

2022/2023

DEPARTEMENT DE GEOLOGIE
Mémoire de fins d'études

En vue d'obtention du diplôme Licence de Sciences et Technique



Estimation de l'érodibilité dans le bassin Reraya



Réalisé par : Najem Mohamed reda / Ouadouni Meriem / Miftah Amine

Encadré par : El Wahidi Farid

Soutenu le 20/06/2023 devant le jury composé de :

Pr. CHAFIKI Idriss (examineur) Pr. EL WAHIDI Farid (encadrant)

Remerciements :

Avant d'entamer le vif de ce rapport, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont soutenu de près ou de loin, moralement et professionnellement, tout au long de la période de notre projet de fin d'études. Ce modeste travail n'aurait pas vu le jour sans leur précieuse aide.

Nos remerciements et profonds respects vont premièrement à Mr. EL WAHIDI Farid notre professeur à la faculté des sciences et techniques qui a accepté sans hésitation de nous encadrer dans ce travail et qui s'est montré d'une grande disponibilité, générosité et suivi avec une rigueur scientifique éminente. Nous le remercions aussi pour ses propositions et conseils avisés et pour l'intérêt porté à notre travail.

Nous remercions chaleureusement Mr. BENKADOUR, Mr. HAFID, Mr. IBOUH et Mr. DAOUDI, nos professeurs de faculté des sciences et techniques pour leur aide ainsi que les informations, le local et le matériel qu'ils ont mis à notre disposition.

Nous adressons nos sincères remerciements à Mr. CHAFIKI et Mr. EL WAHIDI, membres de la jury et professeurs de notre faculté pour leur temps, leur attention et leur évaluation rigoureuse de notre soutenance.

Enfin, nous n'oublierons jamais la gentillesse et l'amabilité de tous nos professeurs du département et surtout de la licence eau et environnement pour leur collaboration fructueuse, leurs aides et leurs suggestions utiles.

Nos sincères remerciements.

Préambule

Après avoir sélectionné le sujet en collaboration avec notre professeur encadrant, M. El Wahidi, et établi le plan que nous allons suivre tout au long de notre projet de fin d'études, nous avons entamé notre parcours par une formation intensive sur le logiciel ArcGIS, d'une durée de trois jours. Cette formation, organisée par M. Azizi et animée par M. El Alaoui, nous a permis d'acquérir les compétences nécessaires pour le traitement et la création de divers types de cartes à partir d'images satellites. Ces connaissances se sont révélées essentielles pour la réalisation de notre carte guide dédiée aux faciès et à la lithologie de notre bassin d'étude.

Par la suite, une fois la carte guide réalisée et les points d'échantillonnage sélectionnés, nous avons entamé la phase pratique, qui s'est déroulée en deux étapes distinctes. La première étape consistait à prélever des échantillons sur le terrain en vue de les soumettre à des analyses physico-chimiques en laboratoire. Durant cette journée, nous nous sommes référés à la carte préalablement réalisée afin de garantir une couverture complète des différents faciès du bassin de Reraya, en prélevant deux échantillons par faciès.

Une fois les échantillons collectés, nous avons procédé aux analyses expérimentales au sein du laboratoire L3G, situé dans notre département de géologie à la faculté des sciences et techniques. Ces analyses se sont déroulées en trois étapes distinctes, nécessitant une durée de trois jours. Tout d'abord, nous avons effectué une granulométrie détaillée, puis nous avons mesuré la conductivité électrique du sol, et enfin, nous avons utilisé le calcimètre pour déterminer la teneur en CaCO_3 du sol étudié (calcimétrie de Bernard).

Ces différentes étapes de notre projet de fin d'études témoignent de notre engagement à mener des recherches rigoureuses et à appliquer des méthodologies précises dans le but d'obtenir des résultats fiables et significatifs pour notre bassin d'étude.

Plan du sujet

Introduction :

- Problématique de la dégradation du sol :
 - Impact sur l'envasement des barrages
 - Impact sur la qualité des eaux
 - Impact sur les risques des inondations
- Objectifs d'études

1. Synthèse bibliographique :

- 1.1. L'érosion et l'érosion hydrique
- 1.2. Formes de l'érosion hydrique
- 1.3. Facteurs de l'érosion
- 1.4. Quantification des pertes du sol
- 1.5. Modèles d'estimation de l'érodibilité (K)

2. Le bassin de Reraya : caractérisation biophysique

- 2.1. Situation géographique
- 2.2. Morphologie/Topographie
- 2.3. Géologie du bassin
- 2.4. Climat
- 2.5. Occupation du sol (végétation)

3. Echantillons et méthodes d'analyse

- 3.1. Stratégie d'échantillonnage
- 3.2. Analyses au laboratoire
 - 3.3.A. Analyses granulométrie
 - 3.3.B. Mesures de la conductivité électrique (CE°)
 - 3.3.C. Mesure de la teneur du sol en CaCO₃

4. L'érodibilité selon le modèle (Merzouk, 1991 ; régression multiple)

5. Résultats des analyses

6. Discussion

Conclusion

Références bibliographiques

Liste de figures, cartes et tableaux :

Figures :

Figure 1 : Effet splash

Figure 2 : Erosion en nappe

Figure 3 : Erosion linéaire

Figure 4 : Erosion par ravinement

Figure 5 : Erosion en masse

Figure 6 : Erosion des berges

Figure 7 : Rugosimètre à bornes d'acier inoxydable

Figure 8 : Simulation des pluies sur parcelle de 1m²

Figure 9 : Carte de Localisation du bassin Reraya au niveau national / régional

Figure 10 : Carte d'Hypsométrie dans le bassin Reraya

Figure 11 : Carte de Litho faciès du bassin Reraya

Figure 12 : Carte géologique du bassin Reraya

Figure 13 : Carte de la répartition des points échantillons et divisions du bassin versant de la Reraya.

Figure 14 : Graphe qui montre la relation entre K (Nomographe-USLE) et Kr (modèle)

Figure 15 : Graphe qui montre la relation entre la perte en sol (t/ha/an) et Kr (modèle)

Figure 16 : Relation logarithmique entre Kr et fragments grossiers des sols étudiés.

Figure 17 : Relation logarithmique entre Kr et Conductivité électrique des sols étudiés.

Figure 18 : Carte de Distribution du facteur K dans le bassin Reraya

Tableaux :

Tableau 1 : Coordonnées des points d'échantillonnage

Tableau 2 : Résultats des analyses granulométriques

Tableau 3 : Résultats de la mesure de la conductivité

Tableau 4 : Résultats de la mesure de la teneur en CaCO₃

Tableau 5 : Erodibilité selon USLE, perte en sol, variables du modèle et indice d'érodibilité selon modèle.

Tableau 6 : Résultats des analyses des trois variables du modèle d'érodibilité relative.

Introduction

Le sol est une ressource naturelle limitée, dont la genèse demande des centaines voire des milliers d'années. Cette ressource est à la base d'activités socioéconomique, aussi bien qu'elle assure des fonctions écologiques de premier ordre : Cycles biogéochimiques (C, N, P, K, ...), support de la végétation, drainage et infiltration, épuration et réservoirs d'eau, etc...

L'érosion des sols est la forme de dégradation des terres la plus courante à l'échelle de la planète. C'est un processus par lequel la couche supérieure du sol est détruite. La perte de cette couche fertile, appelée couche arable, et lieu de déroulement des cycles biogéochimiques, constitue le réservoir de nutriments et des besoins en eau pour la faune et la flore de ces écosystèmes.

Ce type de dégradation des sols entraîne entre autres des conséquences néfastes tel que : la diminution de la qualité des eaux, l'envasement des barrages, et l'augmentation des risques d'inondation.

▪ **Impact de dégradation du sol sur l'envasement des barrages**

Dans n'importe quel pays dans le monde, le phénomène de l'érosion, et surtout hydrique, provoque une gigantesque difficulté pour la gestion et l'entretien des barrages. Ce phénomène est particulièrement actif dans les zones arides et semi-arides, où le manque de ressources hydrique est accentué par l'érosion des sols qui peut atteindre les 50 t/ha/an contre 0.30 à 0.50 t/ha/an en Europe (Abdelli, 2007).

Le problème commence depuis la dégradation du sol dans les bassins versants causée principalement par les précipitations au niveau des reliefs. Cette eau ruisselée après concentration linéaire forme des ravins qui conduisent les matériaux érodés vers le réseau hydrographique pour être transporter jusqu'à atteindre les réservoirs d'eau (barrages et lacs).

Les matériaux fins composés essentiellement de limon, argile et particules de roches, se déposent au fond de ces réservoirs pour former une boue. C'est ce qu'on appelle la vase et d'où le nom d'envasement. La perte en sol d'un bassin versant donnée alors est un indicateur fiable qui peut renseigner sur l'intensité de l'envasement et de perte de la capacité de ces réservoirs barrages.

Au Maroc par exemple, chaque année l'envasement diminue la capacité totale des infrastructures hydrauliques nationales. Ces pertes de capacité sont estimées à 50 Mm³/an, soit une diminution de 0,5% par an. Jusqu'à présent le volume total des barrages envasé est évalué à près de 830 Mm³, ce qui

représente près de 8% de la capacité nationale des barrages (Test Marocain des Indicateurs de Développement Durable, 2002).

En chiffre économique, une diminution de capacité de 0,5% par an vaut un coût de plus d'un milliard de DH.

L'envasement pose ainsi colossalement de soucis :

- La réduction de la capacité des barrages : chaque année le fond vaseux évolue et se consolide avec occupation d'un volume considérable de la retenue.
- Dégradation de la qualité de l'eau : les sédiments véhiculent de la matière organique et des produits chimiques (nitrates, sulfates) provenant en particulier des apports en éléments fertilisants pour les cultures, et se déposant dans les réservoirs entraînant ainsi une dégradation de la qualité de l'eau.
- La sécurité de l'ouvrage : l'envasement pose aussi un problème sur la stabilité de l'ouvrage, on sait que pour une variation linéaire de la hauteur de la vase, la poussée progresse en puissance carrée de la hauteur.
- Envasement et colmatage des canaux d'irrigation : l'irrigation se fait généralement par de l'eau chargée en sédiments, c'est ainsi que ces particules fines vont se déposer dans les canaux réduisant leurs sections mouillées ceci pose le problème de comblement et d'efficacité du réseau des canaux d'irrigation se trouvant à l'aval du barrage.

▪ **Problématique de dégradation du sol sur la qualité des eaux**

La dégradation des sols peut avoir un impact négatif sur la qualité de l'eau de plusieurs manières. Les sols dégradés peuvent être contaminés par des produits chimiques et des polluants, tels que des engrais, des pesticides, des métaux lourds et des hydrocarbures. Ces contaminants peuvent être transportés par les eaux de ruissellement et les infiltrations dans les nappes phréatiques, ce qui peut entraîner une diminution de la qualité de l'eau.

De plus, les sols dégradés peuvent avoir une capacité d'absorption d'eau inférieure, ce qui augmente le volume d'eau de ruissellement et l'érosion des sols. Cela peut entraîner une augmentation de la turbidité et de la charge en sédiments de l'eau, et par conséquent affecter la qualité de l'eau et augmenter le risque de sa contamination bactérienne.

- **Problématique de dégradation du sol sur les risques d'inondation**

Le sol peut stocker et absorber de l'eau en remplissant partiellement (présence d'air) ou totalement (absence d'air) sa porosité.

Cette capacité d'absorption dépend en outre de la composition granulométrique des éléments solides du sol (texture), du mode d'arrangement de ces éléments avec la matière organique (structure) et de leur nature minéralogique et aussi de son niveau d'investissement par la végétation et son système racinaire.

