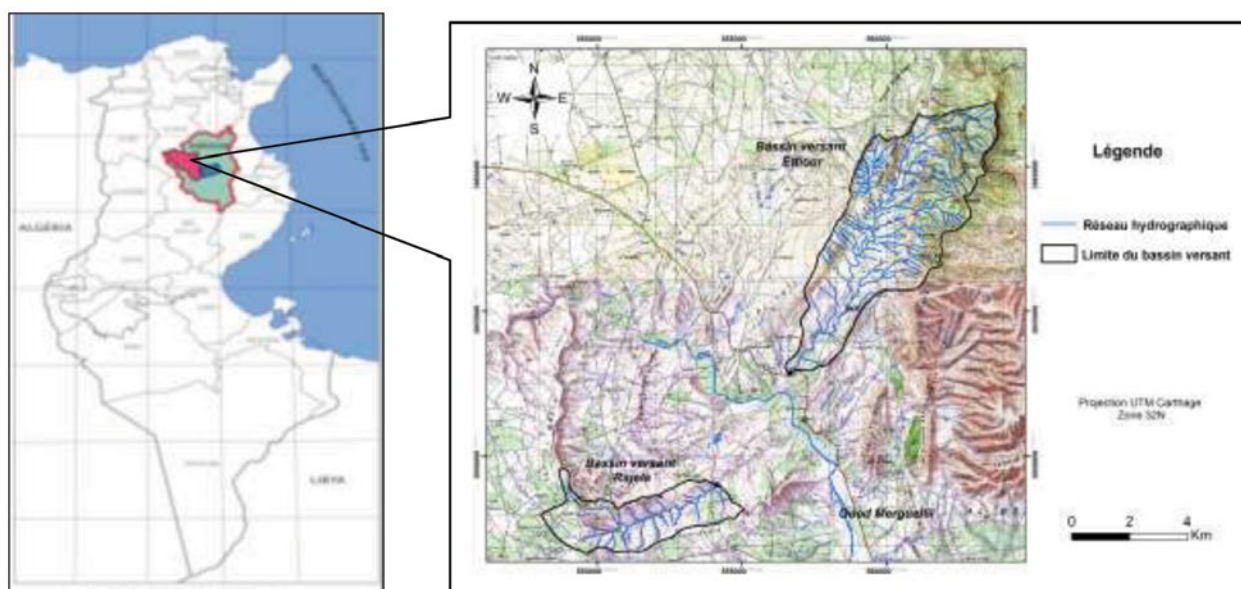


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude.

Le bassin versant de Rajela couvre une superficie d'environ 1100 ha ; il est caractérisé par la prépondérance de sols peu évolués, alors que le bassin versant d'Ettiour est dominé par des rendzines et des unités complexes couvrant une superficie de 3000 ha.

En 1990, au niveau du bassin versant de Rajela, plus de la moitié du bassin (55 %) est occupée par des parcours dégradés, la surface restante est principalement cultivée en cultures annuelles et l'arboriculture occupe ainsi 39 % de la surface totale du bassin. En 2008, les surfaces occupées par les parcours, sont réduites d'environ 19 %, au dépend des cultures annuelles, et l'arboriculture a cédé la place à l'implantation des oliviers.

En 1990, au niveau du bassin versant d'Ettiour, l'occupation des sols est répartie principalement entre les forêts (38 %), les parcours forestiers (15 %) et les cultures annuelles (38 %). En 2008, les surfaces occupées par les forêts sont réduites au dépend des cultures annuelles et des parcours forestiers qui occupent respectivement 45 % et 28 % des surfaces.

Les surfaces aménagées au niveau du bassin versant de Rajela, ont évolué de 25 % au cours des années 90, à 80 % vers les années 2008, alors qu'au niveau du bassin versant d'Ettiour, elles ont évolué de 15 % à 57 %.

III. METHODOLOGIE

Selon les modèles USLE, MUSLE et RUSLE, l'érosion (perte en sol A) est une fonction multiplicative de l'érosivité des pluies (le facteur R) que multiplie la résistance du milieu, laquelle comprend K (l'érodibilité du sol), LS (le facteur topographique), C (le couvert végétal et les pratiques culturales) et P (les pratiques antiérosives).

Ces modèles sont actuellement utilisés à grande échelle dans de nombreux pays. En outre, ils sont largement appliqués et testés à l'échelle du bassin versant [Williams et Berndt, 1972; Griffin et al., 1988; Dickinson et Collins, 1998; Jain et al., 2001; Lee, 2004; El Garouani et al., 2005], à l'échelle du pays [Gay et al., 2002; Strauss et al., 1994 ; Dautrebande et al., 1994] et à l'échelle du continent [Van der Knijff et al., 2000]. Actuellement ce type d'approche est assez généralisé dans le monde sous de nombreuses variantes, et reconnu comme simple et robuste [Desmet et Govers, 1996]. De nombreux modèles hydrologiques intègrent actuellement à l'échelle du bassin versant les formulations USLE/RUSLE et MUSLE moyennant, selon le modèle, des variantes ou ajouts tels que le calcul au pas de temps journalier, la notion de capacité maximale de transport, une description plus explicite du détachement et du transport, la prise en compte détaillée de la croissance des cultures et des pratiques agricoles, etc.

