



Cartographie Quantitative du Risque d'Érosion des Sols par Approche SIG/USLE au Niveau du Bassin Versant Kalaya (Maroc Nord Occidental)

Quantitative Mapping of Soil Erosion Risk Using GIS/USLE Approach at the Kalaya Watershed (North Western Morocco)

L. Khali Issa^{1*}, K. Ben Hamman Lech-Hab¹, A. Raissouni¹, A. El Arrim¹

¹ *Laboratoire d'Environnement, d'Océanologie et de Ressources Naturelles. Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, BP 416, Université Abdelmalek Essaâdi, Maroc.*

Received 21 Nov 2015, Revised 24 Jan 2016, Accepted 10 Feb 2016

**Corresponding author: E-mail: lamiae2608@gmail.com (L. Khali Issa); Phone: +212.662.676.562*

Résumé

L'érosion des sols par l'eau est devenue une question pertinente au niveau Mondial. Au Maroc, en particulier, l'érosion des sols connaît ces dernières décennies une extension spectaculaire et cause des effets, en site et hors site, de plus en plus inquiétants, suite aux conditions naturelles et l'impact humain surtout au nord. Il est donc impérativement primordial d'évaluer spatialement et quantitativement les effets de l'érosion des sols pour faire face au phénomène et pouvoir proposer les meilleures stratégies de lutte, de conservation et d'aménagement des espaces. Cette étude a pour but d'évaluer le risque d'érosion du sol par une approche SIG/USLE à l'échelle du bassin versant de Kalaya (Nord Ouest du Maroc). Les techniques de Système d'Information Géographique (SIG) ont été adoptées pour traiter les données obtenues à l'échelle du bassin versant, de résolution spatiale raisonnable, pour l'application du modèle RUSLE. Cette dernière est une multiplication des cinq facteurs d'érosion à savoir l'érosivité de la pluie, l'érodibilité du sol, l'inclinaison et la longueur de pente, le couvert végétal et les pratiques antiérosives. Chacun de ces facteurs a été exprimé sous forme de carte thématique. La carte de pertes en sols résultante, avec un taux d'érosion moyen de 34,74 t/ha/an montre une faible érosion (<12t/ha/an) qui couvre 18,6% de la superficie totale du bassin, et une érosion très élevée (>120t/ha/an) qui ne dépasse pas les 3,5% de la superficie. Les zones à taux d'érosion forte dépassant les 30 t/ha/an couvrent plus de 30% de superficie du bassin. L'analyse de la carte de risque d'érosion, en comparaison avec les cartes des différents facteurs de l'équation, montre une nette et importante influence du couvert végétal sur le comportement érosif des sols, suivi par le facteur topographique, surtout la pente.

Mots-clés : USLE, SIG, Érosion hydrique, bassin versant, Kalaya, environnement, Maroc.

Abstract

Soil erosion by water has become a relevant issue at global scale. In Morocco, particularly in recent decades, soil erosion knows a spectacular extension and causes effects, in- and off-site, increasingly worrying, as a result of the natural conditions and human impact especially in the Rif's chain. It is therefore absolutely important and crucial to assess, spatially and quantitatively, the effects of soil erosion in order to face the phenomenon and to propose the best strategies for conservation and land management. This study aims to evaluate the risk of soil erosion by a GIS/USLE approach in the Kalaya Watershed (Northwestern Morocco). Geographical Information System (GIS) Techniques have been adopted to treat data obtained at watershed scale, within reasonable spatial resolution, for the application of the empirical model. This latter is a multiplication of five factors namely the

rainfall erosivity, soil erodibility, slope steepness and slope length, vegetation cover and erosion control practices. Each of these factors has been expressed as a thematic map. The resultant map of soil losses, with an average erosion rate of 34.74 t/ha/year, shows a small erosion rate (< 12 t/ha/year), covering 18.6% of the total area of the basin, and very high erosion (> 120 t/ha/year) that does not exceed 3.5% of the basin area. Areas with erosion rate exceeding 30 t/ha/year cover more than 30% of area of the watershed. Analysis of the erosion risk map, in comparison with different thematic maps of the various factors of the equation, shows a clear and significant influence of the vegetation cover on the erosion behavior of soils, followed by the topographic factor, particularly the slope steepness.

Keywords: USLE, GIS, water erosion, Kalaya watershed, environment, Morocco

1. Introduction

Le sol est un élément essentiel à la production agricole qui est à son tour cruciale pour le développement des moyens de subsistance de la majorité de la population qui dépendent de cette ressource naturelle.

L'érosion des sols est un processus majeur de dégradation qui a été identifié comme une priorité essentielle de l'action dans les stratégies nationales de protection de l'environnement et du développement durable. De nombreux organismes nationaux et internationaux de protection de l'environnement ont déjà reconnu la dégradation des sols comme un problème grave, et ont lancé des programmes de surveillance et de gestion durable des terres.

L'érosion des sols est un processus naturel qui est sans doute largement responsable de la géomorphologie actuelle. Le terme érosion des sols ne peut être utilisé dans un contexte de menace ou de risque que s'il s'agit d'une érosion accélérée, au-delà des taux modérés, suite à des facteurs anthropiques, qui causera la perte d'une ou de plusieurs fonctions du sol.

L'utilisation intensive des terres agricoles se traduit souvent par la dégradation de la fertilité naturelle des sols et la diminution progressive de leur productivité. S'il s'agit ici d'un effet direct et important, ce n'est pas le seul ni le plus destructible, économiquement et écologiquement.

Le sol déplacé par l'érosion transporte des nutriments, des pesticides et autres produits chimiques nocifs vers les rivières et les barrages. Les sols érodés sont déposés dans les systèmes d'eau menant à la pollution et l'envasement qui causent la réduction drastique des volumes des réserves d'eau, suivi d'un éventuel envasement et assèchement des rivières, des réservoirs d'eau et des barrages. Par conséquent, la vie aquatique est finalement éliminée. L'érosion des sols peut également entraîner des glissements de terrain ou des coulées de boues dont les dégâts matériels et/ou humains sont souvent désastreux.

L'érosion hydrique du sol est un phénomène très répandu dans les pays du pourtour méditerranéen [1-10] et elle continue à prendre des proportions considérables du sol. Des études récentes sur la vulnérabilité aux changements climatiques dans les zones méditerranéennes [11, 12] ont montré une tendance à l'accroissement de l'aridité qui à son tour accélère l'érosion hydrique.

La détection des zones érodées, ainsi que l'évaluation des facteurs qui contrôlent l'érosion et leur caractéristiques, sont des tâches complexes mais pouvant être résolues avec l'intégration de plusieurs sources de données (données spatiales, mesures et enquêtes sur le terrain et images satellitaires) dans des systèmes de traitement géo-spatiale tels que les systèmes d'information géographique.

Au Maroc, plusieurs facteurs naturels et anthropiques favorisant le déclenchement et/ou le développement des processus d'érosion : un écosystème fragile suite à l'agressivité climatique et l'irrégularité des précipitations, une topographie collinaire et montagneuse (25 % du territoire national) et des substrats géologiques fragiles surtout au niveau de la chaîne Rifaine au Nord. Les montagnes du Rif, qui ne couvrent que 6% de la surface marocaine, fournissent à eux seuls plus de 60% de sédiments mobilisés chaque année dans tout le pays [13].

L'impact humain se manifeste dans la destruction d'un couvert végétal naturel, déjà faible, par le surpâturage et la succession de plusieurs années de sécheresse, ainsi que l'adoption des techniques culturales inadaptées. Une étude effectuée par le MADREF [14] a révélé la destruction de 245.000 hectares du manteau végétal entre 1985 et 1995. Les études réalisées au niveau du Maroc ont révélé des effets néfastes aux phénomènes d'érosion perçus tant à l'amont (sol) qu'à l'aval (ressources en eaux, littoral et infrastructures). Les chiffres obtenus sur la

dégradation spécifique varient de 500 T/km²/an au niveau du Moyen Atlas, pouvant atteindre 5000 T/km² au niveau du Rif [15-18]. Ceci se traduit par une érosion de 15 millions ha de terres agricoles et une diminution progressive et inquiétante de la fertilité des sols, et par conséquent leur productivité.

Les conséquences en aval se manifestent d'abord par la dégradation de la qualité des ressources en eaux et l'augmentation de leur turbidité. Cette dernière, se traduit par un envasement des retenues de barrages de l'ordre de 75 millions de m³/an [19, 20], soit une diminution de 5% de leur capacité de stockage, ou encore une perte d'un volume d'eau permettant l'irrigation de 10.000 ha/an [21-23].

Enfin, nul ne peut négliger également l'impact de l'érosion sur l'écologie par la destruction des milieux naturels et sur la socio économie humaine, d'abord par l'accroissement de la pauvreté et l'exode rurale et ensuite par l'augmentation des frais de conservation ou de lutte contre ses effets.

Pour répondre à ces problématiques environnementales, intéressant aussi bien les chercheurs et les ingénieurs que les gestionnaires du territoire, des cartes de sols sont souvent produites afin de servir de support pour la compréhension des phénomènes. Toutefois, la problématique concerne un objet caractérisé par des variables spécifiques. L'érosion des sols étant un processus d'interaction complexe de nombreux facteurs, ces derniers doivent être abordés efficacement.