Le manque d'absorption de l'eau par les sols dégradés est une des principales causes de la genèse des inondations. Lorsque l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration de la surface du sol, on parlera de ruissellement « hortonien ». En revanche, un sol, partiellement ou totalement saturé en eau par une nappe souterraine superficielle, génèrera du ruissellement « par saturation ».

Dans des cas bien particuliers, ces deux types de ruissellement peuvent se produire en même temps et produire subitement des inondations catastrophiques.

- **Objectif d'étude**

L'érodibilité des sols est un facteur majeur pour quantifier et évaluer les pertes en sol et sa variabilité spatiale à l'échelle du bassin versant. Tous les modèles d'évaluation des pertes en sol développés jusqu'à présent, reposent sur l'estimation (prédiction) de l'érodibilité comme variable dans les équations simulant le processus d'érosion.

Ainsi, l'objectif de notre projet est l'estimation de l'érodibilité des sols dans le bassin versant de la Reraya. Notre approche repose sur des analyses au laboratoire des caractéristiques physico-chimiques des échantillons prélevés sur des différents faciès géologiques dans la zone étudiée. Elle consiste à produire des données expérimentales issues des analyses au laboratoire.

I. Synthèse bibliographique :

I.1 L'érosion et l'érosion hydrique :

▪ Définition :

Selon Girard et al, (2005 *in* Paul-Hus, 2011), " l'érosion peut être définie comme un phénomène de déplacement des matériaux à la surface du sol sous l'action de l'eau, du vent, de l'homme ou simplement de la gravité ".

L'érosion qui se produit sous l'action de l'eau est appelée érosion hydrique. Ce type d'érosion considéré comme un problème environnemental majeur dans les zones arides et semi-arides. Elle est favorisée par la faible couverture des sols et l'agressivité des précipitations. L'eau est le vecteur principal qui arrache et transporte les particules du sol de différentes tailles vers un lieu de dépôts à l'aval. La phase de détachement est provoquée par l'effet de gouttes de pluie tombant sur le sol (effet splash) (figure 1) et celle de transport est provoquée par l'eau de ruissellement (lorsque la vitesse d'apport d'eau devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol).

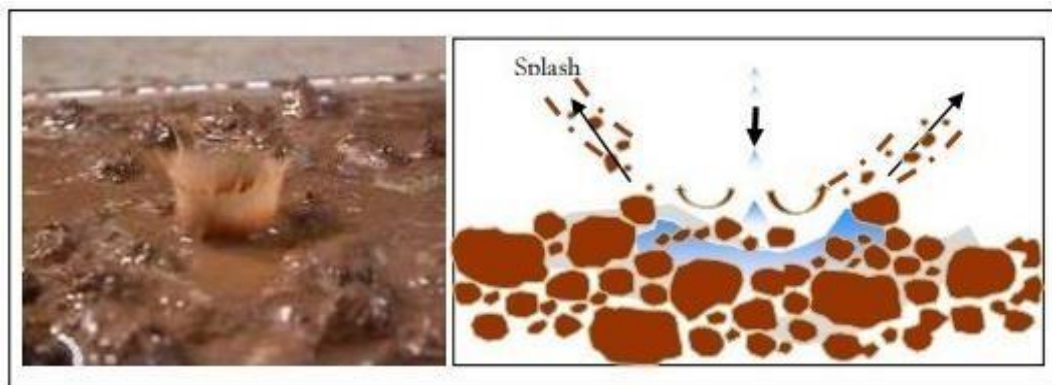


Figure 1 : Effet splash (impact des gouttes des précipitations)

▪ Magnitude de l'érosion au Maroc

L'érosion hydrique des sols peut affecter de nombreuses régions du monde, y compris le Maroc où 40% des terres sont érodées, ce qui constitue « une menace majeure pour la dégradation des terres » (Ouallali *et al.*, 2016).

Les montagnes du Rif, du Moyen Atlas et du Haut Atlas sont particulièrement vulnérables à l'érosion en raison de leur lithologie, de leur topographie et de leur utilisation agricole intensive.

Une étude menée par l'AEFCS (Administration des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols) en 1999 a démontré que dans les montagnes du Rif

l'érosion s'élève à environ 20 tonnes/ha/an et dans les montagnes de l'Atlas elle atteint 5 à 10 tonnes/ha/an.

Ces chiffres augmentent chaque année en raison du changement climatique et de l'activité humaine d'une façon que les dernières études montrent des preuves d'érosion de plus de 25 t/ha par an dans les montagnes du Haut Atlas et les zones rurales (Gourfi *et al.*, 2018 ; Borrelli *et al.*, 2017).

I.2 Formes d'érosion hydrique :

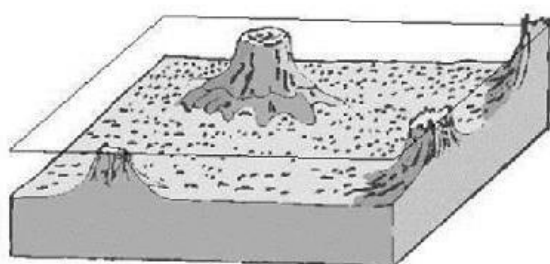
L'érosion hydrique se manifeste sous plusieurs formes :

- L'érosion en nappe « Sheets erosion »

C'est le stade initial de la dégradation des sols par érosion hydrique. Elle entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de l'horizon superficiel, autrement dit, il s'agit d'une forme d'érosion diffuse. L'érosion en nappe se manifeste par la remontée des cailloux en surface qui affleurent après décapage des fines particules du sol, puis leur déplacement se fait à courte distance par effet splash ou par ruissellement diffus du surplus d'eau.

L'importance de l'érosion en nappe dépend à la fois de :

- L'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement.
- L'énergie d'impact des pluies qui détachent les particules susceptibles de migrer.
- La durée des pluies et/ou de l'humidité avant les pluies.



(a) Sheet erosion

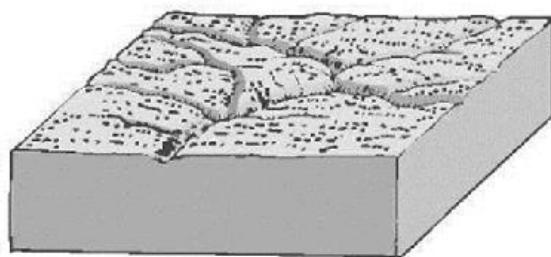


Figure 2 : Erosion en nappe (diffuse)

- L'érosion linéaire

Lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol, des flaques se forment ; ensuite celles-ci communiquent par des filets d'eau et lorsque ces derniers prennent une certaine vitesse, 25 cm/s d'après Hjulström (1935), ils acquièrent une énergie propre qui va créer une érosion délimitée dans l'espace par des lignes d'écoulement. Cette énergie n'est plus dissipée sur l'ensemble de la surface du sol, mais elle se concentre sur des lignes de plus forte pente (Roose, 1994). L'érosion linéaire est donc un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et a acquis une énergie cinétique capable d'éroder le sol à un rythme plus rapide que l'érosion en nappe (Blanco & Lal, 2008). L'érosion linéaire est exprimée par tous les creusements linéaires qui entaillent la surface du sol suivant diverses formes et dimensions (griffes, rigoles, ravines, etc.).

On parle de griffes lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur, de rigoles lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur. Les griffes et les rigoles sont encore effaçables par les techniques culturales. A un stade plus avancé, il y a apparition des ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 30 cm) et en particulier, lorsqu'elles ne sont plus effaçables par les procédés agricoles simples.



(b) Rill erosion

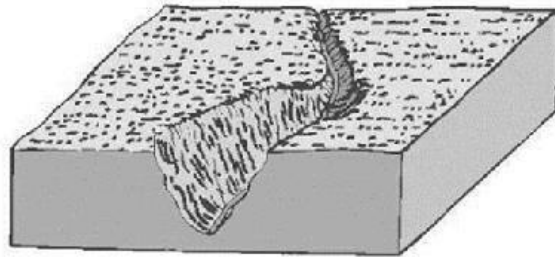


Figure 3 : Erosion linéaire.

- L'érosion par ravinement :

C'est la forme culminante de l'érosion du sol. Les dégâts causés sont d'autant plus importants que la stabilisation et la réparation de cette forme d'érosion sont les plus coûteux de tous les travaux de lutte contre l'érosion. Comme pour les autres processus de l'érosion hydrique, cette forme d'érosion déprécie considérablement la valeur et la productivité des terres agricoles. Les ravins et les ravines, sont responsables de la mobilisation et du transport des

sédiments vers l'aval des bassins-versants. En plus de leur contribution substantielle à l'envasement des barrages, ils occasionnent une perte directe du patrimoine foncier.



(c) Gully erosion



Figure 4 : Erosion par ravinement

- L'érosion en masse

Elle désigne tous déplacement de la couverture pédologique ou du substrat géologique selon des formes non définies comme les mouvements de masse, les coulées de boue et les glissements de terrain.

Ces mouvements de masse peuvent être accélérer par l'homme en modifiant la géométrie externe du versant (par terrassement, creusement d'un talus pour installer une route ou des habitations, modification des écoulements naturels, carrières, ...).

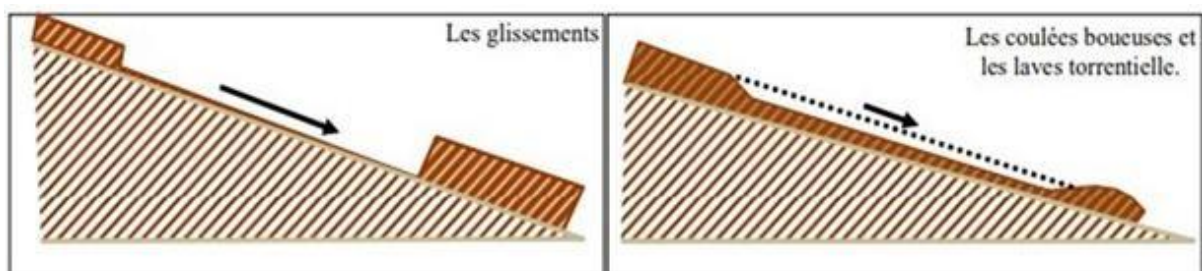


Figure 5 : Erosion en masse.

- L'érosion des berges :

Résulte du sapement et de l'affouillement des berges des cours d'eau naturels et des canaux de drainage.



Figure 6 : Erosion des berges

I.3 Facteurs d'érosion hydrique :

L'érosion autant que phénomène inévitable, elle est conditionnée par des facteurs naturels (climat, topographie, lithologie, couvert végétal) et d'autres anthropiques relatifs aux activités humaines :

- Le climat et l'érosivité de la pluie :

L'érosivité de la pluie se présente comme un indicateur de l'agressivité climatique qui met en évidence l'interaction entre les particules du sol et l'énergie cinétique de la pluie ainsi que la quantité de mouvement dissipée lors de l'impact des gouttes, et qui permettent la disjonction des particules du sol et leur déplacement.

Cette érosivité est contrôlée par plusieurs facteurs parmi lesquels on mentionne :

- La hauteur de la pluie : joue un rôle direct dans le transport solide et le ruissellement.
- L'intensité de pluie : provoque, au fur et à mesure avec son augmentation, une forte perte du sol.
- La durée de pluie : la longue durée a comme résultat la saturation du sol qui diminue l'infiltration et par suite la formation des ruissellements.
- La fréquence de pluie : des pluies fréquentes signifient que l'eau contenu dans le sol n'a pas de temps suffisant pour s'évaporer ; le sol donc reste

saturé et lors de l'accueil des prochaines précipitations il n'y aura pas d'infiltration. On constate par suite la formation des ruissellements.

