

DEDICACES

Je dédie ce travail à ma famille et mes Professeurs :

Mon cher père, mon gardien spirituel, ma source de soutien moral et matériel. Tu étais toujours près de moi pour m'encourager et me conseiller. Je ne trouve pas les mots pour t'exprimer mon amour, ma gratitude pour tes sacrifices et surtout mon grand respect. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation. Puisse le tout puissant te procurer du bonheur de la bonne santé et très longue vie Ma chère mère, Affable, honorable, aimable : Tu représente pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et L'exemple du dévouement qui n 'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. A mes chères sœurs Oumaima et Insaf les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Mes fidèles compagnons dans les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite. Que le tout Puissant nous garde toujours ensemble.

A tous mes professeurs : leur générosité et leurs soutiens m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et mal loyale considération.

A tous mes amis et collègues : ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie...

Je vous aime tous

Boumeaza Oussama

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier dans un premier temps, toute l'équipe pédagogique de la faculté des Sciences Ben Msik, et en particulier au département de Biologie pour la réussite de la formation durant le cycle.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon encadrant Pr. FOUGRACH Hassan professeur à la faculté des sciences Ben Msik son soutien et ses recommandations au cours de la réalisation de mon travail de fin d'étude. Aucun mot ne saurait exprimer ma très haute considération et ma grande admiration pour son ardeur au travail.

Mes remerciements sincères à mon Co-encadrant Pr. KHATTABI Abdellatif professeur à l'Ecole Nationale Forestière des Ingénieurs de Salé et Président de l'AMSR, pour son aide précieuse et minutieuse, et pour la disponibilité permanente qu'il m'a prodigué tout au long de la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier Monsieur le Pr. BELHOUARI Abderrahmane et Pr. Madame RACHDI Bouchra professeur à la faculté des sciences Ben Msik, et le doctorant chercheur MELIHO Modeste à l'ENFI., pour leurs précieux conseils, leur aide et leur disponibilité durant toute la période de réalisation de ce travail. Qu'ils trouvent ici le témoignage de mon profond respect.

Je voudrai remercier également les membres de jurys qui ont accepté d'évaluer mon travail.

RESUME

Au Maroc, le problème de l'érosion hydrique se pose avec acuité, surtout dans les montagnes aux pentes raides. Sous la pression démographique, les milieux forestiers, qui occupent les pentes les plus fortes, sont peu à peu dégradés ou cultivés et n'assurent plus leur rôle environnemental de protection des sols. L'amélioration de nos connaissances sur l'érosion hydrique est d'un grand intérêt, surtout dans une zone tel que le bassin versant d'Ourika dans le Haut Atlas.

*Ce travail a été réalisé en particulier au département de Biologie pour couronner les deux années de formation de master spécialisé « **Sciences de l'Environnement & Développement Durable** » de la Faculté des Sciences Ben Msik , Université Hassan II de Casablanca et en parallèle dans le cadre de la convention de collaboration établie entre la Faculté des Sciences de Ben Msik, et l'Association Marocaine des Sciences Régionales, d'autre part, relative à la mise en œuvre de certaines activités du projet GIREPSE (www.gire-pse.com) financé par le centre de Recherche et de Développement International, Canada*

Le projet GIREPSE s'intéresse de tout près au bassin versant de l'Ourika en vue de développer des réponses efficaces et équitables à la minimisation des risques climatiques, à l'amélioration du système hydro-écologique et à la valorisation des biens et services environnementaux.

Dans ce contexte, ce travail a pour objectif la quantification de l'érosion hydrique par la simulation de pluie à l'échelle de placette de 1 m² selon plusieurs occupations, une évaluation de l'état de surface avant simulation et des analyses de laboratoire ont été nécessaires. Une analyse des sols a été entreprise aux Laboratoires de l'Ecole Forestière d'Ingénieurs de Salé. L'analyse des paramètres a été réalisée dans la perspective de spatialiser l'érosion à l'aide des Systèmes d'Information Géographiques et de quantifier l'érosion au Laboratoire LADES, Unité des SIG et Télédétection, de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de Mohammedia, afin d'identifier les zones sensibles.

Les résultats obtenus nous ont permis de quantifier les risques de ruissellement et d'érosion selon la nature de l'occupation du sol, de comprendre l'origine de l'érosion hydrique, sa distribution et de trouver des indicateurs facilement accessibles sur le terrain, permettant de développer des moyens de prévention et de contrôle réalistes.

SUMMARY

In Morocco, the problem of water erosion is pivotal especially in the mountains with rough slopes. Due to demographic pressure, forest habitats, which covers the steepest slopes, knows gradable degradation or cultivation and no longer ensures their environmental role as soils' protector. Knowledge improvement about water erosion is of paramount importance, mainly in an area like the Ourika basin side in the High Atlas.

This work was made particularly at the Biology Department to crown two years of training to master specialized "Environmental Science & Sustainability" of the Faculty of Sciences of Ben Msik, Hassan II Casablanca University, and in parallel within the collaboration agreement established between the National Forestry School of Engineers of Salé, and the Moroccan Association of Regional Science, concerning the implementation of certain activities of GIREPSE project ([www .gire-pse.com](http://www.gire-pse.com)) funded by the Centre for Research and International Development, Canada

The GIREPSE project is closely interested in the Ourika basin side with the aim to find efficient and equitable solutions to minimize climatic risks, to improve hydro-ecological system and valorize environmental properties and services.

In this respect, this very work aims to quantify water erosion through rain simulation at 1m² scale depending on many places: it was necessary to evaluate the surface state before laboratory simulation analyses. A soil analysis was undertaken at Laboratories of Salé Forestry School of Engineering. The analysis of parameters was carried out in view of the erosion spatialize using Geographic Information System and quantify the erosion at LADES Laboratory of GIS and Remote Sensing Unit of the Faculty of Arts and human Sciences of Mohammedia to identify sensitive areas.

The results reached allow us to quantify the risk of water streaming and erosion depending on the nature of soil occupation, to understand the origin of water erosion; its distribution and to find easy accessible indicators on spot; which allows concrete means of prevention and control.

Organismes d'accueil :

L'École Nationale Forestière d'Ingénieurs (ENFI) fondée en 1968 à Sale est une institution de l'état marocain formant des cadres supérieurs en matière de Foresterie et Ressources Naturelles, à l'échelle nationale et régionale. Elle a produit l'essentiel des ingénieurs pour le secteur des « Eaux et Forêts et Lutte Contre la Désertification » du Royaume. La contribution de l'ENFI en matière de recherche développement est très significative. Les résultats des travaux de recherche réalisés dans le cadre des mémoires de 3e cycle et par les enseignants-chercheurs ont trouvé une large application dans les stratégies forestières et les projets de développement des zones de montagne.

La mission principale assignée à l'ENFI est la formation de l'Ingénieur des Eaux et Forêts. L'École dispense, également, des sessions de formation continue. Elle demeure habilitée à effectuer, pour le compte des administrations et des particuliers, toutes études et recherches ayant trait à la foresterie et la gestion durable des ressources naturelles et environnementales. L'ENFI participe, également, aux programmes de recherches et de projets de développement, conduits par des organismes nationaux et internationaux.

Introduction :

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 (Girard et al, 2005).

L'Erosion des sols débute presque toujours par une dégradation de la structure à cause d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules de sol (Hamma 2004).

C'est un des processus majeurs de la dégradation des sols, à l'origine d'une perte annuelle estimée à 25 milliards de tonnes de sol à l'échelle mondiale. Ce phénomène naturel dû au vent, à la glace et surtout aux pluies, dégrade les couches superficielles des sols en déplaçant les matériaux les constituants. Lorsque le sol n'a plus la capacité d'absorber les pluies, l'excédent d'eau ruisselle à sa surface et emporte les particules de sols en générant des rigoles et des ravines. L'érosion est souvent renforcée par les modifications paysagères apportées par l'homme : intensification de l'agriculture, surpâturage, déforestation, cultures à faible recouvrement, artificialisation et imperméabilisation des surfaces (Girard et al, 2005).

L'irréversibilité du phénomène justifie qu'on lui accorde une attention particulière (Iyves 2003). Ce transport d'eau et de terre, plus ou moins massif et rapide, peut générer des conséquences importantes sur un plan économique, humain et écologique : le potentiel agronomique des terres s'en trouve diminué, les risques d'inondations accrus (coulées de boue, augmentation de l'intensité et du volume des crues de rivière), et les milieux naturels dégradés.

L'érodabilité d'un sol est une estimation fondée sur les caractéristiques physiques du sol, de la vulnérabilité de ce sol à l'érosion. Elle est surtout influencée par la texture du sol, mais elle l'est également par sa structure, sa teneur en matière organique et sa perméabilité. En général, les sols qui affichent une plus grande résistance à l'érosion sont ceux dans lesquels l'eau s'infiltré plus rapidement, ceux qui sont riches en matière organique et ceux dont la structure est améliorée. Les sables, les loams sableux et les sols loameux ont tendance à être moins vulnérables à l'érosion que les limons, les sables très fins et certains sols argileux (Ritter, 2012).

Le Maroc comme pays méditerranéens n'en est pas moins touché par l'érosion, son orographie exceptionnelle est caractérisée par une dominance de substrats friables.

L'agressivité climatique et l'irrégularité des précipitations provoquent une érosion spectaculaire sur la majorité des versants Atlasiques et Rifains.

L'objectif de ce travail de fin d'étude est l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant d'Amassine au niveau du haut atlas occidental. Des tests de simulation de pluie selon les types d'occupations du sol ont été nécessaires.

Comment peut-on quantifier le phénomène d'érosion et qu'elles sont les zones les plus vulnérables?

Chapitre 1. Erosion hydrique, facteurs d'érosion et effet du couvert végétal

1. L'érosion hydrique :

Introduction

L'érosion hydrique est un phénomène complexe, qui menace particulièrement les potentialités en eau et en sol. Elle se définit comme le détachement et le transport de particules de sol de son emplacement d'origine par différents agents vers un lieu de dépôt. Donc, les trois étapes par lesquelles passe l'érosion sont le détachement, le transport et la sédimentation. Cependant, il est à signaler que la pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine du détachement, du transport et du dépôt des particules du sol arrachées (Le Bissonnais 2003).

1.1. Les principaux agents érosifs :

La pluie et le ruissellement superficiel ainsi que la gravité sont à l'origine du détachement des particules de sol, de leur transport et de leur dépôt. Donc ce détachement est lié au deux premiers agents à la fois (pluie et ruissellement). La pluie est l'agent principal de l'érosion hydrique. Son aptitude à provoquer de l'érosion est appelée érosivité, elle dépend surtout de son intensité et de l'énergie cinétique qui en résulte.

1.1.1. La pluie :

Par l'énergie cinétique d'une goutte de pluie, des particules du sol peuvent être déplacées. Ainsi, les éléments fins jaillissent tandis que des particules grossières, d'un diamètre allant jusqu'à 2 cm, peuvent glisser et subir un mouvement de reptation. Parfois les phénomènes de rejaillissement ou de saltation sont favorisés par la présence d'une mince couche d'eau à la surface du sol. Dans d'autres cas, sa présence amortit l'énergie cinétique de la goutte et contrarie donc le jaillissement. Lorsque le sol s'humidifie, trois processus se développent simultanément : la désagrégation du sol, la formation d'une pellicule de battance et l'érosion par rejaillissement (effet splash).

Les processus responsables de la désagrégation sont :

- L'éclatement, qui correspond à la désagrégation par la compression de l'air piégé lors de l'humectation et l'intensité de l'éclatement dépend du volume d'air piégé, donc de la teneur en eau initiale des agrégats et de leur porosité ;

- Le gonflement différentiel, qui intervient suite à l'humectation et la dessiccation des argiles, entraînant des fissurations dans les agrégats et l'importance de ce mécanisme dépend en grande partie de la teneur en argile des sols ;

- La dispersion physico-chimique, qui correspond à la réduction des forces d'attraction entre les particules colloïdales lors de l'humectation et qui dépend de la taille et de la valence des cations pouvant lier les charges négatives dans le sol ;

- La désagrégation mécanique qui dépend de l'énergie cinétique de la goutte de pluie.

- La formation d'une pellicule de battance est une conséquence de la désagrégation de la surface du sol et du rejaillissement des particules les plus fines qui, en se déposant, ferment la porosité superficielle du sol ;

- L'érosion par rejaillissement provoque le déplacement des particules fines de sol sur de faibles distances autour du point d'impact de la goutte de pluie, elle est à l'origine de la formation des pellicules structurales à la surface du sol et de la désagrégation des mottes de labour.

1.1.2. Le ruissellement :

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol. L'écoulement d'une lame d'eau est un moteur essentiel de l'érosion. Il détache, transporte et exporte des fragments de sol. Le ruissellement superficiel est généré soit par saturation de la porosité du sol, soit par refus à l'infiltration dû à une pluie dont l'intensité est supérieure à la capacité d'infiltration de la surface du sol.

Les principales variables qui contrôlent l'action du ruissellement sur le détachement et le transport de particules sont la pente, la vitesse et l'épaisseur de l'écoulement.

On a expliqué la réduction de l'infiltration par les facteurs suivants :

-la tension capillaire qui diminue avec l'augmentation de la teneur en eau du sol due à l'infiltration ;

-le gradient de la tension capillaire qui diminue au fur et à mesure de l'épaississement de la couche superficielle humectée ;

-le développement, à la surface du sol, d'un horizon mince qui devient moins perméable que le sol sous-jacent par le gonflement des argiles à l'humectation et par le compactage dû à la force cinétique des gouttes de pluie (Horton ,1940).

1.1.3. Gravité :

Rarement évoquée, la gravité est aussi un agent qui participe à la mobilisation et au transfert de particules à la surface du sol.

La gravité est aussi la force principale qui limite l'érosion, en s'opposant à la mise en mouvement des particules et en étant le moteur de la sédimentation (Leguédais, 2010).

1.2. Les formes de l'érosion hydrique :

1.2.1. L'érosion en nappe

C'est le stade initial de la dégradation des sols par érosion. Cette érosion en nappe entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de sa surface, autrement dit c'est une forme d'érosion diffuse.

Elle entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de l'horizon superficiel. Les énergies des gouttes de pluie et du ruissellement s'appliquent à toute la surface du sol ce qui provoque un déplacement des particules d'abord par effet "splash" à courte distance et ensuite par le ruissellement en nappe.

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

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

1.2.2. L'érosion linéaire

Lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol, il se forme d'abord des flaques; ensuite ces flaques communiquent par des filets d'eau et lorsque

ces filets d'eau ont atteint une certaine vitesse, 25 cm par seconde. Ils acquièrent une énergie propre qui va créer une érosion limitée dans l'espace par des lignes d'écoulement.

Cette énergie n'est plus dispersée sur l'ensemble de la surface du sol, mais elle se concentre sur des lignes de plus forte pente (Roose, 1994).

1.2.3. L'érosion ravine :

C'est un stade avancé de l'érosion linéaire. Lorsque les eaux de ruissellement se concentrent, elles peuvent former une ravine par creusement. Cette érosion se produit généralement dans les vallées sèches et dans les fonds de thalwegs qui constituent des chemins d'écoulements préférentiels pour l'eau qui ruisselle.

L'ampleur des dégâts causés par ces ravines dépend de la durée et l'intensité des précipitations, du type de couvert végétal, des caractéristiques du sol et des pratiques culturales (Woodward, 1999). On peut distinguer deux types de ravine : ravines en "V", ravine en "U" et ravine en tunnel.

2. Facteurs de l'érosion :

L'érosion hydrique est causée principalement par la pluie, mais l'ampleur de ce phénomène est régie par d'autres facteurs tels que l'intensité de la pluie et sa répartition saisonnière, le type de sol, la topographie du terrain, le couvert végétal et les activités humaines (Wischmeier et al. 1978 ; King et al. 1992).