Parce que l'érosion du sol est particulièrement difficile à mesurer directement en temps réel, surtout à l'échelle il est nécessaire d'utiliser des modèles qui permettent de prédire ou de modéliser les paramètres de causalité et par suite les pertes qui existent dans les zones où aucune mesure n'est réalisable ou n'a pas été effectuée.

Plusieurs modèles d'érosion ont été élaborés par les chercheurs, dont certains sont à base empirique tel que l'USLE (Universel Soil Loss Equation) de Wischmeier et Smith [24] et ses versions modifiées, d'autres à base physique tels que WEPP (Water Erosion Prediction Project) de Foster et Lane [25], ANSWERS (Areal Non point Source Watershed Environment) de Beasley et al., [26], et d'autres semi empiriques tel que SWAT Soil and Water Assessment Tools) d'Arnold et al., [27].

Le modèle empirique USLE est basé sur des lois mathématiques appliquées en utilisant des facteurs calculés et déterminés à l'aide des observations sur terrain et des analyses aux laboratoires. Il reste le modèle mathématique le plus couramment employé pour prédire les pertes dues à l'érosion de surface. Il prédit le taux moyen annuel de l'érosion à long terme sur une parcelle de terrain sur la base des facteurs responsables du phénomène : la pluviométrie, le type de sol, la topographie, le système de culture et les pratiques antiérosives.

L'équation USLE a été produite d'abord pour des systèmes de culture choisis, mais est également applicable à des conditions non agricoles. Récemment, elle a été utilisée avec succès au niveau régional, national et à l'échelle des bassins versants [28-30]. L'équation compare les pertes d'une unité donnée de sol pour "la perte de sol tolérable" afin de déterminer les systèmes de gestion et de cultures alternatives et de concevoir de manière adéquate des mesures de conservation pour l'échelle projetée.

Comme tout modèle, l'USLE présente certaines limites d'application. Selon Roose [31], l'USLE ne s'applique que pour des données moyennes sur 20 ans et ne prend pas en considération les phénomènes de transport et de sédimentation [24].

Toutefois, l'extension de l'utilisation de l'USLE / RUSLE pour étudier l'érosion à de plus grandes échelles que celle de la parcelle a nécessité l'utilisation des système d'information géographique et de la Télédétection. Ils ont donné lieu à de grands progrès dans la recherche de l'érosion des sols et la conservation des sols et de l'eau depuis la fin des années 1980. Ainsi, la télédétection et les SIG sont devenus d'une utilité énorme pour assembler, traiter, analyser et superposer les informations spatiales qui décrivent l'environnement d'un bassin versant, puisque la plupart des facteurs peuvent être cartographiés. Cela a permis de déterminer les valeurs de chaque facteur de l'érosion par unité spatiale déterminée qui est le pixel [32].

Ces techniques permettent également d'évaluer l'érosion du sol et sa répartition spatiale à un coût raisonnable, un temps réduit et une meilleure précision sur de grandes superficies [33-35].

Dans l'étude, le SIG a été intégré facilement et avec succès avec l'USLE pour identifier les emplacements discrets avec des limites spatiales relativement précises qui ont un potentiel élevé d'érosion en nappe avec les zones où les pratiques antiérosives pourrait être appropriées pour éviter l'érosion. En outre, l'approche SIG / USLE est fortement recommandé comme outil de modélisation rapide et peu coûteux pour estimer l'érosion en nappe dans les bassins versants où les données sont publiquement disponibles. Si les SIG ont généralement

facilité la dérivation du facteur topographique à partir des données MNT, la spatialisation des différents facteurs et le calcul des pertes de sol [35-37], la télédétection a énormément aidé à développer les cartes des facteurs du couvert végétal et d'occupation du sol [34, 35, 38].

Avec ce couplage entre les modèles et ces techniques modernes, on découvre progressivement l'intérêt de la spatialisation des méthodes de calcul des pertes de sol, de la cartographie pour représenter les résultats sur de grandes étendues et de la création de scénarios d'interventions humaines [39].

L'objectif de cette étude de cas d'application de la technologie SIG-USLE était d'évaluer quantitativement les risques d'érosion au niveau d'un bassin versant composé de différents types d'utilisation des terres et d'unités topographiques dans une partie de la chaîne rifaine marocaine, le bassin versant de Kalaya (Rif Nord occidental, Maroc). Il s'agit d'une approche systémique basée sur une méthode multicritères permettant de dresser des cartes indicielles numérisées. Ces cartes sont basées sur la relation entre les différents paramètres ayant une influence sur le phénomène d'érosion (lithologie, pluviométrie, topographie, couvert végétal...) et permettent d'exprimer le niveau de vulnérabilité des sols à l'érosion. Le résultat est un document qui constitue un outil d'aide à la décision en termes de gestion et de protection des ressources naturelles.

Dans ce contexte, ce travail vise la modélisation de l'aléa d'érosion en élaborant une carte de vulnérabilité du bassin versant Kalaya, en tenant compte des facteurs physico-climatiques responsables de l'érosion hydrique. L'application, réalisée en utilisant l'équation USLE modifiée [40] et adaptée selon les conditions marocaines [41, 42], en cartographiant les différents facteurs qui contribuent dans le processus de l'érosion sous SIG et leur superposition aboutit à une carte quantitative de l'aléa d'érosion des sols.

Il est prévu que cette méthodologie d'intégration USLE à la fois avec les SIG et la télédétection devrait offrir un outil utile pour évaluer les mesures de risque d'érosion et de proposer les plans de conservation à l'échelle du bassin versant.

2. Site d'étude

Situé dans la partie nord occidentale du grand bassin versant de l'oued Tahaddart, le bassin versant de Kalaya, d'une superficie de 3837 ha, est localisé à l'extrême Nord Ouest du Maroc, dans la partie occidentale de la péninsule tingitane, entre 35° 39' 29,70267" et 35° 43' 37,53037" de latitude Nord et entre 5° 37' 31,93010" et 5° 45' 24,78917" de longitude Ouest. Il appartient administrativement à 4 communes de la province de Fahs Anjra (communes de Jouamaâ, Melloussa, Bahraouyine et d'El Aouama) et une commune de la province de Tanger (commune d'Azzinate) (Fig. 1).

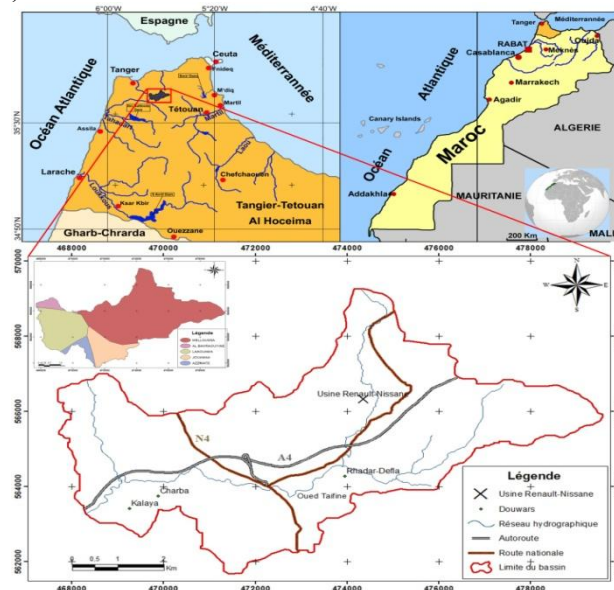


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant Kalaya.

Le climat du secteur d'étude, de type méditerranéen subhumide à variante tempérée, avec un hiver humide et un été sec, est marqué par une forte agressivité climatique se manifestant par des précipitations concentrées sous forme d'averses.

La topographie du bassin est relativement accidentée, caractérisée par des pentes en général moyennes à fortes, à l'exception des zones de plaines et bordures des cours d'eaux principaux (Fig. 2 et 3).

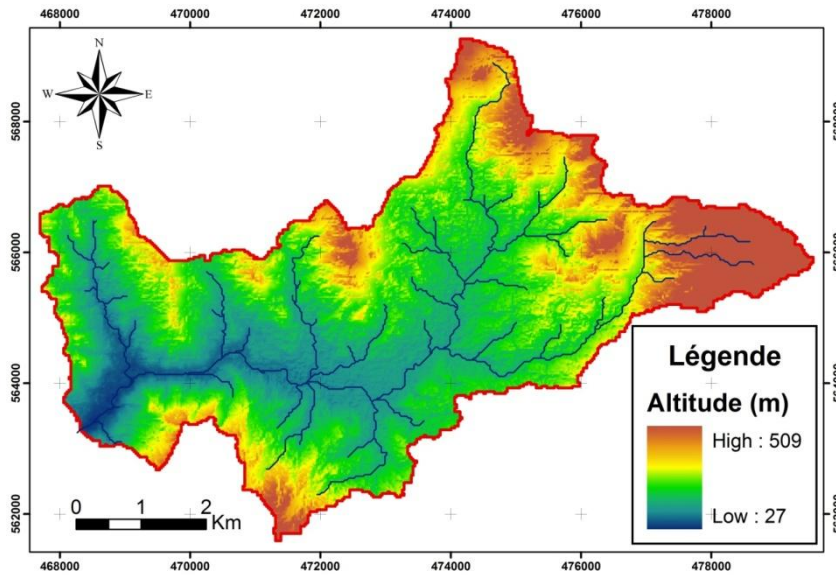


Figure 2 : Carte des altitudes du bassin versant Kalaya.