- La topographie :

La topographie d'un terrain, en particulier la pente peut influencer l'érosion de plusieurs façon en intervenant en fonction de sa forme, de sa longueur et de son inclinaison (Roose, 1994 ; Fox et Bryan , 1999) .

Par exemple ; les pentes abruptes convexes ont tendance à favoriser l'érosion hydrique car l'eau s'écoule rapidement et emporte plus de particules de sol, et pour les pentes douces concaves ont tendance à réduire ce type d'érosion car l'eau s'écoule plus lentement, permettant aux particules de sol de se déposer.

En somme, la topographie est un facteur important à considérer lors de l'évaluation du risque d'érosion hydrique d'un terrain.

- Le couvert végétal :

Il s'agit du facteur primordial de protection du sol contre l'érosion.

La présence de la couverture végétale, sa nature et son étendue, jouent un rôle important dans l'interception et le retard de la chute des gouttes des pluies sur la surface du sol permettant ainsi la dissipation de son énergie cinétique, ce qui diminue dans une large mesure l'effet "splash". Elle favorise également l'infiltration de l'eau et le maintien du sol grâce à son système racinaire, et son développement en surface freine le ruissellent.

- La lithologie :

L'érodibilité du sol désigne sa susceptibilité face aux processus d'érosion, elle dépend essentiellement de la texture et de la structure des sols, de leur perméabilité et de leur matière organique. Elle est faible ($K=0.01$) pour les sols stables et forte pour les sols fragiles ($K = 0.70$). Il reste le facteur le plus important en raison de sa relation directe avec le volume de matières solides mobilisé et du bilan infiltration / ruissellement. Il existe trois propriétés essentielles des sols pour déterminer leur érodibilité et pour évaluer leur résistance à l'érosion :

- La teneur en limon et surtout en argile.
- La matière organique qui assure la cohésion du sol.
- Les caractéristiques minéralogiques et chimiques des sols qui ont un rapport avec la cohésion.

- Les facteurs anthropiques :

L'homme et les activités humaines peuvent influencer l'érosion en modifiant les caractéristiques naturelles du sol et en créant des conditions favorables à l'érosion. Les pratiques agricoles non durables, telles que le labour excessif, le surpâturage, la déforestation, peuvent contribuer à la dégradation du sol et à l'érosion. De plus, les activités de construction, l'exploitation minière et l'urbanisation peuvent également accélérer le rythme naturel de l'érosion et de la dégradation du sol.

I.4 Quantification des pertes en terre :

La quantification et l'évaluation de l'érosion peuvent se faire en adoptant plusieurs méthodes qui varient en fonction des objectifs, des moyens mis en œuvre, des échelles de travail, et de la région et ces particularités. Parmi ces méthodes on trouve :

- La méthode topographique :

Elle se base sur le suivi de la topographie de la surface du sol à l'aide d'un rugosimètre (figure 7). Ce dernier consiste à mesurer les changements de hauteur du sol par rapport à un plan de référence. Le rugosimètre permet aussi de faire le suivi de l'évolution des ravines, en mesurant la variation des dimensions des sections des ravines après chaque événement pluvieux. Les données de mesure peuvent être utilisées pour créer une carte topographique qui peut être comparée à une carte précédente pour déterminer la quantité d'érosion qui s'est produite.



Figure 7 : Rugosimètre à bornes d'acier

- La simulation de pluie :

C'est une méthode qui tente de comprendre et de mesurer l'infiltration de l'eau dans le sol (figure 8). Elle permet d'obtenir sur le terrain, de façon expérimentale, dans un temps relativement court, de nombreuses données mesurées sur le comportement de l'eau en surface et dans le sol sous des averses artificielles effectuées et contrôlées à l'aide d'appareillages qu'on appelle simulateurs de pluies. Pour pouvoir effectuer des simulations de pluie sur le terrain, il est nécessaire de passer par l'étape de préparer les parcelles de mesure comme est montré ci-dessous.



Figure 8 : Simulation des pluies sur parcelle de 1m²

- Mesure par l'étude du transport solide en suspension :

Son évaluation peut être faite in situ ou au laboratoire. En général, le nombre de mesures est petit. En fait, on peut procéder soit une seule mesure verticale au milieu ou au point le plus profond de la section ; soit quelques mesures (2 à 5) réparties sur la section.

I.5 Modélisation de l'érosion hydrique

La modélisation est la représentation des phénomènes physiques sur terrain à travers des outils informatisés pour construire la réalité sur place dans un modèle simplifié afin qu'il puisse être utilisé dans un but précis intéressant (Mourad, 2005). L'utilisation de la modélisation peut aider à la détermination du facteur d'érodibilité K en adoptant l'évaluation des risques d'érosion (Ben Slimane, 2013).

Types de modèles :

1) Modèle physique :

Il cherche à quantifier et à cartographier l'érosion en se basant sur la description des processus physiques de l'érosion. Le principe de cette modélisation à base physique est de décrire l'érosion au travers de représentations mathématiques des processus hydrologiques et érosifs fondamentaux, à savoir : le détachement par les gouttes de pluie et/ou par le ruissellement, le transport par les gouttes de pluie, le transport par le ruissellement, et le dépôt par le ruissellement (Foster, 1990).

Les modèles à base physique sont capables de modéliser les phénomènes de l'érosion et de sédimentation, en fournissant de multiples sorties spatiales. Ils reposent sur une discrétisation fine du bassin versant, ce qui permet d'intégrer les problèmes liés au changement d'échelle spatiale. Cependant, ils nécessitent l'évaluation d'un certain nombre de paramètres sur une base spatiale distribuée, qui demandent des calculs lourds et par conséquent un temps de résolution assez long (Perrin *et al.*, 2001).

Exemple des modèles physiques utilisés :

- Le modèle EUROSEM : « The european SoilErosion Model » (Morgan *et al.*, 1992; Morgan *et al.*, 1998), Est un modèle à base physique orienté pour les événements pluvieux. Il est conçu pour les petites parcelles d'un bassin versant, allant de 1 m² à 1 Km² de superficie. Il permet de calculer le taux de ruissellement, la perte totale du sol, le taux des sédiments et de localiser les sources de sédiments transportés et déposés. (Jaoued, 2007).
- Le modèle Water Erosion Prédiction Project (WEPP) (Bhuyan *et al.* 2002) pour l'évaluation de ruissellement et les pertes de sol. Ce modèle développé par Flanagan et Nearing (1995), se base sur de multiples paramètres dont les notions de base de l'infiltration, la surface de ruissellement, la croissance des plantes, les résidus de décomposition,

l'hydraulique, le labourage, la consolidation du sol ainsi que les mécanismes d'érosion (Nearing *et al.*, 1989) .

2) Modèle empirique USLE :

Une des méthodes les plus répandues pour estimer l'érosion est l'Universal Soil Loss Equation (USLE). Elle est basée 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. Les limites de cette équation universelle sont qu'elle n'évalue que les pertes causées par l'érosion de surface, sans tenir compte du ravinement. Elle est incapable d'estimer les pertes en terre pour une saison ou un épisode pluvieux isolé, ou en dehors des champs en question.

II. Le bassin de Reraya : caractérisation biophysique

II.1 Situation géographique

Nos études ont concerné le bassin versant de Ghiraya (un des sous-bassins de Tensift) (**figure 9**) dans le Haut Atlas de Marrakech. Situé à une quarantaine de kilomètres au sud du Marrakech entre les latitudes $31^{\circ}02'30''/31^{\circ}22'$ et les longitudes $7^{\circ}48'$ et $8^{\circ}00'30''$ ouest, le bassin est limité au nord par la plaine de Haouz, au sud par le bassin d'Assif Tifnout, à l'est par le bassin d'Ourika et à l'ouest par celui de N'fis. (Ouagga, 2005)

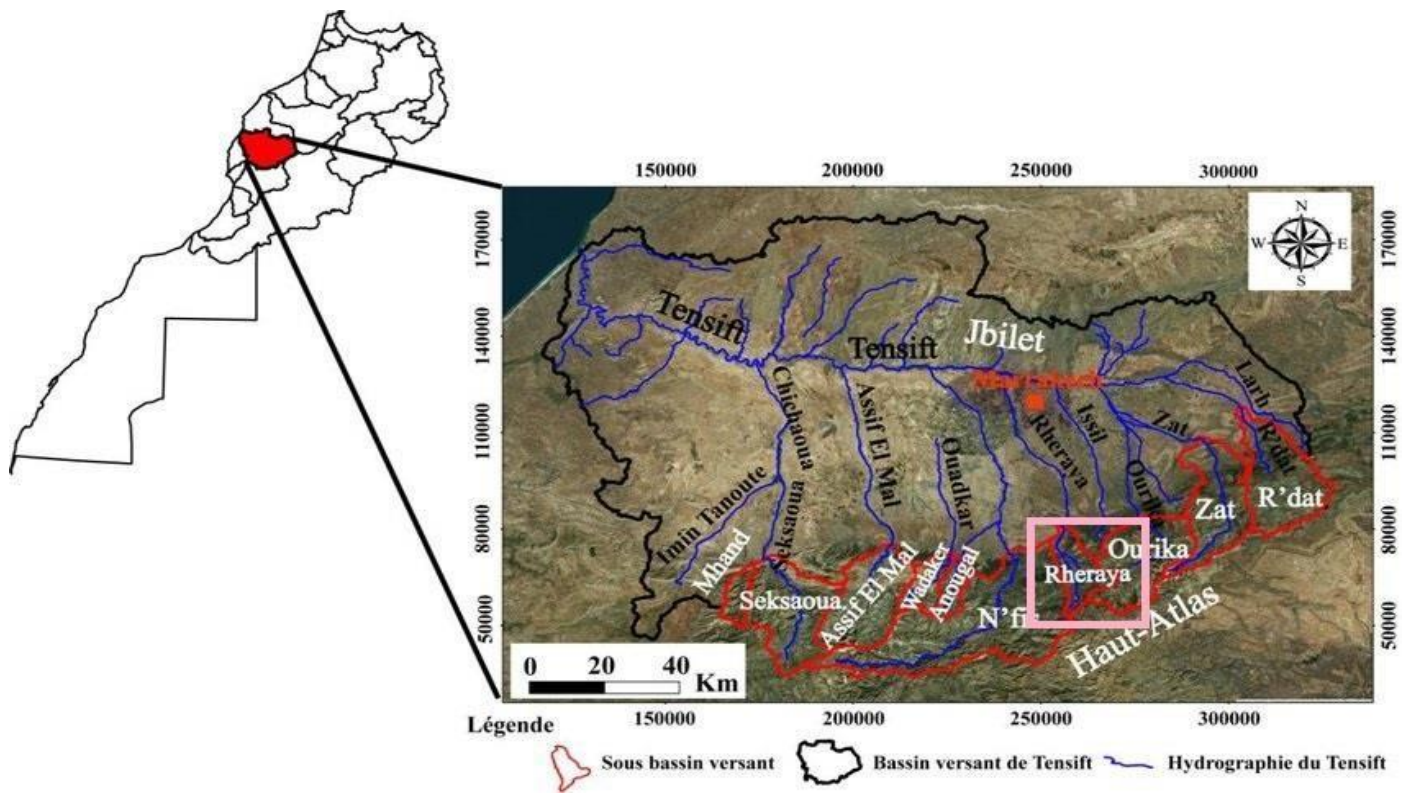


Figure 9 : Carte de Localisation du bassin Reraya au niveau national / régional

II.2 Morphologie/Topographie

En point de vue morphologique, le bassin a une forme allongée ($K_c=1,46$) qui couvre une superficie de 228 Km² avec un périmètre de 78km. Les altitudes du bassin varient entre 1068 m et 4165 m avec une moyenne de 2154 m et une médiane de courbe des altitudes comprise entre 1750 et 2000m, différence qui peut être expliquée par l'abondance des terrains bas. Le bassin s'étend depuis le pied Moulay Brahim jusqu'au l'entourage d'Imlil où se rassemble les plus hauts sommets de l'Afrique notamment la mont Toubkal (4165 m). (Figure 10)

