



**UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE**  
**Faculté des Sciences et Techniques**  
**Béni-Mellal**



*Centre d'Études Doctorales : Sciences et Techniques*  
*Formation Doctorale : Ressources Naturelles, Environnement et Santé*

**THÈSE**

Présentée par

**Aafaf EL JAZOULI**

Pour l'obtention du grade de

**DOCTEUR**

*Spécialité : Géosciences*

*Option : Géomatique et Environnement*

---

---

**Cartographie et modélisation des risques d'érosion  
hydrique et de glissement de terrain au niveau du bassin  
amont d'Oum Er Rbia**

---

---

Soutenue le Samedi 25 Juillet 2020 devant la commission d'examen :

Pr.MOHAMED EL BAGHDADI	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T. Béni-Mellal, Maroc	Président
Pr.AHMED FIKRI	Professeur, Université Hassan II, F.S. BEN M'SIK, Maroc	Rapporteur
Pr.AHMED BOUKDIR	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T. Béni-Mellal, Maroc	Rapporteur
Pr.ABDELGHANI BOUDHAR	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T. Béni-Mellal, Maroc	Rapporteur
Pr.EL MOSTAFA BACHAOUI	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T. Béni-Mellal, Maroc	Examineur
Pr.AHMED BARAKAT	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T. Béni-Mellal, Maroc	Directeur de thèse

*Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on les remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute Notre existence.*

## DÉDICACES

*Au nom du Dieu le puissant le miséricordieux, je dédie ce travail :*

***À celle qui m'a allaitée le lait de la vie, qui m'a appris le sens du sacrifice et qui m'a tout donné sans rien attendre.***

### ***À ma Mère***

*Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être. J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en moi. Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et de mon infini amour. Que dieu tout puissant vous garde et vous procure santé, bonheur et longue vie pour que vous demeuriez le flambeau illuminant le chemin de vos enfants.*

### ***À mon Père***

*En vous, je vois un père dévoué à sa famille. Un père toujours prêt à me soutenir moralement et financièrement. Les mots expressifs soient-ils restés faibles pour énoncer ma gratitude hautement profonde. Que Dieu puisse vous accorder longue vie pleine d'amour, de bonheur et de paix.*

### ***À mes sœurs***

*Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Que le Tout-Puissant nous garde toujours ensemble. Je vous aime...*

### ***À mon Frère***

*Que ce travail soit le témoignage de mes sentiments d'amour et de tendresse envers toi. Puisse l'amour et la fraternité nous unissent à jamais.*

### ***À ma famille***

*Veillez percevoir à travers ce travail, l'expression de ma profonde affection et énorme respect. Avec tout l'amour que je vous porte, je vous souhaite beaucoup de bonheur dans votre vie.*

### ***À tous mes Amis(es)***

*Qui font partie de ces personnes rares par leur gentillesse, leur tendresse et leur grand cœur. Qu'elles trouvent ici, le témoignage de tout mon amour et toute ma reconnaissance pour leur inlassable soutien et serviabilité.*

***À tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.***

**Aafaf EL JAZOULI**

*Merci* 

## REMERCIEMENTS

*Ce mémoire est l'aboutissement de mes travaux c'est-à-dire quatre années de travail, mais aussi la fin de mes études. Je remercie d'avance tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réussite de cette thèse.*

*Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de thèse, **Monsieur Ahmed BARAKAT**. Je le remercie de m'avoir fait confiance pour réaliser ces travaux. Sa disponibilité, sa confiance et sa patience, ses compétences scientifiques et rédactionnelles, ont été très importantes dans la réussite de mes travaux. Je vous remercie de m'avoir accordé une grande partie de ta disponibilité pour répondre à mes questions ainsi que de m'avoir aidé dans ma formation sur le métier de chercheur. Sachez que je suis très fière de compter parmi vos doctorants. Je vous adresse un GRAND MERCI.*

*Je remercie également **Mme Jamila RAIS** pour son aide en prodiguant de nombreux conseils que je m'appliquerai à suivre du mieux que je peux. Tout ceci était pour moi très abstrait au départ. Au cours de ces quatre années, vous m'avez permis de découvrir l'enseignement et l'encadrement d'étudiants qui sont à mes yeux des choses importantes, car elles permettent la diffusion, mais surtout la transmission du savoir scientifique.*

*Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur le Président de l'Université Sultan Moulay Slimane, à Monsieur **MELIANI**, Doyen de la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal et Directeur du CEDoc pour tous les efforts d'accompagnement afin de soutenir ce travail de thèse dans des bonnes conditions.*

*Je remercie vivement tout le staff administratif, pour les efforts qu'ils n'ont cessé de déployer pour favoriser la recherche scientifique au sein de la Faculté des Sciences et Techniques*

*J'exprime mes sincères remerciements Professeurs du département des Sciences de la terre, je cite notamment **Mme SAJI Rachida, Mr Mohammed EL BAGHDADI**, pour son temps réservé pour être là en cas de besoin.*

*Mes grands remerciements s'adressent aussi à **Pr Abderrazak EL ALBANI**, Enseignant Chercheur à l'Université de Poitiers, ainsi que tout le groupe de recherche, pour l'accueil chaleureux au sein du Laboratoire d'Hydrogéologie, Argiles, Sols et Altérations et IC2MP.France, durant mon séjour*

*Ces années de thèse n'auraient pas été aussi agréables sans la convivialité de mes chers collègues doctorants des laboratoires de département de Sciences de la terre, je pense notamment à Rida, Hafsa, Widad, Hakima, Lalla aicha, Mohammed, Abdessamad, Hassania. Je vous remercie pour leur soutien moral et intellectuel.*

*Je n'oubliais pas mes parents pour leurs contributions, leurs soutiens et leurs patiences.*

*Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis(es), qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.*

QUAND ON VEUT, ON PEUT !!!

## AVANT PROPOS

- Nom et Prénom de l'auteur : **EL JAZOULI Aafaf**
- *Intitulé du travail* : « *Cartographie et modélisation des glissements de terrain et de l'érosion hydrique dans le haut bassin versant de l'Oum Er Rbia (Moyen Atlas, Maroc)* ».
- *Encadrant* :
  - *Nom, Prénom et grade* : BARAKAT Ahmed. Professeur d'Enseignement Supérieur (PES)
  - *Laboratoire et Institution* : Géorressources et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques. Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal.
- *Lieux de réalisation des travaux (laboratoires, institution ...)* :
  - *Laboratoire Géorressources et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques. Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal.*
  - *Période de réalisation du travail de thèse* : depuis Janvier 2016
- Ce travail a donné lieu aux résultats valorisés à travers de multiples articles et communications.

### Articles

1. **Aafaf El Jazouli**, Ahmed Barakat, Rida Khellouk (2020): Geotechnical study on landslides susceptibility in the high basin of the Oum Er Rbia River (Morocco) *Geology, Ecology, and Landscapes*, doi: 10.1080/24749508.2020.1743527
2. **El Jazouli A**, Barakat A, Khellouk R (2019) GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco) *Geoenvironmental Disasters* 6:3
3. **El Jazouli A**, Barakat A, Khellouk R, Rais J, El Baghdadi M (2019) Remote sensing and GIS techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the Oum Er Rbia River (Morocco) *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 13:361-374
4. **El Jazouli A.**, Barakat A., Ghafiri A., El Moutaki S., Ettaqy A., Khellouk R. (2017) Soil erosion modeled with USLE, GIS and remote sensing - A case study of Ikkour watershed in Middle Atlas (Morocco). *Geoscience Letters*, 4:25. doi: 10.1186/s40562-017-0091-6
5. Barakat A, Ouargaf Z, Khellouk R, **El Jazouli A**, Touhami F (2019d) Land use/land cover change and environmental impact assessment in béni-mellal district (Morocco) using remote sensing and GIS *Earth Systems and Environment*:1-13

6. Barakat, A., R. Khellouk, **A. El Jazouli**, F. Touhami, and S. Nadem (2018), Monitoring of forest cover dynamics in eastern area of Béni-Mellal Province using ASTER and Sentinel-2A multispectral data, *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2(3), 203-215.
7. Barakat A, Ennaji W, **El Jazouli A**, Amediat R, Touhami F (2017) Multivariate analysis and GIS-based soil suitability diagnosis for sustainable intensive agriculture in Beni-Moussa irrigated subperimeter (Tadla plain, Morocco). *Modeling Earth Systems and Environment (MESE)*, 3:3. doi: 10.1007/s40808-017-0272-5
8. **Aafaf El Jazouli**, Ahmed Barakat, Rida Khellouk: Soil degradation mapping using GIS, remote sensing, and laboratory analysis in the Oum Er Rbia high basin, middle atlas, morocco.

## Communications

1. Aafaf EL Jazouli, Ahmed Barakat, Rida Khellouk (2018): Soil degradation mapping using GIS, Remote sensing, and Laboratory analysis in the Oum Er Rbia high basin, Middle Atlas, Morocco. Colloque international sur la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique, du 19 au 20 novembre 2018 à l'IAV Hassan II, Rabat.
2. A. El Jazouli, A. Barakat, R. Khellouk, J. Rais, M. El Baghdadi (2017). Apport de la télédétection et SIG dans la surveillance et prévision des changements de l'utilisation des terres/de la couverture terrestre : cas du Haut-bassin d'Oum Er Rbia (Moyen Atlas, Maroc). Colloque International des Jeunes Chercheurs (CIJC2017), 18-19 Décembre, Faculté des Sciences, Tétouan.
3. A. El Jazouli, A. Barakat, R. Khellouk, J. Rais, M. El Baghdadi (2017) Effects of land use changes on soil erosion in the upper watershed of Oum Er Rbia River. 6ème Edition du Congrès International « Eaux, Déchets et Environnement (EDE6) », 12-14 Décembre, FST-Béni Mellal.

4. Aafaf El Jazouli, Ahmed Barakat, Rida Khellouk, Jamila Rais (2017) Remote-sensing and GIS-based landslide-susceptibility mapping using analytic hierarchy process in the upstream of Oum Er Rbia watershed (middle Atlas, Morocco). Ecole de Printemps « Télédétection et Techniques Spatiales » 8-12 Mai, FST-Béni Mellal.
5. Aafaf El Jazouli, Ahmed Barakat, Rida Khellouk, Jamila Rais (2016) Application of AHP method to landslide susceptibility mapping of Srou river basin (Middle atlas, Morocco) through GIS and remote sensing. 5ème Colloque International "Environnement et Développement Durable" Sous le thème "Changements Climatiques : Causes, Impacts, Atténuation et Adaptation" du 10 au 15 Octobre 2016. Lieux : Rabat, Settat et Kenitra.
6. Aafaf El Jazouli, Ahmed Barakat (2016) Cartographie des zones exposées aux glissements de terrain dans le bassin versant de l'Oued Srou (Moyen-Atlas, Maroc) : approche par SIG et méthode AHP. 3rd Edition International Conference on Geospatial Technologies for Water Resources GTW, organisé A l'occasion de la COP 22 à Marrakech, 11-12 Novembre 2016.
7. Aafaf El Jazouli, Abdessamad GHAFIRI, Abderrahim ETTAQY, Ahmed Barakat (2016) Mapping and assessment of water erosion in the Ikkour watershed (Middle atlas, Morocco). 5ème colloque international du réseau « Eaux & Climats » organisé à FST-Fès, 12-13 Octobre 2016.
8. Aafaf El Jazouli, Abdessamad GHAFIRI, Abderrahim ETTAQY, Ahmed Barakat (2016): MAPPING AND ASSESSEMENT OF WATER EROSION IN THE IKKOUR WATERSHED (MIDDLE ATLAS, MOROCCO). 7th International Scientific Agriculture Symposium "Agrosym", 06th to 09th October on Jahorina Mountain, Bosnia and Herzegovina
9. Aafaf El Jazouli, Ahmed Barakat (2016) Application of AHP method to landslide susceptibility mapping of Srou river basin (Middle Atlas, Morocco) through GIS and remote sensing ». FORUM INTERNATIONAL SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES Sous le thème " La lutte contre les effets de changement climatique, vecteur de développement économique et social durable et intégré ", 18 - 19 Octobre 2016 À l'Université Sultan Moulay Slimane.
10. Aafaf El Jazouli, Ahmed Barakat (2016) Application of GIS for modeling soil loss rate in Ououmana watershed (Middle Atlas, Morocco). FORUM INTERNATIONAL SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES sous le thème " La lutte contre les effets de changement climatique, vecteur de développement économique et social durable et intégré ", 18 - 19 Octobre 2016 À l'Université Sultan Moulay Slimane.