2.1. L'intensité de la pluie :

C'est une caractéristique importante de la pluie : d'une part, elle joue sur le débit du ruissellement, et donc sur le détachement et la capacité de transport de l'écoulement ; d'autre part, elle influence directement le détachement du sol par le splash. Puisque les gouttes de pluie à forte intensité ont tendance à être plus grosses que les gouttes de pluie à faible intensité. La relation entre détachement de sédiments et intensité de pluie n'est pas linéaire : le détachement augmente approximativement avec le carré de l'intensité de la pluie.

Si l'intensité est doublée, le détachement est augmenté par 4 ($2^2=4$), si l'intensité augmente par 3, le détachement augmente par 9 ($3^2=9$).

2.2. La répartition saisonnière de la pluie :

La fréquence des averses est un facteur très important dans l'étude des phénomènes d'érosion. En effet, dans les pays méditerranéens et tropicaux, les pluies sont irrégulières et la presque totalité des pluies est concentrée sur une période très courte de l'année. En conséquence, le sol africain souffre d'une dégradation qui a lieu pendant une période de temps extrêmement courte (Fournier, 1967).

2.3. La topographie :

2.3.1. Pente

Plus la pente d'un champ est raide et plus cette pente est longue, plus les risques d'érosion sont grands. L'érosion hydrique augmente aussi avec la longueur de la pente à cause de l'augmentation du ruissellement. La fusion de petits champs pour en faire de plus grands a souvent pour conséquence d'allonger les pentes. Le débit de l'eau étant alors plus rapide, le transport des sédiments augmente, ce qui donne lieu à des risques accrus d'érosion et d'affouillement (Ritter, 2012).

2.3.2. L'inclinaison de la pente

Les formes d'érosion changent selon l'inclinaison de la pente. Ainsi, pour des pentes inférieures à 4%, ce sont les particules fines qui migrent. Pour des pentes supérieures à 7 %, des rigoles apparaissent. Des particules grossières sont transportées à l'intérieur de ces griffes. Enfin, au delà d'une pente de 20 %, les rigoles se creusent et deviennent de plus en plus profondes (5 à 20 cm), ce qui se traduit par une surface très accidentée (Roose, 1994).

Au Maroc, (Heusch, 1970) a montré que sur les marnes du Pré rif, l'érosion et le ruissellement diminuent lorsque la pente augmente. Il a expliqué cette réduction du ruissellement et de l'érosion par la présence de drainage oblique dans les sols fissurés (vertisols).

2.3.3. La longueur de la pente

La longueur de la pente est définie comme étant la distance du point d'origine de l'écoulement superficiel à un autre point considéré comme limitant pour la majeure portion du lieu en question et qui est :

- soit le point où la pente diminue à tel point que le dépôt commence ;
- soit le point où le ruissellement entre dans un canal bien défini, le canal étant une portion du système de drainage dont la taille ne peut être corrigée par les pratiques culturales (Wischmeier & Smith, 1957).

2.4. Le sol

2.4.1. Texture :

Un sol devient moins érodable lorsque la fraction limoneuse diminue et ceci quelque soit l'augmentation correspondante des autres fractions (sable et argile). Ceci est dû au fait que cette fraction granulométrique du sol est la plus sensible à l'érosion et à la battance.

2.4.2. Structure :

L'érodabilité d'un sol à structure plate, angulaire ou en blocs est plus importante qu'un sol à structure granulaire très fine ou fine. Cependant la structure du sol reste une propriété difficile à apprécier et aussi à quantifier.

2.4.3. La matière organique :

Une bonne agrégation augmente l'infiltration du sol et entraîne une diminution de l'érodabilité. La variation de l'érodabilité des sols est expliquée par la résistance des agrégats à la dispersion et au transport en nappe. L'augmentation de la teneur en matière organique favorise l'agrégation des particules, et l'infiltration des eaux à la surface du sol. Elle diminue donc le ruissellement (Merzouk et al. 1991).

2.4.4. L'état hydrique :

Au début d'une averse, l'eau commence à humecter le sol et à remplir progressivement les pores. Les eaux de pluie ont tendance à s'infiltrer complètement dans le sol, d'autant plus rapidement que le sol est sec. Au cours de cette phase appelée aussi phase d'imbibition, il n'y a pas de ruissellement à la surface (Albergel, 1987 ; Abdellaoui, 2005).

Comme cas particulier, sur un sol très sec, une averse intense de 10 à 20 mm/h sur forte pente occasionne un décapage spectaculaire.

Par contre, sur un sol humide proche de la saturation le ruissellement peut être déclenché rapidement si l'intensité de précipitation est supérieure à la capacité d'infiltration (Al Karkouri & al, 2000).

2.5. Pratique anthropique :

Quand l'homme exerce des pratiques culturelles inadaptées sur les versants, il peut modifier profondément le comportement hydrologique des sols. Il peut donc être à l'origine du déclenchement et de l'accélération de l'érosion. Les défrichements qu'il opère sur les forêts, le surpâturage, les pratiques culturales de labour et de semis sont des actions qui modifient l'état de surface et peuvent aggraver l'érosion avec des effets indésirables sur l'environnement et sur l'économie.

2.6. Végétation

Le risque d'érosion augmente si le sol n'est pas suffisamment protégé par le couvert végétal et/ou une couche de résidus de culture. Les résidus et la végétation protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie et des éclaboussures d'eau. Ils ont aussi tendance à réduire la vitesse d'écoulement de l'eau et à favoriser l'infiltration de l'eau dans le sol.

L'efficacité de la végétation et de la litière dans la lutte contre l'érosion dépend du type et de la densité du couvert végétal. La meilleure façon de combattre l'érosion est de miser à la fois sur un couvert végétal et sur une litière qui couvrent complètement le sol et qui interceptent les gouttes de pluie. Les résidus partiellement incorporés et les vieilles racines ont aussi leur importance en facilitant l'infiltration.

L'efficacité d'un couvert végétal à réduire l'érosion dépend de la protection qu'il offre au sol à différentes périodes de l'année en fonction de l'importance des précipitations érosives reçues au cours de ces périodes. Un couvert végétal complet durant la majeure partie de l'année permet de beaucoup mieux maîtriser l'érosion qu'un couvert éphémère ou absent surtout pendant les périodes de précipitations très érosives, comme le printemps et l'été (Ritter, 2012).

2.7. Pratiques culturales

L'érosion hydrique est influencée par les opérations culturales, notamment par la profondeur de travail du sol, le sens dans lequel celui-ci se fait, le moment des labours, le type d'instruments aratoires et le nombre de passages. Généralement, moins le travail du sol perturbe la végétation ou la couche de résidus en surface ou près de la surface, moins le travail du sol engendre d'érosion hydrique. Le travail réduit du sol et le semis direct sont des moyens efficaces de limiter ce type d'érosion (Ritter, 2012).

Au contraire, les pratiques aratoires réalisées dans le sens de la pente favorisent l'érosion hydrique en offrant des voies d'écoulement aux eaux de ruissellement. Le travail du sol à contre-pente et les techniques de labour suivant les courbes de niveau s'opposent à la concentration des eaux de ruissellement et limitent les déplacements de sol (Ritter, 2012).

2.8. Défrichement :

La pression démographique entraîne le défrichement des forêts pour l'installation des cultures. Au niveau du bassin versant de Tleta, dans la région de Tanger, les cultures ont envahi, sur une période de 12 ans, presque 1600 ha de forêt et de matorral, essentiellement par le biais de défrichement (Merzouk, 1996). Sur les parcelles cultivées, le sol est périodiquement mis à nu et fragilisé par les labours et les sarclages successifs.

Selon l'équation de pertes en terres de Wischmeier ; pour un sol nu toute l'année, ce facteur est égal à 1. Plus le couvert végétal est dense, plus ce facteur est faible. Pour un même type de sol, l'érosion est ainsi 10 à 20 fois plus faible sous forêt que sur un sol nu. Un couvert forestier réduit fortement l'érosion et que la céréaliculture, comme toutes les cultures vivrières, sont 3 à 4 fois moins efficaces que les formations végétales naturelles pour protéger les sols de l'érosion hydrique (Sabir et al. 1996).

$$X_a = R K L S C P$$

X_a = perte annuelle moyenne de sol ($t \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)

R = indice d'érosivité potentielle de la précipitation ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ an}^{-1}$)

K = indice d'érodabilité des sols à l'érosion hydrique ($t \text{ ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha h}$)

LS = facteur topographique dépendant de la pente et sa longueur

C = facteur de culture, incluant la régie des cultures et des sols et les pratiques culturales;

P = facteur de conservation et d'aménagement.

(Wischmeier et al. 1978 ; King et al. 1992)

2.9. Pâturage :

L'espace pastoral se dégrade suite au surpâturage qui induit un déséquilibre de la dynamique des peuplements forestiers. Le surpâturage cause la disparition de la couverture végétale, laissant ainsi des surfaces importantes du sol exposées aux effets érosifs des pluies et du ruissellement. On a montré que la densité du couvert végétal passe d'un état initial de 33 % de recouvrement à 30, 28, 25, 21 puis 19 %, respectivement pour des niveaux de charge animale égaux à 1, 2, 4, 8, et 12 brebis/ha/an. D'autre part, le passage répété des animaux entraîne un tassement du sol qui provoque une diminution de l'infiltration à la surface du sol, augmentant ainsi les risques de ruissellement et de ravinement.

Dans les régions méditerranéennes, le pâturage était autrefois saisonnier et le bétail devait se déplacer sur des distances considérables pour assurer son alimentation. Actuellement, les éleveurs sont devenus sédentaires. Ils exercent donc une forte pression sur les terrains de parcours proches des villages. La charge animale supportée par les parcours est couramment supérieure à ce qu'elle devrait être (Sabir et al. 1996).

2.10. Bois de feu

L'exploitation de la végétation spontanée par les locaux pour les besoins du bois-énergie est à l'origine d'une intense érosion.

Cette activité de coupe de la végétation engendre une érosion dont l'intensité et la nature varie selon le type de végétation, du relief et de la technique utilisée pour le prélèvement du bois de feu (Ben Chaabane, 1995).

L'arrachage des xérophytes épineux déracine la plante entière. Toutes les particules de terre au niveau des racines sont alors mises en surface et se trouvent exposées au transport par le vent ou les ruissellements de pluie.

3. Effet du couvert végétal sur l'érosion hydrique

La végétation peut intervenir contre l'érosion de deux manières principales: d'une part elle peut empêcher l'érosion de se produire, jouant ainsi un rôle de protection « active » contre l'érosion, d'autre part elle peut retenir les sédiments érodés à l'amont, jouant alors un rôle « passif » ou « à distance » contre l'érosion (Viles, 1990).

3.1. Protection active contre l'érosion

La végétation protège les sols de l'érosion de manière « active » en luttant contre les agents érosifs et en améliorant la fixation des sols. La végétation peut protéger les sols contre les agents érosifs par régulation hydrologique, régulation thermique et protection mécanique (Martinez-Mena et al. 1999 ; Bonnet, 1983).

Elle peut permettre de lutter contre l'érosion par ruissellement grâce à son action de régulation hydrologique des bassins versants (Humbert et al. 1992 ; Fleuriel, 1998).

Cette régulation hydrologique s'effectue par interception des gouttes de pluie, augmentation de l'infiltration de l'eau dans le sol, pompage d'une partie de l'eau contenue dans les sols et restitution dans l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration. La régulation hydrologique jouée par la végétation a pour effet de diminuer la quantité, l'intensité et la vitesse du ruissellement. La végétation a également un effet d'écrêtage et d'étalement du ruissellement (Combes et al, 1995). La régulation hydrologique due à la végétation a ainsi pour effet d'atténuer les contraintes érosives dues à l'eau (Moir et al. 2000).

La végétation peut jouer un rôle de régulation thermique. Elle permet en effet d'atténuer les écarts thermiques journaliers, réduisant ainsi la désagrégation des roches due à la gélifraction et à la thermoclastie (Rovéra et al. 1999).

Enfin, par son couvert, la végétation peut jouer un rôle de protection mécanique, en diminuant l'énergie cinétique des gouttes de pluie et en réduisant ainsi l'effet splash. Les végétaux permettent également de diminuer l'effet du vent sur la mobilisation des sédiments érodés. Enfin, la végétation empêche la concentration du ruissellement et diminue son énergie (Bonnet, 1983 ; Morgan, 1990).

La végétation permet également de lutter contre l'érosion par fixation des sols grâce aux (systèmes racinaires). Les végétaux permettent en effet d'améliorer la cohésion des sols et donc de renforcer leurs propriétés mécaniques (O'Loughlin et al. 1986 ; Handel et al. 1997).

3.2. Protection passive contre l'érosion : le piégeage des sédiments

La végétation peut jouer un rôle de piégeage et de rétention d'une partie des sédiments érodés à l'intérieur d'un bassin versant (Van Dijk et al. 1996).

Ces écoulements déposent les sédiments suite à la réduction de leur énergie de transport. Des dépôts ont ainsi été observés à l'amont de barrières végétales sur des pentes plus fortes que celles sans végétation (Bochet et al. 2000 ; Sanchez et al. 1994).

Ces dépôts peuvent être retenus durablement, ils sont colonisés par des végétaux, qui vont fixer les sédiments piégés par développement des racines. En conséquence, à l'intérieur des bassins versants, de grandes quantités de sédiments érodés sont piégées et ne rejoignent pas l'exutoire des bassins (Rey, 2002).

Ceci peut avoir un intérêt important pour la gestion optimale des problèmes d'érosion par le génie écologique. Si ces processus de piégeage ont bien lieu et que les sédiments sont durablement retenus dans les bassins versants, cela signifie que des zones en érosion produisent des sédiments qui peuvent ensuite être piégés à l'aval par des barrières végétales. En conséquence, une couverture végétale complète n'est pas indispensable pour obtenir une production sédimentaire nulle ou très faible à l'exutoire d'un bassin versant hydrologique défini. La distribution spatiale de la végétation est alors particulièrement importante. Ainsi, en termes de gestion, il n'est pas nécessaire d'installer une couverture végétale complète sur un bassin versant hydrologique dégradé pour parvenir à stopper la production sédimentaire à son exutoire, de même qu'il n'est pas indispensable de maintenir une couverture végétale complète sur les bassins recouverts d'une couverture végétale protectrice totale (Rey, 2002). D'ailleurs, plusieurs études ont montré que la production sédimentaire de bassins ou de versants diversement végétalisés ne variait pas de façon linéaire avec la couverture végétale (Rogers et al. 1991 ; McIvor et al. 1995).

3.3. Efficacité des différentes formations végétales

L'effet de la végétation peut être différent selon le type de la formation végétale. Certains auteurs affirment que la forêt constitue la meilleure protection contre l'érosion hydrique de surface en montagne. D'autres auteurs ont observé qu'une couverture arbustive ou une végétation basse peut offrir une protection similaire à celle jouée par des arbres (Rey et al. 2004).

Un sol forestier favorise l'infiltration de l'eau dans le sol plus qu'une autre occupation du sol en raison d'une pédogénèse plus poussée sous forêt car la biomasse, l'activité biologique et l'enracinement sont plus importants. Le rôle de la couverture herbacée est souvent dénigré, alors que, bien souvent, elle peut être très efficace pour lutter contre l'érosion hydrique de surface. L'action de l'herbe ou du gazon peut être optimale en mélange avec une formation arborée. Les arbres permettent de dessécher les couches profondes, tandis que les herbes minimisent le ruissellement diffus. Toutefois, la couverture herbacée est bien souvent insuffisante pour lutter efficacement contre l'érosion linéaire. Les sols cultivés restent les plus vulnérables à l'action érosive de la pluie car ils restent nus une partie de l'année et principalement au cours des périodes les plus pluvieuses (Giordano, 1994).