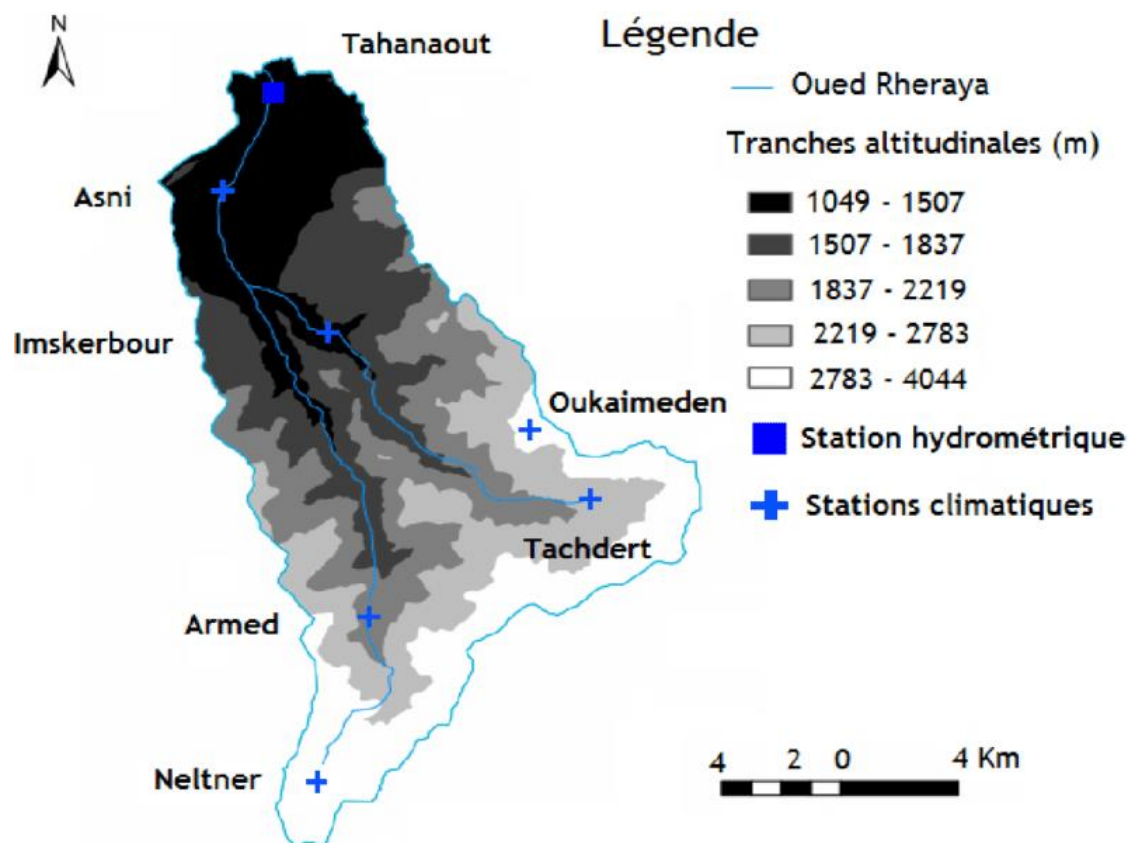


Figure 10 : Carte d'Hypsométrie dans le bassin Rheraya

II.3 Géologie du bassin

Le bassin versant de la Reraya est fondé sur un socle hercynien recouvert par des formations d'âges secondaire et tertiaire. Les différentes formations géologiques du bassin peuvent être regroupées en trois classes :

- Des formations imperméables (métamorphiques ou éruptives) avec une proportion de 59% ;
- Une formation calcaire relativement importante (26%) dans son bassin moyen.
- Des formations grés-argileuses dans le bas du bassin dont la proportion est de l'ordre de 15%

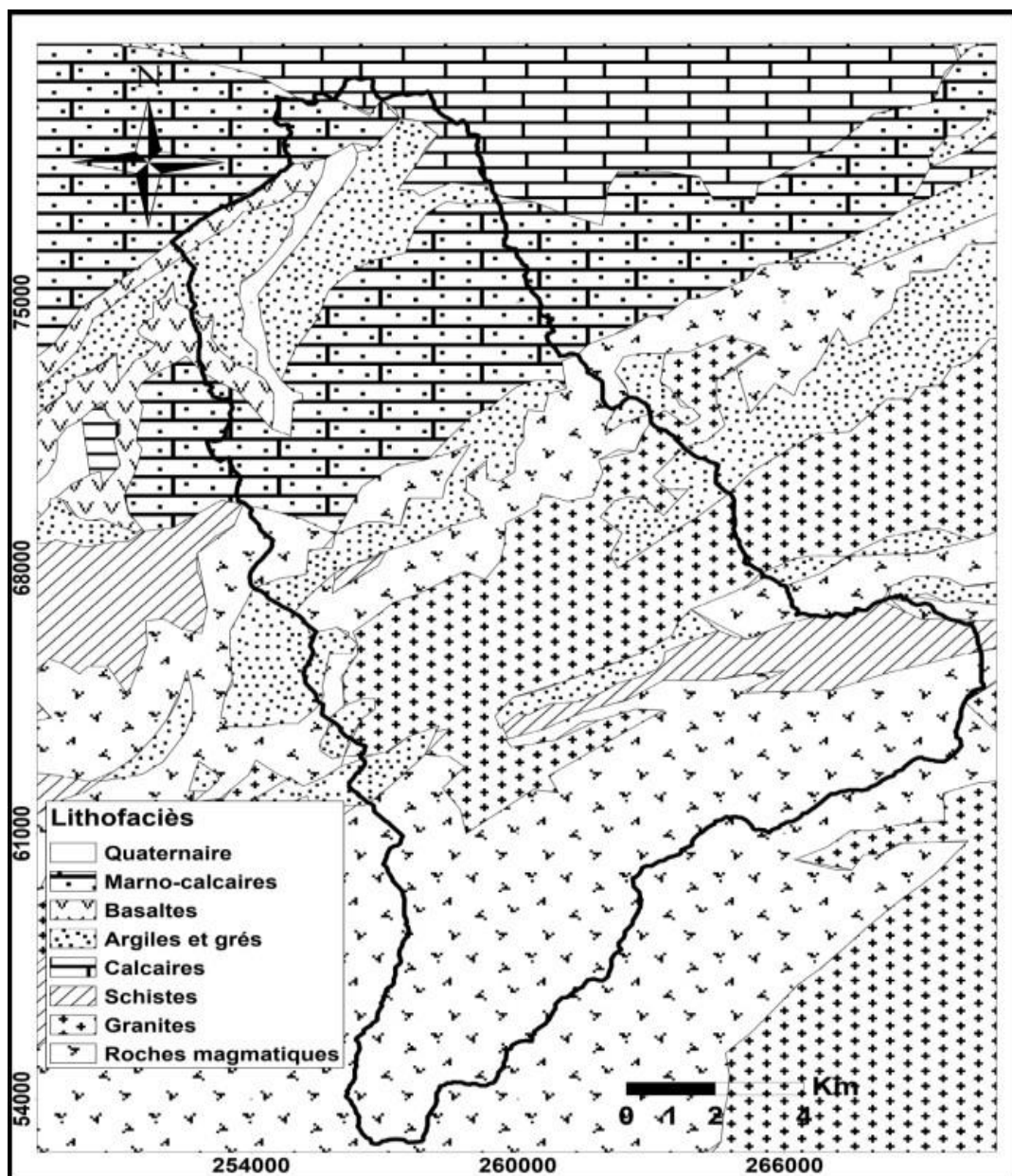


Figure 11 : Carte de Lithofaciès du bassin Reraya

En analysant la géologie du bassin, on l'a divisé en trois parties :

- *La partie amont* constituée d'un socle magmatique précambrien composé essentiellement du granite et d'andésite.
- *La partie moyenne* sous divisée en deux vallées (vallée d'Imlil et vallée d'Imennane), composée de matériaux primaires et triasiques sous forme de basalte vert et argile rouge reposants sur des conglomérats et grès fossilisés. On peut aussi observer des affleurements de substrat gréseux.
- *La partie aval* situé entre Asni et Moulay brahim apparaît la plus riches géologiquement, débute par un socle précambrien et paléozoïque grésoschisteux ainsi que du calcaire. Sur les plateaux de Kik et de Tihallatine on observe d'importantes formations marneuses et carbonatées. (Figure 12)

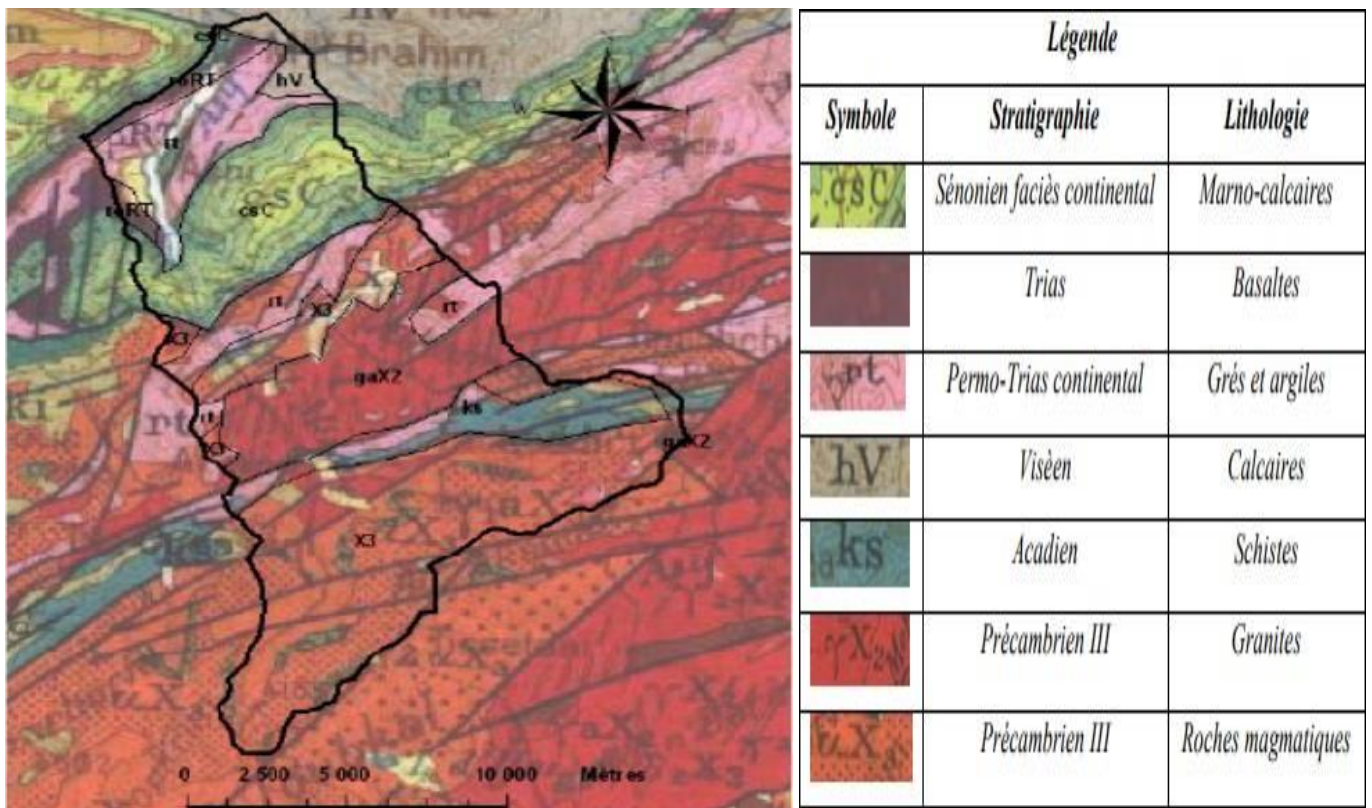


Figure 12 : Carte Géologique du bassin Reraya

II.4 Le climat

Le climat est l'ensemble des conditions météorologiques (température, précipitations, vent...) qui caractérisent l'atmosphère en un lieu donné (bassin versant de la rerya pour notre cas) :

▪ Température :

La température moyenne par exemple est prise au niveau du barrage de Lala TAKERKOUST (18,6 °C), tout comme la hauteur moyenne annuelle évaporée (1833,7 mm).