## *Motivations et intérêts du sujet*

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la préparation d'une thèse de doctorat en Géosciences et Environnement. Pendant toute la période de la thèse, nous avons pu acquérir les notions et les outils qui requièrent le traitement des sujets relatifs aux paysages et au risque hydrologique, précisément, les risques d'érosion et du glissement de terrain. Alors, ce projet de thèse en relation avec le risque d'érosion, représente un terrain adéquat pour mettre en pratique et approfondir mes connaissances scientifiques en tant qu'étudiante chercheuse. Pour cette étude, nous focalisons sur le risque d'érosion et du glissement de terrain du haut bassin versant de l'Oum Er Rbia. Ce fléau est toujours présent depuis longtemps dans le Moyen Atlas marocain, il se manifeste par des crues produisant des dégâts énormes. Les rivières débouchant sur la ville de Khénifra présentent une morphologie particulière, décrite par les points suivants :

- Des sous-bassins versants, qui connaissent un grand problème d'érosion dont témoignent les accumulations de la sédimentation sur les versants,
- Des pentes très fortes des talwegs favorisant le transport solide,
- Des lits d'écoulement qui sont étroits et bien individualisés à l'amont sur les fortes pentes,
- Une habitation forte sur les versants et plus proche de l'oued.

Sur le plan scientifique et technique, les modèles de simulation numérique ne prennent pas en compte toutes les composantes du calcul des pertes, et malgré quelques aménagements réalisés au niveau des versants, le risque persiste d'où l'importance d'une étude globale et précise concernant tous les facteurs directs et indirects qui peuvent causer ce phénomène. Cette étude nécessite plusieurs sortes de données ainsi que l'application des modèles informatiques pour la simulation de ces données pour le contrôle de ce phénomène.

## Résumé

Le bassin amont d'Oum Er Rbia s'étend sur une superficie de 3616.21 km<sup>2</sup>, il draine essentiellement le Moyen Atlas calcaire. Sa remarquable stabilité tient à son socle gréseux et au processus de karstification. En revanche, les vallées creusées dans l'argile du Trias sont le siège d'une forte érosion par sapement des berges et apparition des glissements de terrain, particulièrement dans la dépression Srou-Khénifra. L'érosion devient alors spectaculaire et les barrages s'ensavent. L'objectif de ce travail est d'étudier qualitativement et quantitativement ce fléau. Pour se faire la méthode de l'équation universelle de perte en sol dans sa version révisée (USLE) pour l'érosion hydrique, et celle du processus d'hiérarchie analytique (AHP) pour la modélisation de la susceptibilité aux glissements de terrain ont été utilisées. La première nécessite l'intégration des cartes thématiques des facteurs du modèle RUSLE qui sont l'agressivité des pluies, la longueur et l'inclinaison de la pente, le couvert végétal, l'érodibilité des sols et les pratiques antiérosives. La deuxième méthode aussi intègre des cartes thématiques des facteurs notamment l'occupation du sol, les facteurs topographiques à savoir l'altitude, la pente et l'exposition, la distance au réseau hydrographique, la distance aux routes, la distance aux failles, la lithologie. Chacun de ces facteurs a été calculé moyennant les SIG et la télédétection.

La superposition des différentes cartes de ces paramètres a permis de produire la carte d'érosion dans la zone d'étude. Cette carte montre que le phénomène d'érosion hydrique touche l'ensemble du bassin versant d'Oum Rbia, mais à des niveaux différents. Ainsi, le taux moyen des pertes en sol est de 250 t/ha/an, avec 22.59 % de la superficie du bassin est soumise à une érosion comprise entre 50 et 400 t/ha/an enregistrée principalement au niveau des zones à pente forte et à érodibilité élevée avec un faible couvert végétal, ce qui témoigne de l'importance de l'étude de l'érosion au niveau du bassin étudié.

L'évaluation qualitative de l'érosion hydrique et du glissement de terrain sur le haut bassin de l'Oum Er-Rbia a confirmé la dominance du relief accidenté, constitué de pentes abruptes à très abruptes sur 22.59 % de la surface du bassin. Aussi, la lithologie est assez tendre sur les pentes avec une dominance des roches ou sols sédimentaires faiblement ou modérément compactés (ardoise, schiste, marne, etc.). Cette érosivité forte est le résultat d'une friabilité élevée des roches, d'une agressivité des pluies intense et un relief accidenté. L'influence de la dégradation de la couverture végétale naturelle et le développement de l'occupation humaine s'ajoutent en tant que facteur anthropique.

**Mots Clés :** haut bassin versant d'Oum Er-Rbia, érosion, susceptibilité, glissements de terrain, RUSLE/USLE, SIG, Télédétection, AHP

## **Abstract**

The Upper Um Rbia stretches over an area of 3616.21 Km<sup>2</sup>; it drains mainly the calcareous Middle Atlas. Its remarkable stability is due to its sandstone base and the process of karstification. On the other hand, the valleys dug in the Triassic clay are the site of a strong erosion by undermining the banks and the appearance of landslides, particularly in the Srou-Khénifra depression. The erosion then becomes spectacular and the dams are silted up. The objective of this work is to study qualitatively and quantitatively this scourge. To make the method of the universal soil loss equation in its revised version (USLE) for water erosion, and that of the analytical hierarchy process (AHP) for the modeling of susceptibility to landslides. The first one involves the integration of the thematic maps of the RUSLE model factors, which are the aggressivity of the rains, the length and inclination of the slope, the vegetation cover, the erodibility of the grounds and the anti-erosion practices. The second method also incorporates thematic maps of factors including land use, topographical factors namely altitude, slope and exposure, distance to the river system, distance to roads, distance to faults, lithology. Each of these factors calculated using GIS and remote sensing.

The superposition of the different maps of these parameters made it possible to deduce the erosion map from which, it appears that the erosion phenomenon affects the whole of the Umm Rbia watershed but at different levels. Thus, the average soil loss rate is 250 t / ha / year, with 22.59% of the basin area being eroded by between 50 and 400 t / ha / year mainly recorded in areas with steep slopes and high erodibility with low vegetation cover, which reflects the importance of this phenomenon in the basin studied.

The qualitative assessment of water erosion and landslide in the Upper Oum Er-Rbia Basin confirmed the dominance of rugged terrain, consisting of steep to very steep slopes on 22.59% of the basin's surface. In addition, the lithology is quite soft on the slopes with dominance of sedimentary rocks or soils weakly or moderately compacted (slate, shale, marl, etc.). This strong erosivity is the result of high friability of the rocks, intense rainfall aggression and rugged terrain. The influence of the degradation of natural vegetation cover and the development of human occupation added as an anthropogenic factor.

### **Key words:**

Upper Oum Er-Rbia watershed, erosion, susceptibility, landslides, RUSLE / USLE, GIS, Remote sensing, AHP

## ملخص

يمتد الجزء العلوي من أم ربيع على مساحة 3616.21 كيلومتر مربع، ويستنزف بشكل رئيسي الأطلس المتوسط الجبيري. استقراره الملحوظ يرجع إلى قاعدته من الحجر الرملي وعملية التقرن. من ناحية أخرى، فإن الوديان التي تم حفرها في الطين الترياسي هي موقع تآكل قوي من خلال تآكل ضفاف الأنهار وظهور الانهيارات الأرضية، لا سيما في منخفضو خنيفة. ثم يصبح التآكل مذهباً والسدود مغمورة. الهدف من هذا العمل هو دراسة هذا البلاء نوعياً وكمياً. لجعل طريقة معادلة فقدان التربة الشاملة في نسختها المنقحة (USLE) لتآكل المياه، وطريقة التسلسل الهرمي التحليلي (AHP) لنمذجة التعرض للانهيارات الأرضية. الأولى تتضمن تكامل الخرائط المواضيعية لعوامل نموذج RUSLE وهي عدوانية الأمطار وطول المنحدر وميله، وغطاء الغطاء النباتي، وتآكل الأسطح، وممارسات مكافحة التآكل. تشمل الطريقة الثانية أيضاً على خرائط مواضيعية للعوامل بما في ذلك استخدام الأراضي، والعوامل الطبوغرافية وهي الارتفاع والمنحدر والتعرض، والمسافة إلى نظام النهر، والمسافة إلى الطرق، والمسافة إلى الفوالق، الخصائص الصخرية. تم حساب كل من هذه العوامل باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد.

مكّن تراكب الخرائط المختلفة لهذه البارامترات من استنباط خريطة التعرية التي يبدو أن ظاهرة التعرية تؤثر على كامل مستجمعات المياه في أم ربية ولكن على مستويات مختلفة. وبالتالي، فإن متوسط معدل فقد التربة هو 250 طن / هكتار في العام، مع تآكل 22.59 % من مساحة الحوض بما يتراوح بين 50 و400 طن / هكتار في السنة مسجلة بشكل رئيسي في المناطق ذات المنحدرات الحادة. وقابلية عالية للتآكل مع الغطاء النباتي المنخفض، مما يعكس أهمية هذه الظاهرة في الحوض الذي تمت دراسته.

أكد التقييم النوعي لتآكل المياه والانهيار الأرضي في حوض أم الربيع الأعلى على هيمنة التضاريس الوعرة، التي تتكون من منحدرات شديدة الانحدار إلى حد حاد على 22.59% من سطح الحوض. كذلك، فإن علم الليثولوجيا ناعم جداً على المنحدرات بهيمنة الصخور الرسوبية أو التربة المضغوطة بشكل ضعيف أو معتدل (الأردواز، الصخر الزيتي، المرل، إلخ). هذا التآكل القوي هو نتيجة للتهيج الشديد للصخور وعدوان هطول الأمطار الشديد والتضاريس الوعرة. يضاف تأثير تدهور الغطاء النباتي الطبيعي وتطور الاحتلال البشري كعامل من العوامل البشرية.