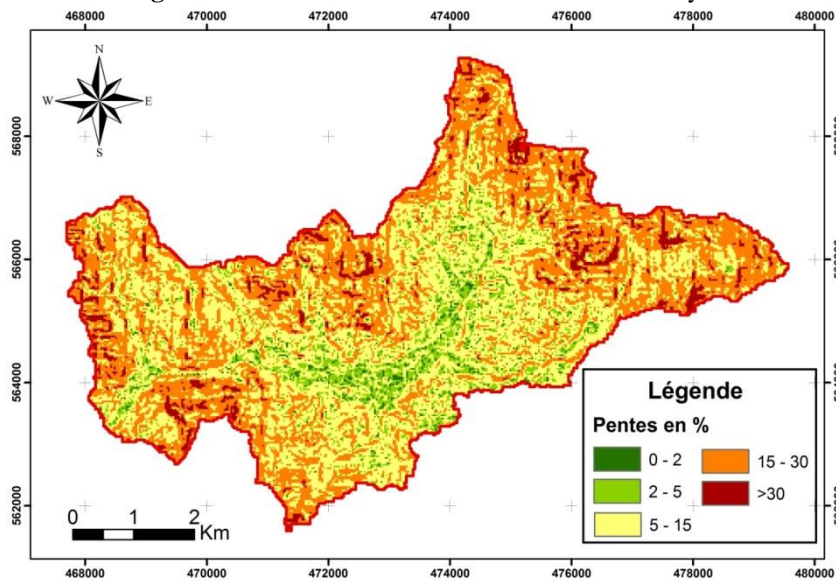
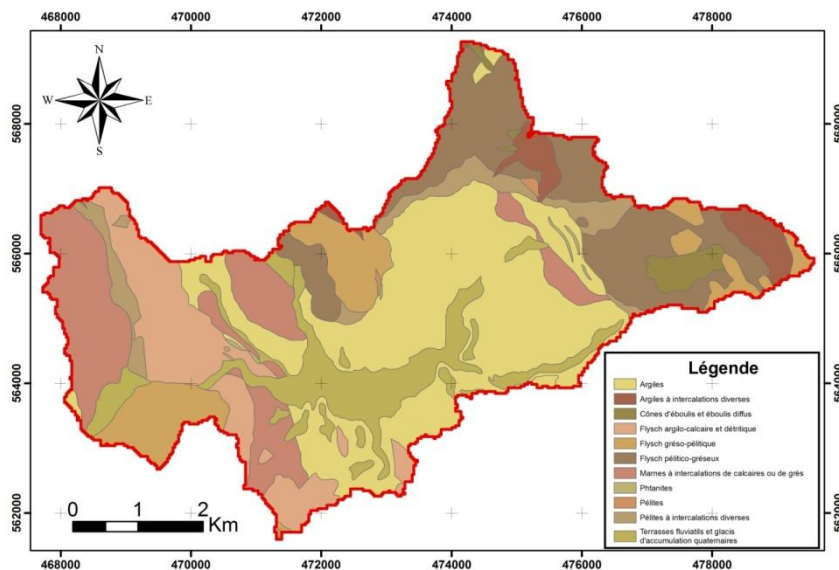
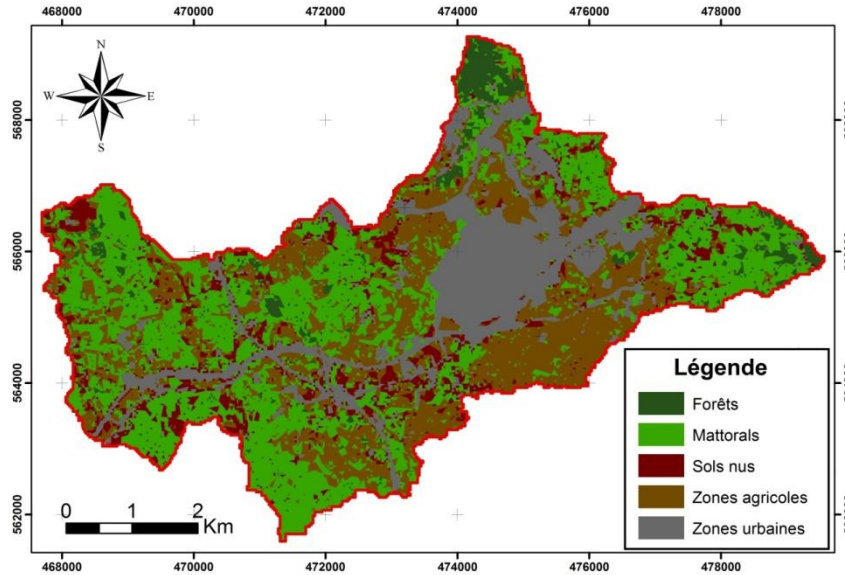


Figure 3 : Carte des classes de pente du bassin versant Kalaya.

La couverture végétale dans cette région du pays est très diversifiée et prend différentes formes globalement réparties, en forêts, matorrals, zones agricoles, et terres nues ou à végétation fortement dégradée (Fig. 4). Cependant, les zones à végétation naturelle a connu une importante régression ces dernières décennies en faveur des terres agricoles et l'expansion des activités humaines.

De point de vue géologique, le bassin appartient à la chaîne rifaine et se caractérise par une diversité lithologique vue l'affleurement de plusieurs unités. Vers l'ouest, se développent les formations des nappes de Bni Ider, représentées essentiellement par les flysch argilo calcaires et détritiques. La partie Est du bassin est occupée généralement par des

formations pélitico-gréseuses appartenant surtout aux flyschs de Melloussa. Le centre est présenté dans sa totalité par les formations essentiellement argileuses de l'unité de Tanger externe. Les formations post nappes (terrasses fluviales et glaciaires d'accumulation quaternaires) se présentent au niveau des plaines alluviales et les bordures des cours principaux (Fig. 5).



En ce qui concerne l'hydrologie, les eaux superficielles du bassin sont issues du cours d'eau principal représenté par Oued Taifine, dans lequel débouchent deux petits affluents qui sont l'Oued Tsouati au Nord Est et l'Oued Ksibar au Nord Ouest. Le bassin en sa totalité fait partie du bassin versant de l'oued M'Harhar, un affluent majeur de l'oued Tahaddart qui débouche en Atlantique au Sud de la ville de Tanger (Fig. 6).

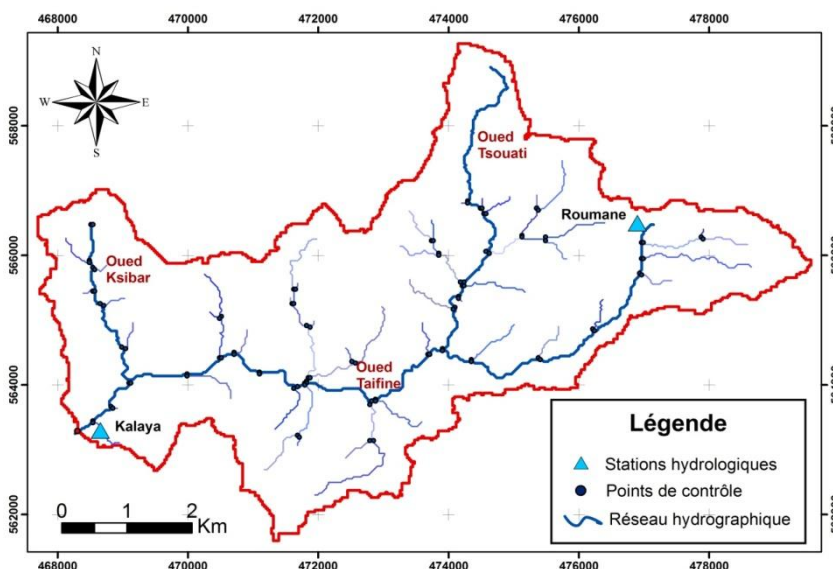


Figure 6 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant Kalaya.

3. Méthodologie

L'érodibilité des sols est une estimation de la capacité du sol à résister à l'érosion sur la base des caractéristiques physiques de chaque sol. Généralement, les sols avec des taux d'infiltration plus rapides, des niveaux plus élevés de la matière organique et une structure développée ont une plus grande résistance à l'érosion [43]. Cependant, un sol avec un facteur d'érodabilité relativement fort peut montrer des signes d'érosion grave, ou encore un sol pourrait être très sensible à l'érosion et souffrir de faible érosion [44]. Ceci est parce que l'érosion du sol est fonction de nombreux facteurs tel que indiqué dans l'équation universelle des pertes en sol (USLE) (Fig.7).