▪ Vent :

Selon leurs directions, les vents soufflant sur le bassin versant de RHERAYA sont classés en trois types :

- *Direction WNW* : provenant de l'Océan atlantique, ces masses d'air en mouvement sont pourvues d'humidité considérable qu'elles vont perdre progressivement lors de l'ascendance orographique déclenchée par leur contact avec les hauts reliefs du RHERAYA.

Localement, ils sont appelés «Gharbi».

- *Direction SSW* : d'origine continentale, ces vents sont chauds et secs, mais leurs caractéristiques peuvent être réduites avant d'atteindre la zone d'étude, durant leurs remontées sur le versant sud du Haut-Atlas par ce qu'on appelle couramment le mécanisme de Föhn.
- *Direction ENE* : surnommés localement « Chergui », ils sont aussi chauds et secs. En plus de ces directions majeures, la topographie accidentée du bassin contribue à l'apparition de courants locaux accentuant les problèmes d'hétérogénéité spatiale des précipitations.

▪ Précipitation :

Sous ses deux états liquides et solides, les précipitations sur le Rerya sont distinguées des autres bassins de Tensift. D'une part, car parmi eux, le Rerya est classé deuxième concernant la hauteur de pluie brute rapportée à la surface. D'autre part, parce que son enneigement relatif est le plus prononcé entre ses homologues de Tensift (Cruette 1975 et Haloui 1986).

Cependant, ce caractère privilégié est associé à une hétérogénéité spatio-temporelle dans la distribution des pluies, en fonction de l'altitude et l'exposition vis-à-vis des vents humides comme c'est mentionné précédemment. Par conséquent, on ne trouve jamais une corrélation significative entre les stations pluviométriques même avec un réseau développé.

II.5 L'occupation du sol (végétation)

L'occupation du sol du Reraya se montre très contrastée, en termes d'effectif de classes, de leurs propriétés (densité, superficie, localisation,...), et de la variabilité temporelle. Mais, en gros elle est formée principalement par :

- La végétation : Elle est de plusieurs types allant depuis les formations arborées de chêne vert de genévriers qui occupent une portion respectée de la surface totale du Reraya mais qui sont en voie de dégradation intense, jusqu'aux arbustes qui dominant le paysage, en passant par les périmètres de reboisement instaurés pour battre la détérioration de la forêt.
- Agriculture : Cette activité est répandue le long des lits des Oueds en formes de terrasses aménagés, où poussent essentiellement des céréalicultures, des maraichères et des arbres fruitiers.
- Terrains nus : Cette classe dominée représente les sols nus, les terrains dénudés de végétation et les terrains rocheux imperméables.

En ce qui concerne les sols, ils sont majoritairement peu évolués, à part les zones de terrasses aménagées et les périmètres forestiers. La couverture caillouteuse est abondante sur la plupart d'eux avec une moyenne de 30% de cailloux dans les sols du bassin étudié.

Cette situation endommagée des sols est en rapport direct avec l'érosion hydrique très poussée que connaît la Reraya déclarée par le PNABV (Plan National d'Aménagement des Bassins Versants) et affirmé par plusieurs auteurs.

III. Echantillons et méthodes d'analyse

III.1 Préparation d'une carte guide

L'opération de collecte des données a été guidée par une cartographie préalable des sites de prélèvement des échantillons. Pour ce, nous avons procédé par une stratification de la zone d'étude à trois niveaux (figure 13).

Le premier niveau correspondait à délimiter trois parties dans le bassin versant de la Reraya, en l'occurrence : la partie amont – moyenne et avale. La partie amont a été exclue de cette étude étant donné qu'elle est formée de socle à matériel géologique compact peu affecté par l'érosion hydrique (ravinement). Les prélèvements se focaliseront alors uniquement dans la partie moyenne et avale. La partie moyenne, comme nous l'avons déjà évoquée, est composée de deux sous bassins ; Ait Mezzane et Ait Imernane, deux affluents de la Reraya qui se joignent à l'amont du village Asni.

Le deuxième niveau de stratification est obtenu à partir de la nature lithologique des faciès composant le bassin de la Reraya. Les points d'échantillonnage sont implantés quand on a un changement de faciès lithologique des affleurements en raison de deux points échantillons par faciès. La carte des faciès géologique est obtenue à partir de la Carte géologique (1/500000) du Maroc détaillée à partir des images satellites de Google Earth.

Le troisième niveau de stratification a été guidé par le réseau de drainage du bassin versant. Les échantillons sont choisis à proximité des ravins étant donné qu'ils constituent des zones à dynamique érosive active. Le réseau de drainage a été élaboré à partir d'un modèle numérique de terrain à 12,5 m de résolution.

Les paires de points sont choisies d'une manière espacée.

station	faciès	x	y
1	schiste viséen	31.283385	-7.959546
2	argile/dolomie	31.281992	-7.971005
3	marne gréseux	31.276003	-7.967614
4	argile rouge	31.246467	-7.996742
5	basalte vert	31.226436	-7.975881
6	pellites gréseux	31.176369	-7.940019
7	grès triasique	31.185900	-7.947525
8	niveau gréseux	31.155667	-7.923770
9	diorite quartzique	31.160574,	-7.929061

Tableau 1 : Coordonnées des points

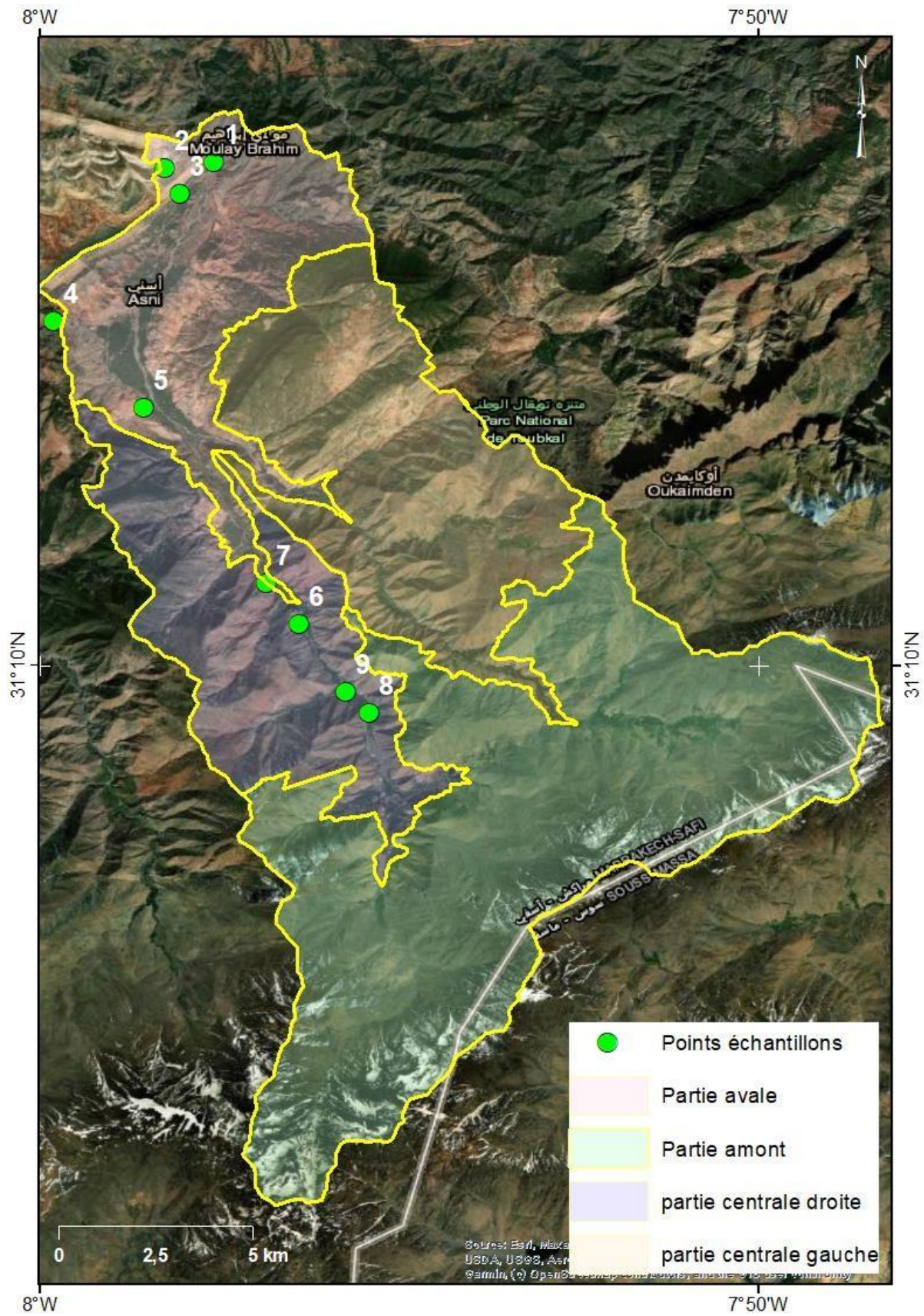


Figure 13 : Carte de la répartition des points échantillons et divisions du bassin versant de la Reraya.

III.2 Méthodes de prélèvement :

On a besoin tout d'abord dans notre activité, d'un marteau géologique, une truelle et de sacs en plastique avec des étiquettes pour écrire le nom du faciès ainsi que le numéro de la station de chaque prélèvement.

La prise des échantillons commence par les schistes à côté du pied de Moulay Brahim, comme il est mentionné dans le tableau ci-dessus. Ensuite, on suit le même ordre jusqu'au socle précambrien (granites et andésites) dans les environs d'Imlil. On prend, dans un sac d'échantillon, toutes les tailles des fragments du matériau disponibles sur le terrain, depuis les plus gros (cailloux et graviers) jusqu'au sol (mélange de sable, limon et argile), sauf pour le socle où on ne possède pas de sol sous l'effet de la dureté des formations.

Au moment de la prise du sol, il est nécessaire d'éliminer les impuretés et de prélever une épaisseur de 15 cm depuis la surface, afin de préserver les caractéristiques intéressantes.

En terminant cette opération, on prend les échantillons au laboratoire. Nous nous assurons d'abord de la nature des roches importées déterminée sur le terrain, avant de commencer l'étape de l'analyse pratique.