### الكلمات المفتاحية:

RUSLE / USLE, GIS,AHP، التآكل، الحساسية، الانهيارات الأرضية، الحوض المائي لأم الربيع، الاستشعار عن بعد

## Liste des figures

Figure I. 1: Processus de l'érosion hydrique ( <a href="http://www.agirpouurladiable.org/html/do_erosion.html">http://www.agirpouurladiable.org/html/do_erosion.html</a> ) .....	11
Figure I. 2: Types de glissements de terrain les plus fréquents. Source: USGS (United States Geological Service), fact sheet 2004-3072 <a href="http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/">http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/</a> .....	15
Figure I. 3 Nomographe permettant une évaluation rapide du facteur "K" d'érodibilité des sols (d'après Wischmeier, Johnson et Cross, 1971).....	27
Figure I. 4 Structure hiérarchique d'un problème selon la méthode AHP .....	38
Figure II. 5 Localisation géographique du bassin du haut Oum Er-Rbia.....	42
Figure II. 6 : Coupe transversale du Faille du Moyen Atlas Sud dans son segment central au sud du plus haut sommet du Moyen Atlas (J. Bou Naceur, 3137 m.s.l.), après Laville et al. (2007). .....	44
Figure II. 7: Extrait de la zone d'étude digitalisé de la carte géologique du Maroc au 1 : 500 000 .....	46
Figure II. 8 : Carte hypsométrique des altitudes du haut bassin versant d'Oum Er Rbia .....	50
Figure II. 9: Courbe hypsométrique du bassin versant du haut Oum Er Rbia .....	50
Figure III. 10: Organigramme de la méthode utilisée .....	56
Figure III. 11 : Organigramme du modèle CA-Marcov .....	57
Figure III. 12: Occupation du sol du bassin d'étude pour les trois années 2003, 2013 et 2017 .....	61
Figure III. 13 : Gain / perte (%) de surface pour chaque LULC entre différentes périodes. ...	62
Figure IV. 14: Situation géographique de la zone d'étude .....	66
Figure IV. 15: Organigramme de la méthodologie .....	70
Figure IV. 16: Carte des facteurs de l'érosion du bassin versant Ikkour(a) facteur R, (b) facteur K et (c) facteur C .....	72
Figure IV. 17: Carte de la pente (a) et du facteur LS (b) du bassin versant Ikkour .....	73
Figure IV. 18: Carte des pertes en sol (a), carte de dégradation des sols obtenue à l'aide l'utilisation conjointe de l'IC, NDVI, et l'IF (b).....	76
Figure V. 19: Carte de l'érosivité des pluies du haut bassin versant d'Oum Er Rbia.....	83
Figure V. 20 : Prélèvement des échantillons des sols au niveau du bassin.....	84
Figure V. 21: Protocole granulométrique par pipette de Rhobinson .....	86
Figure V. 22: Diagramme de texture des échantillons de la zone d'étude.....	86
Figure V. 23: Carte d'érodabilité des sols du haut bassin versant d'Oum Er Rbia .....	87
Figure V. 24: Carte du facteur topographique LS .....	88
Figure V. 25: Carte du facteur C des trois années 2003, 2017 et 2030.....	89
Figure V. 26: Carte de pertes en sol pour les années de 2003, 2017 et 2030 .....	91
Figure V. 27 : Exemples de type d'érosion dans haut bassin versant d'Oum Er Rbia.....	94
Figure VI. 28: Cartes des facteurs contributifs à la susceptibilité aux glissements de terrain produites pour la zone d'étude : (a) aspect de la pente, (b) la pente, (c) élévation, (d) utilisation des sols. ....	104
Figure VI. 29: Cartes de facteurs contribuant à la susceptibilité aux glissements de terrain produite pour la zone d'étude : (a) distance du réseau de drainage, (b) distance des routes, (c) distance aux failles, (d) Lithologie .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure VI. 30: Carte de susceptibilité aux glissements de terrain basée sur le modèle AHP	113
Figure VI. 31: Exemple de route détruite à cause du glissement de terrain.....	116

Figure VII. 32 : Exemple de réseau de couche tétraèdre (a) et d'octaèdre (b) formant les argiles (Hillel 1998), et l'exemple de la structure d'un feuillet de kaolinite (T/O) (c).....	119
Figure VII. 33: Préparation des échantillons en poudre et lames orientés pour la DRX .....	120
Figure VII. 34: Échantillons préparés pour les analyses géotechniques : Limite d'Atterberg et casagrande .....	120
Figure VII. 35: Schéma de diffraction des rayons X par une famille de plan réticulaire d est la distance réticulaire.....	123
Figure VII. 36: Distributions des échantillons sur la carte de plasticité (ML : limons, sables fins limoneux ou argileux, avec une légère plasticité, CL : argiles, argiles limoneuses, argiles sableuses de faible plasticité, OL : limons et argiles limoneuses de plasticité intermédiaire, MH : limons de hautes plasticités, CH : argiles à haute plasticité, OH: argiles à très haute plasticité). .....	125
Figure VII. 37 : Résultats de l'analyse de la limite d'Atterberg .....	126
Figure VII. 38: Diffractogrammes de préparation orientée séchée à l'air (1), glycolée (2), chauffée à 350°C (3) et 550°C (4) de l'échantillon KH-1 et KH 10 Minéraux : (Ca) Calcite, (Do) Dolomite, (F) Feldspath-K, (He) Hématite, (I) Illite, (ML) Interstratifié type illite/smectite, (Q) Quartz. ....	129
Figure VII. 39: Diffractogrammes de préparation orientée séchée à l'air (1), glycolée (2), chauffée à 350°C (3) et 550°C (4) de l'échantillon KH-0 et KH 17 Minéraux : (C) Chlorite, (Do) Dolomite, (F) Feldspath-K, (He) Hématite, (I) Illite, (K) Kaolinite, (ML) Interstratifiés type chlorite/smectite (1) et smectite/illite (2), (P) Plagioclase, (Q) Quartz.....	130

## Liste des tableaux

Tableau III. 1 : Caractéristiques physiques du capteur OLI (Source : U.S. Geological Survey Department of the Interior/USGS). .....	55
Tableau III. 2: Caractéristiques du capteur Oli .....	55
Tableau III. 3 : Matrice de probabilité de transition de la chaîne de Markov des types LULC pour la période 2003-2017 .....	62
Tableau III. 4: Changements de LULC entre 2003-2013 et 2017 dans le haut bassin d'Oum Er Rbia .....	63
Tableau IV. 5 : Répartition des classes d'altitudes du bassin versant Ikkour .....	71
Tableau IV. 6 : Répartition de la surface selon le facteur LS du bassin versant Ikkour .....	74
Tableau IV. 7: Pertes en sol dans le bassin versant Ikkour.....	76
Tableau IV. 8: Classification de la dégradation des sols dans le bassin versant Ikkour .....	77
Tableau V. 9: Caractéristiques et valeurs de l'indice d'agressivité des pluies (R) .....	81
Tableau V. 10 Le statut acido-basique des sols selon le projet PNUD FAO .....	85
Tableau VI. 11: Sources de données utilisées.....	101
Tableau VI. 12 : Pondération des sous-facteurs à l'aide de la matrice appariée AHP .....	106
Tableau VI. 13: Échelle fondamentale de Saaty (1977). .....	110
Tableau VI. 14: Matrice de comparaison par paires et vecteur propre principal normalisé pour les facteurs causaux de glissements de terrain requis pour l'application de la méthode AHP. ....	111
Tableau VI. 15: Classes de cartes de la susceptibilité aux glissements de terrain .....	114
Tableau VII. 16: Nature de sol en fonction de valeur du bleu du sol.....	122
Tableau VII. 17: Valeurs du bleu du sol (VBS).....	125
Tableau VII. 18 : Regroupements des argiles dominants dans la zone d'étude.....	128
Tableau VII. 19 : Minéralogie qualitative des argiles par DRX .....	128

## Liste des abréviations et acronymes

**SIG** : Système d'information géographique

**USLE** : Universal soil loss equation

**RUSLE**: Revised universal soil loss equation

**SWAT**: Soil water assesement tool

**AHP**: Analytical hierarchy process

**DRX** : Diffraction des rayons X

**WEPP** : Water Erosion Prédiction Project

**GPS**: Global positioning system

**USGS**: United States Geological Service

**LEAM** : Land Erodibility Assessment Mehodology

**MNT** : Modèle numérique de terrain

**LULC**: Land use/Land cover

**ROC**: Receiver operating characterestic

# Table des matières

<i>DÉDICACES</i> .....	<i>ii</i>
<i>REMERCIEMENTS</i> .....	<i>iii</i>
<i>MOTIVATIONS ET INTERETS DU SUJET</i> .....	<i>vii</i>
<i>RESUME</i> .....	<i>viii</i>
<i>ABSTRACT</i> .....	<i>ix</i>
<i>ملخص</i> .....	<i>x</i>
<i>INTRODUCTION GÉNÉRALE</i> .....	<i>1</i>
1.Problématique .....	1
2.Objectifs de la recherche .....	3
3.Démarche adoptée .....	4
4.Consistance du mémoire.....	5
<b>PARTIE I :PROBLÉMATIQUE DE L'ÉROSION ET DS GLISSEMENTS DE TERRAIN</b>	
Chapitre I : Généralités sur l'érosion hydrique Et les glissements de terrain	
I.1.Généralités sur l'érosion hydrique .....	9
I.1.1. Historique de l'érosion à l'échelle mondiale.....	9
I.1.2. Définition de l'Érosion hydrique.....	10
I.1.3. Mécanismes de l'érosion hydrique.....	11
I.1.4. Différentes formes de l'érosion hydrique.....	11
a) L'érosion en nappe .....	11
b) L'érosion linéaire .....	12
c) Erosion en griffe ou rigole (rill érosion).....	13
d) Érosion en ravines (gully erosion) .....	13
e) Érosion en masse .....	14
f) Glissement de terrain .....	14
g) Coulées de boue .....	15
I.1.5. Facteurs de l'érosion hydrique .....	16
a) Climat et Hydrologie .....	16
b) Précipitations .....	16
c) Causes anthropiques .....	16
d) Topographie .....	17
e) Sol et lithologie.....	18

f) Végétation .....	18
I.2. Modélisation de l'érosion.....	19
I.2.1. Historique de la modélisation de l'érosion dans le monde.....	19
I.2.2. Historique de la modélisation de l'érosion en Afrique.....	21
I.2.3. Études de l'érosion au Maroc .....	21
I.2.4. Différents types de modèles .....	22
I.2.5. Équation universelle de perte en terre USLE .....	23
I.3. Modélisation de la susceptibilité aux glissements de terrain .....	29
I.3.1. Concepts de base pour l'analyse de la susceptibilité et de l'aléa .....	30
I.3.2. Méthodes pour la cartographie de la susceptibilité et de l'aléa.....	30
I.3.3. Méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) .....	35
I.3.4. Évaluation et validation du modèle de performance de glissement de terrain... 38	
<b>Chapitre II : Présentation de la zone d'étude</b>	
II.1. Cadre géographique .....	42
II.2. Cadre climatologique .....	43
II.3. Cadre hydrogéologique .....	43
II.4. Cadre géologique .....	44
II.5. Cadre socioéconomique .....	47
II.6. Cadre Géomorphologique du haut bassin d'Oum Er Rbia .....	47
<b>PARTIE II: CHANGEMENT ET DYNAMIQUE D'OCCUPATION DE SOL ET DU COUVERT VÉGÉTAL</b>	
<b>Chapitre I: Changement et dynamique d'occupation de sol et du couvert végétal.....</b>	
	<b>51</b>
I.1. Cartographie du changement de l'occupation et de l'utilisation du sol .....	53
I.2. Matériels et méthodes.....	54
I.2.1. Classification supervisée : Préparation des cartes LULC .....	55
I.2.2. Le modèle CA-Markov .....	56
I.3. Résultats .....	58
I.3.1. Modélisation de changement de l'occupation de sol .....	58
I.3.2. Analyse de la matrice de probabilité de transition .....	58
I.3.3. Prévision des changements LULC sur la base du modèle CA – Markov .....	59
I.4. Conclusion.....	63
<b>Chapitre II: Cartographie et quantification de l'érosion hydrique et lutte contre l'érosion hydrique dans le sous-bassin versant de l'oued Ikkour</b>	
II.1. Introduction.....	65