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une étude bibliographique pour présenter les mécanismes, les formes et les facteurs de l'érosion hydrique. Ensuite, nous avons expliqué l'effet du couvert végétal sur l'érosion hydrique et le rôle important joué par ce dernier pour protéger les sols contre l'érosion hydrique.

Cette efficacité de la végétation peut être mise à profit dans la lutte contre les phénomènes érosifs. C'est dans ce cadre, que nous avons porté notre étude sur l'érosion hydrique selon l'occupation des sols pour déterminer les zones à risques dans le bassin versant d'Amassine.

Chapitre 2. Matériels et méthodes :

1. Localisation géographique :

Le bassin versant de l'Ourika est un hydro-système bien individualisé du Haut Atlas de Marrakech, compris entre 31° et 31°20' Nord et entre 7°30' et 7°60' Ouest (Fig.1). L'oued Ourika prend ses sources dans les hauts contreforts de la chaîne du Haut Atlas. Dans un bassin versant qui culmine à 4001 mètres et qui débouche à 1070 mètres à la sortie de l'Atlas, l'oued a façonné son cours en incisant des roches cristallines dures en amont et des formations sédimentaires plus friables en aval, sculptant des vallées encaissées et des pentes raides.

Le sous bassin de l'Amassine se situe à l'aval du bassin versant de l'Ourika (Fig.2).

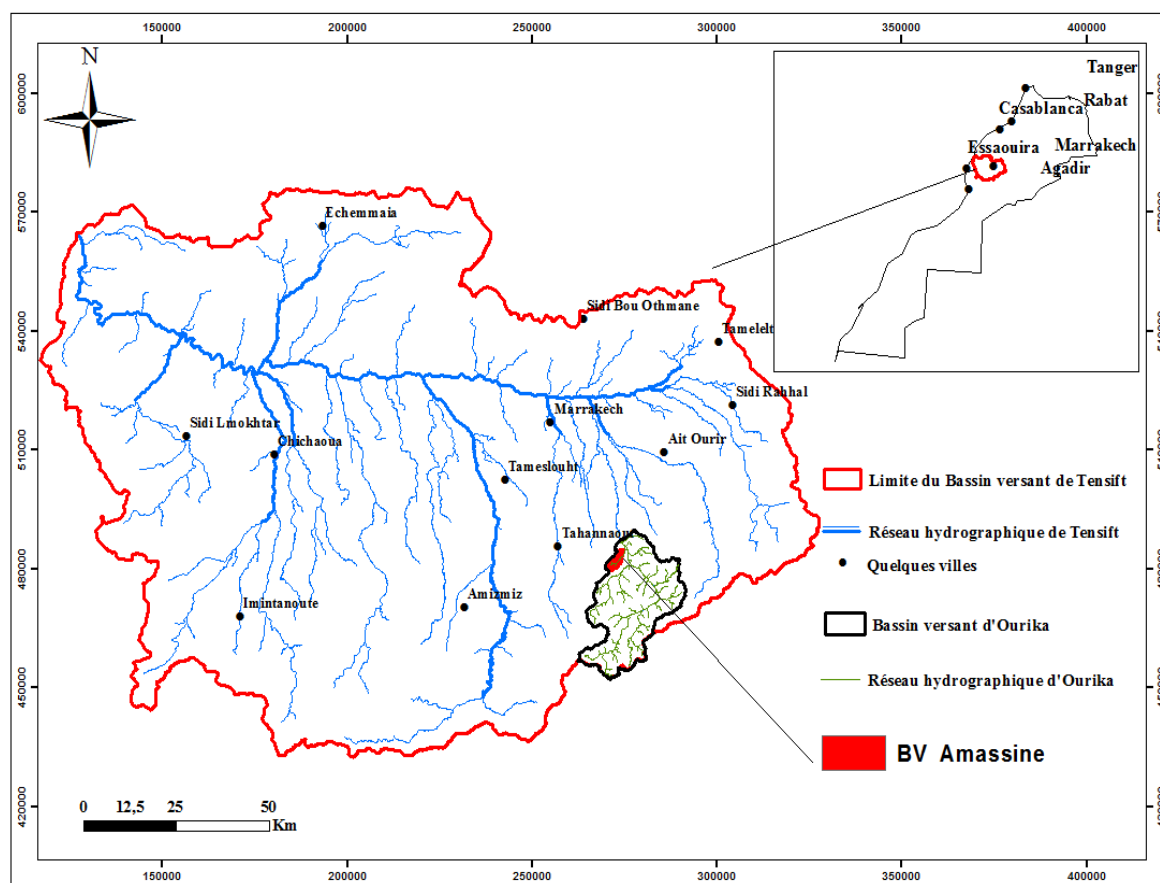


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant d'Amassine

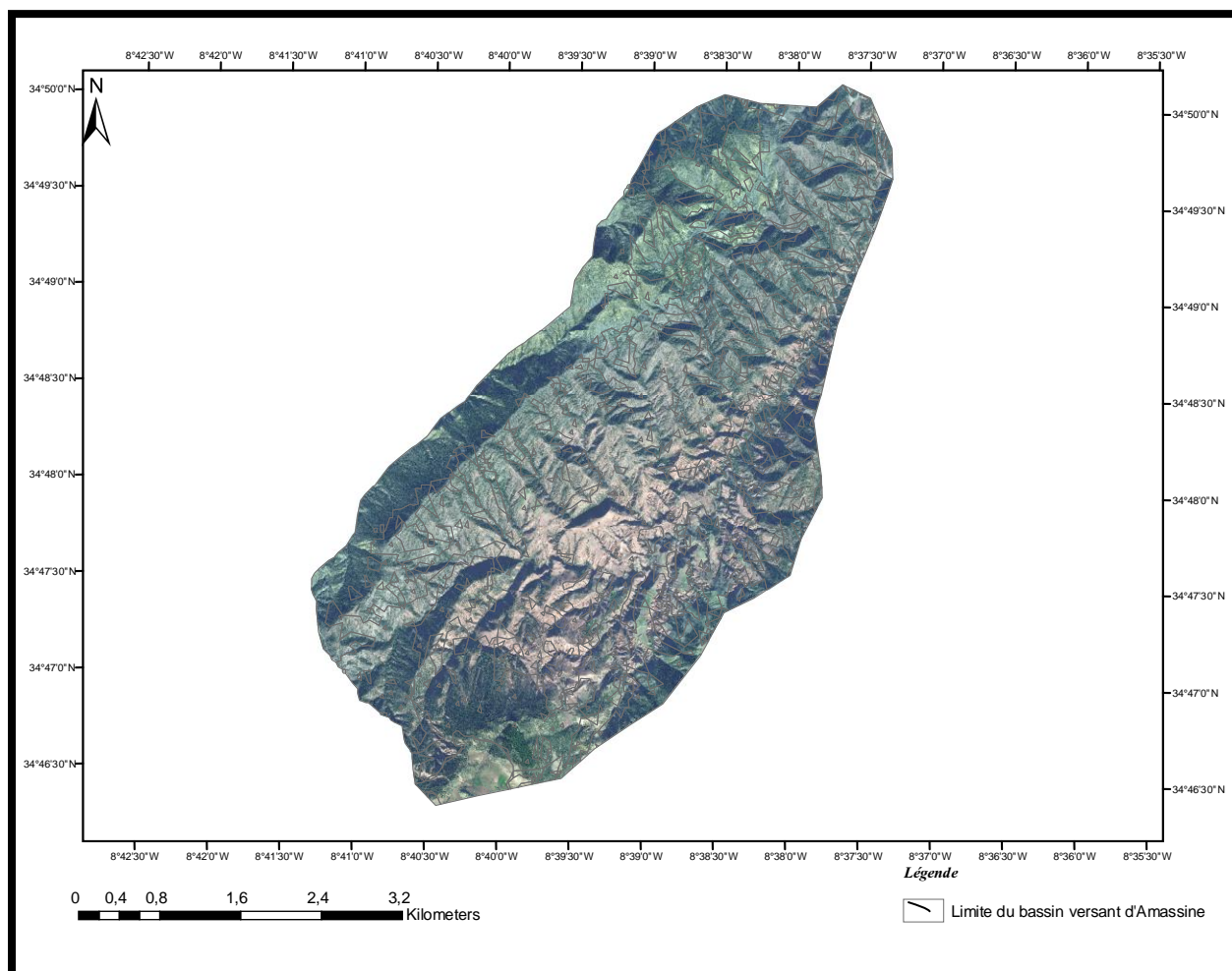


Figure 2 : Vue satellitaire du Bassin versant d' Amassine (Landsat8, 2015).

2. Découpage administratif et population :

La région de Marrakech-Safi est située dans le centre du pays à l'ouest , elle est divisée en quatre provinces: Essaouira, El Kelâa des Sraghna, Al Haouz, Chichaoua et trois préfectures: Marrakech-Ménara, Marrakech-Médina et Sidi Youssef Ben Ali. Elle compte 16 cercles et 216 communes dont 18 municipalités (Fig.3). Son milieu rural qui renferme 14 % de la population rurale du royaume compte 4700 douars (selon le dernier recensement). La région s'étend sur une superficie de 31.160 km² soit l'équivalent de 4,4% du territoire national.

Selon le dernier recensement de la population de 2014, la population de la région s'élève à 4 572 766habitants contre 3 102 652 habitants en 2004 et 2 724 204 en 1994 soit un

taux d'accroissement annuel de 1.2% contre 1,3% en 2004. La répartition de la population selon le milieu de résidence met en évidence le caractère rural de la région. En effet 57% de la population vivent dans le milieu rural, contre 43% dans le milieu urbain.

Les provinces de Chichaoua et d'Al Haouz sont les moins urbanisées avec respectivement 4% et 3% de la population urbaine de la région.

La zone représente 10,38% de la population nationale, elle est située au 3^{ème} rang en terme d'effectif, son taux d'accroissement est inférieur à la moyenne nationale qui est de 1,4%.

La région est l'une des régions les plus densément peuplée du Maroc puisque la densité de la population qui s'élève à 99,6 habitants au km carrés dépasse de loin la densité nationale qui est de 42,05 habitants au km².

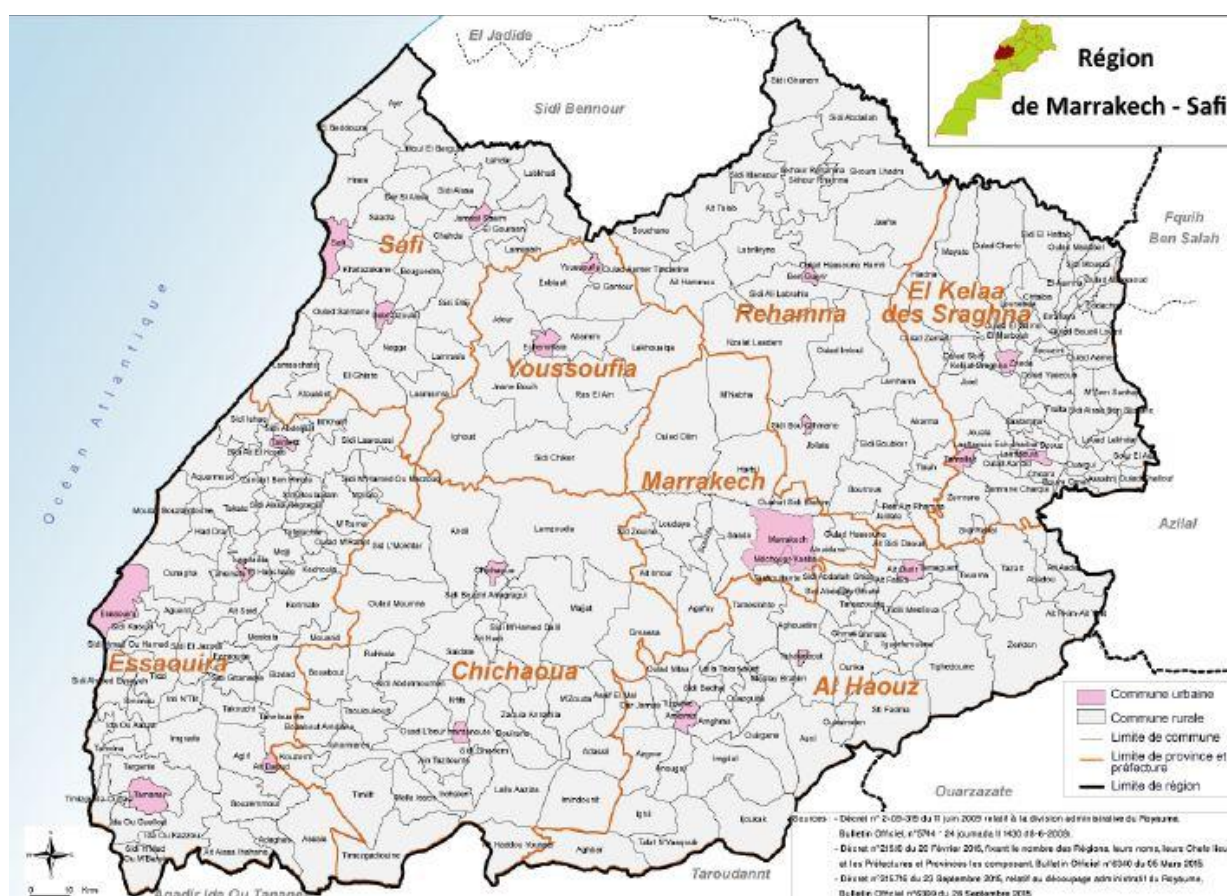


Figure 3 : Carte de découpage administratif de la région de Marrakech Safi (HCP, 2015).

3. Morphométrie générale du bassin versant :

Vaste de 503 km², le bassin versant de l'Ourika jusqu'à Aghbalou a une forme légèrement allongée (Fig.1). Le cours principal, d'abord orienté vers le NE puis vers le NW après la localité de Setti-Fadma, coule dans une longue vallée encaissée vers laquelle converge, sur les deux rives, une succession de vallées et de ravins affluents. Cette situation explique que les ondes de crues de l'oued Ourika grossissent vers l'aval, à mesure de leur alimentation par les affluents.

La région de l'Ourika est réputée par ses reliefs élevés et abondants. 75 % des surfaces du bassin sont situées entre 3200 et 1600 m et l'altitude moyenne s'élève à 2500 m (Fig. 4). Les pentes sont dans l'ensemble fortes. Celles du cours principal ne dépassent pas 5 %, mais celles des affluents et des versants montagneux sont beaucoup plus importantes: le Tarzaza qui draine le massif de l'Oukaïmiden suit une pente moyenne de 11 %, mais les ravins les plus abrupts se situent en amont du bassin avec des pentes (Fig.5) qui atteignent, par endroit, des valeurs de 30 à 40 %, comme le cas de l'Oufra et du Tifni. Ces pentes confèrent à l'oued un caractère violent et torrentiel.