III.3 Analyses aux laboratoires :

Après le prélèvement des échantillons, on passe à la partie expérimentale afin d'élaborer les données de mesures qui vont nous aider à estimer l'érodibilité K de notre bassin versant "Reraya". Nos mesures pour ce projet vont concerner 3 manipulations : une analyse physique qui s'intéresse à la granulométrie du sol, et deux analyses chimiques qui mettent en évidence la conductivité électrique et la mesure de la teneur en CaCO_3 du sol.

3.a. Analyses granulométriques :

Le sol est un mélange de particules de dimensions différentes, ayant une composition physique et minéralogique différentes. Pour cette raison le sol est un milieu hétérogène. Dès lors il est important d'individualiser avec précision sa composition par des analyses granulométriques ou on est besoin d'un tamisage, des tamis universels selon des normes européennes qui contiennent différentes tailles de l'ouverture de la maille, et aussi une balance de précision.

Pour la méthode, on met la série des tamis sous un ordre décroissant du haut vers le bas dans un tamisage, on ajoute un échantillon de sol sec de masse (M) qui va être secoué mécaniquement à travers la série de tamis, on

tamise pendant 10 min. Les grosses particules sont piégées au-dessus de chaque tamis tandis que les petites particules peuvent traverser.

À la fin de l'essai :

- La masse de particules retenues sur chaque tamis est mesurée (M').
- Le pourcentage de particules retenues à chaque tamis est calculé :

$$\% \text{ retenues} = (M'/M) * 100$$

3.b. Mesure de la conductivité électrique :

La mesure de conductivité a pour raison d'estimer la teneur du sol en minéraux, et par suite déterminer son degré de résistance à la force d'érosion.

La manipulation a inclus deux étapes : la première s'intéresse à la préparation des solutions des échantillons, pendant que la deuxième concerne les mesures à l'aide du conductimètre.

▪ Préparation des échantillons :

A cette phase on a travaillé avec le protocole suivant :

On prend 10g de chaque échantillon tamisé à 2mm (de préférence 10g de limon et argile car ils sont plus fins et donnent des résultats plus exacts).

Ensuite on ajoute 50ml d'eau distillée à l'échantillon pour former une solution (1/5).

Puis, à l'aide d'un agitateur magnétique, on fait agiter les solutions pendant 30min pour bien mélanger et obtenir de bons résultats.

A la fin de l'agitation, on laisse les solutions se décanter pendant au moins une demi-heure, pour avoir des éléments solides au-dessous de l'eau qu'on va exploiter lors de la mesure.

Dernièrement, en recours à la filtration de solution en cas de présence des matières en suspension dans l'eau.

▪ Mesure de la conductivité électrique :

La mesure se fait directement avec un conductimètre, en intégrant les deux électrodes (le premier de température et le deuxième de conductivité) dans la solution sans toucher les précipités solides, on attend la stabilisation des résultats et on note les données.

3.c. Mesure de la teneur en CaCO_3 :

Afin de déterminer le taux de (CaCO_3) d'un sol, on recourt au calcimètre de Bernard selon la norme française NF P 94-048. Son principe se base sur la mesure du volume V_b de dioxyde de carbone (CO_2) dégagé par une masse m d'échantillon sous l'action d'acide chlorhydrique en excès suivant cette réaction :



On peut fabriquer un calcimètre avec :

- une ampoule
- un tube gradué de 100 cm^3
- un erlenmeyer de 100 cm^3
- un petit tube en verre environ deux fois moins haut que l'erlenmeyer
- deux bouchons à 1 trou adaptés au tube gradué et à l'erlenmeyer
- 1,5 m de feuille anglaise

Prévoir :

- une balance à 0,01g pour peser l'échantillon.
- un portoir pour le petit tube
- une grosse pince à dissection
- un peu de pâte à modeler (non attaquée par l'acide)
- une pipette graduée
- HCl assez concentré

Le calcul de CaCO_3 fait tout d'abord par une préparation d'une solution saturée de NaCl (environ 1/4 de litre) ; la verser jusqu'à mi-hauteur de l'ampoule. Puis on pèse 0.5g d'échantillon et on le place dans l'erlenmeyer. A l'aide d'une pipette, on verse dans un petit tube de l'HCl assez concentré. A l'aide d'une grosse pince, on met en place le tube dans l'erlenmeyer et on bouche ce dernier. L'étape suivante est de modifier la hauteur de l'ampoule de manière à ce que l'eau salée soit au même niveau dans l'ampoule et le tube gradué. Le contenu de l'erlenmeyer sera alors à la pression atmosphérique, on note le niveau à cette étape. Après avoir finir la préparation on passe par la suite à la phase de mesure. Cette phase est débutée par l'action d'incliner l'erlenmeyer afin de faire couler l'acide sur

l'échantillon. On repose après l'erlenmeyer et on attend la fin de l'effervescence. La pression dans le tube gradué est alors supérieure à la pression atmosphérique, il convient de rétablir cette dernière en descendant l'ampoule jusqu'à obtenir le même niveau dans l'ampoule et le tube. Par conséquent le CO_2 dégagé devient à pression atmosphérique. Connaissant le volume de CO_2 dégagé (niveau final - niveau initial), on fait un produit avec une constante de 0.432, et on divise par la masse d'échantillon ($m=0.5\text{g}$). la valeur obtenue est la teneur en CaCO_3 .

IV. L'érodibilité selon le modèle USLE

L'équation universelle de pertes en sol (Universal Soil Loss Equation : USLE) établie par Wischmeier et Smith en 1978 s'applique à la quantification des pertes en sol par érosion en nappes. C'est une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique : agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et pratiques antiérosives :

$$\mathbf{A=P \times C \times LS \times K \times R}$$

A = perte annuelle moyenne de sol (t/ha/an)

R = indice d'érosivité potentielle de la précipitation (MJmm/ha/ha/an)

K = indice d'érodibilité des sols à l'érosion hydrique (tonne.heure/Newton.hectare)

LS = facteur topographique dépendant de la pente et sa longueur

C = facteur de culture, incluant le couvert végétal (occupation du sol) ;

P = facteur de conservation et d'aménagement.

La répétition des expérimentations sur différents types de sols a permis à Wischmeier & Smith (1978) de développer une équation pour le calcul de l'érodibilité des sols :

$$\mathbf{100K=2,1.M^{1,14}.10^{-4}(12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3)}$$

Où :

M : calculé par la formule $M = (\% \text{ sable fin} + \text{ limon}). (100 - \% \text{ argile}),$

a : est le pourcentage de matière organique.

b : est le code de la perméabilité (1à6), avec, 1 pour les sols à drainage rapide (>60mm/hr) et 6 pour les sols à drainage très lent (<1mm/hr).

c : est le code de la structure (1à4), avec 1 pour les structures fondamentales et 4 pour les structure très grossières.

Vu le manque de données des différentes valeurs de la matière organique, de la perméabilité, de la texture et de la structure, on se retrouve face à un problème de calculer de facteur K des différentes zones du bassin versant de la Reraya. Ceci nous oblige à travailler par la formule suivante :

$$\mathbf{Kr=311,63-4,48 \times (\%SM > 2mm + \%Sable) + 613,40 \times EC + 6,45 < \%CaCO3 \text{ active}}$$

Cette équation se base sur trois variables qui sont la granulométrie (pourcentage des graviers et des sables), la conductivité électrique du sol, ainsi que sa teneur en CaCO3 active.

V. Résultats des analyses :

Après avoir achevé les analyses expérimentales des trois manipulations, on a obtenu les résultats affichés dans les tableaux suivants :

- Analyses granulométriques :

Echantillon	N Tamis	Tamis 1 (2mm)		Tamis 2 (0,05mm)		Tamis 3 (fond)	
		Masse retenue (g)	% retenu	Masse retenue(g)	% retenu	Masse retenue (g)	% retenu
Schiste		292,45	86,1	43,37	12,76	3,86	1,14
Argile blanche		22,99	4,29	73,2	13,64	440,25	82,07
Dolomie		380,71	82,1	51,28	11,05	31,67	6,85
Marne gréseux		205,91	49,38	153,59	36,88	57,32	13,74
Marne argileux		212,61	59,33	100,95	28,17	44,75	12,5
Argile rouge		76,76	15,96	140,51	29,22	262,62	54,82
Basalte vert		476,41	79,24	69,1	11,5	55,7	9,26
Grès triasique		298,5	70,85	106,37	25,25	16,47	3,9

Tableau 2 : Résultat des analyses granulométriques

- Mesure de la conductivité :

Echantillon	Schiste	Argile blanche	Dolomie	Marne gréseux	Marne argileux	Argile rouge	Basalte Vert	Grès triasique
C·E ($\mu S/cm$)	351	4300	184	1264	845	309	186.4	125.6
T ($^{\circ}C$)	24	24	23.7	24	24.6	23.8	23.8	23.7

Tableau 3 : Résultat de la mesure de la conductivité

- Mesure de la teneur en CaCO₃ :

Echantillon	Schiste	Argile blanche	Dolomie	Marne gréseux	Marne argileux	Argile rouge	Basalte vert	Grès triasique
Masse (g)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Vi	32	31.5	31.5	32	32.5	31.5	32	32
Vf	53	38.5	39	67	76.5	38.5	32	32
ΔV	21	7.5	7.5	36	44	7	0	0
%CaCO ₃	18.144	6.048	6.48	30.24	38.016	6.048	0	0

Tableau 4 : Résultat de la teneur en CaCO₃

VI. Discussion :

- Article A. Merzouk, G.R. Blake, 1991. « indices for the estimation of interrill erodibility of Moroccan soils”.

Le facteur K (érodibilité selon K-factor dans l'équation universelle USLE de Wischmeier et al. (1971), calculé à partir du nomographe des 9 échantillons ne montrent aucune corrélation avec le Kr développé par le modèle (Figure 14).

Néanmoins, le Kr est fortement corrélé ($R^2 = 0.95$) avec l'évaluation des pertes en sol estimée dans les parcelles expérimentales pour les 9 types de sol (figure 15).

	Coarse fragments, >2 mm	Coarse sand, 2-0.1 mm (%)	CaCO ₃ , total (%)	EC, S.m]	K (USLE) (t ha h)·(ha MJ mm)–1	Kr indice (modèle)	perte en sol (t/ha/an)
Aine A	33,5	24,4	0	0,0207	0,375	64,93538	82
Biad	1,8	2,8	61,2	0,0308	0,283	704,59352	614
Calci	23,4	30	19	0,0276	0,224	211,85884	170
Hamri	7,5	6,1	5,8	0,017	0,303	298,534	294
P. Vert	2,5	1	0,7	0,0276	0,217	317,39414	380
Sable	0	56,2	0	0,0000 10023	0,255	59,8601481	70
Tlita	18,8	13,2	0	0,095	0,236	226,543	190
Trias	7,1	8,7	9,74	0,0164	0,566	313,71902	299
Vert.	0,5	0,8	0,84	0,278	0,178	481,74836	504

Tableau 5 : Erodibilité selon USLE, perte en sol, variables du modèle et indice d'érodibilité selon modèle.