II.2. Zone d'étude .....	65
II.3. Méthodologie .....	66
II.3.1 Données utilisées .....	67
II.3.2 Approche des indices spectraux à l'étude de la dégradation des sols .....	68
II.4. Résultats .....	71
II.4.1. Agressivité des pluies .....	71
II.4.2. Facteur topographique (LS) .....	71
II.4.3. Facteur d'érodabilité des sols.....	73
II.4.4. Facteur du couvert végétal .....	74
II.4.5. Facteur des pratiques antiérosives P .....	75
II.4.6. Risque érosif .....	75
II.4.7. Indices spectraux.....	77
II.5. Conclusion .....	78
Chapitre III: Cartographie et quantification de l'érosion hydrique : Cas du haut bassin versant d'Oum Er Rbia	
III.1. Introduction .....	80
III.2. RUSLE/USLE .....	80
III.3. Résultats.....	81
III.3.1. Cartographie des différents facteurs du modèle RUSLE : Approche par bassin versant : Le haut bassin d'Oum Er-Rbia .....	81
III.3.2. Impacts du changement de la couverture végétale sur l'érosion des sols.....	92
III.3.3. Validation des résultats.....	94
III.4. Conclusion .....	95
<b>PARTIE III: MODELISATION ET CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN DANS LE HAUT BASSIN D'OUUM ER RBIA</b>	
Chapitre I :Cartographie et la modélisation de la susceptibilité aux glissements de terrain dans le haut bassin de l'Oum Er Rbia par la méthode d'analyse multicritère AHP	
I.Introduction .....	98
I.1. Méthodes de cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain .....	99
I.2. Préparation des cartes des facteurs contributifs à la susceptibilité aux glissements de terrain.....	101
I.2.1. Facteurs topographiques.....	102
I.2.2. Occupation de sol .....	102
I.2.3. Distance au drainage .....	103
I.2.4. Distance aux routes .....	103
I.2.5. Distance aux failles .....	103

I.2.6. Lithologie .....	105
I.3. Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain.....	105
I.4. Résultats et discussion.....	109
I.5. Conclusion.....	115
Chapitre II: Caractérisation minéralogique et géotechnique des sols susceptibles aux glissements de terrain (haut bassin d'Oum Er Rbia)	
II.1. Introduction.....	118
II.2. Matériel et méthodes.....	118
II.2.1. Composition minéralogique.....	118
II.2.2. Propriétés géotechniques des sols.....	119
II.2.3. Identification des minéraux par analyse par diffraction des rayons X (XRD) .....	124
II.3. Résultats et discussion .....	124
II.3.1. Classification des sols basée sur les limites d'Atterberg et le bleu de méthylène....	124
II.3.2. Classification des sols par DRX .....	127
II.3.3. Relation entre la susceptibilité aux glissements de terrain et l'analyse géotechnique et minéralogique .....	131
II.4. Conclusion .....	132
<i>CONCLUSION GÉNÉRALE</i> .....	<i>134</i>
<i>RECOMMANDATIONS</i> .....	<i>137</i>
<i>RÉFÉRENCES</i> .....	<i>143</i>

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## 1. Problématique

Les risques naturels sont les éléments de l'environnement physique qui se sont produits sous diverses formes telles que hydrologiques (Hingray et al. 2009) (cas des inondations, sécheresse, tsunami, désertification, etc.), géologiques (sismiques, volcaniques, glissements de terrain, érosion du sol, etc.) et atmosphériques (ouragans, tornades, etc.). Celles-ci peuvent potentiellement toucher les êtres humains en raison de leur emplacement, de leur gravité et de leur fréquence d'apparition (OZER, Pierre 2009). Habituellement, une intervention humaine dans les zones exposées à de tels dangers peut entraîner un degré de gravité important et une augmentation de la fréquence des dangers. Il est donc nécessaire de prévoir avec précision les niveaux de risque associés à ces dangers, notamment la quantification du risque, l'évaluation de la vulnérabilité / sensibilité et les modèles d'exposition.

L'évaluation de la susceptibilité a été reconnue comme un outil essentiel pour prédire l'incidence des zones sujettes à un danger, en particulier les glissements de terrain, l'érosion des sols et les inondations. Pour tenter d'avoir une bonne idée de la susceptibilité de ces dangers en termes de volume ou de superficie, de répartition spatiale et de potentiel d'occurrence, des techniques qualitatives et quantitatives ont été adoptées. L'approche qualitative est subjective et moins précise, tandis que l'approche quantitative est objective et plus précise que précédemment.

Les approches quantitatives, qui pourraient être bivariées ou multivariées et intégrées aux techniques de télédétection et de SIG, reposent sur des statistiques ou des analyses probabilistes exprimant la relation entre les facteurs et les dangers en question. Un grand nombre de ces méthodes qualitatives et quantitatives ont été appliquées avec succès à la cartographie de la susceptibilité à l'érosion des sols par de nombreux chercheurs du monde entier. Bien que la technique quantitative la plus largement utilisée soit l'équation universelle de perte de sol USLE et ses versions révisées (RUSLE et MUSLE).

Le processus d'érosion est étroitement lié au mode d'occupation du sol, qui contribue largement à son aggravation ou à son atténuation. L'occupation du sol détermine le degré de protection des sols. L'influence du couvert végétal sur l'érosion du sol est très importante. Son action est d'autant plus efficace qu'il absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie, recouvre une forte proportion du sol et ralentit l'écoulement du ruissellement ou encore maintient une bonne

porosité à la surface du sol. D'une part, la couverture végétale protège contre le phénomène de battance des pluies et prolonge alors la perméabilité du sol et réduit le volume ruisselé. D'autre part, une grande quantité de l'énergie du ruissellement est absorbée par la litière qui entretient la mésofaune (influençant la vitesse d'infiltration). Enfin, l'état de la couverture végétale influence directement la rugosité du sol. Celle-ci dépend notamment du nombre de tiges par mètre carré. Un couvert végétal composé des herbacées à tiges nombreuses aura une action protectrice du sol plus efficace contre le ruissellement que des arbres (Roose and Sarrailh 1990).

Les glissements de terrain constituent un danger majeur dans la plupart des régions montagneuses et accidentées. Leur impact dépend en grande partie de leur taille et de leur vitesse, des éléments à risque sur leur parcours et de la vulnérabilité de ces éléments. Chaque année, les glissements de terrain font des victimes et entraînent des dommages importants aux infrastructures (routes, voies ferrées, canalisations, réservoirs artificiels, etc.) et aux biens (bâtiments, terres agricoles, etc.).

De grands glissements de terrain dans les régions montagneuses peuvent entraîner des barrages bloquant les cours d'eau. Ces barrages naturels provoquent des inondations et peuvent être augmentés par la pression de l'eau du lac, générant ainsi des crues éclairées mortelles ou des coulées de débris en aval. Les glissements de terrain sur les falaises côtières et sous-marines peuvent déclencher un tsunami, tout comme les glissements de terrain sur les rives des lacs et des réservoirs. Ils peuvent également affecter la production de décharges et le traitement des terres et des eaux. Dans les zones touchées par des glissements de terrain, elles constituent une source majeure d'érosion des sols et de sédimentation des vallées et des rivières, et donc de l'envasement des réservoirs.

L'importance de la cartographie des glissements de terrain ne peut être sous-estimée en raison des énormes pertes et dommages subis par l'environnement et la population vulnérable croissante. La cartographie des glissements de terrain peut être motivée par l'une des raisons suivantes : inventaire des glissements de terrain, évaluation de la susceptibilité, évaluation des risques / cartographie de zonage ou évaluation et atténuation des risques. L'inventaire des glissements de terrain, type de distribution de la carte de glissement de terrain, est la forme la plus simple de carte de glissement de terrain montrant les glissements de terrain passés et actuels. Contrairement aux inventaires centrés sur le passé, le zonage des risques, les cartes de susceptibilité et les cartes d'évaluation des risques sont axés sur les glissements de terrain futurs dans le but d'accroître la sensibilisation, la préparation et l'atténuation (Hervás et Bobrowsky, 2009).

Au Maroc, dans les marnes du Pré-Rif, Heusch (1970) avait attiré l'attention sur la contribution des divers types d'érosion en fonction de l'abondance des pluies : le ravinement et les glissements de terrain dominant largement en années excédentaires ou lors d'averses exceptionnelles, tandis que l'érosion en nappe répartie sur la majorité des surfaces des bassins méditerranéens l'emporte lors des années moyennes ou sèches. En année ordinaire, les ravines évoluent sur place (comblement du fond) ou semblent souvent endormies jusqu'à ce qu'un événement pluvial surabondant balaie les sédiments accumulés (effet de chasse). Dans le Rif occidental, Naimi et al. (2019) ont suivi l'incision des ravines à l'aide de relevés topographiques dans un petit bassin de 5ha. Parmi les facteurs du ravinement, la stabilité structurale et surtout le % de pente expliquent le mieux la variabilité des pertes par ravinement. Le ravinement dans le bassin du Nakhla est une source majeure de sédiments (36t/ha en 6 mois), alors que l'érosion en nappe est estimée à 1,3t/ha/an sur des parcelles expérimentales (Moufaddal, 2002 ; A.Tribak, 1998 in Roose et al, 2012).

La modélisation spatialisée de l'érosion des sols et des glissements de terrain entreprise dans plusieurs régions a donné des résultats variables selon les modèles adoptés, et l'utilisation de la télédétection et des systèmes d'information géographique (Ait Fora, 1995 ; Aloussi, 1994).

La télédétection et les SIG sont de plus en plus utilisés pour l'étude des phénomènes de surface et forment des outils essentiels dans les systèmes interactifs d'aide à la décision et opérationnels pour des opérations de gestion du risque (Wachal and Hudak, 2000 ; Shrimalil et al. 2001 ; Lee, 2004 ; Bou Kheir et al., 2006). Avec ces méthodes modernes et ce couplage, on découvre progressivement l'intérêt de la spatialisation des méthodes de calcul des pertes de sol, de la cartographie pour représenter les résultats des pertes de sol sur de grandes étendues et de la création de scénarios pour les interventions humaines sur le milieu (Bonn, 1998).