Ainsi, pour ces différents modèles, la prévision de l'érosion est issue de la combinaison de cinq sous-modèles qui sont donnés par l'équation 1 :

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (1)$$

Le SIG s'articule d'une part sur une banque de données cartographiques et d'autre part sur une banque de données alphanumériques. Il permet, ainsi, de croiser des cartes aux thèmes différents, de fusionner leurs bases de données et d'appliquer des équations mathématiques sur les valeurs numériques des facteurs de l'érosion qui y sont rangées.

L'application des trois modèles de perte en sol, USLE, MUSLE et RUSLE, dans les bassins versants des oueds Rajela et Ettiour a nécessité l'évaluation des différents facteurs

de l'équation universelle de chaque modèle sur la superficie de tout le bassin versant et leur expression sous forme de cartes thématiques. L'intégration de ces cartes dans le Système d'Information Géographique ArcGIS se fait par numérisation. Les différents polygones obtenus pour chaque carte sont associés à leurs bases de données (modèle vecteur). Par la suite ces unités surfaciques sont converties en un nombre de pixels contenant la même valeur (modèle raster), qui correspond à l'information sur un facteur de l'équation universelle.

Le croisement des couches raster par le module « Raster Calculator » d'ArcGIS et l'application des équations mathématiques des modèles de prédiction de perte en sol a permis d'évaluer le taux d'érosion sur tous les points des deux bassins versants et l'élaboration de la carte synthétique des pertes en sol selon l'organigramme méthodologique (Figure 2).

Le terme LSKCP représente une caractéristique du bassin versant, alors que le facteur R représente une caractéristique de la zone. En effet, on a adopté une seule valeur d'érosivité des pluies pour chaque bassin versant du fait que leurs superficies sont assez faibles. Cet indice tient bien compte des trois conditions : énergie, intensité de pointe et durée des pluies. Il est calculé par les équations correspondantes pour chaque modèle.

L'érodibilité d'un sol est sa résistance à deux sources d'énergie, d'une part, la battance des gouttes de pluies à la surface du sol et d'autre part, l'entaille du ruissellement entre les mottes. En effet, le facteur d'érodibilité K, des différents types de sols des bassins versants de Rajela et Ettiour, a été déterminé à partir de la carte pédologique de la zone et en utilisant des fonctions de pédotransfert et les valeurs proposées dans la littérature spécialisées [Wischmeier et al., 1971].

En ce qui concerne le facteur du couvert végétal C, il s'agit d'exprimer l'effet du couvert végétal présent dans les bassins versants. Pour ce facteur, on a associé une valeur globale annuelle pour chaque type de culture qui est obtenue directement à partir des cartes d'occupation des sols et des photos aériennes du bassin correspondant et en se référant aux travaux de Cormary et Masson [1964] en Tunisie et de Wischmeier [1960] aux Etats-Unis.

Le facteur de pratiques anti-érosives P reflète l'effet des aménagements de conservation des eaux et du sol, qui réduisent la quantité d'eau de ruissellement et leur vitesse et diminuent ainsi les effets de l'érosion hydrique. Ce facteur dépend du type d'aménagement adopté et de la pente du versant aménagé. L'indexation de ce facteur provient essentiellement des résultats expérimentaux de Masson [1971] et Heusch [1970] en zone méditerranéenne. Le facteur P est obtenu directement à partir des cartes d'occupation des sols et des photos aériennes de chaque bassin versant.

Afin de déterminer le facteur topographique (LS) le plus adéquat pour chaque bassin versant, on a essayé d'appliquer plusieurs formules de la littérature de ce facteur sous un SIG, et de trouver de nouvelles expressions logiques, combinées avec les autres facteurs, donnant des résultats de l'érosion proches des résultats expérimentaux réalisés en 1990.

Après calage des formules modifiées et le choix des facteurs adéquats, pour chaque bassin versant, on a essayé d'estimer la perte en sol en 2008, sachant que les facteurs qui changent sont l'occupation des sols, les aménagements CES ainsi que le facteur d'érosivité des pluies R qui dépend de la pluviométrie de l'année considérée.

IV. RÉSULTATS

Les données pluviométriques disponibles sont des enregistrements des deux pluviographes à augets basculeurs. Les