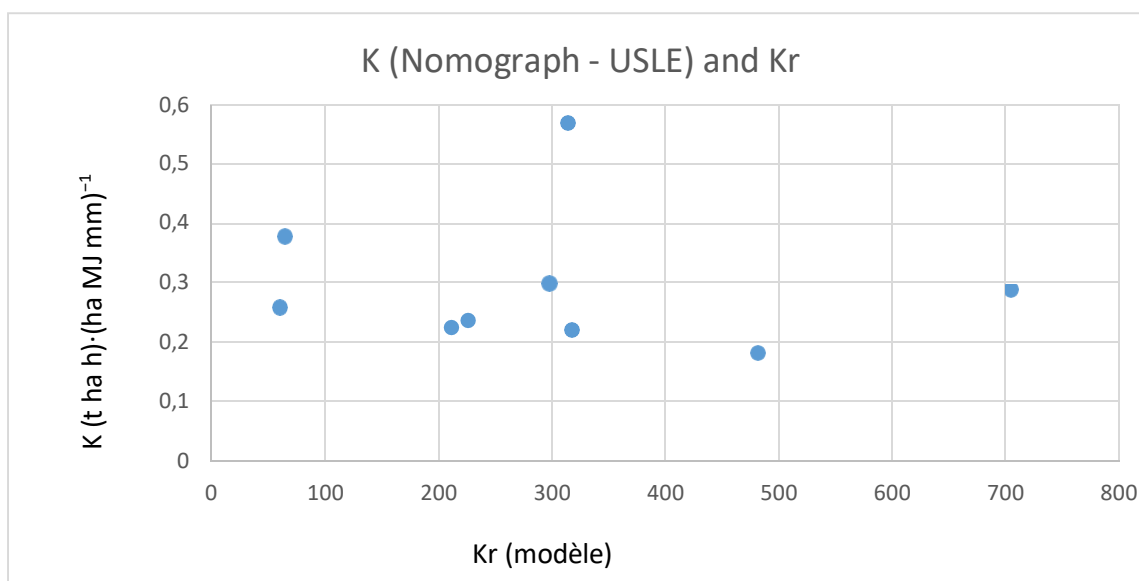


Figure 14 : Graphe qui montre la relation entre K (Nomographe-USLE) et Kr (modèle)

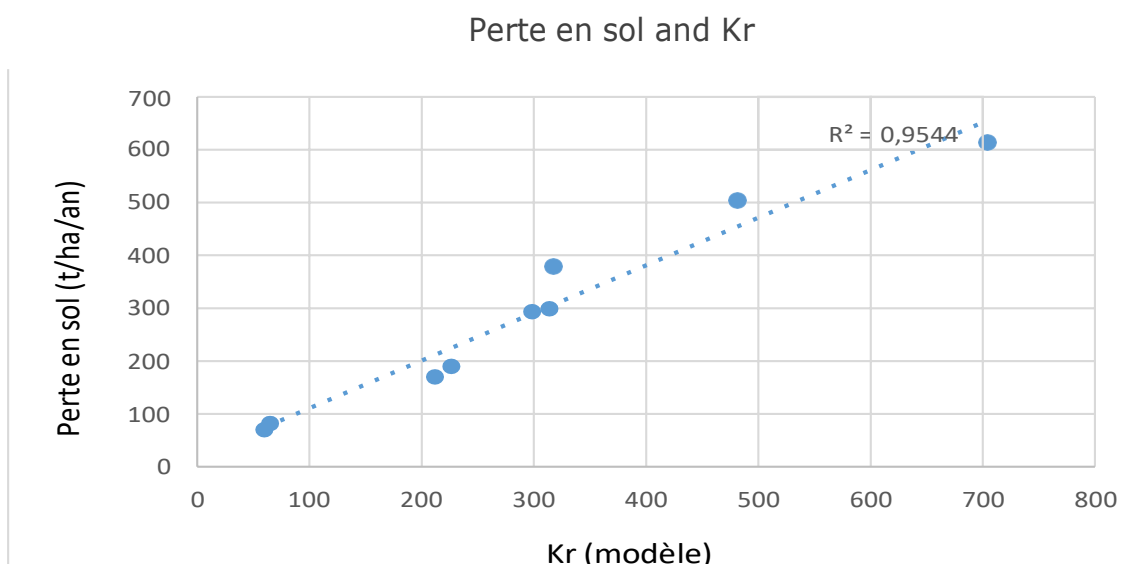


Figure 15 : Graphe qui montre la relation entre la perte en sol (t/ha/an) et Kr (modèle)

Le modèle développé par A. Merzouk, G.R. Blake (1991) ne permet pas une estimation quantitative directe de l'érodibilité mais il donnera une évaluation des pertes en sol par érosion hydrique que peuvent connaître les sols marocain. Ainsi, le Kr développé est un indice de classement relatif des sols selon aptitude à l'érosion (érodibilité).

- Calcul de l'érodibilité relative des sols dans le bassin de la Reraya.

Les valeurs calculées du facteur Kr d'érodibilité (fonction 1) propre à chaque échantillon collecté dans le bassin versant sont données dans le (tableau 6).

On a utilisé le modèle d'érodibilité qui se base sur les trois caractéristiques traités (granulométrie (fragment > 2mm et sable fin), conductivité électrique (s/m), teneur en CaCO₃ (%)).

Fonction 1 :

$$Kr = 311,63 - 4,48 \times (\% \text{fragments} > 2\text{mm} + \% \text{Sable}) + 613,40 \times EC + 6,45 \times \% \text{CaCO}_3 \text{ active}$$

Echantillon	T (°C)	C.E (μS/cm)	%CaCO ₃	Coarse fragments, >2 mm, %	Coarse sand, 2-0.1 mm, %	Total fragment >2mm et sable fin	Kr	Kr standardisé
Schiste	24	351	18,144	86,1	12,76	98,86	7,28	0,18
Argile blanche	24	4300	6,048	4,29	13,64	17,93	534,07	1
Dolomie	23,7	184	6,48	82,1	11,05	93,15	-52,60	0,09
Marne gréseux	24	1264	30,24	49,38	36,88	86,26	197,74	0,48
Marne argileux	24,6	845	38,016	59,33	28,17	87,5	216,63	0,51
Argile rouge	23,8	309	6,048	15,96	29,22	45,18	167,18	0,43
Basalte Vert	23,8	186,4	0	79,24	11,5	90,74	-83,45	0,043
Grès triasique	23,7	125,6	0	70,85	25,25	96,1	-111,19	0

Tableau 6 : Résultats des analyses des trois variables du modèle d'érodibilité relative.

À partir des valeurs de Kr standardisé, il ressort que les 9 types de sol-substrats de la Reraya peuvent être ordonnés selon l'indice d'érodibilité Kr qui traduit leur aptitude à l'érosion.

Argile blanche > Marne argileux > Marne gréseux > Argile rouge > Schiste > Dolomie > Basalte Vert > Grès triasique.

Il ressort également de ces résultats les conclusions suivantes :

- Relation Kr et fragments grossiers : on note une forte corrélation négative ($R^2 = 0,7134$) entre ces deux variables. L'érodibilité relative diminue quand la part des fragments grossiers augmente (Figure 16). En effet, les

éléments grossiers agissent comme un mulching (protection) contre l'impact des pluies et l'écoulement superficiel.

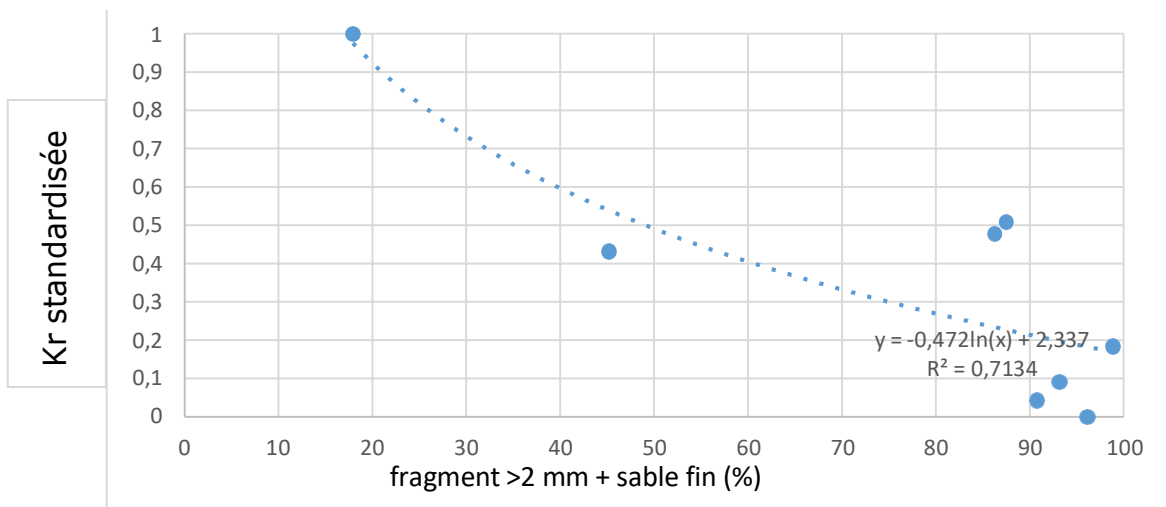


Figure 16 : Relation logarithmique entre Kr et fragments grossiers des sols étudiés.

- Relation entre Kr et la conductivité électrique (C.E.): le coefficient de détermination de la relation entre Kr et le C.E. ($R^2 = 0,9098$) montre une corrélation positive très forte entre ces deux variables. En effet plus la teneur en sels (CE élevé) est grande plus l'érodibilité est forte (figure17). Les sels dissous par les ruissellements lors des évènements pluvieux contribuent à l'augmentation de la porosité des fragments et à leur fragmentation.

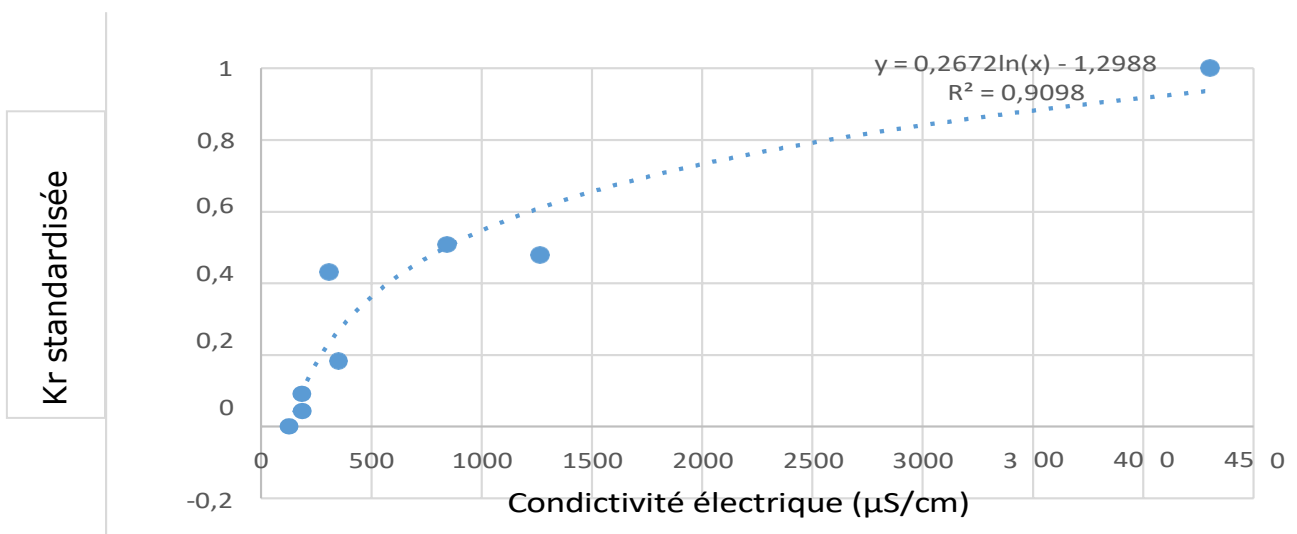


Figure 17 : Relation logarithmique entre Kr et Conductivité électrique des sols étudiés.