## **2. Objectifs de la recherche**

La zone d'étude très vallonnée connaît une dynamique érosive très importante. Elle se présente sous forme de collines argileuses ou marneuses à morphologie très ravinée. Les terrains en pente subissent l'effet des événements pluviométriques qui ravinent les surfaces à chaque saison pluviale. Les conséquences de l'érosion des versants sont assez fréquentes là où les formations superficielles sont composées de matériaux marneux et peu compactes. La morphogénèse de cette zone est liée à des surfaces topographiques très inclinées où les incisions sont particulièrement visibles sur des sols marneux.

Les apports en sédiments du Srou se jettent dans l'Oum-er-Rbia sur lequel plusieurs barrages ont été édifiés. Le plus affecté est le barrage d'Ahmed-el-Hansali qui se situe à une quinzaine

de kilomètres de la confluence du Srou avec l'Oum Er Rbia. Dans cette zone, tectoniquement active et à topographie accidentée, dominant des formations marneuses. Le franchissement de tels terrains est, en principe, techniquement possible, mais il pose des problèmes délicats de stabilité pour les déblais (zones où l'on enlève des matériaux) et les remblais (zones d'accumulation de matériaux). En effet, les multiples observations faites sur un grand nombre de glissements de talus récemment construits ont montré que les glissements se produisent souvent peu de temps après la fin des travaux. Ces observations ont également permis de mettre en évidence le rôle primordial de l'eau et de la valeur des pentes dans le déclenchement des ruptures.

Pour mieux appréhender le contrôle des processus d'érosion en milieu montagneux, il est nécessaire de comprendre et de quantifier l'importance de chaque phénomène érosif dans l'évolution des paysages. Parmi ceux-ci, les glissements de terrain sont un phénomène brusque, imprévisible et souvent catastrophique pouvant mobiliser des volumes rocheux considérables et exercer un rôle majeur dans l'érosion. Au cours de ce travail, nous nous sommes attachés à affiner la susceptibilité aux glissements de terrain, qui constituent le principal agent de l'érosion des pentes dans le bassin de l'Oum Er Rbia.

La présente étude a pour objectifs principaux :

- La détermination des différents facteurs intervenant dans le processus d'érosion hydrique et les représenter sous forme des cartes thématiques ;
- L'intégration des nouvelles technologies des SIG et de la Télédétection dans la modélisation ;
- La cartographie des facteurs du modèle utilisé correspondant aux facteurs de l'érosion ;
- L'application du modèle de prédiction du changement d'occupation de sol et son impact sur l'érosion hydrique.
- La quantification du taux d'érosion en tonnes par unité spatiale au niveau du haut bassin d'Oum Er Rbia.
- L'élaboration de la carte de susceptibilité aux glissements de terrain ;
- La caractérisation minéralogique des argiles causant les glissements de terrain par diffraction des rayons X.

### **3. Démarche adoptée**

La présente thèse concerne la modélisation et la cartographie de l'érosion hydrique et des glissements de terrain par Télédétection et SIG dans le haut-bassin versant de l'Oum Er Rbia.

L'approche adoptée se base sur la cartographie et la détermination des différents facteurs de l'érosion hydrique et des glissements de terrain dans l'ensemble de la zone d'étude. Présenter sous forme de chapitre, une brève présentation de la zone d'étude est effectuée en insistant sur les caractéristiques physiques pour se faire une idée de la configuration du site. Une présentation des problèmes qui existent dans la ville sera ensuite effectuée. Cette partie sera ensuite précédée par la présentation de la méthodologie d'approche et les données utilisées pour mener à terme l'étude.

#### **4. Consistance du mémoire**

Le présent mémoire de thèse est structuré comme suit :

- Introduction générale
- Partie I est relative à la problématique, présentation de la zone d'étude et méthodologie du travail et qui traite les deux chapitres suivants :
  - Le premier chapitre correspondra à une revue bibliographique sur les généralités concernant la thématique étudiée ainsi qu'une synthèse des travaux antérieurs réalisés sur la zone d'étude ;
  - Le deuxième chapitre : cadre général de la zone d'étude commence par une documentation succincte concernant la zone d'étude, à savoir la géographie, la géologie, l'hydrologie, le climat, la pédologie, l'occupation des sols, les activités humaines, ainsi que d'autres données intervenant d'une manière ou d'une autre dans le phénomène étudié.
- Partie II est relative à la cartographie du changement d'occupation du sol et la modélisation de l'érosion, et qui renferme les trois chapitres suivants :
  - Le premier chapitre est consacré au diagnostic du changement et de la dynamique d'occupation de sol et le couvert végétal dans la zone d'étude ; où seront exposés les différents résultats obtenus, accompagnés de leurs discussions et interprétations ;
  - Le deuxième chapitre est consacré à la cartographie et la quantification de l'érosion hydrique à petite et à grande échelle moyennant l'équation universelle de perte en sol et les indices spectraux ; dans ce chapitre, nous allons étudier l'apport de la télédétection dans la cartographie de la dégradation des sols ; dans ce chapitre nous allons étudier l'apport de la télédétection dans la cartographie de la dégradation des sols.
  - Le troisième chapitre correspond à la cartographie et quantification de l'érosion hydrique à petite échelle et leur prédiction dans le futur moyennant l'équation universelle de perte en sol et le changement d'occupation du sol.

- Partie III relative à la cartographie et la modélisation de la susceptibilité aux glissements de terrain et la caractérisation minéralogique et géotechnique, est constituée des deux chapitres suivants :
  - Le premier chapitre correspond à la cartographie et la modélisation de la susceptibilité aux glissements de terrain dans le haut bassin de l'Oum Er Rbia par la méthode d'analyse multicritère AHP ;
  - Le deuxième chapitre qui porte sur la caractérisation minéralogique et géotechnique par diffraction des rayons X des différents sites susceptibles à l'érosion et au glissement de terrain dans le haut bassin de l'Oum Er Rbia
  - Enfin, une conclusion générale et recommandations qui résume l'essentiel des parties précédentes ainsi que des recommandations et perspectives à prendre en considérations dans une éventuelle étude.

# **PARTIE I**

## **PROBLÉMATIQUE DE L'ÉROSION ET DES GLISSEMENTS DE TERRAIN**



# **Chapitre I :**

## **Généralités sur l'érosion hydrique Et les glissements de terrain**



## **I.1. Généralités sur l'érosion hydrique**

### **I.1.1. Historique de l'érosion à l'échelle mondiale**

Le problème de perte des terres par l'érosion hydrique ne cesse de s'amplifier et de retenir l'attention des aménagistes, chercheurs susceptibles de juguler aux mieux ce grave fléau. Cependant la dégradation des sols par l'érosion est engendrée par une nouvelle situation caractérisée par : abaissement des rendements par une perte des éléments fins du sol et de la couche arable, assèchement des sols, dégradations des infrastructures et les risques d'inondation.

La quantification et la spatialisation de l'érosion des sols constituent une approche essentielle pour l'appréhension des processus en cours sur les bassins versants. De nombreuses modélisations des processus de transfert de sédiments ou polluants ont été proposées. Ces dernières sont basées sur des représentations mathématiques des processus hydrologiques et érosifs fondamentaux.

Elles sont souvent appliquées à des zones géographiques restreintes (parcelles, sous bassins versants) et nécessitent pour leurs calibrations de nombreuses mesures de terrains telles que le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al. 1995 ; Neistch et al., 2002).

Au Maroc et en particulier au Nord l'érosion hydrique est la principale source de dégradation des sols avec une dégradation spécifique dépassant 2000 t/km<sup>2</sup>/an. En effet, plusieurs études ont montré que les régions du nord du Maroc sont fortement exposées aux risques d'érosion à cause de l'agressivité climatique, du relief accidenté, de la grande sensibilité des couches lithologiques et de l'impact du facteur anthropique. Au niveau de la région du Moyen Atlas et du Haut Atlas, les pertes en terre se situent entre 500 t/km<sup>2</sup>/an et 1000 t/km<sup>2</sup>/an (Ibrahimi, 2005).

Les problèmes de dégradation de l'environnement sont intimement liés au développement des populations et des civilisations : ils concernent autant les agronomes et forestiers, les géographes, les hydrologues, les sédimentologues, que les socioéconomistes. Mais chacun dans sa discipline a développé un langage propre, si bien que les mêmes mots n'ont pas la même portée selon les professions. Il nous faut donc préciser le sens des mots et celui que leur prêtent les divers spécialistes qui interviennent à différentes échelles de temps et d'espace à la poursuite d'objectifs propres. C'est là une condition préalable à l'amélioration de l'efficacité des projets de lutte antiérosive.

L'analyse de l'évolution des recherches sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb montre que de 1945 à 1970, on observe principalement l'importance des dégâts d'érosion : dégradation de la productivité des terres, ravinement, glissements de terrain, ensablement des barrages et inondations. Peu de recherches sont menées, mais il est appliqué des techniques de lutte mécaniques (banquettes, seuils) et biologiques (mises en défens et reforestation à l'amont des barrages) utilisées aux USA et en France. Des géographes (J.M. Avenard, 1990) régionalisent les traces des processus d'érosion et en tirent la répartition des risques futurs (Roose et al., 2012). De 1965 à 1985, l'érosion est quantifiée. En Tunisie, l'équipe de Cormary et Masson (1964) évalue les facteurs de l'érosion en nappe (USLE) à l'aide d'un simulateur de pluies. Delhoume (1987) et Delhumeau (1981) étudient les processus d'érosion sous des climats arides, semi-arides et subhumides. En Algérie, A. Demmak trouve que les transports solides des oueds dépendent surtout de la superficie des affleurements de roches argileuses, de marnes et de schistes tendres dans les bassins versants (Roose et al., 2012). Au Maroc, l'équipe de B. Heusch (1986) démontre sur parcelles et bassins versants i) que l'érosion en nappe est moins importante que le ravinement et l'ablation par les rivières, ii) que la pente a moins d'effet que la position topographique et iii) que les averses exceptionnelles saturantes ont un rôle majeur sur les transports solides.

### **I.1.2. Définition de l'Érosion hydrique**

L'érosion dérive du mot latin "ERODERE", qui signifie "ronger" ; l'érosion ronge la terre comme un chien s'acharne sur un o. L'érosion se définit comme l'ensemble des phénomènes externes qui, à la surface du sol ou à faible profondeur, enlèvent tout ou une partie des terrains existants et modifient ainsi le relief. On distingue deux types d'érosion : l'érosion naturelle ou géologique et l'érosion accélérée ou anthropique (Roose, 1994). L'érosion géologique se déroule continuellement et lentement. C'est elle qui a conduit à la formation du paysage naturel actuel dans son ensemble. La quantité de terre qui est enlevée par l'érosion géologique sur 1 ha de terre est en moyenne de 1 à 2 tonnes par année. Mais ce déplacement de terre est en équilibre avec la quantité de sols formée chaque année, par altération. Lorsque l'Homme détruit la végétation naturelle pour cultiver le sol sur les pentes (par défrichements de forêts, feu, etc.) l'érosion des sols se déclenche. C'est ce que l'on appelle l'érosion anthropique. Villemure, N. 2006 distingue plusieurs types d'érosion : hydrique, éolienne, mécanique, glaciaire. Celui qui nous intéresse, c'est l'érosion hydrique. Elle est due à l'action de l'eau sur le sol ou sur la roche présente. Il y a quatre types d'érosion hydrique : l'érosion marine, l'érosion en nappe, l'érosion linéaire et l'érosion en masse.