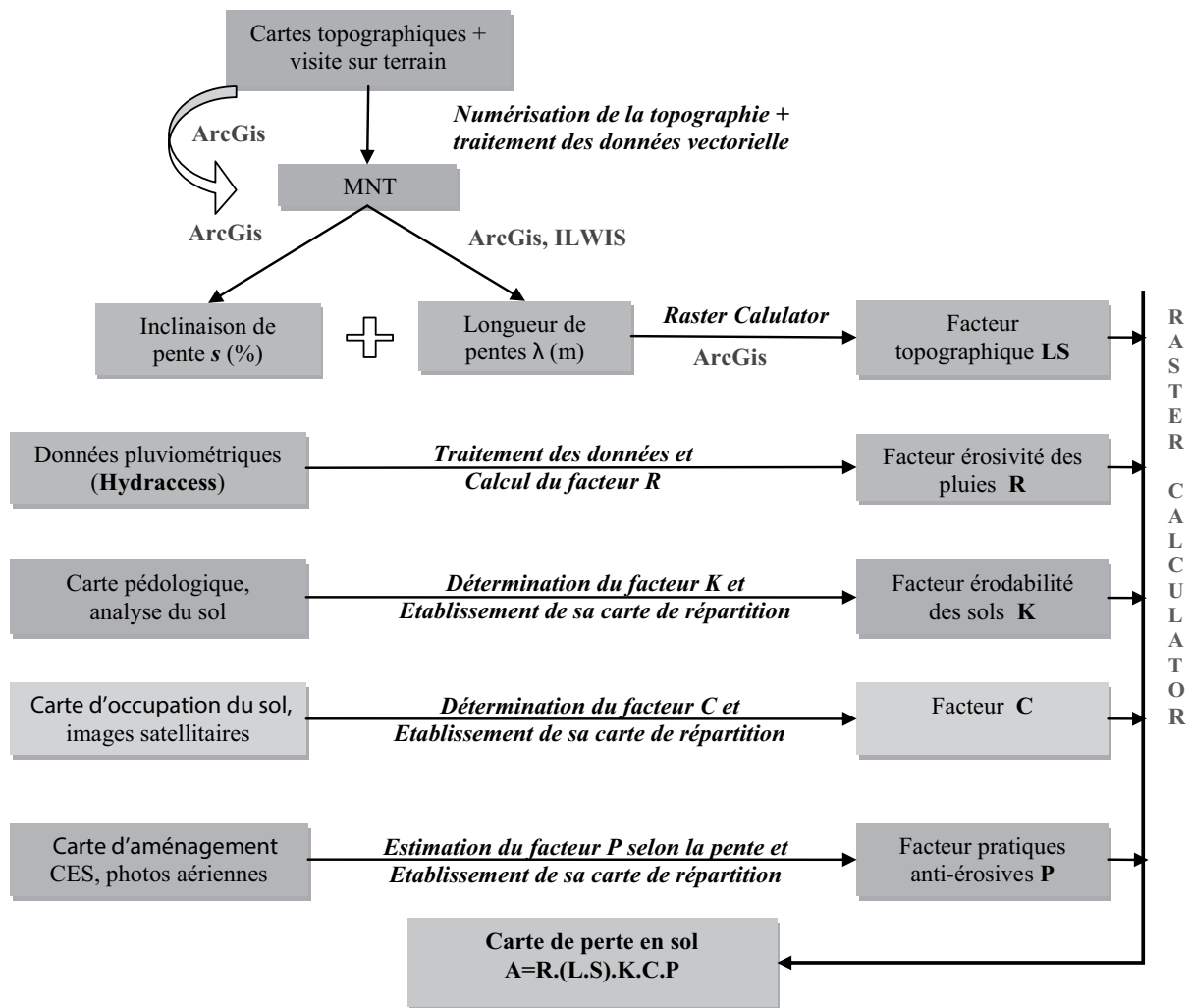


Figure 2 : Organigramme méthodologique de l'intégration de l'Equation universelle de perte en sol dans le SIG.

pluviographes ont été installés à des endroits dégagés de tout obstacle, dans les environs des dispositifs de mesures hydrométriques et du transport solide (exutoires des bassins versants). Les enregistrements ont débuté le 02/06/1989 et se sont terminés le 23/12/1990.

D'autre part, les données hydrométriques disponibles sont les volumes ruisselés et les débits de pointe produits par les événements survenus pendant la période d'observation. Ces données ont été déterminées à partir du niveau de l'eau dans l'oued en fonction des temps enregistrés par les limniographes installés au niveau des stations de mesure, tout en tenant compte de la courbe de tarage de l'oued effectuée par la Direction Générale des Ressources en Eau.

Les données expérimentales du transport solide, correspondent à des concentrations moyennes de matières en suspension des événements considérés au niveau du cours d'eau. Ces concentrations moyennes sont déterminées à partir d'un préleveur de matières en suspension qui permet de prélever plusieurs échantillons du cours d'eau sur plusieurs niveaux d'une même verticale.

Le suivi hydro-sédimentaire au niveau des exutoires des bassins versants a donné les résultats expérimentaux de perte en sol suivants :

— Pour le bassin versant de Rajela : érosion spécifique = 12,3 t/ha/an (1989-1990)

— Pour le bassin versant d'Ettiour : érosion spécifique = 4,9 t/ha/an (1989-1990)

IV.1. Améliorations apportées au facteur topographique

Pour les modèles USLE et MUSLE, on a trouvé que les résultats de perte en sol, selon les différentes formules de calcul du facteur topographique combiné (LS), sont supérieurs aux résultats expérimentaux. En effet, les valeurs de perte en sol élevées sont dues essentiellement aux valeurs des moyennes du facteur topographique (LS) qui sont élevées. Le rapport entre les valeurs calculées et celles observées peut atteindre un facteur 20. Concernant le modèle RUSLE, on a trouvé que, pour chaque bassin versant, deux expressions du facteur topographique (LS) combinées avec les autres facteurs donnent des résultats assez acceptables. Ces deux expressions sont basées sur les deux formules du tableau 1.

Avec λ longueur de la pente et θ l'angle de la pente en degré.

Les résultats des pertes en sol, selon les différentes expressions du facteur (LS) adoptées, sont représentés par le tableau 2.

Tableau 1 : Les expressions du facteur (LS) selon Moore et Wilson [1992] et Mitasova et al., [1996].