- Relation K_r et la teneur en carbonate (CaCO_3) : il est reconnu que les sols riches en carbonates possèdent une érodibilité élevée.

Dans la zone étudiée, les sols riches en carbonate sont les sols « Marne argileux » et « Marne gréseux ». Ces derniers ont une érodibilité moyenne par rapport au sol « Argile blanche », qui s'est montré très érodible. En effet, la grande valeur de K_r de l'Argile blanche est due à leur composition dominante (>82 %) d'éléments fins à très fins (argile et limons). Ces sols sont très friables, ce qui augmente drastiquement leur aptitude à l'érosion.

Après traitement par le logiciel ArcGis, la (figure 18) est élaborée, montrant la distribution du facteur d'érodibilité K dans le bassin versant de la Reraya :

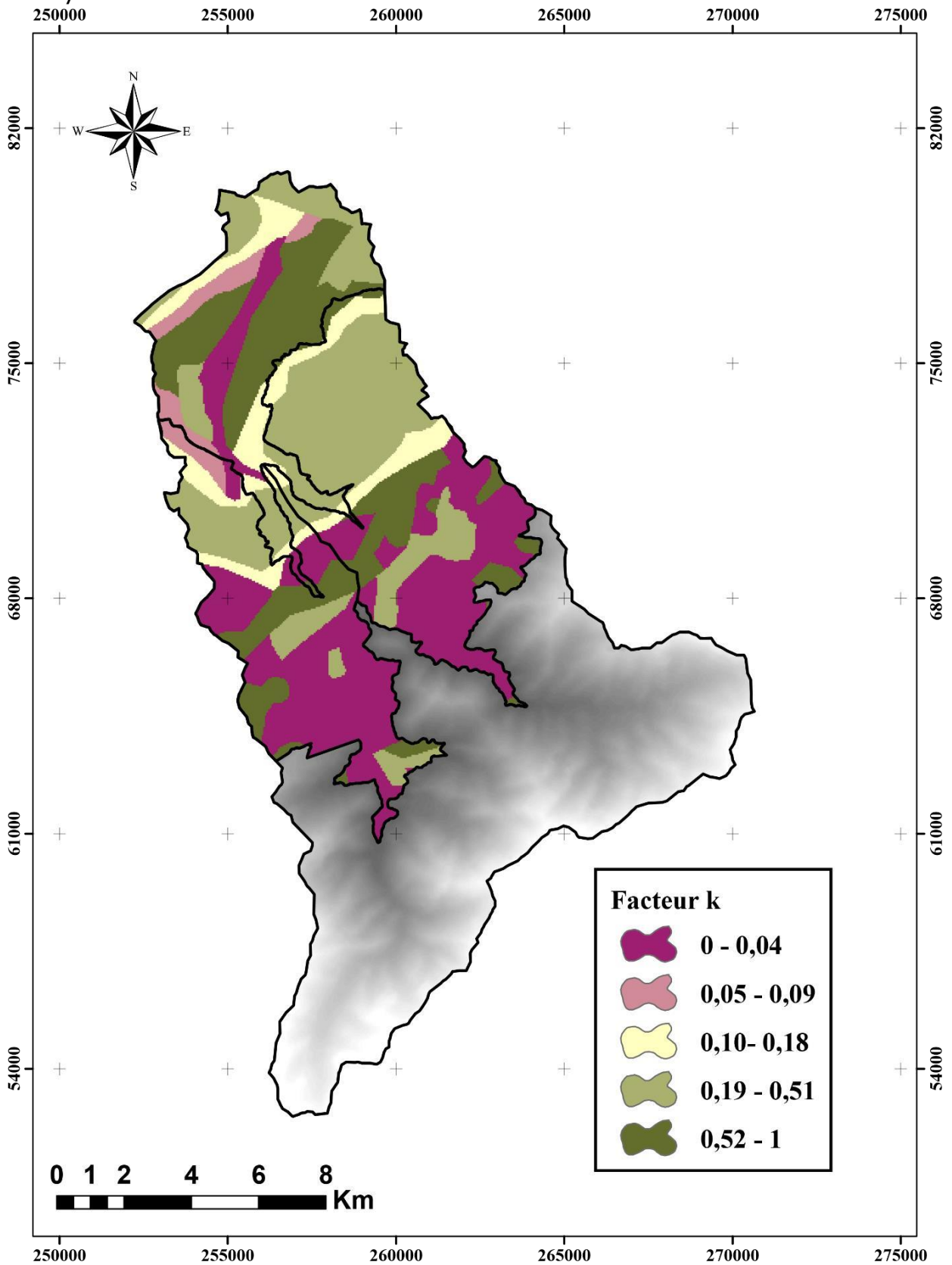


Figure 18 : Carte de Distribution du facteur K dans le bassin Reraya

Conclusion :

L'objet de cette étude est d'estimer l'érodibilité relative des sols dans le bassin de la Reraya à partir de trois variables selon le modèle développé par A. Merzouk, G.R. Blake, (199). Ce modèle se base uniquement sur la granulométrie (fragments > 2mm et sable fin), la conductivité électrique (s/m) et la teneur en CaCO₃ (%)) pour estimer l'érodibilité relative avec une exactitude de 98 %.

Le protocole expérimental de notre estimation a été réalisé à partir de 9 échantillons de sol collectés dans les 9 facies lithologiques constituant les affleurements de la Reraya. Les échantillons ont été analysés au laboratoire pour évaluer les paramètres impliqués dans le modèle A. Merzouk, G.R. Blake, (199).

Les résultats de nos études sur l'érodibilité dans le bassin versant de Reraya ont des implications significatives pour l'estimation de l'érosion hydrique dans la région et ouvrent la voie à de nouvelles perspectives pour améliorer les modèles de calcul de l'érodibilité.

L'une des principales implications de nos résultats est la prise de conscience de l'importance de considérer des variables supplémentaires dans l'estimation de l'érosion. En particulier, l'utilisation de la matière organique comme paramètre dans les modèles de calcul de l'érodibilité peut fournir des informations précieuses sur la stabilité des sols et leur susceptibilité à l'érosion. La matière organique joue un rôle clé dans la formation et la stabilité des agrégats du sol, ce qui influence directement leur résistance à l'érosion hydrique.

De plus, la friabilité du matériel géologique est un autre aspect important à prendre en compte. La friabilité, qui fait référence à la facilité avec laquelle un matériau se désintègre ou se décompose, peut influencer la sensibilité d'un sol à l'érosion. En incluant la friabilité dans les modèles de calcul de l'érodibilité, nous pouvons obtenir une estimation plus précise de la vulnérabilité d'un bassin versant à l'érosion hydrique. En effet, en complément des paramètres précédemment mentionnés, l'inclusion de la dureté ou de la compaction du sol dans l'évaluation de l'érodibilité peut apporter une compréhension approfondie des processus d'érosion. La dureté du sol fait référence à sa résistance mécanique, c'est-à-dire la difficulté pour les particules du sol de se détacher et d'être entraînées par les agents érosifs tels que l'eau ou le vent.

Ces perspectives d'amélioration du modèle de calcul de l'érodibilité soulignent l'importance de la recherche continue et du développement de nouvelles méthodologies pour une évaluation plus précise des processus

d'érosion. Cela a des implications pratiques pour la gestion et la prévention de l'érosion, car une meilleure compréhension de la stabilité des sols et de leur sensibilité à l'érosion permet de développer des stratégies adaptées pour protéger les bassins versants.

Références bibliographiques :

Abdelli M., 2007. Problématique et enjeu de l'envasement. L'expression. Du 05 Septembre 2007.

Administration des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols .1999. Quantification de l'érosion hydrique et de la sédimentation.

Ben Slimen Abir.2013. Rôle de l'érosion ravinatoire dans l'envasement des retenues collinaires dans la Dorsale Tunisienne et le Cap Bon. Thèse de doctorat, présentée au Centre International d'études supérieures en Sciences Agronomiques, Montpellier Sup Agro et à l'Institut National Agronomique de Tunisie (INAT).

Blanco,H. & Lal,R., Eds.2008. Principles of Soil Conservation and Management. Springer, New York.

Chaponniere.A., 2005. Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant semi-aride. Cas du bassin versant du Rheraya (Haut Atlas marocain). Thèse de Doctorat de l'institut national agronomique, Paris-Grignon, France, 223p .

Diallo.D & Roose.E & Barthès.B, 1999.- Comparaison d'un test simple d'érodibilité des sols et de mesures sur parcelles d'érosion dans le bassin versant de Djitiko (Mali sud), pp168-175, Bulletin du RESEAU EROSION n°19

DRE., 1988. Carte géologique et rapport de la direction régionale de l'eau.

Flanagan, D.C. and Nearing, M.A.1995. USDA Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation.

Foster G.R., 1990. Process – Based modelling of soil erosion by water on agricultural land. In: Soil erosion on agricultural land (J. Bourdman, IDL. Foster, JA. Dearing, eds). John Willey and Sons Ltd. Chichester (UK), 229-245

FOX D.M., BRYAN R.B.,1999. The Relationship of Soil Loss to Slope Angle for Interrill Erosion. Catena, 38, p. 211-222.

Girard, M .2005. Sols et environnement. Paris, DUNOD, 816 p.

Gourfi A., Daoudi L., de Vente J. A new simple approach to assess sediment yield at a large scale with high landscape diversity: an example of Morocco. *J. Afr. Earth Sci.* 2018.

Hjulstrom, F. 1935. Studies of Morphological Activity of Rivers as Illustrated by the River Fyris. *Bulletin of the Geological Institute University of Uppsala*, 25, 221-527.

Jaoued Moez. 2007. Modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant du KEBIR-MELLIANE et gestion des eaux du barrage Bir M'cherga (Tunisie septentrionale. thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, Tunisie, p104, 105.

Maimouni S., El-Harti A., Bannari A., Bachaoui E. M. date. Water erosion risk mapping using derived parameters from digital elevation model and remotely sensed data. *Geo Spatial Inf. Sci.* 2012;15:157–169.

Merzouk.A & Blake.G.R.,1991. Indices for the estimation of interrill erodibility of Moroccan soils .

Morgan R.P.C., Quinton J.N. and Rickson R.J. 1992. EUROSEM: Documentation manual (Version1). Silsoe College, Silsoe.

Morgan R.P.C., Quinton J.N., Smith R.E., Govers G., Poesen J.W.A., Auerswald K., Chisci G., Torri D. and Styczen M.E. 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*; 23: 527-544.

Nearing, M.A.,1989. A Process-Based Soil Erosion Model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology.

Ouallali,A, 2016. Evaluation et cartographie des taux d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Arbaa Ayacha (Rif occidental, Nord Maroc) *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, 2016, n° 38, 65-79.e-ISSN : 2458-7184.

Perrin C., Michel C. and Andreassian V. 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, 242: 275-301.

Rochdane.S, Messouli M . Impact des activités des populations et des changements climatiques sur les services éco systématiques au niveau du bassin Ghiraya au Maroc .

Roose E.1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique de la FAO. N° 70, 420p.

Wischmeier, W.H., et D.D. Smith. 1978.« Predicting Rainfall Erosion Losses - À Guide to ConservationPlanning ». Agriculture Handbook, n° .537, Department of Agriculture Science and Education Administration, Washington, District of Columbia USA. U.S.

- Site internet :

www.ReasearchGate.net www.ResearchGate.net

, Bassin versant de Tensift.

www.ResearchGate.net , Carte du bassin versant du Reraya illustrant le découpage en cinq tranches altitudinales utilisées par CemaNeige

www.aquaportail.com Erosion par ravines

www.Saidi.ma