### I.1.3. Mécanismes de l'érosion hydrique

D'une manière générale, le mécanisme de l'érosion des sols est la combinaison de détachement et d'un transport de particules suivi de leur sédimentation (Barthes et al, 1998) (figure I.1). L'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules du sol. Cette perte de sol est due à la pluie qui est incontestablement considérée la principale cause de l'érosion hydrique, surtout s'il s'agit des pluies de climat méditerranéen, qui sont caractérisées par une irrégularité intra et interannuelle. Elles succèdent à plusieurs mois de sécheresse. Elles sont soudaines, violentes, intenses et tombent sur des terres rarement protégées, parfois même, dépourvues de végétation. Ces chutes d'eau sont caractérisées par leur irrégularité et peuvent atteindre des intensités de pointe allant jusqu'à 10 à 30 m<sup>3</sup>/ha (Greco, 1966).

L'érosion hydrique est un phénomène dont la complexité n'est plus à démontrer. En effet, il est difficile de connaître avec précision son processus. Mais, il peut être représenté ou schématisé selon les trois phases ci-dessous (figure I.1).

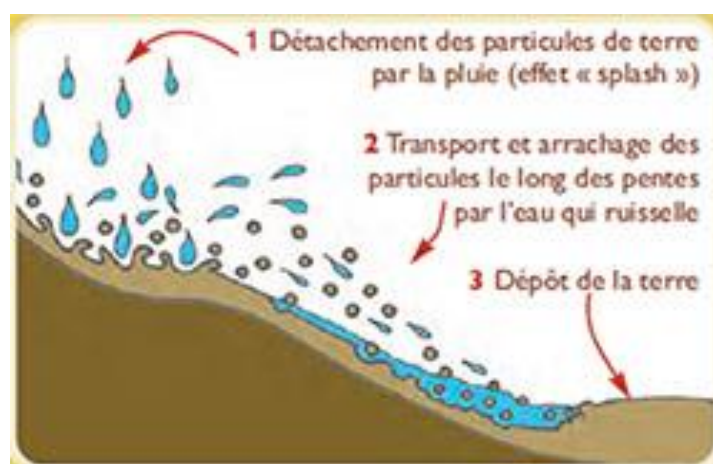


Figure I. 1: Processus de l'érosion hydrique ([Http://www.agirpouurladiable.org/html/do\\_erosion.html](http://www.agirpouurladiable.org/html/do_erosion.html))

### I.1.4. Différentes formes de l'érosion hydrique

Les grandes distinctions entre les différentes catégories de l'érosion hydrique se font selon le caractère diffus ou linéaire du ruissèlement et l'agent d'arrachement des particules solides. L'érosion linéaire se répartit en deux types : l'érosion en rigole et l'érosion en ravine.

#### a) L'érosion en nappe

C'est l'érosion superficielle ou encore l'érosion en feuillet « sheet ». C'est un type d'érosion peu spectaculaire, car la quantité totale de sols enlevée lors d'une averse est généralement

faible. Elle est le stade initial de la dégradation des sols par érosion. Elle commence par la concentration des gouttelettes de pluie tout en formant un film fin qui balayera la surface du sol en trainant les particules selon leur taille, et en fonction de l'intensité et de la durée de pluie, et du degré de la pente (Cailleux, 1975). L'érosion en nappe entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble des parcelles ou versants. Elle est peu visible. En effet une érosion importante de 15 à 30 t/ha/an ne correspond qu'à une perte de hauteur de 1 à 2 mm. Cependant, combinée à l'érosion mécanique sèche (et à la dégradation de la microporosité pour donner suite à la minéralisation accélérée des matières organiques, ou par simple tassement par les outils), l'érosion en nappe peut entraîner un décapage de la majorité de l'horizon humifère en quelques dizaines d'années (10 à 20 cm par rapport au profil voisin resté sous forêt). Le signe le plus connu de l'érosion en nappe est donc la présence de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés, les plus agressés des champs (haut de collines et rupture de pente). La remontée des cailloux qui est le deuxième symptôme de l'érosion en nappe est causée par la fonte de l'horizon humifère et le travail profond du sol remontant en surface les cailloux. Ce phénomène s'explique par le fait que les terres fines sont entraînées par les pluies, soit par drainage en profondeur, soit par érosion sélective, tandis que les cailloux trop lourds pour être emportés s'accumulent à la surface du sol (Roose, 1973). L'érosion en nappe se présente sous diverses formes à noter : des voiles de sable lavé, des cratères sombres, et des colonnettes sous les feuilles larges qui protègent le sol contre la battance.

L'érosion en nappe dépend de :

- l'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissèlement
- l'énergie cinétique des pluies qui détachent les particules
- la durée des pluies et/ou l'humidité avant les pluies
- la nature et l'occupation du sol
- la pente et l'exposition des versants

## **b) L'érosion linéaire**

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.). Dans un premier temps, des flaques se forment, et en débordant, ces flaques communiquent entre elles et des lignes d'écoulement limitées dans l'espace apparaissent selon la ligne de plus grande pente. En fait, l'érosion linéaire apparait lorsque le ruissèlement en nappe s'organise et creuse des formes

de plus en plus profondes. C'est une forme d'érosion liée à la vitesse de l'eau et à l'épaisseur de sa lame. Elle apparaît sur les pentes plus fortes et le plus souvent dans des zones de concentration (fossé, talweg, traces de roues et d'outil, chemins, rigoles...). L'érosion n'est plus sélective et creuse des rigoles et des ravines (Roose, 1994).

#### **c) Érosion en griffe ou rigole (rill érosion)**

L'érosion en rigoles se produit lorsque la concentration des eaux de ruissèlement morcèle ou creuse le sol de plus en plus en profondeur. Elle consiste à l'entraînement des particules du sol par l'eau suivant de petits sillons qui s'inscrivent sur la surface topographique selon la plus grande pente. Le démarrage de formation en rigoles est facilité par l'hétérogénéité topographique ou granulométrique de la surface (Dautrebande et Sohier, 2006).

On parle de griffes lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur, de rigoles lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur, en effet, sur un bassin versant ou une parcelle, l'érosion en rigoles succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissèlement dans les creux. À ce stade, les rigoles ne convergent pas, mais forment des ruisselets parallèles. Quand les rigoles constituent un réseau bien ramifié et atteignent une profondeur d'ordre métrique, on parle dans ce cas de l'érosion par ravinement.

#### **d) Érosion en ravines (gully erosion)**

Les ravins constituent la forme la plus évoluée de l'érosion linéaire, et se répartissent sur l'ensemble du terrain. Parfois, lorsque le substrat est dur, les ravins s'élargissent par sapement des berges qui constituent la principale source des sédiments transportés (Ludwing et al. 1996 ; Chmelova et al. 2002).

À l'intérieur des ravines, on peut encore distinguer des petites ravines dont le lit est encore encombré de végétation herbacée et surtout arbustive et qu'on pourra fixer rapidement par les méthodes biologiques. En revanche, dans des grandes ravines qui peuvent s'étaler sur plusieurs kilomètres, le canal central comporte des blocs rocheux, témoins d'un charriage important et d'une certaine torrentialité. Ces fonds étant mobiles, il n'est plus question de les stabiliser uniquement par des méthodes biologiques ; il sera alors nécessaire d'utiliser des seuils cimentés et des méthodes mécaniques couteuses.

Une autre forme d'érosion linéaire est l'érosion hydrographique ou fluviatile (Zachar, 1982), elle est due à la dissipation de l'énergie de l'eau dans les lits des cours d'eau et les rivières. L'énergie de ces dernières est capable, de manière régulière ou accidentelle (lors des inondations), d'emporter une partie des berges. On appelle ce processus le sapement des berges.

Il se produit également dans les ravins en formation lorsque l'eau du ruissèlement attaque les assises du ravin. Ce type d'érosion est étroitement lié au volume ruisselé et à la vitesse de l'eau qui dépend de la pente et de la hauteur d'eau dans le chenal.

#### **e) Érosion en masse**

Alors que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol et le ravinement aux lignes de drainage du versant, l'érosion en masse déplace un volume de sol à l'intérieur de la couverture pédologique. On attribue à l'érosion en masse tout déplacement de terre sous forme de mouvements de masse, de coulées de boue et de glissements de terrain ; c'est un phénomène qui a lieu sur les terrains en pente forte (Roose, 1994). La cause des mouvements de masse provient du déséquilibre entre d'une part la masse sol, de l'eau y stockée et des végétaux qui le couvrent et d'autre part les forces de frottement qui permettent la stabilisation de ces matériaux sur la roche altérée, en pente. Les mouvements de masse constituent la manifestation d'un processus appelé solifluxion. Les phénomènes de mouvement de masse sont très nombreux, mais les principaux groupes sont les suivants (Roose, 1994).

#### **f) Glissement de terrain**

Les glissements de terrain caractérisent les mouvements de masse de grande ampleur et les coulées boueuses des mouvements de masse, pour lesquels les sols atteignent leurs limites de liquidité. Il est défini comme le déplacement d'une masse de terrains meubles ou rocheux au long d'une surface de rupture par cisaillement qui correspond souvent à une discontinuité préexistante. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures ou d'une modification des conditions aux limites. Selon la géométrie de cette surface, on peut distinguer trois types principaux de glissements (figure I.4):

- Glissement lent : c'est un glissement plus ou moins lent des couches superficielles de la couverture pédologique, qui s'observe sur les pentes fortes grâce à la forme couchée des jeunes plants forestiers et à la forme en crosse de la base des arbres adultes ;
- Glissement rapide : c'est le cas des chutes de blocs ou des décollements d'une couche plus ou moins épaisse de sol. Ce type de glissement est très fréquent en montagne, il affecte les falaises et les escarpements rocheux ;
- Glissement rotationnel : c'est un glissement où la surface du sol est une partie de la masse glissant en faisant une rotation. Il s'agit d'un mouvement caractérisé par l'existence d'une zone de départ nette et par un bourrelet frontal plus ou moins marqué ; le

remaniement interne dépend de la nature des terrains et de l'importance du déplacement. Il se produit en particulier en terrains meubles dans les roches homogènes à faible cohésion ou très divisées ;

### g) Coulées de boue

Le terme de "coulée boueuse" est entendu comme un écoulement fortement chargé en sédiments, provenant des surfaces cultivées et entraînant des particules de sol. En règle générale, cet écoulement n'est ni visqueux ni épais. (Le Bissonnais et al., 2002).

La teneur en eau des coulées de boue est supérieure à celle des glissements de terrain. Moins compactes que les glissements, les coulées de boue se déplacent plus rapidement vers l'aval et peuvent donc avoir des conséquences dévastatrices subites.

Sur les bords de la coulée, la vitesse de glissement est moindre, ce qui entraîne parfois la formation de petites levées. Parvenue au bas de la pente, la coulée de boue ralentit sa course et s'étale dans le sens de la largeur avant de s'immobiliser.