Dans le cadre de ce travail, la cartographie de l'érosion sera effectuée par l'application du modèle empirique USLE, établie par Wischmeier [24], puis modifiée et adaptée selon les conditions marocaines par Merzouk et Arnoldus [41, 42].

Toutefois, le modèle RUSLE est sélectionnée parmi les modèles les plus applicables grâce à sa structure très simple et l'entrée économe des données en relation avec les données disponibles et l'échelle de l'investigation. L'équation a été intégrée sous un système d'information géographique afin de permettre une modélisation et une cartographie exhaustive du phénomène érosif.

Comme précédemment indiqué en introduction, la méthodologie du travail consiste en l'intégration et la représentation des informations cartographiques et descriptives des différents facteurs et paramètres de l'érosion dans une plate forme des systèmes d'information géographiques. Une base de données à références spatiales contenant toutes les informations quantitatives concernant la zone d'étude a été créée (Fig. 7).

Le modèle quantitatif d'érosion à base empirique permet ainsi de fournir une estimation des pertes en sol, en T/ha/an, par unité de surface, qui correspond dans le cas d'utilisation de superposition cartographique sous SIG, au pixel de base du MNT.

Le choix de ce modèle dépend de la variabilité des conditions du milieu, de la surface de la zone, de la raideur des pentes, des limitations matérielles et de la disponibilité des données surtout climatiques [39].

3.1 Evaluation des facteurs de l'USLE

3.1.1 Facteur d'érosivité de la pluie R

L'érosivité de la pluie est définie comme la capacité potentielle de pluie à causer de l'érosion et donné comme le produit (EI30) de l'énergie totale de pluie (E) et l'intensité maximale pendant 30 min (I30) [24, 45]. Cependant, suite au manque de ces données dans plusieurs régions au Monde, y compris le Maroc, Arnoldus [42] a proposé une formule modifiée (1) selon les conditions marocaines qui n'implique que les précipitations moyennes mensuelles et annuelles :

$$R = \Sigma_{12}^1 (MR_i) / AR \quad (1)$$

Où : MR : Précipitations moyennes mensuelles ;
 AR : Précipitations moyennes annuelles.

Ainsi, des données de précipitations de 24 stations climatologiques réparties dans la région et étalées sur une période de 30 ans ont été utilisées dans le cadre de cette étude.

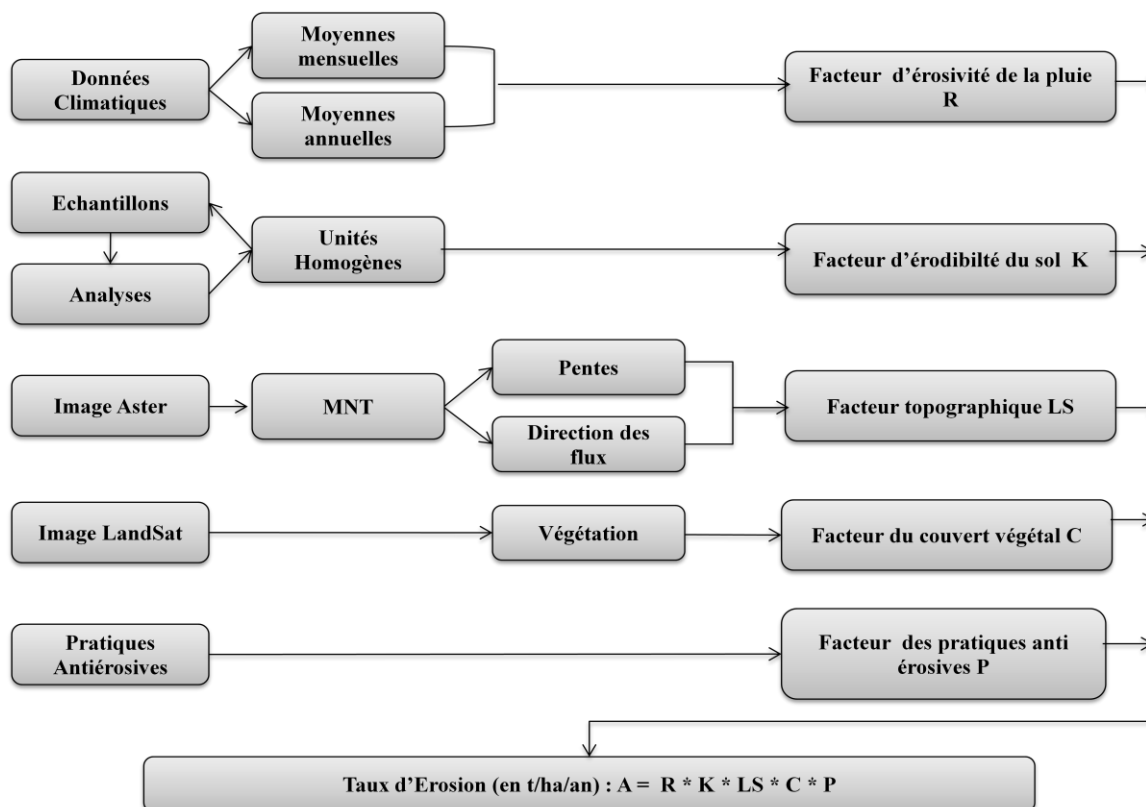


Figure 7 : Organigramme méthodologique du modèle USLE appliqué.

Le facteur R a été calculé séparément pour chaque station à part, puis on a interpolé les résultats par la méthode d'interpolation IDW, pour avoir la carte du facteur d'érosivité du bassin versant Kalaya.

Le choix de cette méthode parmi d'autres revient à son adaptation aux variations de terrains, contrairement aux autres méthodes qui sont généralement plus sensibles aux variations. La méthode IDW est une technique d'interpolation déterministe locale qui calcule la valeur d'un point en effectuant la moyenne des valeurs des points situés dans le voisinage pondérées par l'inverse de la distance au point calculé: plus les points sont proches, plus la pondération affectée est forte.

3.1.2 Facteur d'érodibilité du sol K

L'érodibilité des sols est un indicateur de la facilité avec laquelle les particules de sol se détachent. Il est fonction de la structure du sol, de sa texture de sa granulométrie, de sa quantité de matière organique et de sa perméabilité.

Le facteur d'érodibilité du sol K a été calculé pour les conditions marocaines par Merzouk [41] en utilisant une équation à trois paramètres (2) :

$$K = 311.63 - 4.48 * (SG\% + S\%) + 613.4 * EC + 6.45 \quad (2)$$

Avec SG% : pourcentage du sable grossier ; S% : pourcentage du sable total et EC : conductivité électrique.

Pour déterminer les valeurs du facteur K, on a eu recours aux résultats des analyses granulométriques, de la matière organique et de la conductivité électrique, qui ont été effectuées sur une quarantaine d'échantillons. Les sites d'échantillonnage et d'observation ont été choisis sur la base de la carte des unités homogènes, élaborée à partir de la superposition de la carte géologique, la carte du couvert végétal et la carte physiographique. Cette dernière a été obtenue par l'intersection de la carte de classes de pentes avec celle des altitudes selon la méthode de pédo-paysage [46]. A chaque unité homogène est attribuée la valeur de K qui lui correspond.

3.1.3 Facteur topographique LS

Le critère de pente est utilisé pour mettre en évidence la capacité d'un ruissellement à détacher et transporter des particules de sol : plus la pente est importante, plus le ruissellement érodera le sol.

Fauk [47] et Fournier [48] ont affirmé qu'il suffit une action pluviale pour déclencher le phénomène de l'érosion, puisque cette dernière apparaît sur des pentes très faible, de l'ordre de 2%. Cependant, toutes les études qui ont suivi montrent qu'il existe une forte relation entre le degré de pente et sa longueur et l'intensité de ruissellement et par suite, sa capacité de détacher et transporter des particules. Plus la pente est forte et plus elle est longue, plus l'érosion est plus intense.

Le paramètre de topographie, évalué à partir de deux critères : l'inclinaison de la pente et sa longueur, est calculé à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 28 mètres.

Les logiciels informatisés tels que ArcGis ont amplement facilité les calculs de certains paramètres tels que le cas du facteur topographique qui a été calculé à partir du MNT, de la carte des classes de pentes et la carte des flux selon l'expression suivante (3) [49] :

$$LS=[(\text{Flow.Acc}*\text{Résolution})/22,1]^{0,4}*[(\sin(\text{pente})*0,01745)/0,0896]^{1,4}*1,4 \quad (3)$$

3.1.4 Facteur du couvert végétal C

Dans l'équation universelle de pertes en sol, l'action de la végétation traduite par le facteur C constitue le paramètre le plus déterminant et le plus dynamique pour les bassins versants marocains [50].

Les différentes classes de végétation et/ou occupation du sol ont été cartographiées à partir de la classification supervisée d'une image satellitaire multi-spectrale LANDSAT TM5. Le traitement de l'imagerie sur Logiciel Envi a subi d'abord des prétraitements à savoir les corrections géométriques et radiométriques, la combinaison et le masquage. Une classification supervisée de type maximum de vraisemblance a ensuite été réalisée sur l'image en créant des zones d'Intérêt ROI. Une étape de validation de résultat par la matrice de confusion a permis enfin d'obtenir une carte du couvert végétal à cinq classes. Une visualisation de l'imagerie sur Google Earth a été ensuite effectuée, suivie d'une visite sur terrain pour une meilleure description des différentes unités cartographiques et validation de la classification de l'image.