Expression du facteur (LS)	Auteurs
$LS = 1,6 \cdot \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^{0,6} \cdot \left(\frac{\sin \theta}{0,0896} \right)^{1,3}$	Moore et Wilson [1992]
$LS = 1,4 \cdot \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^{0,4} \cdot \left(\frac{\sin(\theta \cdot 0,01745)}{0,09} \right)^{1,4}$	Mitasova et al. [1996]

Tableau 2 : Résultats des pertes en sol des bassins versants des oueds Rajela et Ettieur en 1990 selon les expressions du facteur (LS) adoptées.

Expression du facteur (LS)	Perte en sol (t/ha/an)
Bassin versant d'oued Rajela	
$LS = 1,4 \cdot \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\sin(\theta \cdot 0,01745)}{0,09} \right)^{1,4} \quad (1.a)$	12,6
$LS = 1,4 \cdot \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\sin(\theta \cdot 0,01745)}{0,09} \right)^{1,3} \quad (1.b)$	12,03
Bassin versant d'oued Ettieur	
$LS = 1,6 \cdot \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^{0,4} \cdot \left(\frac{\sin(\theta \cdot 0,01745)}{0,09} \right)^{1,3} \quad (2.a)$	4,78
$LS = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^{0,6} \cdot \left(\frac{\sin(\theta \cdot 0,01745)}{0,09} \right)^{1,3} \quad (2.b)$	4,95

Les valeurs des pertes en sols calculées sont très proches des valeurs observées, la valeur moyenne de la couche résultante des facteurs LSKCP peut être fixée à 0,1 pour les deux bassins versants pour l'année 1990. La figure 3 présente la carte des pertes en sol du bassin versant de Rajela pour l'année 1990, selon le modèle RUSLE et l'équation (1.a) du facteur (LS).

Les résultats de calcul des pertes en sol par les différents modèles sont donnés par le tableau 3.

Pour les modèles USLE et MUSLE, le rapport entre les valeurs calculées et celles observées peut atteindre un facteur 20, selon les différentes formules de calcul du facteur topographique combiné (LS). Il s'est avéré que le modèle RUSLE est le plus adéquat pour les deux bassins versants, avec quelques modifications des paramètres, puisqu'il donne des résultats de perte en terre proches de celles observées.

Pour l'année 2008, le tableau 4 regroupe les résultats de perte en sol calculés sur les deux bassins versants.

Entre les années 1990 et 2008, pour les deux bassins et selon les formules du facteur topographique combiné adoptées, on note une différence des valeurs moyennes de la couche résultante LSKCP et par conséquent les valeurs de perte en sol différentes. En faite, cette différence s'explique par le changement de la valeur du facteur d'érosivité des pluies et l'évolution des surfaces aménagées ainsi que l'occupation des sols.

La figure 4 présente la carte des pertes en sol du bassin versant Ettieur pour l'année 2008, selon le modèle RUSLE et l'équation (2.a) du facteur (LS).

Pour mieux comprendre le fonctionnement érosif des bassins versants, nous avons détaillé la répartition des classes d'érosion du modèle RUSLE, les résultats de calcul sont donnés par le tableau 5.

Pour l'année 1990, il est remarquable que presque la moitié de la surface du bassin de Rajela est affectée par une érosion inférieure ou égale à 5 tonnes/ha/an, et 60 % de la superficie est affectée par une perte en sol inférieure entre 10 t/ha/an. Pour le bassin versant d'Ettieur, la majorité de la surface (85 %) est affectée par une perte en terre inférieure à 10 tonnes/ha/an.

Pour l'année 2008, la majeure partie (87 %) du bassin de Rajela est affectée par une perte en terre inférieure ou égale à 10 t/ha/an. En 2008, la majeure partie (77 %) de la surface du bassin d'Ettieur est affectée par une perte en terre ne dépassant pas 10 t/ha/an alors que plus de 10 % de la surface du bassin est affecté par une perte de sol supérieure à 20 t/ha/an. En se basant sur le calage des paramètres pour l'année 1990, les résultats de l'année 2008 expliquent bien la réduction de l'érosion au niveau du bassin versant de Rajela et l'amplification du phénomène d'érosion pour le bassin versant d'Ettieur, en effet, ces deux bassins ont connus des modifications au niveau des occupations des sols et des aménagements et