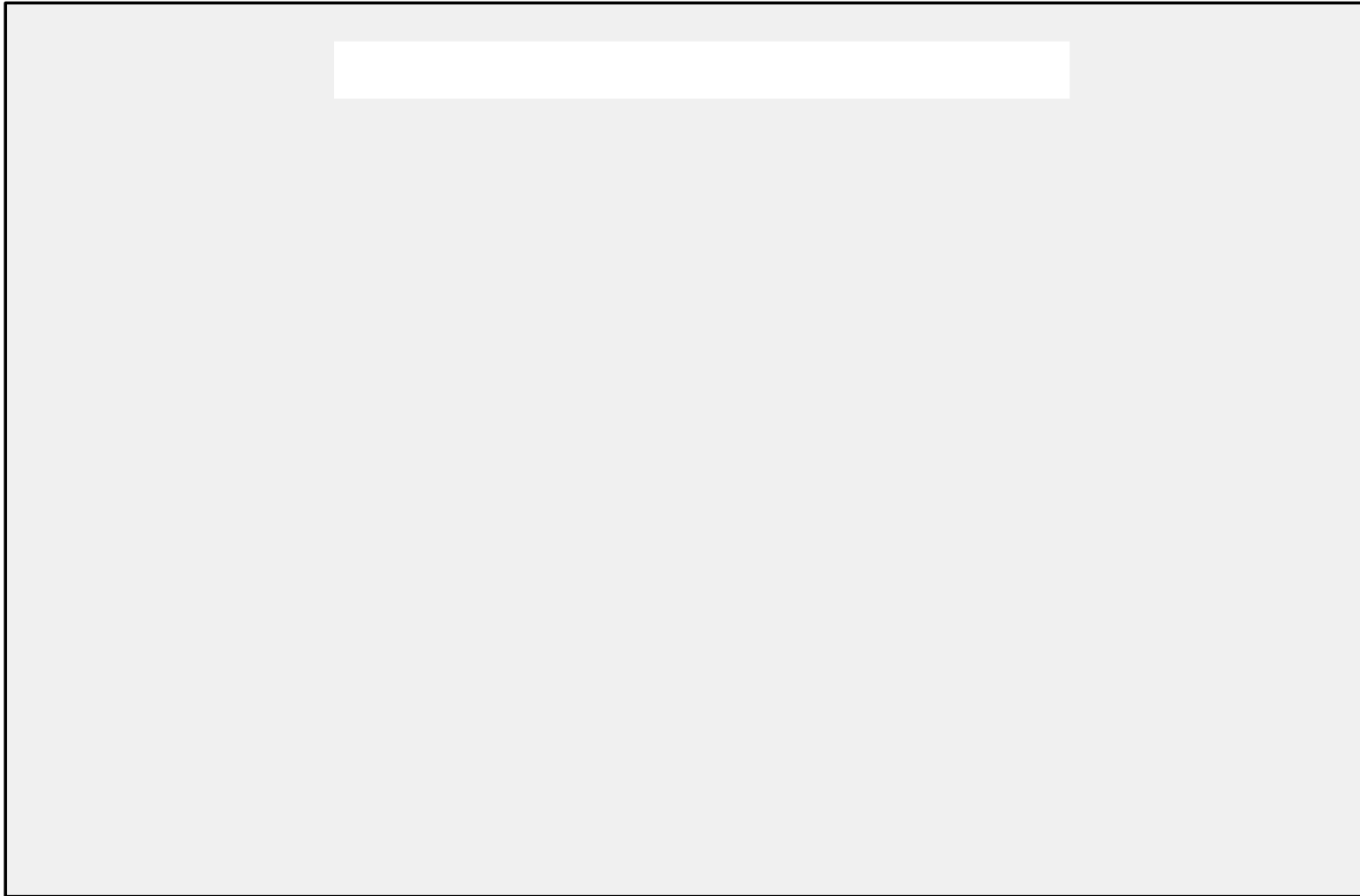


Figure 4: Carte des altitudes du bassin versant d'Amassine

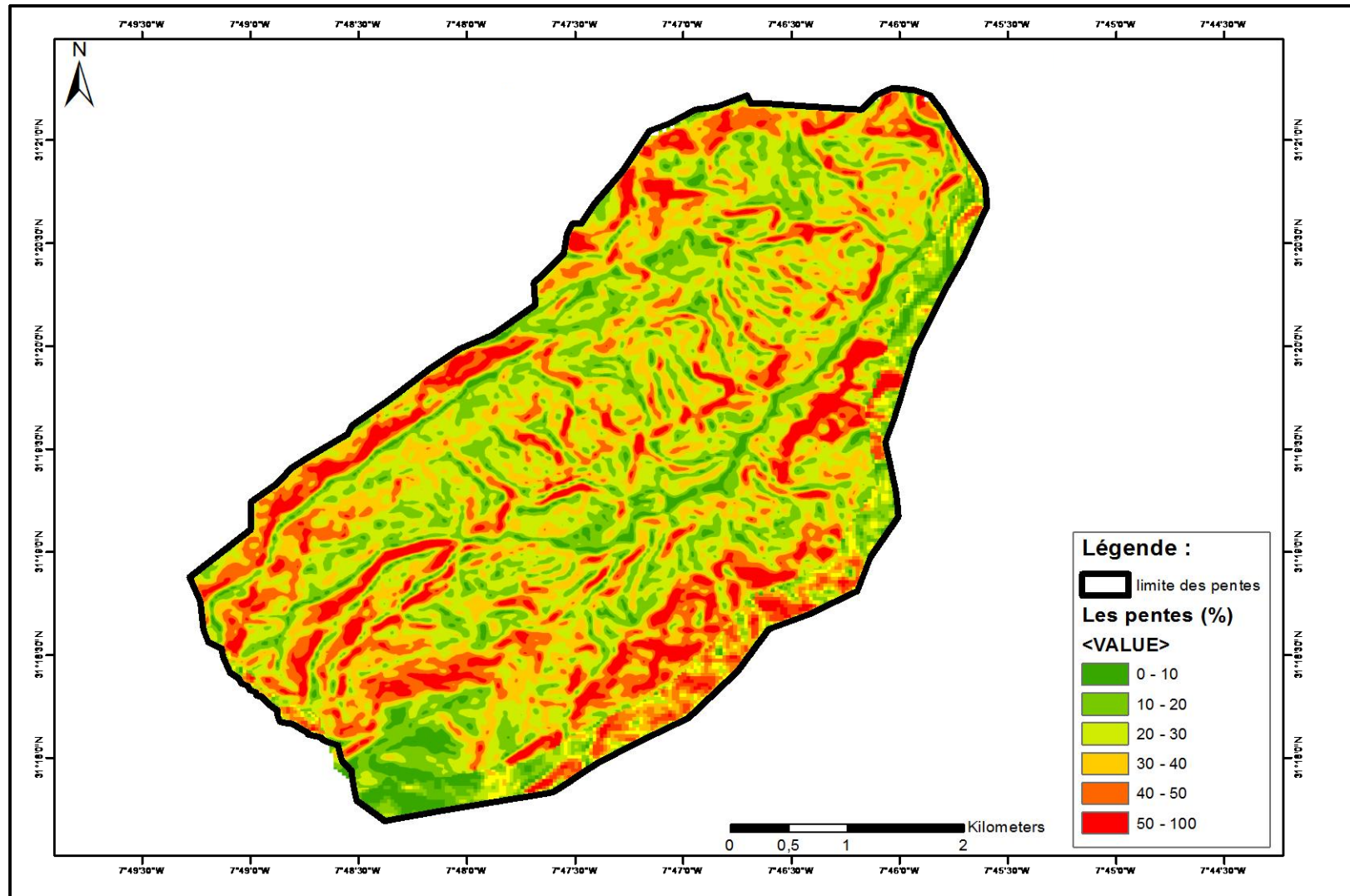


Figure 5 : Carte des pentes du bassin versant d' Amassine

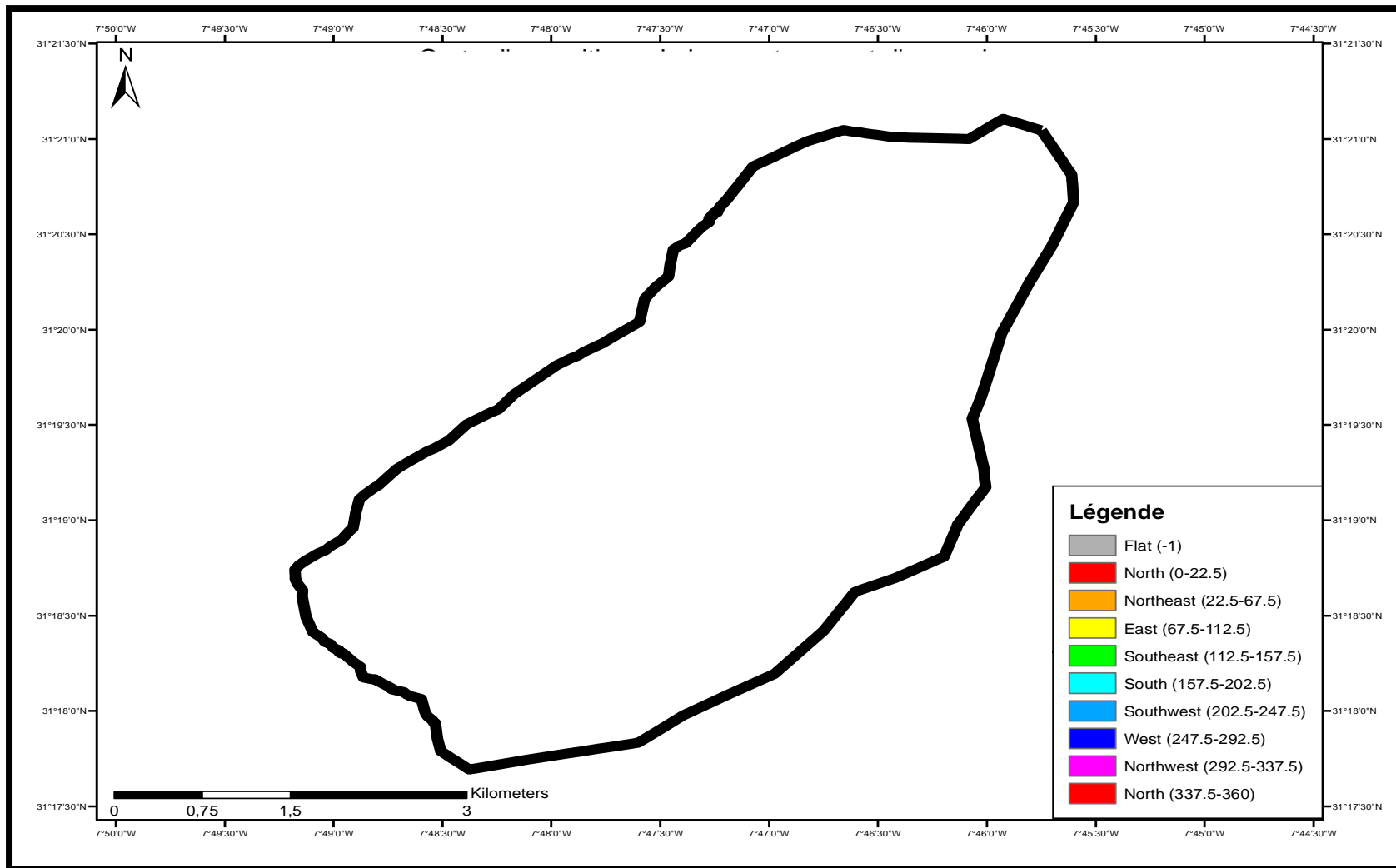


Figure 6 : Carte des expositions du bassin versant d' Amassine

4. Géologie :

Au centre du Haut Atlas de Marrakech, le bassin versant de l'Ourika montre deux grands types de faciès :

– une partie amont, située à des altitudes supérieures à 2000 m, constituée de roches magmatiques et métamorphiques appartenant au socle de la chaîne atlasique ; on y rencontre des roches plutoniques, notamment des granites et granodiorites, des roches volcaniques (andésites, rhyolites...) et métamorphiques (gneiss et migmatites) ; ces formations cristallines sont propices à un ruissellement immédiat des eaux de pluie.

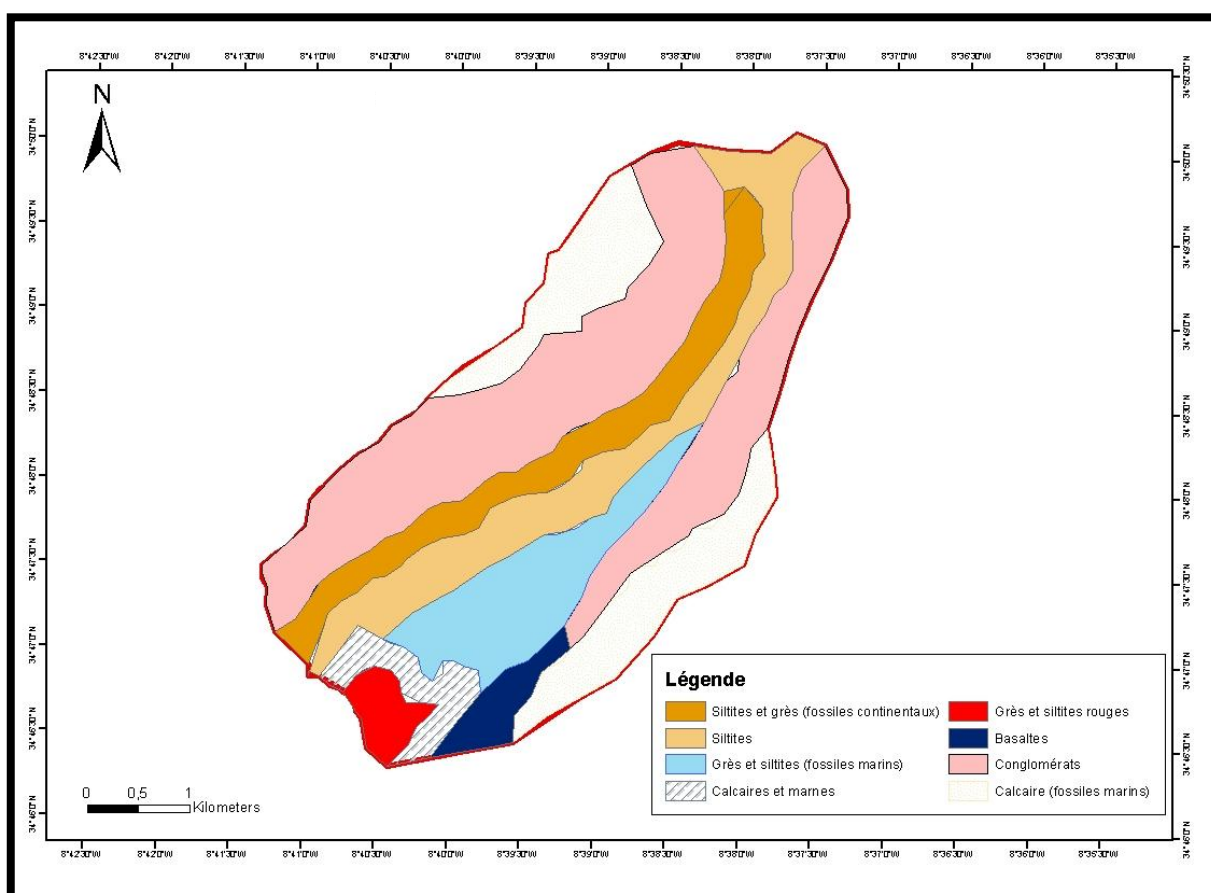


Figure 7 : Esquisse géologique du bassin versant d'Amassine

– une partie aval, située à des altitudes inférieures à 2000 m, composée de dépôts Permo-triasiques et quaternaires plus tendres ; lithologiquement, ce Permo-Trias comprend un faciès nord formé de conglomérats, grès et siltites, et un faciès sud formé essentiellement de siltites argileuses et localement de grès massifs. Les roches tendres à moyennement tendres (marnes, argiles et calcaires) représentent une étendue inférieure à 35 %, alors que le substrat

dur (roches cristallines) représente environ 67 % de l'étendue du bassin (Biron 1982). La figure 7 nous enseigne de la composition géologique ainsi que la lithologie du sous-bassin d'Amassine (Fig.7).

5. Le climat :

Le climat du bassin versant de l'Ourika est d'abord caractérisé par sa grande variabilité spatiotemporelle. Il est exposé aux perturbations pluvieuses en provenance de l'Océan Atlantique avec une direction Nord-Ouest. Cette exposition et l'orientation vers le Nord et le Nord-Ouest, permettent au bassin de l'Ourika d'être assez bien arrosé par les eaux pluviales.