Une valeur de C a été par la suite attribuée à chaque classe de végétation, selon la littérature [51-53] avant de rasteriser la carte de végétation.

3.1.5 Facteur des pratiques antiérosives P

Le facteur P décrit les actions humaines conservatrices des sols qui se pratiquent pour contrer l'érosion hydrique. Il varie généralement de 0 à 1, selon la pratique adoptée et selon la pente.

Cependant, vu le fait qu'il n'y a pas de pratiques antiérosives adoptées dans tout le secteur d'étude, ce facteur a été considéré comme valeur unitaire égale à 1.

3.2 Carte de risque d'érosion

La superposition des cinq paramètres de l'USLE sous SIG permet l'obtention de la carte de risque d'érosion, informant sur le potentiel d'érosion en t/ha/an par unité spatiale (pixel du MNT).

4. Résultats

4.1 Cartographie des facteurs de l'USLE

4.1.1 Facteur R

La carte du facteur d'érosivité de la pluie R (Fig. 8), avec des valeurs variant entre 94,73 et 95,27, montre une augmentation horizontale de l'Est vers l'Ouest, indiquant ainsi l'effet de la continentalité sur les précipitations.

4.1.2 Facteur K

La figure 9 présente la répartition spatiale des différentes classes du facteur K dans le bassin versant. Les valeurs de l'indice d'érodibilité sont comprises entre 0 et 0,724 et sont réparties sur la zone d'étude selon les différentes unités homogènes. Le bassin versant présente généralement une érodibilité moyenne (0,453 - 0,596) couvrant presque la moitié (47 %) de la superficie totale du bassin, suivie d'une érodibilité faible (0 - 0,453) avec 39% et celle forte (0,696 - 0,724) avec 14% de la surface (Tableau 1).

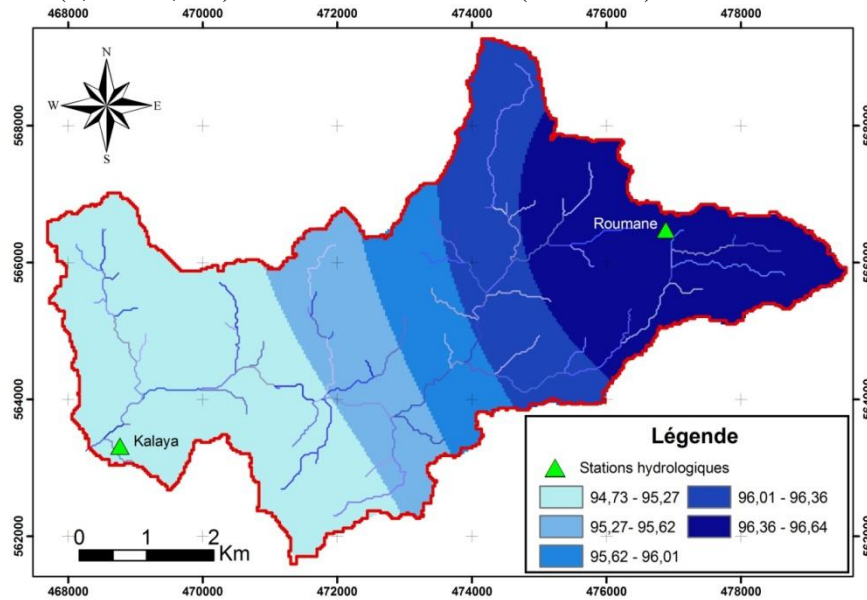


Figure 8 : Carte du facteur d'érosivité de pluie R.

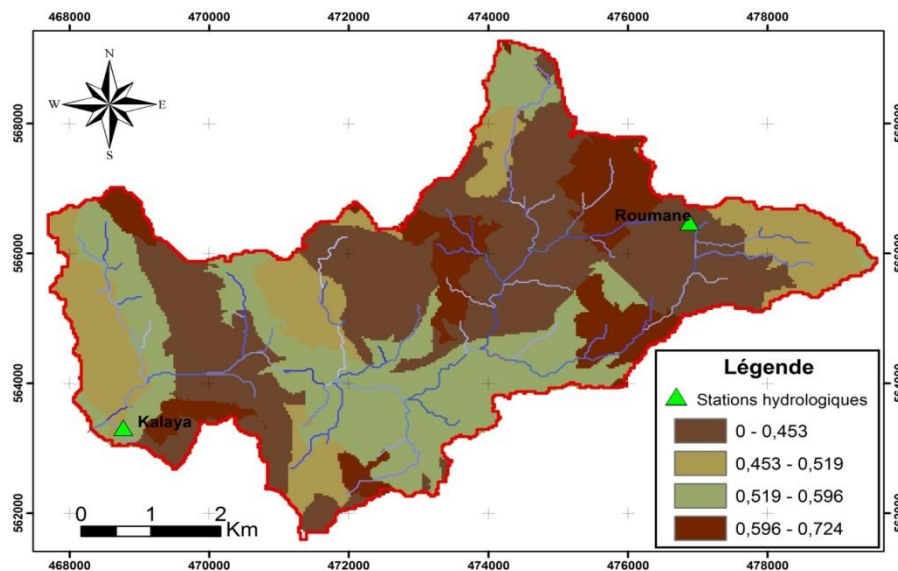


Figure 9 : Carte du facteur d'érodibilité du sol K.

Tableau 1 : Répartition des classes du facteur d'érodibilité K dans le bassin versant Kalaya.

| Classes du facteur K | Superficie (ha) | % Superficie |
|----------------------|-----------------|--------------|
| 0 - 0,453 | 1510,61 | 39,4 |
| 0,453 - 0,519 | 713,39 | 18,6 |
| 0,519 - 0,596 | 1080,26 | 28,2 |
| 0,596 - 0,724 | 532,74 | 13,9 |
| Total | 3837 | 100% |

4.1.3 Facteur LS

Le facteur topographique LS est classé selon des valeurs variant entre 0 à 331. La lecture de la carte (Fig. 10) reflète généralement la topographie du terrain. Les valeurs minimales (0-2) couvrent 16% de la superficie totale du bassin et se présentent généralement au centre aux alentours du réseau hydrographique principal. Les valeurs comprises entre 2 et 20 sont réparties dans tout le reste du bassin en couvrant la plus grande partie (80%). Les 4 % restants de la superficie du bassin correspondent aux valeurs supérieures à 20, dispersées dans toute la zone, coïncidant généralement avec des zones à hautes altitudes et pentes élevées (Tableau 2).

Tableau 2 : Répartition des classes du facteur LS dans le bassin versant Kalaya.

| Classes du facteur LS | Superficie (ha) | % Superficie |
|-----------------------|-----------------|--------------|
| 0 - 2 | 597,61 | 15,6 |
| 2 - 5 | 1263,30 | 32,9 |
| 5 - 10 | 1184,10 | 30,9 |
| 10 - 20 | 599,64 | 15,6 |
| 20 - 35 | 151,08 | 3,9 |
| 35 - 55 | 31,24 | 0,8 |
| 55 - 80 | 6,34 | 0,2 |
| 80 - 331 | 3,94 | 0,1 |
| Total | 3837 | 100% |

4.1.4 Facteur C

La carte du facteur C, présentée par la figure 11, montre des valeurs variant entre 0 et 0,14. Le tableau 3 montre les valeurs de C correspondantes aux différents types d'occupation du sol dans le bassin de Kalaya.

Tableau 3 : Valeurs du facteur C attribué pour chaque classe d'occupation du sol.

| Classe d'occupation du sol | Valeur de C attribuée |
|--|-----------------------|
| Forêts | 0,001 |
| Matorral | 0,05 |
| Zones agricoles | 0,1 |
| Terres à végétation fortement dégradée | 0,14 |
| Zones urbaine | 0 |

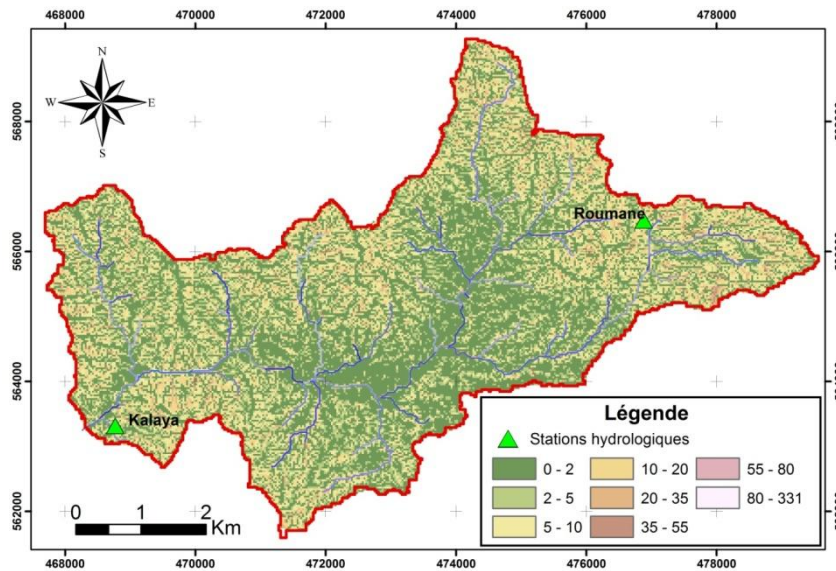


Figure 10 : Carte du facteur topographique LS.