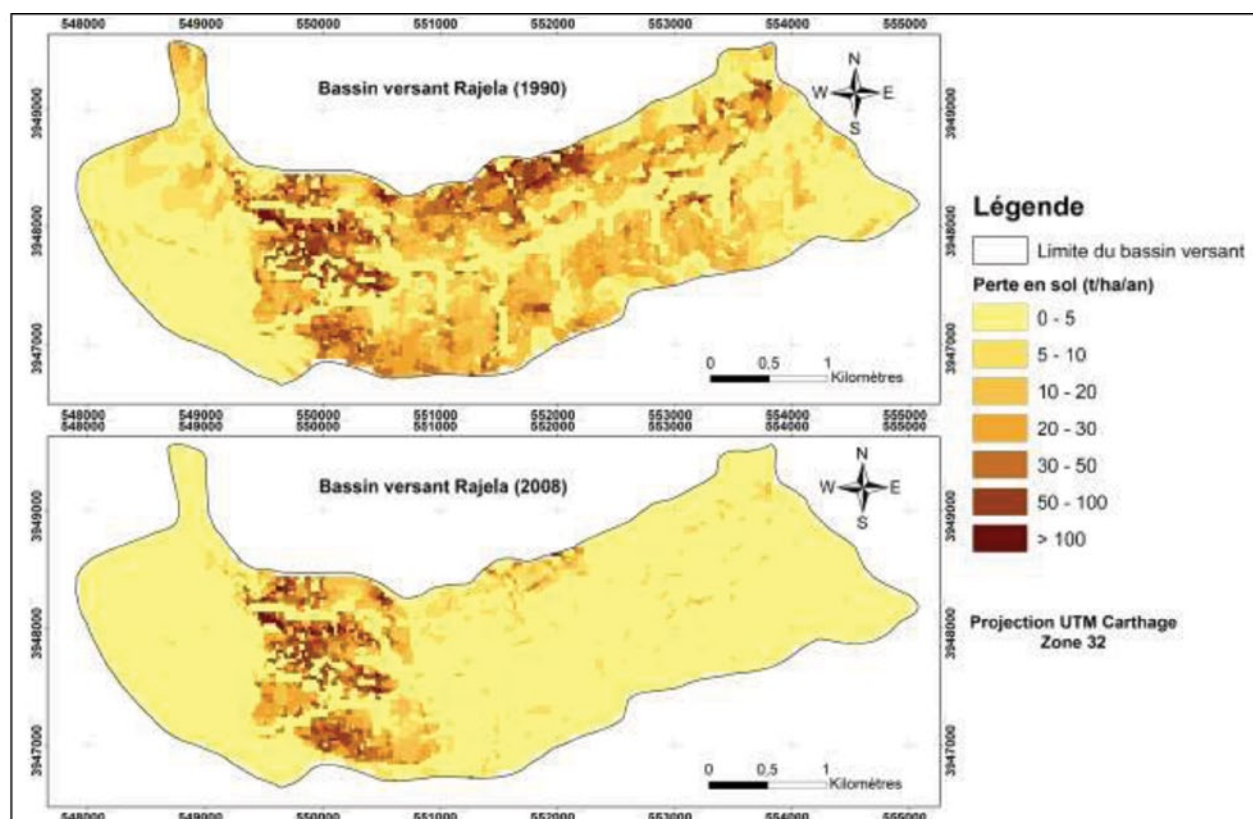


Figure 3 : Cartes des pertes en sol dans le bassin versant de Rajela pour les années 1990 et 2008 selon le modèle RUSLE.

Tableau 3 : Résultats de perte en sol calculés sur les bassins versants des oueds Rajela et Ettiour pour l'année 1990.

Perte en sol A (t/ha/an)	Valeur Observée	Valeur calculée USLE	Valeur calculée MUSLE	Valeur calculée RUSLE
Rajela	12,3	97,4	137,8	12,61
		58	82,1	
		172,3	243,9	12,03
		30,8	43,6	
Ettiour	4,9	38,9	50,2	4,68
		26,4	34,1	
		79,9	103,3	4,78
		14,4	18,6	

Tableau 4 : Résultats de perte en sol sur les bassins versants des oueds Rajela et Ettiour en 2008.

Expression du facteur (LS)	Bassin versant Rajela	
	LSKCP	Perte en sol (t/ha/an)
1.a	0,062	6,12
1.b	0,058	5,71
	Bassin versant Ettiour	
2.a	0,086	8,54
2.b	0,09	8,95