Les précipitations varient en hauteur, en intensité et dans leurs distributions géographiques. Elle peut dépasser 700 mm par an sur les hauts sommets du bassin. (Agence de bassin hydraulique de Tensift).

Au niveau de la station d'Aghbalou la précipitation moyenne en 30ans (entre 1982 et 2012) et de l'ordre de 417mm/ an avec un minima de 0.3C° et un maxima de 34.9C°. A partir de ces données le quotient d'Emberger et de 40.45, cette valeur combinée à la température minimale situe la zone dans le bioclimat semi aride frais.

L'amplitude thermique entre la température minimale et maximale et de 34.6C°.D'après le climagramme de Debrach le climat est semi-continentale, la continentalité qui règnent a quelques kilomètres de la zone et atténué vue la proximité du domaine océanique qui se perchent dans les plus hautes altitudes de la zone d'étude.

Station	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Tot
Aghbalou	14	37	52	50	42	49	57	59	31	10	2	4	407

Source : ABHT 2016).

Tableau 1 : Moyennes cumulées des précipitations mensuelles en mm

6. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique du bassin (Fig.8) est particulièrement dense et bien hiérarchisé. Et c'est à partir de la carte topographique d'Oukaimeden-Toubkal que nous avons retracé ce réseau et cherché son importance, en se basant sur son niveau de ramification. Le cours d'eau principale a ainsi atteint l'ordre 6 (d'après la méthode d'ordination de Strahler) à l'exutoire du bassin. Par ailleurs, la densité du drainage est également importante (Saïdi et al. 2010).

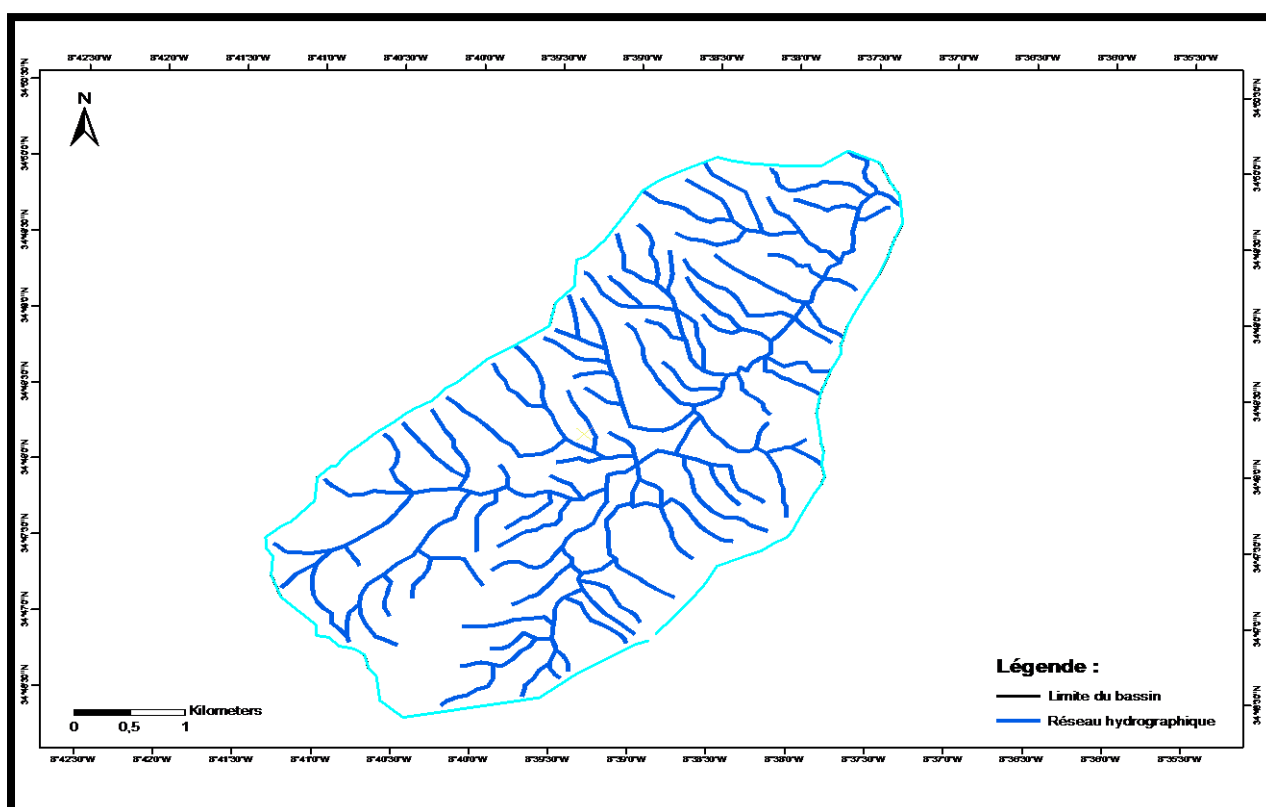


Figure 8 : Carte du réseau hydrographique du Bassin versant d'Amassine

7. La végétation

Les forêts de la région de Marrakech Safi s'étendent sur une superficie de 721.876 hectares, ce qui représente 22,6% du total national, dont près de 65.120 hectares de plantations artificielles forestières et fruitières pour des fins économique ainsi que la protection des sols contre les différentes formes d'érosion et surtout l'érosion hydrique.

Le taux de couverture forestière se situe dans les zones forestières de montagne autour de 43 % avec une moyenne de 22 % pour toute la région.

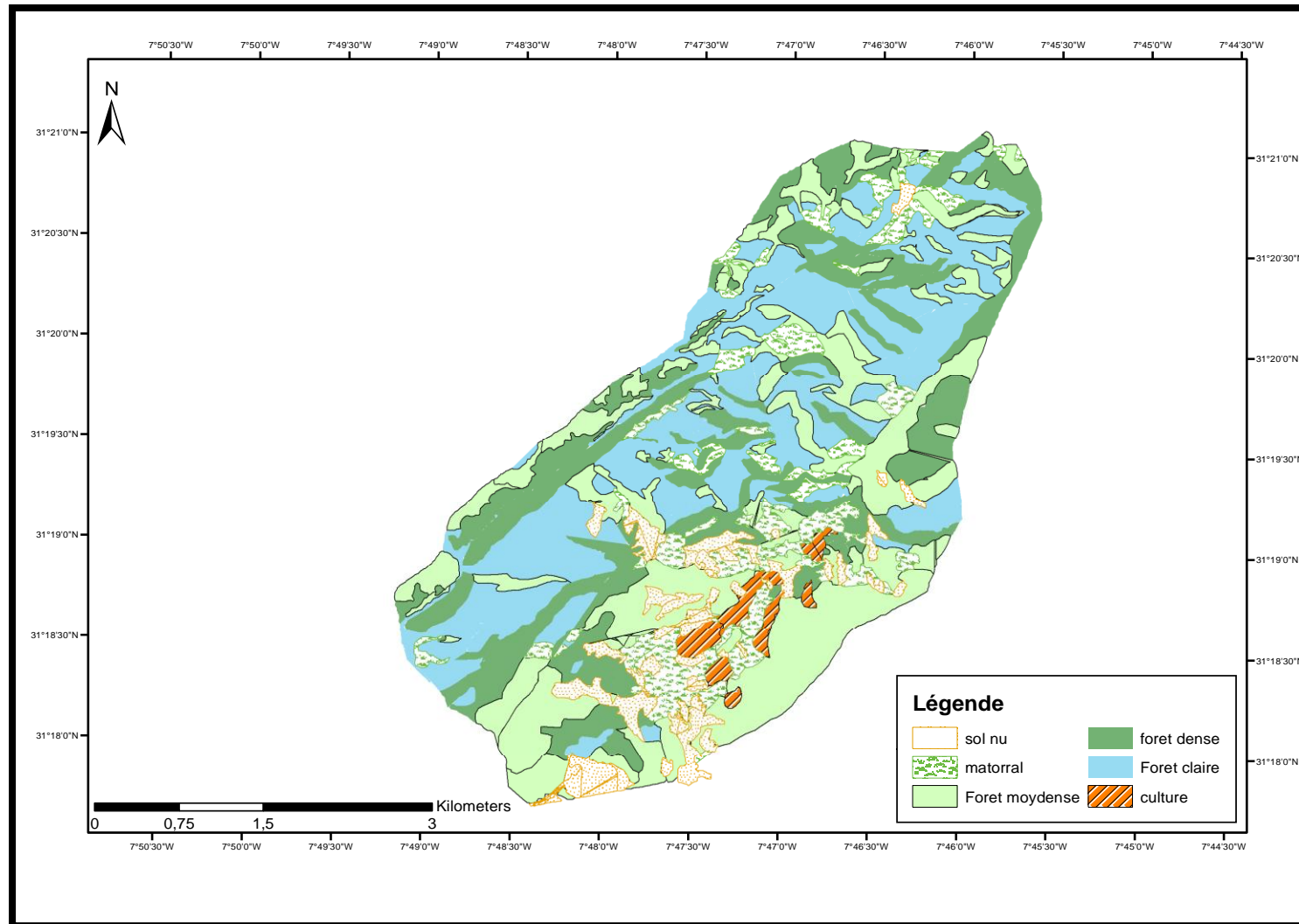


Figure 9 : Carte d'occupation du sol du bassin versant d'Amassine

Le caractère montagneux de la chaîne atlasique lui confère une vocation pastorale et forestière. Le Haut Atlas est le domaine des massifs forestiers du chêne, du thuya et des autres conifères.

Le bassin versant d'Amassine (Fig. 9) qui se situe à l'aval de l'oued Ourika est dominé par des tétraclinaies

La Tétracinaie est très mixte, elle contient *Juniperus phoenicea*, *Pistacia lentiscus*, *Juniperus oxycedrus*. La Juniperaie substitue à la tétraclinaie en lui succédant, vers l'amont du bassin et altitudinalement.

Ces formations se matérialisent sous forme de couvert dense, peu dense et clair avec respectivement 80%, 65% et 50% de recouvrement par rapport à la zone d'étude.

8. Activités humaines

Selon la carte de pauvreté de 2007, le taux de pauvreté dans la région de Marrakech s'est situé en 2004 à 15,9% contre la moyenne nationale de 8,9%.

Par milieu de résidence, la pauvreté demeure beaucoup plus ancrée en milieu rural de la région (le taux de pauvreté varie de 5 à 35%) et touche 19% de la population, soit un ménage sur cinq. Cependant, en milieu urbain de la région, le taux de pauvreté varie entre 0.8 % et 29.9%.

Année 2013	total	Urbain	Rural
Al Haouz	57.8%	43.0%	60.0%

Haut Commissariat au Plan, annuaire statistique du Maroc de 2013

Tableau 2 : Taux d'activité dans la province d'Al Haouz

Année 2013	total	Urbain	Rural
Al Haouz	1.8%	6.4%	1.3%

Haut Commissariat au Plan, annuaire statistique du Maroc de 2013

Tableau 3 : Taux de chômage dans la province d'Al Haouz

L'agriculture, l'élevage, le tourisme et l'activité minière constituent les principales sources de revenus de la population.

9. Test de simulation de pluie :

9.1 Description du dispositif expérimental

Le simulateur de pluies utilisé est un simple irrigateur manuel (Roose, 1996). Il s'agit d'une version simplifiée à l'extrême du simulateur de pluie. Il est constitué d'une rampe d'arrosage de 50 cm de large, comportant une ligne de trous de 0,5 mm de diamètre distants de 1 cm, reliée par un tuyau souple d'environ cinq mètres de long à un bidon de 60 litres situé au-dessus de la placette. La placette mise en place dans la direction de la pente du terrain, de superficie de 1 m² (60 cm x 166 cm) est délimitée latéralement par deux barres de fer de 166 cm de long, simplement posées sur le sol de façon à matérialiser les côtés de la placette sans briser l'état de surface du sol. Des bourrelets de terre humide sont disposés sur l'extérieur des barres pour les stabiliser et assurer le cas échéant l'étanchéité de la bordure. À l'aval un métal de forme triangulaire à bord arrondi est conçu pour recueillir le ruissellement et le conduire à un récipient pour le collecter et le quantifier.

Le choix des placettes s'est fait en fonction de la nature du couvert végétale. Trois placettes pour chaque type d'occupation du sol avec une sous couvert, une hors couvert et une troisième intermédiaire.

9.2. Etat de surface

9.2.1. Surfaces couvertes, ouvertes et fermées

Avant le démarrage du test de simulation on procède à la mesure des différents paramètres de surface. L'état de surface du sol est décrit par la méthode des points quadra. On matérialise les deux diagonales de chaque parcelle, et on laisse descendre (systématiquement, sans viser) un crayon à intervalle régulier le long de la ligne tous les 2 cm. Au point de contact avec le sol, on note sur une fiche l'état de surface rencontré : la surface nue ou couverte et la surface fermée ou ouverte. Les surfaces couvertes au ras du sol (SC) englobent tout ce qui est litière, végétation et cailloux non intégrés dans la masse du sol. Les surfaces ouvertes (SO) concernent surtout les fissures, les galeries et les mottes constituant des pièges

favorisant l'infiltration. Les surfaces fermées (SF) correspondent aux zones obturées par une pellicule de battance (environ 1 mm d'épaisseur), croûte de sédimentation (3 à 30 mm d'épaisseur), semelle de tassement, croûte d'érosion (d'épaisseur allant de 5 à 30 mm et très tassée), témoin de passage d'un animal ou d'un dépôt provenant de l'érosion hydrique et surface des cailloux intégrés dans le sol (Roose, 1996).

A partir de ces relevés, le pourcentage de chaque état de surface est calculé :

- % de la surface du sol nue = Le nombre de points dont le sol est nu / Le nombre total des points observés le long des deux diagonales ;
- % de surface couverte = 100 % - % du sol nu ;
- % de la surface du sol ouverte = Le nombre de points dont le sol est ouvert / Le nombre total des points observés le long des deux diagonales ;
- % de surface fermée = 100 % - % surface du sol ouverte ;

9.3. Résistance du sol à la pénétration et au cisaillement

D'autres paramètres liés à l'état de surface sont mesurés. Les résistances à la pénétration (PEN kg/cm²) (Image 1) et au cisaillement (SS kg/cm²) (Image 2) sont mesurées respectivement, aux alentours de la parcelle, par un pénétromètre de poche et un scissomètre à raison de dix répétitions pour chaque paramètre.

9.4. Indice de rugosité

L'indice de rugosité (R) est déterminé par la méthode de la chaînette qui consiste à utiliser une chaînette métallique posée de façon rectiligne. Trois répétitions sont mesurées pour chaque placette.

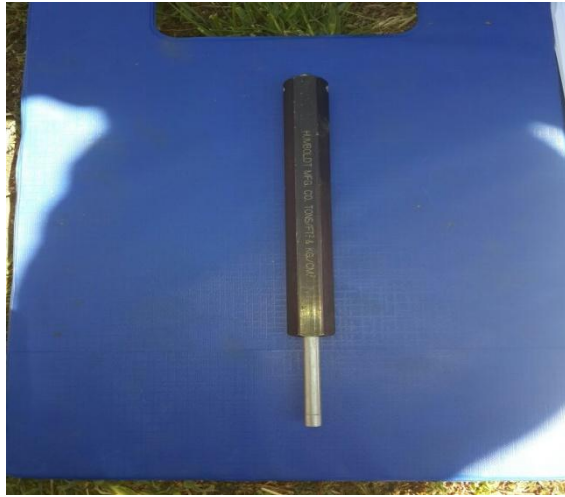


Image 1 : Pénétrromètre



Image 2 : Scissomètre



Image 3 : La chainette

9.5. Test de simulation de pluie

Après l'évaluation de l'état de surface, on démarre le test qui consiste à arroser le plus régulièrement possible la placette de 1 m² par des mouvements de va et vient de la rampe d'arrosage dans le sens de la placette, avec des pluies d'environ 80 mm/h d'intensité réglée par une vanne à la sortie de la citerne. Le réglage parfait de cette intensité reste toutefois difficile à obtenir et nécessite plusieurs essais pour le stabiliser. La mesure de l'intensité de pluie simulée s'effectue au début et à la fin de la simulation.