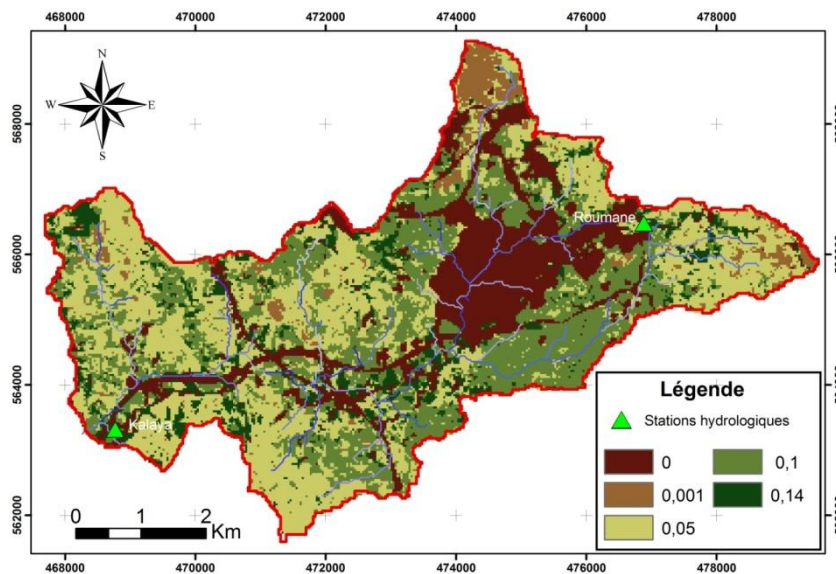


Figure 11 : Carte du facteur du couvert végétal C.

4.2 Carte de risque potentiel d'érosion

La superposition multiplicative des quatre couches thématiques représentant les facteurs de l'érosion sous format Raster, a permis l'obtention de la carte d'aléa d'érosion, exprimant la valeur d'érosion potentielle en t/ha/an par unité spatiale. La carte obtenue (Fig. 12) montre des taux d'érosion variant entre 0 et plus de 120 t/ha/an répartis sur l'ensemble de l'aire d'étude, avec une moyenne de l'ordre de 34,74 t/ha/an. Le tableau 4 représente la répartition des classes d'érosion au niveau de tout le bassin.

Selon Wall et al [54], une érosion très faible à faible varie entre 0 et 11 t/ha/an, une érosion modérée entre 11 et 22 t/ha/an, alors qu'au-delà de 22, l'érosion est forte (22 à 33 t/ha/an) à très forte (> 33t/ha/an). Dans ce travail, nous avons classé la carte des pertes de sol en 10 classes pour une meilleure visualisation spatiale des pertes en sols, pourtant, la discussion des résultats tiendra en compte les seuils suivants : érosion très faible (0-6 t/ha/an), faible (6-12 t/ha/an), moyenne (12-20 t/ha/an), forte (20-60 t/ha/an) et très forte (>60t/ha/an).

Tableau 4 : Répartition des classes de perte en sol dans le bassin versant Kalaya.

| Classes des pertes en sols | Superficie (en ha) | Superficie (en %) |
|----------------------------|--------------------|-------------------|
| No Data | 799,14 | 20,8 |
| 0 - 3 | 174,00 | 4,5 |
| 3 - 6 | 141,04 | 3,7 |
| 6-12 | 400,63 | 10,4 |
| 12-20 | 268,39 | 7,0 |
| 20-30 | 878,23 | 22,9 |
| 30-45 | 364,51 | 9,5 |
| 45-60 | 325,90 | 8,5 |
| 60-90 | 240,53 | 6,3 |
| 90-120 | 109,89 | 2,9 |
| > 120 | 134,74 | 3,5 |
| Total | 3837 | 100% |

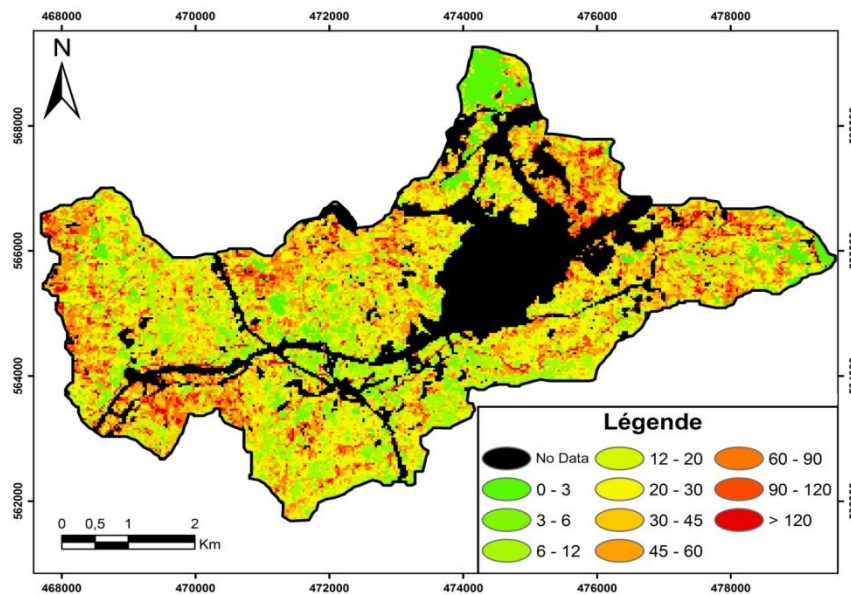


Figure 12: Carte d'aléa d'érosion hydrique du bassin versant Kalaya.

La carte d'érosion montre que seul 18,6% de la superficie du bassin présente des taux d'érosion inférieures ou égales au seuil de tolérance maximale, sur les sols profonds, qui varie généralement de 1 à 12 t/ha/an en fonction du climat, du type de roche et de l'épaisseur des sols [50]. 7% de la superficie du bassin représente une érosion d'ordre moyen, alors que les classes d'érosion fortes et très fortes représentent respectivement 39,4% et 12,6%.

5. Discussion

La lecture préliminaire de la carte des classes d'érosion montre une répartition spatiale « éparpillée » des classes d'érosion, ce qui montre clairement l'impact cumulé des différents facteurs responsables de l'érosion. La description et la discussion de carte des classes d'érosion nécessite obligatoirement une lecture parallèle des cartes des paramètres physiques (pente et altitudes) et naturels (lithologie et végétation) de tout le secteur.

Notre connaissance et les travaux antérieurs que nous avons menés dans toute la région, ainsi que les études qui ont intéressé la modélisation de l'érosion hydrique, surtout dans les pays méditerranéens, ont montré la grande influence du couvert végétal et de l'occupation des sols sur le phénomène, ce qui nous incite à faire une première comparaison avec la carte d'occupation des sols.

Dans l'extrême Nord du bassin, on rencontre une concentration de la classe d'érosion très faible (< 3 t/ha/an), qui coïncide avec une zone à forêt dense. D'autres petites zones se répartissent dans la partie orientale et nord occidentale du bassin, coïncidant également avec des zones arbustives et/ou de forêts.

Les terrains couverts par une végétation de type matorral ou sclérophylle, devront généralement présenter des taux d'érosion faibles (3 à 6 t/ha/an), suite au pouvoir de la végétation à protéger les sols contre l'érosion. Cependant, la répartition spatiale de ces classes ne coïncide pas parfaitement avec les zones à matorral. A titre d'exemple, presque toute la partie orientale, la partie méridionale et la partie occidentale du bassin sont recouvertes, par du matorral et de végétation sclérophylle alors que la carte d'aléa montre des classes d'érosion faibles à très fortes dispersées.

Par recours aux autres cartes thématiques, on observe dans ces régions des valeurs du facteur topographique élevées traduits par des altitudes et pentes élevées.

Les taux d'érosion mesurés sur les terres nues ou à végétation fortement dégradée et agricoles étaient liés à la topographie (degré et la longueur de la pente), alors que ce ne fut pas le cas pour les parcelles avec une couverture permanente des sols. Nous attribuons cela à une différence fondamentale dans la production d'eaux de ruissellement et le transfert des sédiments en fonction des types de couverture terrestre.

L'analyse de la carte des classes de pentes dans le bassin versant montre une dominance des pentes moyennes à fortes dans ces zones ce qui nous permet d'attribuer ces taux élevés d'érosion à l'augmentation de l'effet de la pente. L'impact du facteur topographique apparaît clairement dans les zones où coïncide une pente moyenne à forte sur des terres nues ou des terres agricoles. Au niveau de ces deux types d'occupation du sol, les taux d'érosion augmentent sensiblement avec la pente. Une étude menée par Roose [28], a montré qu'une augmentation de 0,25% au niveau de la pente peut engendrer une augmentation de 11% au niveau du taux de ruissellement moyen annuel et une augmentation de 3,6 t/ha/an en pertes moyennes en sols. Il existe alors une relation positive entre le gradient de pente et les taux d'érosion sur les terres agricoles, à végétation dégradées et nues. Pourtant, la pente n'est pas le seul facteur responsable. En se référant à la carte lithologique du secteur, on rencontre des formations friables de type argiles, marnes et flysch ce qui constitue à coté de la pente, un facteur intensifiant du phénomène d'érosion.