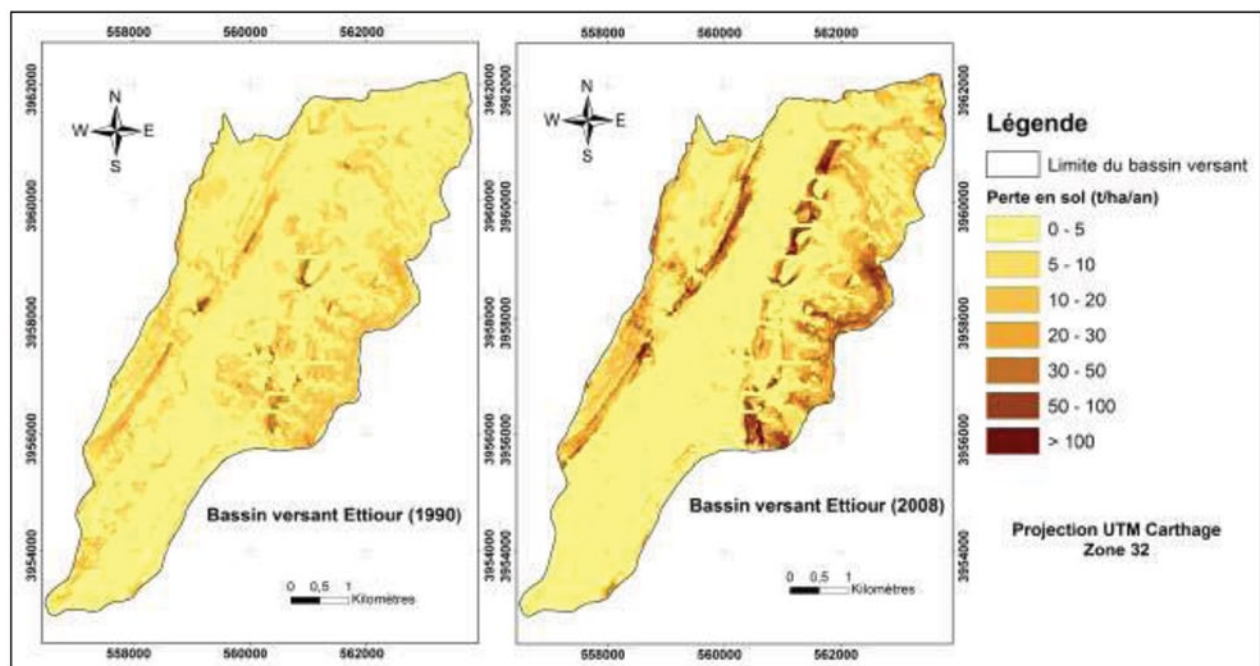


Figure 4 : Cartes des pertes en sol du bassin versant d'Ettiour pour les années 1990 et 2008 selon le modèle RUSLE.

Tableau 5 : Répartition des classes d'érosion pour le modèles RUSLE.

Perte en sol (t/ha/an)	Simulation (1989-1990)		Prévision (2007-2008)	
	Rajela (ha)	Ettiour (ha)	Rajela (ha)	Ettiour (ha)
0-10	657	2527	928	2200
10-20	177	334	47	300
20-50	194	84	69	259
50-100	36	9	21	78
>100	8	2	6	23
Erosion Moyenne	12,6	4,7	5,9	8,7

surtout la réduction des superficies forestières (cf. paragraphe II relatif à la présentation du site d'étude).

RUSLE intègre d'avantage des données et des paramètres dans la détermination des facteurs, notamment le facteur du couvert végétal C et celui des pratiques de soutien P. Il présente des modifications du facteur (LS) pour tenir compte de la sensibilité des sols à l'érosion des rigoles et des révisions des valeurs du facteur R.

IV.2. Impact des aménagements de conservation des eaux et du sol

La cartographie des aménagements de conservation des eaux et du sol a été élaborée à partir des cartes d'occupation des sols et des photos aériennes de chaque bassin versant, l'objectif étant de déterminer la répartition spatiale des aménagements existants et de décrire leur évolution au cours du temps. Les aménagements les plus répandus dans la zone semi aride tunisienne sont les banquettes à rétention totale ou partielle et les cordons en pierres sèches. Ces ouvrages sont nettement visibles sur les photographies aériennes et

jouent un rôle important de stockage des eaux de ruissellement sur les versants et par conséquent ils limitent les transports solides à l'échelle des petits bassins versants.

Les aménagements réalisés au niveau du bassin versant de Rajela sont constitués essentiellement par des banquettes à rétention totale. Les superficies aménagées ont été développées de 25 % de la superficie totale du bassin versant en 1990 à 81 % en 2008.

En 1990, les aménagements du bassin versant d'Ettiour étaient composés de banquettes à rétention totale et de cordons en pierres sèches, ils occupent respectivement 11 % et 4 % de la superficie totale du bassin versant. La superficie aménagée en banquettes antiérosives a évolué pendant la période 1990-2008 pour atteindre 53 % de la surface totale du bassin versant alors que celle concernée par la technique de cordons en pierres sèches n'a pas connu d'extension.

Dans le but de déterminer l'impact des aménagements de conservation des eaux et des sols à partir de l'évolution des surfaces aménagées entre les années 1990 et 2008, on a calculé les pertes en sol avec et sans prise en compte du facteur de pratiques anti-érosives P. Le tableau 6 présente le

Tableau 6 : Impact des aménagements antiérosifs sur les pertes en sol

Bassin versant	1990		2008	
	Surfaces aménagées (%)	Réduction de des pertes en sol (%)	Surfaces aménagées (%)	Réduction de des pertes en sol (%)
Rajela	25	11	81	56
Ettiour	15	2	57	40

pourcentage des superficies aménagées pour les deux années considérées, ainsi que la réduction des pertes en sol suite à la construction des aménagements de conservations des eaux et du sol.

L'aménagement de 25 % de la surface totale du bassin versant de Rajela a permis de réduire les pertes en sol de 11 %, alors que l'aménagement du bassin versant d'Ettiour sur 15 % de sa superficie a diminué ses pertes en sol seulement de 2 %.

L'évolution des superficies des aménagements de conservations des eaux et du sol, pendant la période de 1990 à 2008, a entraîné une réduction de la perte en terre de l'ordre de 56 % au niveau du bassin versant de Rajela. On note aussi une diminution très importante du taux de perte en terre sur le bassin versant d'Ettiour qui peut atteindre 40 % en 2008. On constate ainsi que la réduction des pertes en sol est en relation directe avec l'évolution des surfaces aménagées.

Les aménagements de conservation des eaux et du sol sont très importants dans les espaces ruraux de la zone semi aride tunisienne, ils ont pour objectifs la collecte des eaux, la protection des sols et l'augmentation de la production agricole. Les modèles dérivés des équations de Wischmeier sont donc des outils performants pour étudier l'impact de l'action anthropique, par la mise en culture des terres agricoles et la conception des aménagements antiérosifs, et pour analyser des scénarios de gestion et de planification à l'échelle des bassins versants.