Sur la fiche terrain, on reporte toutes les 5 minutes, les valeurs de la quantité d'eau ruisselée jusqu'à stabilisation. La durée du test maximale est d'une heure.

A partir des mesures après chaque test d'infiltration, on calcule (D'après Roose et al 1996):

- La pluie d'imbibition (Pi) :

La pluie d'imbibition (Pi en mm) est définie comme étant la hauteur d'eau infiltrée avant le début du ruissellement, elle est calculée à partir du temps de réaction du sol (**Tr**) et l'intensité de pluie. En effet, le temps de réaction du sol est le laps de temps que met le sol avant le ruissellement. La durée de ce temps dépend de plusieurs facteurs liés au sol.

- L'infiltrabilité (If) :

La capacité d'infiltration d'un sol décroît avec le temps lors d'un événement pluvieux. Elle tend progressivement vers un régime constant appelé infiltration permanente ou infiltration finale (If, mm/h).

La surface de 1 m² des placettes est très faible par rapport à la forte variabilité naturelle des unités de paysage étudiées. On s'est efforcé de choisir pour chaque occupation trois placettes comportant des états de surfaces jugés représentatifs du site et des variations observées. Le nombre total de tests de simulation de pluie réalisé est de :

5 occupations * 3 répétitions = 15 parcelles de simulation de pluies



Image 4 : Surface de simulation sur culture

9.6. Echantillonnage du sol

En vue de pouvoir mesurer les paramètres physiques en relation avec les réponses hydrologiques du sol, on a prélevé autour de chaque parcelle de simulation de pluie des échantillons de sol.

A l'aide d'un cylindre de 10 cm de hauteur et 4 cm de diamètre, on a prélevé des échantillons de sol à trois profondeurs (0-10cm), (10-20 cm) et (20-30cm) en vue de mesurer la densité apparente et la porosité. Ce qui totalise :

15 parcelles * 3 niveaux= 45 échantillons.

A l'échelle de chaque occupation de terre, on a prélevé un échantillon de surface pour la détermination de la granulométrie, ce qui fait 15 échantillons.

Les échantillons sont conservés à l'abri de la chaleur et de humidité et sont transportés au laboratoire pour les différentes analyses.

9.7. Densité apparente, porosité du sol

Les échantillons de sol sont pesés à l'état frais et passés à l'étuve à 105°C pendant 24 heures (durée suffisante par convention pour l'évaporation de l'eau sans qu'il y ait décomposition des carbonates) et pesés de nouveau à la sortie de l'étuve pour obtenir la masse anhydre (m_0). Cette étape a permis de déterminer :

La densité apparente (D_a en g/cm^3) : la densité de l'échantillon est obtenue par la formule de Blake (1965) (Blake 1965 in Roose et al 1996):

$$D_a = m_o / V \quad \text{avec : } m_o = \text{masse anhydre du sol (g)} \\ V = \text{volume du cylindre (cm}^3\text{)}$$

- **La porosité totale (%)** : une fois la densité apparente connue, on a déduit la porosité totale. La formule de cette dernière se présente comme suit :

$$P\% = 100\% - ((D_a/D_r) * 100) \quad \text{avec } D_r = \text{constante} = 2,65 \text{ g}/\text{cm}^3$$

9.8. Détachabilité des sols (D)

La mesure de la détachabilité consiste à la quantification des sédiments transportés par les eaux de ruissellement et conservées dans les jerricanes à la fin de la simulation de pluie. Par parcelle de simulation, on prend 500ml de cette eaux après agitation dans un bêcher qu'on dépose pendant 72h afin que les sédiments se redéposent jusqu'à la clarté de l'eau. Pour les séparer, on pipette cette eau dans le levier jusqu'aux sédiments déposés. Par la suite, les béchers tarés contenant des sédiments sont séchés à l'étuve pendant 24h à 105°C . Après séchage, les béchers sont repesés pour trouver la masse des sédiments.

La **détachabilité des sols (D)** est obtenue par la formule suivante :

$$D (\text{g} / \text{m}^2 / \text{h}) = \text{Poids des sédiments (g)} * [60 / \text{durée de simulation (min)}].$$



Image 5 : le cylindre et les marteaux

10. Logiciels

10.1. SPSS

SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) est un logiciel utilisé pour l'analyse statistique et fait partie des programmes les plus largement utilisés pour l'analyse statistique en sciences sociales. Il est utilisé par des chercheurs en économie, en science de la santé, par des compagnies d'études, par le gouvernement, des chercheurs de l'éducation nationale et différents autres organismes.

La présente étude a pris en considération plusieurs paramètres afin de caractériser l'érosion au niveau de la zone d'étude. L'interdépendance des variables nous a poussé à choisir le SPSS comme outils statistiques afin de comparer les résultats.

L'utilisation du SPSS a permis de déceler les corrélations entre les différents paramètres ainsi que leur degrés de signification.

10.2. ARCGIS

ArcGIS est un système d'information géographique (SIG) pour travailler avec des cartes et des informations géographiques. Il comprend une suite d'applications intégrées : ArcMap, ArcCatalog et ArcToolbox. A l'aide de ces trois applications, vous pouvez effectuer toutes les tâches SIG, de la plus simple à la plus avancée, y compris la cartographie, la gestion des données, l'analyse géographique, la mise à jour des données et le géo-traitement.

11. Techniques d'analyses du laboratoire

Le dosage du carbone organique a été effectué par la méthode de Walkley et Black.

La texture a été analysée par la méthode densimétrique, mise au point par Meriaux .

Conclusion :

Au niveau de ce chapitre la zone d'étude a été localisée et décrite d'un point de vue morpho métriques, géologiques, hydrographiques, climatiques, administratifs et sociales.

Il présente aussi les outils et techniques utilisés dans les différentes approches à noter l'étude du terrain, les analyses de laboratoires, les analyses statistiques et la cartographie.

Chapitre 3. Résultats et discussions

1. L'effet des utilisations des terres sur les caractéristiques du sol :

1.1. L'infiltrabilité

Les résultats de cette expérimentation sont présentés dans la Fig10. Ceci démontre la variabilité de l'infiltration en fonction du temps pour les différentes occupations. L'occupation qui affiche le plus haut taux d'infiltration est la forêt dense (+ de 80 mm/h), par contre le plus faible taux d'infiltration est enregistré au niveau du matorral (43.55 mm/h), pour le reste des occupations cette valeur varie entre (55 et 70 mm/h).

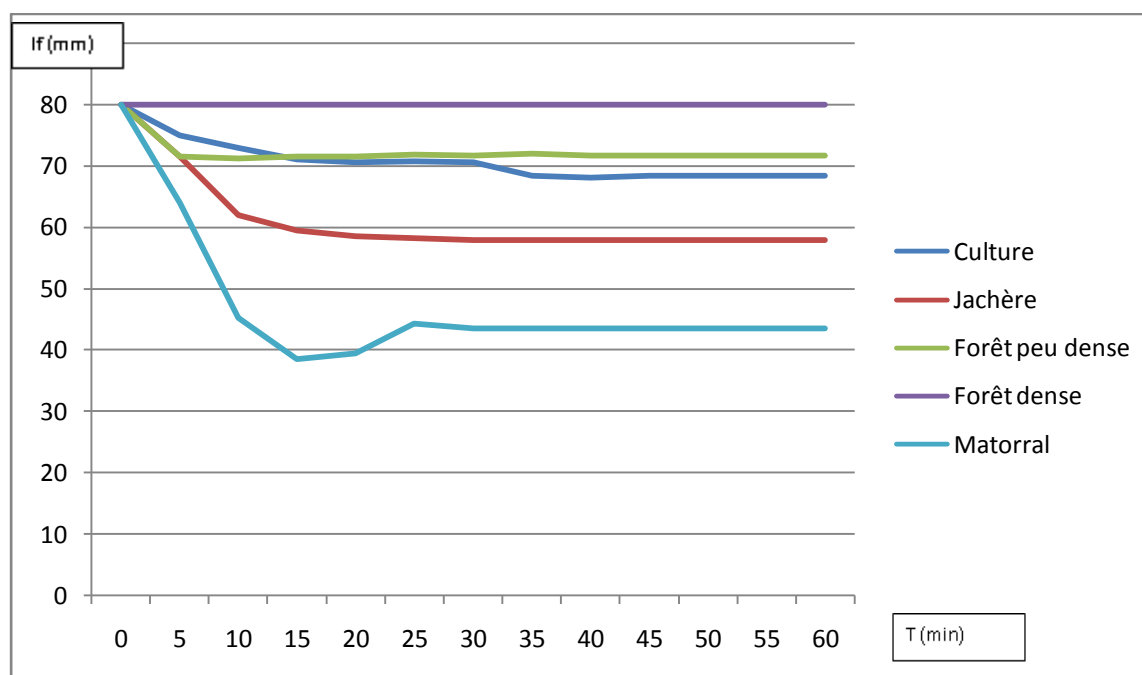


Figure 10 : Evolution de l'infiltration en fonction du temps selon l'occupation du sol

Le test de corrélation entre le paramètre hydrologique (infiltrabilité) et les paramètres physiques (PEN, SO, SC, SS, R, DA, P), ont démontré que l'infiltrabilité est en corrélation avec le sol couvert, sol ouvert, pénétration, cisaillement et la densité apparente. Le tableau 4 présente le test de corrélation du paramètre hydrologique (infiltration) en fonction du paramètre physique (cisaillement).

Corrélations		If	SS
If	Corrélation de Pearson	1	-,773**
	Sig. (bilatérale)		,001
	N	15	15
SS	Corrélation de Pearson	-,773**	1
	Sig. (bilatérale)	,001	
	N	15	15

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Tableau 4 : Test de corrélation d'infiltration en fonction du cisaillement

Les autres résultats de corrélation sont présentés dans l'annexe.

1.2 La pluie d'imbibition :

L'occupation qui affiche la plus grande valeur d'imbibition et la forêt dense vue qu'après 60 mn de simulation de pluie (avec une intensité de 80mm/h) le ruissellement est absent, par contre la plus faible valeur d'imbibition est enregistrée au niveau du matorral, pour le reste des occupations cette valeur varie entre (2 et 7mm).

Occupations	Pi (mm)	
	Moyenne	s
Culture	6,3	2,52
Jachère	3,36	1,45
Forêt peu dense	2,4	1,2
Forêt dense	indf	indf
Matorral	1,67	1,2

Tableau 5 : Variation de la valeur de la pluie d'imbibition en fonction de l'occupation

Le test statistique n'a pas donné de corrélation entre le paramètre hydrologique (pluie d'imbibition) et les paramètres physiques (PEN, SO, SC, SS, R, DA, P).

1.3. Le coefficient de ruissellement (kr) :

L'occupation qui affiche la plus grande valeur de ruissellement est le matorral. Par contre, la plus faible valeur de ruissellement est enregistrée au niveau de la forêt dense. Pour les autres occupations, cette valeur varie entre 7 et 22%.

Occupations	Kr (%)	
	Moyenne	s
Culture	7.12	6.31
Jachère	21.07	13.56
Forêt peu dense	20.27	8.31
Forêt dense	indf	indf
Matorral	42.50	2.11

Tableau 6 : Variation du taux du coefficient de ruissellement en fonction de l'occupation

Le test de corrélation entre le paramètre hydrologique (coefficient de ruissellement) et les paramètres physiques (PEN, SO, SC, SS, R, DA, Po10, Po20, Po30, Da10, Da20), ont démontré que le coefficient de ruissellement est en corrélation avec le sol couvert, sol ouvert, pénétration, cisaillement et la densité apparente à 10 et 20 cm ainsi que la porosité à 10, 20 et 30 cm.

Le tableau 7 présente la corrélation entre le coefficient de ruissellement et la densité apparente, les autres résultats de corrélation est en annexe.

Corrélations		Kr	Da10
Kr	Corrélation de Pearson	1	,521*
	Sig. (bilatérale)		,046
	N	15	15
Da10	Corrélation de Pearson	,521*	1
	Sig. (bilatérale)	,046	
	N	15	15

*. La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).

Tableau 7: Test de corrélation du coefficient de ruissellement en fonction de la densité apparente

Le reste des résultats de corrélation et présenté dans l'annexe

1.4. La détachabilité (D) :

L'occupation qui affiche la plus grande valeur de détachabilité et au niveau des cultures, par contre la plus faible valeur est enregistrée au niveau de la forêt dense. Pour le reste des occupations, cette valeur varie entre 10 et 15%.

Occupations	D (g/m ² /h)	
	Moyenne	s
Cultures	20,87	1,92
Jachère	14,54	4,14
Forêt peu dense	10,52	4,79
Forêt dense	0,00	0,00
Matorral	11,99	0,43

Tableau 8 : Variation de la valeur de la détachabilité en fonction le l'occupation

Le test de corrélation entre le paramètre hydrologique (détachabilité) et les paramètres physiques (PEN, SO, SC, SS, R, DA, Po10, Po20, Po30, Da10, Da20, H10,), ont démontré

que la détachabilité est en corrélation avec la rugosité, l'humidité à 10 et 20 cm, la densité apparente à 10, 20 et 30 cm ainsi que la porosité à 10 et 20 cm . Le tableau 9 présente la corrélation entre la détachabilité et la rugosité, les autres tableaux de corrélations sont en annexe.

Corrélations		D	R
D	Corrélation de Pearson	1	-,725**
	Sig. (bilatérale)		,002
	N	15	15
R	Corrélation de Pearson	-,725**	1
	Sig. (bilatérale)	,002	
	N	15	15

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Tableau 9: Test de corrélation de la détachabilité en fonction de la rugosité

Les autres résultats de corrélation sont présentés dans l'annexe.

1.5. La matière organique :

Occupations	%MO
Cultures	2,38
Jachère	1,29
Forêt peu dense	8,39
Forêt dense	15,09
Matorral	2,52

Tableau 10 : Variation du taux de matière organique en fonction de l'occupation

Le test du laboratoire nous a donnés les différents teneurs en matière organique en fonction des occupations. D'après le tableau 10, on remarque que le taux le plus élevé en MO est au niveau de la forêt dense, contrairement au jachère qui affiche la teneur minimale. Pour les autres occupations, le taux varie entre 2 et 9 %. Les différentes occupations du sol influencent significativement sa teneur en matière organique. Ces résultats s'accordent avec les résultats obtenus dans les montagnes méditerranéennes du rif occidental par Sabir et al, (2004).

1.6. La texture :

Occupation	%A	%L	%S	Texture
Cultures	5	76	19	Limoneux-fin
Jachère	10	28	62	Limono-sableux
Forêt moyennement dense	22	16	62	Limono-argilo-sableux
Forêt dense	9	6	85	Sablo-limoneux
Matorral	15	14	70	Limono-sableux

Tableau 11 : les textures des différentes occupations du sol en %.

La plus forte teneur en argile se trouve au niveau de la forêt moyennement dense, la plus faible au niveau des cultures.

Pour les limons les cultures affichent la teneur la plus importante contre la plus faible au niveau de la forêt dense.

Pour le sable, la plus grande valeur se trouve au niveau de la forêt dense et contrairement aux cultures qui affichent le taux le plus faible.