La pierrosité du sol est connue également pour avoir une grande influence sur les taux d'érosion [55]. La couverture du sol par des fragments pierreux de roche est connue pour être liée positivement au gradient de pente, réduisant ainsi les taux d'érosion. Les fragments de pierres jouent le rôle de freins contre le ruissellement sur les pentes ce qui minimise son effet érosif, conduisant ainsi à une situation d'équilibre des taux d'érosion, relativement faible et spatialement homogènes [56]. La présence d'une fraction importante de fragments de roche réduit l'érosion de 30% par rapport à un sol non pierreux dans la même position géographique [55, 57]. Des données détaillées sur la pierrosité du sol n'existent pas pour le Maroc. Cependant, les missions de cartographie et de validation nous ont fournis des informations sur la distribution spatiale des sols avec une importante teneur en fragments de roche. Dans le bassin de Kalaya, les formations de type flysch, les plus dominants dans toute la région, sont connues par leur couverture pédologique riche en fragments de roches, suite à la nature friable des alternances gréso-pélimitiques. Pour cette raison, même avec l'abondance de ce type de formations sur l'ensemble du bassin, coïncidant parfois avec des pentes relativement fortes occupées par des activités agricoles, les taux d'érosion semblent être un peu modérés.

Les taux d'érosion hydrique dans le bassin versant de Kalaya restent en général inférieurs ou proches de celles estimées par les travaux effectués sur divers bassins versants à l'échelle du Rif, du Maroc, ou encore à l'échelle du pourtour méditerranéen.

A titre de comparaison, des études réalisées à l'échelle du Rif ont révélé des taux d'érosion plus élevées, par exemple 65 t/ha/an a été estimé au niveau du bassin versant de Nakhla [59], 61 t/ha/an au niveau du bassin versant de l'oued Telata dans le Prérif oriental [56], 55,35 t/ha/an au niveau de l'oued Boussouab [60]. D'autres

études ont donné des résultats proches comme au niveau du bassin versant de Khmiss avec 37 t/ha/an [61] et celui du barrage Ibn Battouta avec 39,6 t/ha/an [62].

Au sud de l'Espagne, une étude de Garcia Ruiz et al, [63] a montré que les taux d'érosion varient sensiblement en fonction du type de l'occupation du sol, de 22 t/ha/an sur les terres en vignobles, à 87 t/ha/an sur les champs à terrasses abandonnés, jusqu'à 115 t/ha/an sur des champs de céréales. Cela peut être une raison pour laquelle les taux d'érosion sur les terres agricoles et nues au niveau du bassin Kalaya changent parfois sur des terrains de même lithologie et des conditions de topographie similaires.

Conclusions

Le problème de l'érosion des sols abordé au travers de l'équation de Wischmeier & Smith [24] s'applique aisément au Systèmes d'Information Géographique par la comptabilité entre l'USLE et l'algèbre de carte. Le SIG permet de gérer d'une façon rationnelle, une multitude de données, à référence spatiale, relatives aux différents facteurs de la dégradation des sols, ce qui nous a permis de conclure que ces facteurs principaux qui influencent l'érosion hydrique.

L'application du modèle USLE donne des résultats relativement très fiables qui peuvent apporter une aide précieuse, à coûts très bas, aux décideurs et aménageurs du territoire dans le but de simuler des scénarios d'évolution et par suite cibler les zones prioritaires qui nécessitent des actions de conservation et de lutte contre l'érosion.

Les résultats obtenus, sous forme de carte de risque d'érosion, montrent que le bassin de Kalaya présente des pertes en sols qui varient de 0 à plus de 120 t/ha/an avec une perte moyenne annuelle relativement forte de 34,74 t/ha/an. Plus de 30 % de la superficie totale du bassin présente des valeurs supérieures à 30 t/ha/an. Cette perte résulte de l'interaction des plusieurs facteurs qui se conjuguent aussi pour accélérer l'érosion. En plus de la prédominance des formations lithologiques à érodabilité élevée (flyschs, marnes, terrasses fluviales, etc.), le bassin est caractérisé par une couverture végétale dégradée (seulement 4,4% est couverte par des forêts contre 38,7% de terres agricoles et nues) et des pentes fortes (43% de la surface totale du bassin présente des pentes supérieures à 15%).

L'utilisation des terres est clairement le contrôle le plus important sur les taux d'érosion. Elle a un effet énorme sur les taux d'érosion: les pertes de sol sur les terres nues ou à végétation fortement dégradée sont sans doute plus élevées que ceux sur les surfaces avec végétation permanente, même sur de fortes pentes. Sur ces terres, l'érosion est contrôlée surtout par le facteur topographique.

Enfin, ce travail a pu atteindre son but d'évaluer, à l'échelle d'un bassin versant, les taux d'érosion potentielle, de délimiter les zones à différentes classe de risque et de dévoiler les facteurs déterminants de la dégradation des terres. Le modèle appliqué dans cette étude est assez fiable et il peut être, avec mises à jour continue et une amélioration des données sources et des méthodes appliquées, un outil important pour l'évaluation spatio-temporelle des risques d'érosion.

Les résultats obtenus, sous format cartographique, permettent de cibler les zones qui nécessitent une action prioritaire pour une analyse à plus grande échelle, en vue de trouver les solutions appropriées pour lutter contre l'érosion et protéger le milieu naturel.

Remerciements- Ce projet de recherche est effectué dans le cadre de préparation d'une thèse de Doctorat en Sciences à la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, avec le soutien financier du Centre National de la Recherche Scientifique et Technique CNRST (Bourse d'excellence).

Références

1. Yjjou M., Bouabid R., El Hmaidi A., Essahlaoui A., El Abassi M. Modélisation de l'érosion hydrique via les SIG et l'équation universelle des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'Oum Er-Rbia. *The IJES* 3 (2014) 83-91.
2. El Garouani A., Chen H., Lewis L., Tribak A., Abahrour M. Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG Idrisi au nord-est du Maroc. *Téledétection*, 8 (2008) 193-201.

3. Stanchi S., Falsone G., Bonifacio E. Soil aggregation, erodibility and erosion rates in mountain soils (NW Alps, Italy). *Solid Earth* 6 (2015) 403-414.
4. Anteur D., Mederbal K., Fekir Y., Hamadouche M., Labani A., Adda Hanifi N., Boudjemaa M. Contribution à l'évaluation et à la cartographie de la sensibilité à l'érosion hydrique des sols du sous bassin versant de l'oued de Saida (ouest de l'Algérie). 1er Séminaire National sur la Santé et Bio-Surveillance des Ecosystèmes Aquatiques, Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras (2014).
5. Haoues C. Evaluation par analyse multicritères du risque d'érosion dans la vallée de l'Oued Labiod (Approche systémique). Mémoire de fin d'étude Magister, Université colonel El Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, 132p (2008).
6. Bou Kheir R., Cerdan O., Chadi A. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology*, 82 (2006) 347-359.
7. Canton Y., Solé-Benet A., de Vente J., Boix-Fayos C., Calvo-Cases A., Asensio C., Puigdefábregas J.A. review of runoff generation and soil erosion across scales in semiarid south-eastern Spain. *Journal of Arid Environments* 75 (2011) 1254-1261.
8. Kouli M., Soupios P., Vallianatos F. Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *Environ. Geol.* 57 (2009) 483-497.
9. Nunes A.N., De Almeida A.C., Coelho C.O.A. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal. *Applied Geography* 31 (2011) 687-699.
10. Paroissien J.B., Darboux F., Couturier A., Devillers B., Mouillot F., Raclot D., Le Bissonnais Y. A method for modeling the effects of climate and land use changes on erosion and sustainability of soils in a Mediterranean watershed (Languedoc, France). *Journal of Environmental Management* 150 (2015) 57-68.
11. Bates, B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S., Palutikof J.P. (Eds). Les changements climatiques et l'eau. Document Technique VI du GIEC, Secrétariat IPCC, Geneva, (2008).
12. Lammadalena N. Changements climatique et ressources en eau dans la région méditerranéenne. *La lettre de veille de CIHEAM*, 12 (2010) 1-4.
13. Heusch B. Estimation et contrôle de l'érosion hydraulique. *C.R. Soc. Sci. Nat. Phy. Maroc*, 37 (1973) 41-54.
14. MADREF. Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Eaux et Forêts, Rapport interne, Rabat-Maroc (1996).
15. Ait Fora A. Modélisation spatiale de l'érosion hydrique dans un bassin-versant du Rif marocain : validation de l'approche géomatique par la sédimentologie, les traceurs radioactifs et la susceptibilité magnétique des sédiments. Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 231 p, 1995.
16. El Ouadini M., Aït Brahim L., Moukhchane M., Benjbara A., Nachit D. Erosion et transport en suspension dans le bassin versant de l'oued Martil (rif septentrional, Maroc). *Bull. Réseau Erosion*, IRD Montpellier, France, 20 (2000) 78-86.
17. Lahlou A. Dégradation spécifique des bassins versants au Maroc. Rapport n°1000. Ministère de l'équipement et de la promotion nationale, Direction de l'hydraulique, Division exploitation, service de gestion des eaux, Rabat, Maroc (1997).
18. MAMVA. Étude de préparation du plan national d'aménagement des bassins versants. Ministère de l'Agriculture et de la Mise en Valeur Agricole, Rabat, Maroc (1993).
19. Marzouki T. Diagnostic de l'envasement des grands barrages marocains. *Rev. Mar. Génie Civil.* 38 (1992) 46-50.
20. Merzouk A., Dahman H., Abdellaoui B., Houssa R. Transformation des terres du Rif et son impact sur l'envasement du barrage Ibn Battouta (Tangérois, Maroc). Congrès « La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes ». AUPELF-UREF No7, Sainte Foy PQ, Canada, (1998) 339-348.
21. Lahlou A. Envasement des barrages au Maroc. Eds WALADA, Collection Sciences et Techniques, Casablanca, 120 p, (1994).
22. Margat J., Vallée D. Mediterranean vision on water, population and the environment for the 21th century. Document prepared by the Blue Global Water Council Partnership/Medtac in the programme of the World Water Vision of the World Water Council, Blue Plan (2000).