V. CONCLUSION

A cause de ses caractéristiques climatiques, physiques et anthropiques particulières, la Tunisie présente des conditions favorables pour le déclenchement de l'érosion hydrique qui menace les terres agricoles du pays. Pour évaluer le dépôt de sédiments, il est nécessaire de caractériser le processus d'érosion sur les bassins versants.

La modélisation des pertes en sol, par l'intégration des modèles empiriques sous les logiciels de Systèmes d'Information Géographique (SIG), permet à la fois la quantification et la cartographie de l'aléa de l'érosion hydrique dans les bassins versants. Ces modèles, non exigeants en paramètres, sont de plus en plus utilisés dans les études d'aménagement intégré pour déterminer les zones les plus sensibles à l'érosion au niveau d'un bassin versant, sur lesquelles des interventions d'urgence sont requises, et/ou prévoir différents scénarios d'aménagement des versants.

Les modèles USLE, MUSLE et RUSLE sont couramment utilisés pour calculer la perte en sol. Ces modèles définissent la perte en sol comme étant l'interaction de cinq facteurs de l'érosion hydrique à savoir :

— Un facteur caractéristique du milieu : l'érosivité des pluies (le facteur R),

— Quatre facteurs caractérisant le bassin versant à savoir : l'érodibilité du sol (facteur K), le facteur topographique combiné LS, le couvert végétal et les pratiques culturales C et le facteur des pratiques antiérosives P.

RUSLE intègre davantage de données et de paramètres dans la détermination des facteurs, notamment le facteur du couvert végétal C et celui des pratiques antiérosives P. Il présente des modifications du facteur (LS) pour tenir compte de la sensibilité des sols à l'érosion des rigoles et des révisions des équations de calcul du facteur d'érosivité R. En effet, le modèle RUSLE semble être adapté aux conditions du climat semi-aride tunisien et en particulier aux deux bassins versants Rajela et Ettiour, par l'utilisation de nouvelles expressions du facteur topographique (LS) qui ont permis d'obtenir des résultats assez satisfaisants, qui pourraient être améliorés en utilisant des bases de données globales ou régionales (WorldClim, BD-500, SRTM).

MUSLE est dérivé d'un modèle d'estimation de la production des sédiments basé sur les caractéristiques de l'écoulement, jugé comme le meilleur indicateur pour prédire l'apport des sédiments, à la sortie du bassin versant sur la base d'un événement pluvieux et de certains facteurs qui affectent l'érosion des sols. La qualité du modèle MUSLE dépend donc de la capacité de ses paramètres à traduire la réalité observée sur terrain ainsi que de la disponibilité des différents paramètres, ce qui représente un inconvénient majeur lors de la phase de calage. RUSLE est l'un des plus grands modèles techniquement avancé et montrant un potentiel pour une utilisation dans plusieurs parties du monde. En outre, la flexibilité du modèle RUSLE s'est avérée avantageuse pour son application à l'échelle du bassin versant.

Appliquer ces modèles dérivés des équations de Wischmeier à d'autres bassins versants en région semi-aride tunisienne permettra leur validation et ainsi leur utilisation dans les programmes d'aménagement de conservation des eaux et des sols. Il serait aussi possible d'envisager un suivi de l'évolution des états de surface des sols et des cultures pratiquées, en utilisant des images satellitaires, et d'apporter une meilleure description des autres facteurs afin d'affiner l'estimation des pertes de sols.

VI. REFERENCES ET CITATIONS

- AGENCE DE PRESSE XINGHUA (2008) — *L'érosion du sol menace la Chine*, [En ligne]. http://french.china.org.cn/china/txt/2008-11/21/content_168044_46.htm. Page consultée le 15 Février 2009
- BOGGS G.S., DEVONPORT C.C., EVANS K.G., SAYNOR M.J. ET MOLIÈRE D.R. (2001) — Development of a GIS based approach to mining risk assessment. *Supervising Scientist Report*, , Environment Australia, Darwin. **159** 49