1.7 L'indice de végétation normalisé :

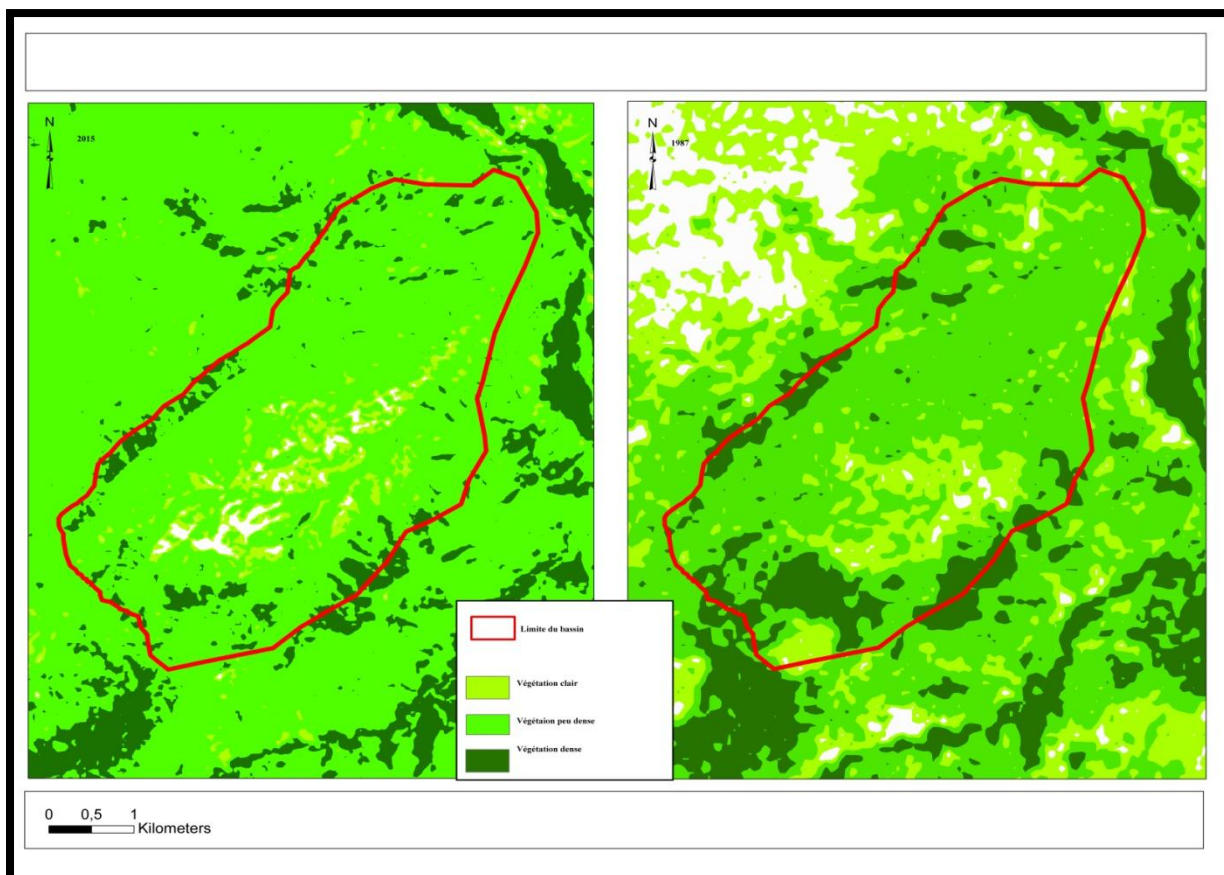


Figure 11 : Cartes des NDVI à partir d'images satellitaires

Les deux cartes de la fig11 représentent l'indice de végétation normalisé des années 1987(à droite) et 2015 (à gauche). Elles démontrent en général une détérioration du couvert végétal d'un point de vue qualitatif et quantitatif. Ceci peut être expliqué par la pression anthropique exercée sur le milieu naturel. Les zones blanches représente les sols nues vue que leur signature spectrale est nul.

En effet, la population de la zone a augmenté d'une façon considérable pendant ces dernières années, accompagnées d'une pression de plus en plus croissante sur les ressources naturelles tels le bois de feu, le défrichage, le surpâturage et les feux de forêt.

L'irrégularité des conditions climatiques (précipitations et les périodes de sécheresse qui peuvent durée des années) fragilisent les écosystèmes forestiers et pré-forestiers vis-à-vis des actions anthropiques.

2. Discussion

Il ressort de ce travail que l'utilisation d'un simulateur de pluie simplifié fournit des indications pertinentes sur les risques de ruissellement et d'érosion en fonction des modes d'utilisation des sols.

Les forêts couvrent bien le sol. L'enrichissent en matière organique, améliorent l'agrégation l'humidité, augmente la porosité, et assurent une infiltration maximale. La nature sablo limoneuse du substrat contribue à ce fort potentiel d'imbibition. Le matorral dégradé pauvre en matière organique, peu poreux et résistant à la pénétration couvre moins bien le sol et donne beaucoup de ruissellement, la couche de battance minimise la détachabilité et réduit automatiquement la charge solide. Les terres de cultures sont bien couvertes et poreuses, mais rapidement appauvries en matière organique au niveau de la couche superficielle suite au labour. Fragiliser, elles se couvrent de croûtes et perdent leur capacité d'infiltration provoquant du ruissellement avec une charge solide élevés même a faibles pentes. Au niveau du jachère la faible résistance à la pénétration ainsi que la texture limono sableuse à forte teneur en sable permettent à l'eau de s'infiltré mieux que sur des surfaces compactées et donnent un ruissellement intermédiaire. Ces résultats concordent avec ceux obtenue par Sabir et al. (2004) dans les montagnes Méditerranéennes du Rif Occidental, Rose et al, (2007) au niveau du bassin de Rheghaya dans le haut atlas ainsi que Rey et Berger (2004).

L'infiltration finale, la pluie d'imbibition, le coefficient de ruissellement et la détachabilité sont liées aux états de surface, en particulier à la surface couverte et la surface fermée par les croûtes et les zones compactées. Ces paramètres sont également liés à la structure et la texture du sol ainsi qu'au taux de matière organique de l'horizon superficiel.

Dans la figure 12 la modélisation des paramètres à noter : l'inclinaison de la pente, le couvert végétal et la nature géologique du substrat et leurs superposition à l'aide d'un SIG a permis de déterminer les zones potentiellement à risque vis-à-vis de l'érosion hydrique au niveau du bassin versant d'Amassine.

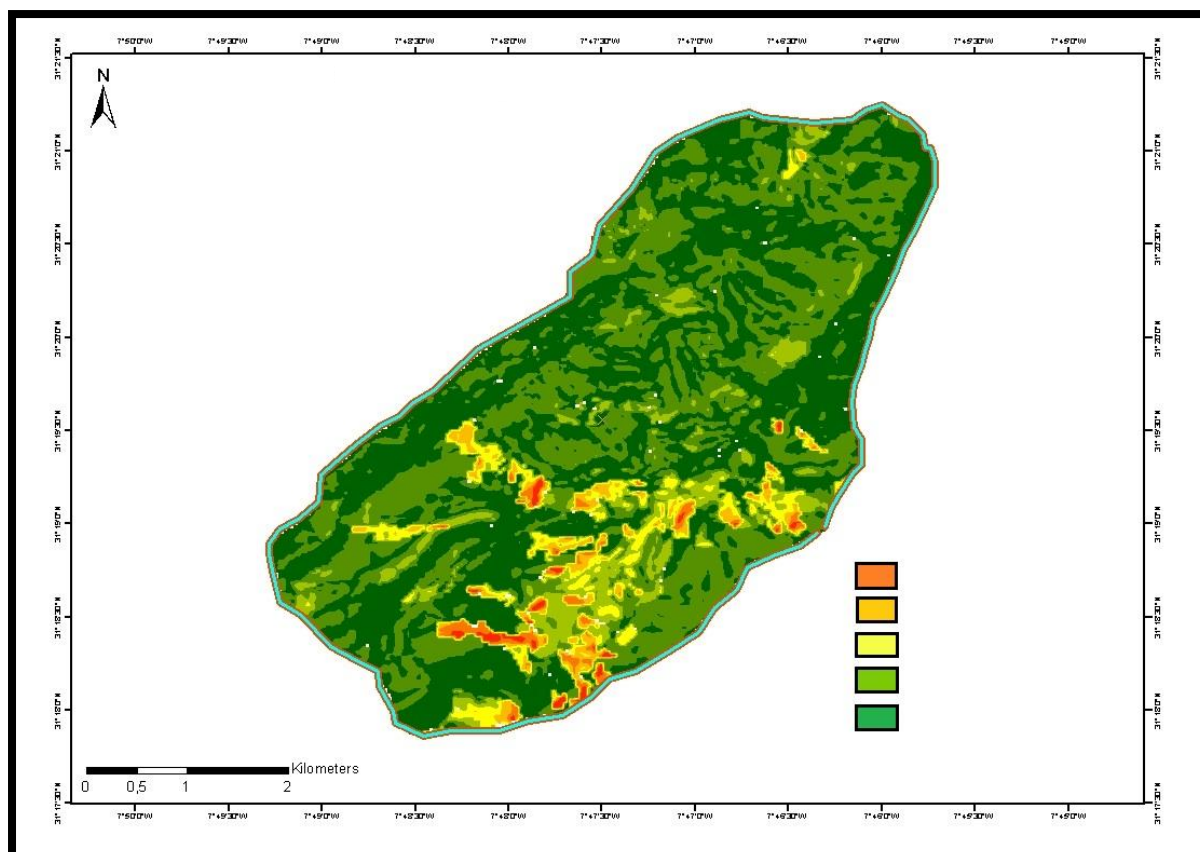


Figure 12 : Carte du risque potentielle a l'érosion du bassin versant d'Amassine

3. Conclusion et recommandations :

Le présent travail a été focalisé sur le diagnostic des causes principales de la variation du taux d'érosion hydrique, à savoir l'occupation du sol et d'autres paramètres physiques. En effet, l'érosion hydrique est l'une des principales menaces à l'égard du capital sol au Maroc. Cette étude est entreprise sur l'un des sites les plus représentatifs de ce phénomène : le bassin versant de l'Ourika et plus précisément le sous bassin d'Amassine.

Afin de pouvoir réaliser ce travail des tests de simulation de pluie et de mesure des différents paramètres physiques ont été fait au niveau de parcelles expérimentales selon différentes occupations, en plus des analyses de laboratoires effectués sur des prélèvements de sol et d'eau de ruissellement.

L'analyse statistique des données a permis de mettre en évidence des corrélations significatives qui peuvent nous aider à quantifier de manière assez exacte le phénomène

d'érosion. Une étude cartographique de la zone a été nécessaire afin de mieux cerner le problème et déterminer les zones les plus susceptibles d'être touchés.

Les risques de ruissellement et d'érosion peuvent donc s'estimer en fonction de l'infiltrabilité des sols. Les terres forestières infiltrent mieux que le matorral tassé, la jachère pauvre en matière organique et les terres de culture instables. L'infiltration finale est liée aux surfaces ouvertes, à la couverture de la surface, au taux d'agrégation proportionnel à la teneur en matière organique. La densité apparente et la teneur en matière organique, peuvent être utilisées comme indicateurs des risques de ruissellement et donc d'érosion.

Afin de lutter contre ce phénomène des mesures de réhabilitation et de prévention doivent être effectuées au niveau de la zone selon le stade de dégradation. Les zones les plus touchées et les moins couvertes pourraient bénéficier d'un reboisement tandis qu'une mise en défens pourrait être suffisante au niveau des zones à préserver.

Néanmoins, il ne faut pas négliger les populations locales liées culturellement et historiquement à la zone. En effet ces dernières sont dépendantes des ressources naturelles pour subsister. L'arboriculture assurent un double rôle ; économique en assurant un revenu aux populations à travers le commerce de fruits, huiles, et bois, et environnemental par la rétention des sols et la lutte contre l'érosion au niveau du bassin versant d'Amassine.

Bibliographie

Abdellaoui.2005. Suivi et simulation de bilan hydro-sédimentaire du barrage d'Oued Saboun (région de Tanger) : apport à la gestion des ressources en eau des retenues collinaires en zones marneuses méditerranéennes. hèse de doctorat de l'université Mohamed V-Agdal.

Al Karkouri j., A. Laouina , E. Roose, M. Sabir, (2000) : Capacité d'infiltration et risques d'érosion des sols dans la vallée des Béni Boufrah-Rif central (Maroc). Réseau érosion Bull. Montpellier IRD. 20, 342-356.

Albergel J., (1987). Genèse et prédétermination des crues au BURKINA FASO. Du m2 au km, étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de doct. Un. Paris 6. Coll. Etudes et Thèse éd. de l'ORSTOM. 341 P.

Ben Chaabane H. (2000) - *L'érosion hydrique sur les piémonts de Jebel Semmama*. Rapport du Ministère de l'Agriculture et des Ressources en Eau , Tunisie, 30 p.

Biron P.E. (1982) : Le Permo-Trias de la région de l'Ourika (Haut-Atlas de Marrakech, Maroc) : lithostratigraphie, sédimentologie, tectonique et minéralisations. Thèse de doctorat 3 cycle ; Stratigraphie. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1982. Français

Bochet E, Garcí'a-Fayos P. 2004. Factors controlling vegetation establishment and water erosion on motorway slopes in Valencia, Spain. *Restoration Ecology* 12: 166–174.

Bonnet D. (1983). Prise en compte des risques naturels en forêt de montagne. Quelques réflexions dans le cas des forêts soumises des Alpes du Nord.1983. 127p. CEMAGREF, Grenoble.

Combes F., Hurand A., Meunier M. 1995. La forêt de montagne : un remède aux crues. Compte-rendu de recherches n° 3, BVRE de Draix. Editeur Cemagref Editions

Fleuriel M. (1998). Synthèse bibliographique : forêt et écoulement des eaux. Aix-en-Provence : Université de Provence, 29 p. (Mémoire de DEA). In Freddy REY et Frédéric BERGER (2004) : Interactions végétation-érosion et génie écologique pour la maîtrise de l'érosion en montagne. (www.inbo-news.org/IMG/pdf/Rey-Berger-2.pdf)

Girard, M.-C., Walter, C., Rémy, J.-C., Berthelin, J. et Morel, J.-L. (2005). Sols et environnement. Paris, DUNOD, 816 p.

Hamma Y., (2004). Cours de conservation des eaux et des sols (version électronique). <http://www.bf.refer.org/toure>

Handel S.N., Robinson G.R., Parsons W.F.J., Mattei J.H. (1997). Restoration of woody plants to capped landfills: root dynamics in an engineered soil. *Restoration Ecology*, vol. 5.

Heusch B. (1970). Estimation et contrôle de l'érosion hydraulique. Société des sciences naturelles et physiques, Maroc, p. 41-54.

Heusch B. (1970). L'érosion du Pré Rif occidental : une étude quantitative de l'érosion hydrique. Société des sciences naturelles et physiques, Maroc,

Humbert et al. 1992 Humbert, J., (1990) : Intérêt de la densité de drainage pour régionaliser les données hydrologiques en zone montagneuse. In: H. Lang et A. Musy, eds., Hydrology in mountainous regions I. Wallingford, UK: IAHS Press, IAHS Publ. 193, 373–380. Disponible à: http://iahs.info/redbooks/a193/iahs_193_0000.pdf

Le Bissonnais Y, Le Souder C. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 1. 1995.

Le Bissonnais Yves (2003) : Maîtrise de l'érosion hydrique des sols cultivés, phénomènes physiques et dispositifs d'action. Rapport final. INRA, Science du sol, Orléans, 76 pages.

Leguedois S. (2003). Mécanismes de l'érosion diffuse des sols : modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés. Thèse de doctorat, Université d'Orléans ; Discipline : Sciences Agronomiques Spécialité : Science du Sol. 179 pages.