23. Boutayeb N. Impact de la dégradation des bassins versants sur l'économie nationale. Proceedings of National Seminar on Watershed Management, (1988) 18-23.
24. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting Rainfall Erosion losses, Agriculture Handbook no. 57, US Department of Agriculture. Washington DC. USA. 58p, (1978).
25. Foster G.R. and Lane L.J. User requirements: USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP). NSERL Report No. 1, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN, 43 p. (1987).
26. Beasley D.B., Huggins L.F., Monke E.J.. ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*, 23 (1980) 938-944.
27. Arnold, J.G., Williams, J.R., Srinivasan, R. and King, K.W. SWAT: Soil and Water Assessment Tool. User's Manual USDA Agriculture Research Service Grassland. Soil and Water Research Laboratory, 808 East Blackland Road Temple, TX 76502, 190 p. (1996).
28. Van der Knijff J.M., Jones R.J.A., Montanarella L. Soil erosion risk assessment in Europe. EUR 19939 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 38 p, (2000).
29. Grimm M., Jones R.J.A., Rusco E., Montanarella L. Soil Erosion Risk in Italy: a revised USLE approach. European Soil Bureau Research Report No.11, EUR 20677 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 28 p, (2002).
30. Erdogan H. E., Erpul G., Bayramin I. Use of USLE/GIS Methodology for Predicting Soil Loss in a Semiarid Agricultural Watershed. *Environ Monit Assess* 131 (2006) 153-161.
31. Roose E. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédol. FAO*, 70 (1994).
32. Kinnell P.I.A. Slope length factor for applying the USLE-M to erosion in grid cells. *Soil Till Res* 58 (2001) 11-17.
33. Lal R., Blum W.H.V. (Eds). Methods for assessment of soil degradation. *CRC Press. Boca Raton*, (1997) 17-31.
34. Millward A.A, Mersey J.E. Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. *Catena* 38 (1999) 109-129.
35. Wang G., Gertner G., Fang S., Anderson A.B. Mapping multiple variables for predicting soil loss by geostatistical methods with TM images and a slope map. *PHOTOGRAMM ENG REM S* 69 (2003) 889-898.
36. Cerri C.E.P., Dematte J.A.M., Ballester M.V.R., Martinelli L.A., Victoria R.L., Roose E. GIS erosion risk assessment of the Piracicaba River Basin, southeastern Brazil, *GISciences and Remote Sensing* 38 (2001) 157-171.
37. Bartsch K.P., van Miegroet H., Boettinger J., Dobrowolski J.P. Using empirical erosion models and GIS to determine erosion risk at Camp Williams. *Journal of Soil and Water Conservation* 57 (2002) 29-37.
38. Ma J.W., Xue Y., Ma C.F., Wang Z.G. A data fusion approach for soil erosion monitoring in the Upper Yangtze River Basin of China based on Universal Soil Loss Equation (USLE) model. *INT J REMOTE SENS* 24 (2003) 4777-4789.
39. Bonn F. La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG: possibilités, erreurs et limites. *Sécheresse* 9 (1998) 185-192.
40. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. (Eds.). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agr. Handbook, Washington (DC): USDA/US Government Printing Office*, 407 p, (1997).
41. Merzouk A. Relative Erodability of Nine Moroccan Soils as Related to Physical, Chemical and Mineralogic Properties, Ph D. thesis, University of Minnesota, 283 p, (1985).
42. Arnoldus H.M.J. Methodology used to determine the maximum potential average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. Report of an FAO/UNEP Expert Consultation on Assessing soil degradation, Rome, 18-20 January 1977, *FAO Soils Bulletin* 34 (1977) 39-48.
43. Wall G., Baldwin C.S., Shelton I.J. Soil Erosion-Causes and Effects. OMAFRA Factsheet 87-040(1987) [<http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/12-053.htm>].

44. Nyakatawa E.Z.; Reddy K.C., Lemunyon J.L. Predicting soil erosion in conservation tillage cotton production systems using the revised universal soil loss equation (RUSLE). *Soil Till Res.* 57 (2001) 213-24.
45. Sanoussi Manzo L.M. Utilisation de la géomatique pour la contribution à la cartographie des sols de la région de Tétouan. Mémoire IAV Hassan II. 198 p, (2011).
46. Fauck R. Erosion et mécanisation agricole. Bureau des sols en Afrique occidentale, 24 p, (1956).
47. Fournier F. La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain. *Sols Africains* 12 (1967) 5-53.
48. Mitsova H., Brown W.M., Hohmann M., Warren S. (site web). Using Soil Erosion Modeling for Improved Conservation Planning: A GIS-based Tutorial. Geographic Modeling Systems Lab, University of Illinois at Urbana-Champaign. [www4.ncsu.edu/~hmitaso/gmslab/reports/CerlErosionTutorial/denix/denixstart.html]
49. Dahman L. Modélisation des pertes en sol par l'érosion hydrique base sur l'utilisation d'un SIG et des images satellitaires SPOT (XS). Application au bassin versant de Tlata (Rif occidental). Mémoire de troisième cycle, ENFI, Salé, 135 p, (1994).
50. Kalman R. Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin du Sebou. Rapport du Ministère de l'Agriculture, Maroc, 40 p, (1967).
51. Shi Z.H., Cai C.F., Ding S.W., Li Z.X., Wang T.W., Sun Z.C. Assessment of Erosion Risk with the RUSLE and GIS in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang River. Proceeding of the 12th ISCO Conference, Beijing, (2002) 73-78.
52. Adediji A., Tukur A.M., Adepoju K.A. Assessment of Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Katsina Area, Katsina State of Nigeria using Remote Sensing (RS) and Geographic Information System (GIS). *Iranica J. Energy & Environ.* 1 (2010) 255-264.
53. Wall, G.J. Coote D.R., Pringle E.A. Shelton I.J., (Eds). RUSLE-CAN - Équation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada. Manuel pour l'évaluation des pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada. Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, No de la contribution AAC2244F, 117 p, (2002).
54. Poesen J., Torri D., Bunte K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review. *Catena* 23 (1994) 141-166.
55. Govers G., Van Oost K., Poesen J. Responses of a semi-arid landscape to human disturbance: a simulation study of the interaction between rock fragment cover, soil erosion and land use change. *Geoderma* 133 (2006) 19-31.
56. Poesen J., Lavee H., Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena* 23 (1994) 1-28.
57. Naimi M., Tayaa M., Ouzizi S. Cartographie des formes d'érosion dans le bassin-versant de Nakhla (Rif occidental, Maroc). *Sécheresse* 16 (2005) 79-82.
58. Nunes A.N., De Almeida A.C., Coelho C.O.A. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal. *Applied Geography* 31 (2011) 687-699.
59. Tribak A., El Garouani A., Abachour M, Water erosion in tertiary marl series of the Oriental Préfif (Morocco): agents, processes and quantitative evaluation. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.* 1 (2012) 47-52.
60. Sadiki A. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation Universelle de Perte en Sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'Oued Boussouab. *Bull. Inst Sci. Rabat, sec. Sci. Terre* 26 (2004) 69-79.
61. Khali Issa L., Raïssouni A., El Arrim A., Moussadek R. Mapping and Assessment of Water Erosion in the Khmiss Watershed (North Western Rif, Morocco), *CAES*, 24 (2014) 119-130.
62. Raïssouni A. Modélisation et cartographie de la sensibilité et de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale par USLE et SIG (Rif Nord occidental, Maroc). Thèse de Doctorat Es-Sciences, Fac. Sci. Tech. Tanger, Maroc, 208 p, (2012).
63. García-Ruiz J.M. The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *Catena* 81 (2010) 1-11.