- COHEN M. ET REY F. (2005) — Dynamiques végétales et érosion hydrique sur les marnes dans les Alpes françaises du Sud. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. **1** 31-44
- CORMARY Y. ET MASSON J.-M. (1964) — Etude de conservation des eaux et du sol au Centre de Recherche du Génie Rural de Tunisie. *Application à un projet type de l'équation de perte de sols de Wischmeier*. Cahiers ORSTOM, Pédologie. **2(3)** 3-26
- DAUTREBANDE S., MOKADEM A.I. ET LAIME S. (1994) — *Projet pilote de CARactérisation Hydrologique CARHY – Rapport final*. Unité d'Hydraulique Agricole, FUSAGx. 164
- DESMET P. J. J. AND GOVERS G. (1996) — A GIS Procedure for Automatically Calculating the USLE LS Factor On Topographically Complex Landscapes Units. *Journal of Soil and Water Conservation*. **51** 427-433
- DICKINSON A. AND COLLINS R. (1998) — Predicting erosion and sediment yield at the catchment scale, Soil erosion at multiple scales. CAB Int. 317-342
- DUMAS P. ET PRINTEMPS J. (2010) — Assessment of Soil Erosion Using USLE Model and GIS for Integrated Watershed and Coastal Zone Management in the South Pacific Islands. *Proceedings Interpraevent, International Symposium in Pacific Rim, Taipei, Taiwan*. 856-866
- DUMAS P., PRINTEMPS J., MANGEAS M. ET LUNEAU G. (2010) — Developing Erosion Models for Integrated Coastal Zone Management. A Case Study of NewCaledonia West Coast. *Marine Pollution Bulletin*. **161** 519-529
- EL GAROUANI A., MERZOUK A., JABRANE R. ET BOUSSEMA M. R. (2005) — Analyse spatiale de l'érosion en nappe et de l'infiltrabilité des sols dans le pré-rif Marocain. *Télédétection*. **5(1-2-3)** 69-80
- FAO (2011) — *Coopération FAO/Tunisie en matière de développement agricole en Tunisie*. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. Bureau Sous-Régional pour l'Afrique du Nord, Représentation en Tunisie. 66 p
- FENGYIN Y., SICHOUX L., BARRIOT J.P. ET DUMAS P. (2010) — Modeling the erosion of shield volcanoes : The Tahiti island case. *Proceedings Interpraevent, International Symposium in Pacific Rim, Taipei, Taiwan*. 690-699
- GAY M., CHERET V. AND DENUX J.P. (2002) — Apport de la télédétection dans l'identification du risque d'érosion. *La Houille Blanche*. **1(81)** 86
- GRIFFIN M.L., BEASLEY D.B., FLETCHER J.J. AND FOSTER G.R. (1988) — Estimating soil loss on topographically nonuniform field and farm units. *Journal of Soil and Water Conservation*. **43** 326-331
- HEUSCH B. (1970) — L'érosion du Pré-Rif. *Ann Rech Forestière au Maroc*. **12** 9-176
- INSTITUT FRANÇAIS DE L'ENVIRONNEMENT (2005) — Érosion des sols, un phénomène à surveiller. [En ligne]. <http://www.ifen.fr/publications/lecatalogue-des-publications/le4-pages/2005/I-erosion-des-sols-unphenomene-a-surveiller.html?print=1>. Page consultée le 05 Février 2009
- JAIN S.K., KUMAR S., AND VARGHESE J. (2001) — Estimation of soil erosion for a Himalayan watershed using a GIS technique. *Water Resour. Manag.* **15** 41-54
- LEE S. (2004) — Soil erosion assessment and its verification using the universal soil loss equation and geographic information system: A case study at Boun, Korea. *Environmental Geology*. **45** 457-465
- MATI B.M., MORGAN R.P.C., GICHUKI F.N., QUINTON J.N., BREWER T.R. ET LINIGER H.P. (2000) — Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS : A case study of the Upper EwasoNg'iro North basin of Kenya. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. **2(2)** 78-86
- MASSON J.M. (1971) — *L'Érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen. Méthodes expérimentales pour l'étude des quantités érodées à l'échelle du champ*. Montpellier : thèse de doctorat Université des Sciences et techniques du Languedoc-Montpellier 2. 213 p. + annexes
- MITASOVA H., HOFIERKA J., ZLOCHA M. AND IVERSON L.R. (1996) — Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of GIS*. **10(5)** 629-641
- MOORE I.D. AND WILSON P. (1992) — Length-slope Factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified Method of Estimation. *Journal of Soil and Water Conservation*. **47(5)** 423-428
- RENARD K. G. AND FREIMUND J. R. (1994) — Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *J. Hydrol.* **157** 287-306
- RENARD K.G., FOSTER G.R., WESSIES G. A. AND PORTER J. P. (1991) — Revised universal soil loss equation. *J Soil Water Conserv.* **46** 30-33
- ROOSE E. (1994) — Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédo. FAO, Rome*. **70** 420 p
- ROOSE E., SABIR M., ARABI M., MORSLI B. ET MAZOUR M. (2012) — Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb. *Physio-Géo*. **6** 43-69
- STRAUSS A.L. AND CORBIN J. (1994) — *Grounded Theory Methodology. Handbook of Qualitative Research*, a.Y.S.L. Norman K. Denzin (ed.), Sage Publications. 273-285
- UNITED NATIONS (UN) (2002) — *Global Environment Outlook GEO3*. [En ligne]. <http://www.unep.org/geo/ge03/french/index.htm>. Page consultée le 20 Janvier 2009
- VAN DER KNIFF J.M., JONES R.J.A. AND MONTANARELLA L. (2000) — *Soil erosion risk assessment in Europe*. EUR 19044 EN, European Soil Bureau, Space Application Institute, JRC, Ispra, Italy. 34
- WILLIAMS J. R. AND BERNDT H.D. (1972) — Sediment yield computed with universal equation. *J. Hydraul. Div., ASCE*. **98(HY12)** 2087-2098
- WILLIAMS J. R. AND BERNDT H. D. (1977) — Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* **20** 1100-1104
- WISCHMEIER W.H. AND SMITH D.D. (1958) — Rainfall energy and its relation to soil loss. *Trans. Am. Geophys. Union*. **39** 285-291
- WISCHMEIER W.H. (1960) — Cropping-management factor evaluations for a universal soil loss equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **24** 322-326
- WISCHMEIER W.H. AND SMITH D.D. (1965) — Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. *Agricultural Handbook, USDA: Washington, DC*. **282**
- WISCHMEIER W.H., JOHNSON C.B., AND CROSS B.V. (1971) — A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil and Water Conserv.* **26** 189-193
- WISCHMEIER W.H. AND SMITH D.D. (1978) — Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. *Agricultural handbook USDA, Washington*. **537**