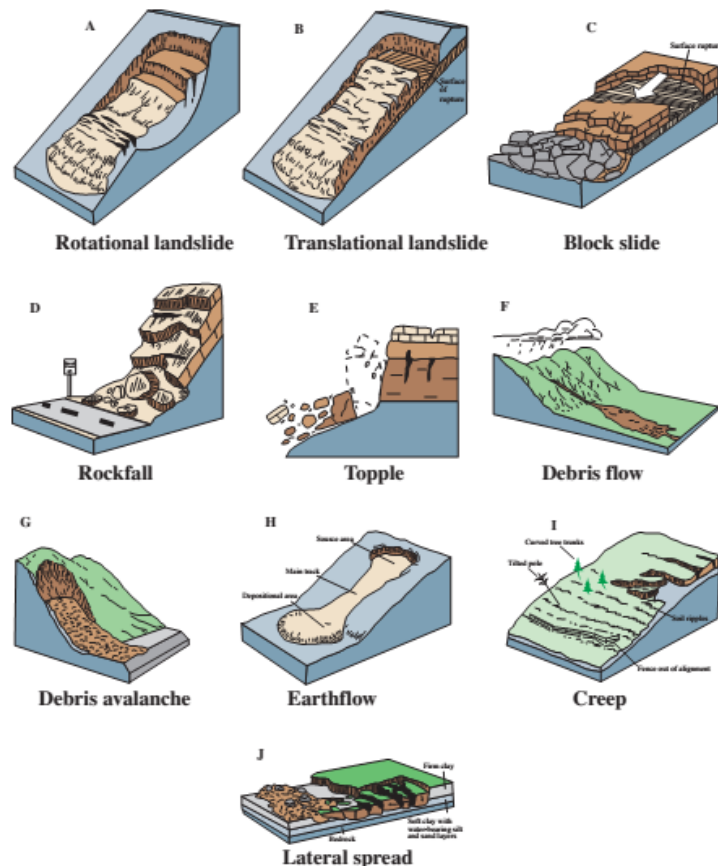


Figure I. 2: Types de glissements de terrain les plus fréquents. Source: USGS (United States Geological Service), fact sheet 2004-3072 <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/>.

### **I.1.5. Facteurs de l'érosion hydrique**

L'action de l'érosion hydrique varie selon les conditions du milieu. Dans certains sites, elle transforme complètement le paysage, et dans d'autres, elle paraît inopérante. En effet, le phénomène et son intensité sont régis par un certain nombre de facteurs à savoir, le couvert végétal, l'érosivité des pluies, l'érodabilité du sol, la topographie et le facteur anthropique (Wischmeier et Smith, 1978 ; Bou kheir et al., 2001 ; Sadiki et al., 2012).

#### **a) Climat et Hydrologie**

Le climat s'exprime par l'action des pluies et du ruissèlement, étant donné que l'érosion est un phénomène de détachement et de transport des produits d'altération. L'action des précipitations est régie par la pluviométrie qui est le terme quantitatif de l'action des pluies, caractérisée aussi par la fréquence, la durée et l'intensité.

#### **b) Précipitations**

Les études réalisées par Wischmeier et Smith (1962) puis Fedoroff (1965), concernant les mécanismes de l'érosion pluviale, permettent d'établir deux conclusions importantes sur l'effet de l'intensité de précipitation sur l'infiltration et l'érosion :

- Les gouttes de pluie constituent un élément important de l'érosion pluviale des sols et elles entraînent une décomposition mécanique des agrégats et la formation de la croûte de battance qui imperméabilise la surface du sol et augmente le ruissèlement
- L'agressivité de la pluie est proportionnelle à son énergie cinétique, elle dépend non seulement de la durée et l'intensité de la pluie, mais aussi du diamètre des gouttes.

De même Rose (1961) et Hillel (1972) ont étudié l'effet des caractéristiques des précipitations sur le ruissèlement. Ils ont montré qu'il existe deux facteurs responsables de la diminution de l'infiltration : la diminution du gradient hydraulique vertical de succion lié à la saturation progressive du profil du sol par un apport d'eau supplémentaire et la formation d'une croûte sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie, sous l'effet du ruissèlement ou d'un dépôt de particules dans les dépressions ou sur le sol lors d'un ruissèlement en nappe.

#### **c) Causes anthropiques**

Les abus et les diverses erreurs de gestion des ressources en sols et en eaux sont considérés comme des causes bien plus importantes du déclin de grandes civilisations dans le monde. Rares sont les sols qui ont pu évoluer sans être marqués plus ou moins profondément par l'action directe ou indirecte de l'homme. Les causes anthropiques sont multiples et aussi complexes que les comportements humains. Elles sont fondamentalement liées à une pression accrue sur les

écosystèmes qui excède leur capacité de résilience (Begnig et Lanly, 2010). Parmi les principales causes anthropiques, on peut accorder une importance particulière à la pression démographique. L'accroissement de la pression démographique dans les zones arides et semi-arides entraîne en effet des modifications profondes des modes de gestion et d'utilisation des ressources naturelles et de l'espace rural (Roose, 1994). Ces perturbations anthropiques (culture extensive, faiblesse des apports d'engrais, coupe abusive du bois, mauvaise gestion des parcours, pratique des feux de brousse, surpâturage...) ont contribué au recul des formations végétales, lequel a exacerbé les processus érosifs. Les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols se trouvent fortement altérées par une mise en culture prolongée sans restitution de matière organique ou sans apport d'engrais. Les principales manifestations de cette dégradation sont la généralisation du ravinement, la baisse des productions et des rendements agricoles. La dégradation du couvert végétal naturel entraîne la raréfaction du bois d'énergie et du bois d'œuvre. L'exode rural est une conséquence de cette raréfaction des ressources naturelles due à la dégradation des sols et du couvert végétal.

#### **d) Topographie**

Plusieurs chercheurs ont mis en évidence l'effet de la topographie sur l'érosion. Nombreux sont ceux qui ont montré que la topographie agit sur le ruissèlement et les pertes en sol par deux composantes (Borst et Woodbrun, 1940 ; Wischmeier et Smith, 1978) :

- La longueur de la pente, car plus la pente est longue, plus les eaux ont tendance à se concentrer graduellement dans les fissures ou rainures, ce qui entraîne un apport considérable en eau et en sédiments ;
- Le degré de la pente, car plus le degré de l'inclinaison des versants est important, plus l'énergie cinétique de l'écoulement et la détachabilité des particules du sol sont importantes.

La topographie intervient aussi par la forme du profil de pente, selon que le versant est concave ou convexe. Sur les versants de forme convexe, le ruissèlement et l'érosion sont très minimes près du sommet, mais ils augmentent très rapidement vers l'aval. Sur les pentes de forme concave, le ruissèlement et l'érosion sont très élevés en amont, mais diminuent graduellement en aval (Mayer et Harmon, 1992). Les griffes peuvent aussi être parallèles sur des pentes linéaires, convergentes sur des pentes concaves, etc. La pente peut agir également sur le ruissèlement par son action sur les paramètres de l'infiltration. Avec l'accroissement de l'angle

de la pente, Poesen (1986) a observé une diminution du taux de ruissèlement attribué à la destruction de la croute de battance sous l'action de l'énergie cinétique du ruissèlement

#### **e) Sol et lithologie**

Il représente la sensibilité d'un sol à l'arrachement et au transport des particules qui le composent. Il est en fonction de la profondeur, la pierrosité, la granulométrie, la teneur en matière organique (Roose et al., 1993 ; FAO, 1966), la nature minéralogique des argiles (Auzet, 1987 ; Le Bissonnais et al., 1995), l'infiltrabilité (Papi et al., 1995) et la cohésion (Mériaux, 1961).

Deux facteurs vont intervenir au niveau de l'érosion des sols : la capacité d'infiltration du sol qui règle l'importance du ruissèlement et son érodibilité qui traduit sa vulnérabilité à l'érosion.

L'érodibilité d'un sol représente sa sensibilité à l'arrachement et au transport des particules qui le composent. Elle est définie par 2 caractéristiques :

- La résistance au splash (battance) ;
- La résistance au cisaillement (lié au ruissèlement).

L'érodibilité du sol peut être caractérisée par sa stabilité structurale (Le Bissonnais, 1996).

Elle est fonction de plusieurs paramètres, notamment :

- La texture du sol ;
- La teneur en matière organique, et
- La teneur en calcium.

La capacité d'infiltration du sol dépend aussi de ces paramètres et de son état de surface (couvert végétal, couche de battance, porosité).

Les divers types de roches et leurs structures donnent une indication précieuse sur la capacité d'infiltration des zones occupées par les roches et les sols et par conséquent la quantité de sol susceptible d'être érodée (FAO, 1990). Une faible infiltration des roches affleurantes indique qu'une grande quantité d'eau ruissèle, par conséquent, une grande quantité de terre peut être emportée.

#### **f) Végétation**

La végétation joue le rôle d'un toit qui protège le sol contre l'érosion. Il protège le sol contre l'érosion par 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 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 ruissèlement par rapport au sol nu. La présence ou l'absence du couvert végétal à la surface du sol détermine son comportement hydrologique. En effet, la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol, le ruissèlement et le transport solide sont corrélés positivement avec le taux de recouvrement de la végétation (Rey et al., 2004 ; Bastola et al.2018).

## **I.2. Modélisation de l'érosion**

### **I.2.1. Historique de la modélisation de l'érosion dans le monde**

L'érosion façonne la Terre depuis qu'elle est émergée. Et depuis plus de 7 000 ans, l'homme s'acharne à lutter contre l'érosion pour protéger ses terres contre l'agressivité des pluies et du ruissèlement (Lowdermilk, 1953).

Les recherches sur l'origine et les facteurs de l'érosion en parcelles expérimentales ont commencé en 1890 en Allemagne, et dans les années 1935 aux USA.

Le développement des technologies de prédiction de l'érosion a débuté avec des corrélations telles que celles de Cook (1936) essayant d'identifier les principales variables qui affectent l'érosion du sol par l'eau. Cook (1936) a déterminé trois facteurs principaux qui sont, la susceptibilité du sol à l'érosion, l'érosivité potentielle des pluies et du ruissèlement et la protection du sol par le couvert végétal. Quelques années plus tard, 1940, Zingg publia une première équation empirique à partir des résultats des mesures de l'érosion en sa possession et établit pour la première fois la relation entre les pertes en terre avec la longueur et l'intensité de la pente ; Dwight Smith la compléta quelques années ensuite, avec les facteurs de couverture végétale et de pratique conservatoire (Wischmeier et Smith, 1972).

Vingt ans après la mise en place des essais d'érosion en parcelles dans une bonne dizaine d'États d'Amérique du Nord, il existait une accumulation d'un grand nombre de données sur l'érosion dont il convenait de faire la synthèse. En 1958, Wischmeier, statisticien du Service de Conservation des Sols fut chargé de l'analyse et de la synthèse de plus de 10.000 mesures annuelles de l'érosion sur parcelles et sur petits bassins versants dans 46 stations de la Grande Plaine américaine. L'objectif de Wischmeier et Smith était d'établir un modèle empirique de prévision de l'érosion à l'échelle du champ cultivé pour permettre aux techniciens de la lutte antiérosive de choisir le type d'aménagement nécessaire pour garder l'érosion en dessous d'une valeur limite tolérable étant donné le climat, la pente et les facteurs de production (Roose, 1994).