Martinez-Mena M., Alvarez Rogel J., Albaladejo J., Castillo V.M. (1999). Influence of vegetal cover on sediment particle size distribution in natural rainfall conditions in a semiarid environment. *Catena*, vol. 3.

McIvor J.G., Williams J., Gardener C.J. 1995. Pasture management influences runoff and soil movement in the semi-arids tropics. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, vol. 35.

Merzouk A., et Black J.R. 1991 : Indices for estimation of interrill erodibility of Moroccan soils. *Catena*, 18, 6: 537-550.

Merzouk A., Sabir M., Berkat O., Roose E., (1996): Effet de maximization du pasturage sur certaines caractéristiques de la surface et la perméabilité d'un sol brun sub-aride dans un milieu steppique marocain (Aarid, Haute Moulouya. *Bull Réseau Erosion*, 16 ; 47-57.

Moir W.H., Ludwig J.A., Scholes R.T. (2000). Soil erosion and vegetation in grasslands of the Peloncillo Mountains, New Mexico. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 64.

Morgan R.P.C. 1990. Modeling the effect of vegetation on air flow for application to wind erosion control. In *Vegetation and erosion: processes and environments*.(Ed. J.B. Thornes); Wiley Chichester; pp. 85-97.

Morgan, R. P. C. and Rickson, R. J. (1990). 'Issues on soil erosion in Europe: the need for a soil conservation policy', in Boardman, J. Foster, D. L. and Dearing, J. A. (Eds), *Soil Erosion on Agricultural Land*, Wiley, Chichester, 591–603.

O'Loughlin C., Xinbao Z. (1986). The influence of fast-growing conifer plantations on shallow landsliding and earthflow movement in New Zealand steeplands. in: *Proc. 18th IUFRO World Congress*, Ljubljana, Yugoslavia, IUFRO, 1986.

Rey F., Ballais J.-L., Marre A., Rovéra G. (2004) – Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes Rendus Geoscience* 336, 991-998.

Rey F., Berger F., (2003). Interactions végétation- érosion et génie écologique pour la maîtrise de l'érosion en montagne. Cemagref ; Grenoble.

Ritter J. (2012). *Gestion des sols*, MAAARO.

Rogers R.D., Schumm S.A. (1991). The effect of sparse vegetative cover on erosion and sediment yield. *Journal of Hydrology*, n° 123.

Roose E. (1996). Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes. Bull. Réseau Erosion, Montpellier, 16, pp. 87-97.

Roose E., Arabi M., Brahamia K., Chebbani R. Mazour M., Morsli B. (1993). Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne : Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES : synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion. Cah. Orstom, Sér. Pédol., vol. XXVIII, n° 2, J993 : 289-308

Rovéra G., Robert Y., Coubat M., Nedjai R. (1999) – Erosion et stades bio-rhexistatiques dans les ravines du Saignon (Alpes de Provence) ; essai de modélisation statistique des vitesses d'érosion sur marnes. Etudes de Géographie Physique, 28, 109-115.

Sabir M., Barthès B., Roose E. (2004). Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du rif occidental (Maroc). Revue Sécheresse 15 (1), pp. 05-110.

Saidi M.E. & Daoudi L. (2000). Risques naturels dans le Haouz de Marrakech. Exemple des crues de l'Ourika, de la Ghiraia et du N'Fis. Colloque international des Chaires maghrébines Unesco-Gaz Naturel sur le thème du développement durable du Maghreb, l'ouverture sur la Méditerranée et la valorisation du patrimoine écologique, humain et culturel. Université Mohammed V, Rabat, 27-29 avril 2000.

Sanchez G., Puig De Fabregas J. (1994) – Interactions of plant growth and sediment movement on slopes in a semi-arid environment. Geomorphology, 9, 243-260.

Van-Dijk P.M., Kwaad F.J.P.M., Klapwijk M. (1996). Retention of water and sediment by grass strips. Hydrological Processes, vol. 10.

Viles H.A. (1990). In Vegetation and erosion: processes and environments. (Ed. J.B. Thornes); Wiley Chichester; pp. 518.

Wischmeier, W. H., and Smith D. D., :1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. Agriculture Handbook no 537, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 58 p.

Annexes:

Tableaux de corrélations et de signification :

Corrélations

		VAR00001	VAR00003
VAR00001	Corrélation de Pearson	1	,694**
	Sig. (bilatérale)		,004
	N	15	15
VAR00003	Corrélation de Pearson	,694**	1
	Sig. (bilatérale)	,004	
	N	15	15

**. La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

If/So

Corrélations

		VAR00001	VAR00002
VAR00001	Corrélation de Pearson	1	,633*
	Sig. (bilatérale)		,011
	N	15	15
VAR00002	Corrélation de Pearson	,633*	1
	Sig. (bilatérale)	,011	
	N	15	15

*. La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).

If/Sc

Corrélations

		VAR00001	VAR00004
VAR00001	Corrélation de Pearson	1	-,695**
	Sig. (bilatérale)		,004
	N	15	15
VAR00004	Corrélation de Pearson	-,695**	1
	Sig. (bilatérale)	,004	
	N	15	15

**. La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

If/Pen

Corrélations

		VAR00001	VAR00005
VAR00001	Corrélation de Pearson	1	-,773**
	Sig. (bilatérale)		,001
	N	15	15
VAR00005	Corrélation de Pearson	-,773**	1
	Sig. (bilatérale)	,001	
	N	15	15

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

If/Ciss

Corrélations

		VAR00001	VAR00003
VAR00001	Corrélation de Pearson	1	-,601*
	Sig. (bilatérale)		,018
	N	15	15
VAR00003	Corrélation de Pearson	-,601*	1
	Sig. (bilatérale)	,018	
	N	15	15

* . La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).

Kr/Sc

Corrélations

		VAR00001	VAR00004
VAR00001	Corrélation de Pearson	1	-,735**
	Sig. (bilatérale)		,002
	N	15	15
VAR00004	Corrélation de Pearson	-,735**	1
	Sig. (bilatérale)	,002	
	N	15	15

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Kr/So

Corrélations

	VAR00001	VAR00005
Corrélation de Pearson	1	,773**
VAR00001 Sig. (bilatérale)		,001
N	15	15
Corrélation de Pearson	,773**	1
VAR00005 Sig. (bilatérale)	,001	
N	15	15

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Kr/Pen

Corrélations

	VAR00001	VAR00004
Corrélation de Pearson	1	-,624**
VAR00001 Sig. (bilatérale)		,001
N	15	15
Corrélation de Pearson	-,624**	1
VAR00004 Sig. (bilatérale)	,001	
N	15	15

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Kr/Po

Corrélations

	VAR00001	VAR00005
Corrélation de Pearson	1	-,774**
VAR00001 Sig. (bilatérale)		,001
N	15	15
Corrélation de Pearson	-,774**	1
VAR00005 Sig. (bilatérale)	,001	
N	15	15

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

D/So

Corrélations

		VAR00001	VAR00005
VAR00001	Corrélation de Pearson	1	-,763**
	Sig. (bilatérale)		,001
	N	15	15
VAR00005	Corrélation de Pearson	-,763**	1
	Sig. (bilatérale)	,001	
	N	15	15

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

D/Sc

Corrélations

		VAR00001	VAR00005
VAR00001	Corrélation de Pearson	1	-,631**
	Sig. (bilatérale)		,001
	N	15	15
VAR00005	Corrélation de Pearson	-,631**	1
	Sig. (bilatérale)	,001	
	N	15	15

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

D/ Pen

Corrélations

		VAR00001	VAR00005
VAR00001	Corrélation de Pearson	1	-,773**
	Sig. (bilatérale)		,001
	N	15	15
VAR00005	Corrélation de Pearson	-,773**	1
	Sig. (bilatérale)	,001	
	N	15	15

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

D/Da

Corrélations

	VAR00001	VAR00005
Corrélation de Pearson	1	-,614**
VAR00001 Sig. (bilatérale)		,001
N	15	15
Corrélation de Pearson	-,614**	1
VAR00006 Sig. (bilatérale)	,001	
N	15	15

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

D/Po

Corrélations

	VAR00001	VAR00005
Corrélation de Pearson	1	-,748**
VAR00001 Sig. (bilatérale)		,002
N	15	15
Corrélation de Pearson	-,748**	1
VAR00002 Sig. (bilatérale)	,002	
N	15	15

** . La corrélation est significative au niveau 0.02 (bilatéral).

D/H

Occupations	If (mm/h)		Pi (mm)		Kr (%)		D (g/m ² /h)	
	Moy.	s	Moy.	s	Moy.	s	Moy.	s
Culture	69,08ac	6,31	a6,30	2,52	69,08ac	6,31	a20,87	1,92
Jachère	58,23ac	13,5 6	a3,36	1,45	58,23a	13,56	a14,54	4,14
Forêt peu dense	55,76ac	8,31	a2,40	1,20	55,76a	8,31	b10,52	4,79
Forêt dense	80,00acd	0,00			80,00a	0,00	0,00	0,00
Matorral	43,55b	2,11	Bc1,6 7	1,20	43,55b	2,11	b11,99	0,43

Occupations	SC %		SO %		PEN (Kg/cm ²)		SS (Kg/cm ²)		R %	
	Moy.	s	Moy.	s	Moy.	s	Moy.	s	Moy.	s
Culture	78,33a	2,89	16,67a	2,89	1,04a	0,24	1,06a	0,11	3,52a	0,03
Jachère	43,33b	5,77	4,67b	0,58	1,14a	0,19	1,53a	0,20	2,87a	0,57

Forêt peu dense	75,00a	5,00	14,00a	1,73	0,50b	0,25	0,74ac	0,41	4,31ac	0,14
Forêt dense	96,00bc	1,73	16,67a	2,89	0,13b	0,03	0,40b	0,03	5,56b	0,28
Matorral	56,67b	7,64	4,00b	1,73	4,38bc	0,03	2,71bc	0,04	3,33a	0,28

Occupations	Da ₁₀ (g/cm ³)		Da ₂₀ (g/cm ³)		Da ₃₀ (g/cm ³)		P ₁₀ (%)		P ₂₀ (%)	
	Moy.	s	Moy.	s	Moy.	s	Moy.	s	Moy.	s
Culture	1,48a	0,19	1,43a	0,19	1,50	0,19	44,08a	7,00	45,86a	7,01
Jachère	1,57a	0,19	1,55a	0,20	1,82	0,33	40,81a	7,34	41,59a	7,39
Forêt peu dense	1,09ac	0,18	1,31ac	0,01	1,33	0,01	58,68b	6,81	50,58b	0,43
Forêt dense	0,87ac	0,12	0,94ac	0,07	1,08	0,07	67,22b	4,36	64,65b	2,64
Matorral	1,56a	0,18	1,70a	0,30	2,03		41,23a	6,78	35,87a	11,30

Occupations	P ₃₀ (%)		H ₁₀ (%)		H ₂₀ (%)		H ₃₀ (%)	
	Moy.	s	Moy.	s	Moy.	s	Moy.	s
Culture	43,54a	7,33	18,00a	5,00	26,33	5,51	39,67	8,74
Jachère	31,17a	12,59	11,33a	5,69	22,33	6,66	33,00	2,65
Forêt peu dense	49,87ac	0,41	40,67b	6,03	43,33	7,64	65,33	14,50
Forêt dense	59,14ac	2,73	36,67b	4,16	44,00	9,64	40,33	4,73
Matorral	23,58b		33,33b	4,16	37,33	9,29	41,33	9,87

Abréviation	Signification	Unité	Formule de calcul
If	Capacité d'infiltration finale	mm/h	If = P - R Avec : P: Intensité de la pluie simulée (mm / h) = ((I1 + I2) / 2) * 60 I1: Intensité initiale de la pluie simulée avant simulation (l / min) I2: Intensité finale de la pluie simulée après simulation (l / min) R: Intensité du ruissellement (mm / h) = ((Vr / 1000) / 5) * 60 Vr : Volume ruisselé (ml).
Pi	Pluie d'imbibition	mm / h	Pi = (P * Tr) / 60 Avec : P: Intensité de la pluie simulée (mm / h) Tr: Temps de déclenchement de ruissellement (mn)
D	Détachabilité	g / m ² / h	D= Poids des sédiments (g) * (60 / durée de simulation (mn))
Kr	Coefficient de ruissellement	%	Kr = (LR / LP) * 100 Avec : LR: lame d'eau ruisselée totale(mm) = Σ LRi LRi: lame d'eau ruisselée à chaque pas de temps (mm) = (R i/60) * Δt Ri: Intensité du ruissellement à chaque pas de temps (mm) Δt : Pas de temps (mn) LP: lame d'eau précipitée totale(mm)= LR+LI; LI: lame d'eau infiltrée totale (mm)=Σ LIi LIi: lame d'eau infiltrée à chaque pas de temps (mm)= (Ii / 60) * Δt
R	Indice de rugosité	%	R = (L-Li / Li) * 100 Avec: Li: Longueur initiale de la chaînette (m) L: Longueur mesurée (m)

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique du bassin versant d'Amassine	21
Figure 2 : Carte du Bassin versant d'Amassine	22
Figure 3 : Carte de découpage administratif de la région de Marrakech Safi.....	23
Figure 4 : Cartes des altitudes du bassin versant d'Amassine	26
Figure 5: Cartes des pentes du bassin versant d'Amassine.....	25
Figure 6 : Cartes des expositions du bassin versant d'Amassine	27
Figure 7 : Carte géologique du bassin versant d'Amassine	28
Tableau 1 : Moyennes cumulées des précipitations mensuelles en mm	29
Figure 8 : Carte du réseau hydrographique du Bassin versant d'Amassine	30
Figure 9 : Carte d'occupation du sol du bassin versant d'Amassine.....	31
Figure 10 : Evolution de l'infiltration en fonction du temps selon l'occupation du sol	41
Figure 11 : Cartes des NDVI à partir d'images satellitaires Landsat TM-1987 et Landsat 8-2015.....	47
Figure 12 : Carte du risque potentielle a l'érosion du bassin versant d'Amassine.....	49

Liste des tableaux

Tableau 1 : Moyennes cumulées des précipitations mensuelles en mm	29
Tableau 2 : Taux d'activité dans la province d'Al Haouz	32
Tableau 3 : Taux de chômage dans la province d'Al Haouz	32
Tableau 4 : Test de corrélation d'infiltration en fonction du cisaillement.....	42
Tableau 5 : Variation de la valeur de la pluie d'imbibition en fonction le l'occupation	42
Tableau 6 : Variation du taux du coefficient de ruissellement en fonction de l'occupation	43
Tableau 7: Test de corrélation du coefficient de ruissellement en fonction de la détachabilité	44
Tableau 8 : Variation de la valeur de la détachabilité en fonction le l'occupation	44
Tableau 9: Test de corrélation de la détachabilité en fonction de la rugosité.....	45
Tableau 10 : Variation du taux de matière organique en fonction de l'occupation	45
Tableau 11 : les textures des différentes occupations du sol en %.....	46

Liste des planches

Image 1 : Pénétrromètre	35
Image 2 : Scissomètre.....	35
Image 3 : La chainette	35
Image 4 : Surface de simulation sur culture.....	37
Image 5 : le cylindre et les marteaux.....	38

Liste d'abréviations

A : Argile

ABHT : Agence de bassin hydraulique de Tesnsift

Da : Densité apparente

D : Détachabilité

GIREPSE : Gestion intégrée des ressources en eau et paiement des services
environnementaux

H : Humidité

HCP : Haut commissariat au plan

If : Infiltration finale

L : Limon

MO : matière organique

NDVI : Normalized difference vegetation index

PEN : Résistance à la pénétration

PI : Pluie d'imbibition

Po : Porosité

R : Rugosité

S : Sable

Sc : Surface couverte

SIG : Système s'information géographique

So : Surface ouverte