C'est la naissance de l'équation universelle de perte en terre. Le premier modèle empirique de prévision des pertes en terre à l'échelle de la parcelle (Wischmeier et Smith, 1960 à 1978). La seule prétention de ce modèle (USLE : Universal Soil Loss Equation) est d'aider à la décision les ingénieurs qui doivent définir des systèmes de conservation des sols pour des conditions particulières de sol, de climat, de topographie et de couvert végétal.

Williams et al. (1985) proposent une équation révisée. Celle-ci a été modifiée par la suite par Hession et Shanholtz (1988) puis par Renard (1991). Les facteurs du RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) ont été déterminés à l'aide des données issues de nouvelles approches méthodologiques et des visites de terrain. La nouvelle version RUSLE (Renard et al., 1996) intègre les dernières informations disponibles pour l'utilisation de cette approche de prédiction de l'érosion. Elle ne diffère pas de la première au niveau des concepts de base et du nombre des sous-modèles utilisés, mais elle améliore la qualité des paramètres du milieu qui définissent le rôle de chaque facteur. C'est au prix de ces adaptations et corrections que le modèle gagne une confiance comme il a été confirmé lors du séminaire de Merede au Venezuela (Roose, 1994).

Le modèle RUSLE constitue de nos jours, un outil de choix pour la prédiction de l'érosion et la planification de la conservation du sol. Par ailleurs, les recherches sur les principes et les processus de l'érosion et de la sédimentation par l'eau se sont poursuivies afin d'améliorer les méthodes de prédiction et de contrôle de l'érosion. Les résultats de recherche ont été utilisés pour développer des modèles physiques tel que les composantes d'érosion et de sédimentation de CREAMS (Kinsel, 1980 ; Foster et al., 1981). Une équipe a développé une autre technologie pour la prédiction de l'érosion hydrique appelée « WEPP » (Water Erosion Prediction Project). Le projet de prédiction de l'érosion hydrique WEPP a été développé entre 1985-1995 par le NSERL (National Soil Erosion Research Laboratory). Il se base sur une simulation orientée et continue des processus d'érosion du sol. Il est applicable aux versants ou aux petits bassins versants de 250 à 800 ha, à condition qu'ils ne comportent pas de formes d'érosion concentrée permanentes. Il nécessite un grand nombre de données. Il remplacera sans doute dans les années qui viennent le RUSLE (Foster et Lane, 1987 ; Lane et Nearing 1989).

Un autre modèle de prédiction de l'érosion hydrique LEAM (Land Erodibility Assessment Methodology) a été conçu pour évaluer l'érodabilité des terres dans les pays tropicaux (Manrique 1991). D'autres modèles sont à mentionner, le modèle RILL and INTERRILL et le nouveau modèle européen de prévision de l'érosion EUROSEL, qui, tous les deux, s'appuient sur des processus physiques.

### **I.2.2. Historique de la modélisation de l'érosion en Afrique**

En zone soudano-sahélienne, sur le versant comme sur la parcelle, Valet (1985) a démontré que l'extrême variabilité du ruissèlement et de l'érosion concomitante est bien la cause dominante de la modification de la variabilité de l'alimentation en eau.

En 1954, Fournier et Fauck installèrent un premier réseau de parcelles de mesure du ruissèlement et de l'érosion en Afrique occidentale et à Madagascar. Plus tard, des hydrologues ont étudié les débits liquides (Rodier, 1964) et les transports solides (Calombani, 1967 ; Billon, 1968 ; Carré, 1972 ; Nouvelot, 1972) des grands fleuves et des quelques petits bassins expérimentaux (Vuillaume, 1969 ; Mathieu, 1972 ; Molinier, 1976). Ils s'intéressent également à l'envasement des retenues de barrages en Tunisie (Claude et Chartier, 1977) et, avec la collaboration d'autres disciplines, aux dépôts alluvionnaires de l'oued Medjerda (Claude et al., 1977).

Des géographes comme Rougerie en Côte d'Ivoire (1958, 1960), Avenard au Maroc (1989) ont quantifié les processus, évalué les facteurs et les méthodes de lutte et cartographié les risques des divers processus d'érosion.

### **I.2.3. Études de l'érosion au Maroc**

Au Maroc, l'équation universelle de pertes en terre de Wischmeier USLE (universal soil loss equation) qui intègre les principaux facteurs influençant les quantités de sols érodées est la plus largement utilisée. Les différents travaux de calcul du taux d'érosion par l'équation USLE ont montré que les valeurs des coefficients de cette équation, originellement établie aux USA, doivent être adaptées aux conditions locales. Pour ce faire plusieurs travaux de recherche se sont penchés sur cet aspect d'adaptation de l'USLE aux conditions locales.

Milovanovitch (1968) et Heusch (1970) ont calculé les valeurs du facteur C pour certaines occupations du sol et types d'assolement sur les terrains de cultures.

Les recherches de Kalman (1967) et d'Amoldus (1977) ont abouti à des méthodes de calcul indirectes utilisant les données disponibles à savoir les précipitations mensuelles pour le calcul du facteur R, puisque, selon l'USLE, ce facteur nécessite des données précises sur les précipitations fournies par les pluviographes, et qui ne sont pas disponibles dans la majorité des régions marocaines. Quant au facteur d'érodabilité K, il a été calculé pour les conditions marocaines par Merzouk (1985). De nouvelles mesures sur l'érosion ont été entreprises depuis 1990 un peu partout au Maroc grâce à plusieurs équipes universitaires et de recherche (Raissouni 2011, El guerouani 2012) Le Rif (occidental et central), le Moyen Atlas et Haut

Atlas ont reçu une attention particulière. En outre, des études antérieures ont développé des méthodologies d'intégration des données de télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) pour caractériser l'érosion des sols dans des grandes surfaces avec la précision et des coûts raisonnables.

#### **I.2.4. Différents types de modèles**

La nécessité d'avoir recours à des modèles de prédiction de l'érosion découle de la complexité des phénomènes érosifs qui est due généralement aux interactions complexes, variables dans le temps et dans l'espace des différents facteurs d'érosion.

Le modèle constitue donc un outil efficace d'analyse, de planification et de prédiction quantitative à différentes échelles spatiales et temporelles. Il existe plusieurs approches pour concevoir des outils de modélisation : les modèles empiriques, les modèles à base physique et les modèles experts.

##### **a) *Modèles empiriques***

Les modèles empiriques consistent à établir une loi mathématique qui relie la variable de sortie à des variables d'entrée, dont la forme et les coefficients sont fixés à l'aide d'observation et de mesures sur le terrain. Ceci est effectué de façon expérimentale en ajustant les valeurs calculées par le modèle à celles mesurées sur le terrain. Ces modèles ont été créés pour jouer un rôle opérationnel. C'est-à-dire comme outil de conservation des sols et de contrôle de l'érosion hydrique (Company-Redmond, 1996).

Le modèle empirique le plus connu et le plus utilisé est celui des travaux menés par Wischmeier et Smith (1978) sur plus de 10 000 parcelles expérimentales dans 24 États à travers les États-Unis et qui ont mené à la proposition d'un modèle universel de pertes de sols connu sous le nom de USLE (universal soil loss equation, Wischmeier et Smith 1978).

##### **b) *Modèles déterministes à « base physique »***

Ces modèles s'inspirent des processus élémentaires hydrologiques et érosifs mis en jeu. Ils reposent notamment sur les équations de Darcy pour ce qui concerne l'infiltration et sur des lois mécaniques classiques telles que la loi de conservation des masses et du moment des forces (Williatte, 2008). Pour la détermination des paramètres de la fonction de production, ces modèles sont limités par le passage difficile entre l'échelle 21 de l'expérimentation au laboratoire ou sur le terrain à la distribution spatiale des paramètres. En ce qui concerne les prises en compte du réseau d'écoulement et du transport des sédiments à l'échelle du bassin versant, celles-ci restent difficiles à mettre en œuvre pour ces modèles, car il faut décomposer

le réseau hydrographique en biefs qui ont des caractères physiques identiques (même pente, même rugosité et même section transversale). De plus, d'après Bryan (2000), « il n'est pas du tout évident que tous les processus et interactions impliqués dans l'érodibilité des sols puissent un jour être modélisés physiquement ». Les modèles déterministes à base physique présentent l'avantage d'être universels dans leur conception, mais ils sont très exigeants en données d'entrée et en temps de mise en œuvre. Il est donc exclu de les utiliser dans notre étude.

### c) *Modèles experts*

Les modèles experts sont une alternative aux deux précédents. Ils reposent sur l'étude des processus dominants qui interviennent dans les phénomènes d'érosion, ainsi que sur les relations établies entre l'érosion et ses principaux facteurs. Ils s'appuient sur une base de données qualitative (connaissances expertes), que l'on considère comme valable pour des échelles de temps et d'espace données. Cette méthode fonctionne efficacement à l'échelle des petits bassins versants. Elle permet une grande flexibilité d'utilisation par rapport aux modèles empiriques ou déterministes. En effet, les résultats expérimentaux, permettant le paramétrage de ces modèles, peuvent être directement intégrés et facilement ajustés au cas étudié. Le modèle STREAM "Sealing and Transfer by Runoff and Erosion in relation with Agricultural Management" fait partie de ce type de modèles.

### **I.2.5. Équation universelle de perte en terre USLE**

Plusieurs techniques pour la prévision de la perte en sols ont été développées dans les dernières années pour aider la compréhension des processus érosifs et les manières de les combattre. Les premières estimations ont été de nature qualitative, avec le but d'identifier les réponses de différentes pratiques agricoles dans le contrôle de l'érosion. Au départ, ces équations adoptaient une seule variable explicative. Au fur et à mesure que les données ont été disponibles, des modèles plus complexes ont été créés, jusqu'à aboutir à l'équation la plus acceptée aujourd'hui : l'Équation universelle de Perte de Sols (EUPS ou USLE, en anglais). Les recherches actuelles sont basées sur l'extension des paramètres de l'USLE aux différentes conditions de climat et de topographie et en établir des modèles journaliers. Elles cherchent aussi à définir les processus d'érosion et à quantifier la perte de sols à compter d'une base physique, laissant de côté l'approche empirique très adoptée jusqu'au moment.

L'USLE prévoit uniquement l'importance des pertes de terre qui résultent des érosions en nappe ou en rigole sur une pente simple sans toutefois tenir compte des pertes de terre supplémentaires

qui peuvent être attribuables aux autres formes d'érosion associées au ravinement, au vent ou au travail du sol.

Ce modèle de prévision de l'érosion a été conçu pour mesurer l'influence de l'assolement et du système de gestion des cultures sur l'érosion, mais il peut aussi servir à prévoir l'érosion dans un cadre qui n'est pas agricole, notamment sur des chantiers. L'USLE peut servir à comparer les pertes de terre provenant d'un champ donné soumis à un assolement et à un système de gestion des cultures particuliers, à des taux de « pertes de terre tolérables » ou à un autre type d'assolement ou système de gestion des cultures, afin de déterminer la pertinence des mesures de conservation du sol dans la planification des activités agricoles.

L'équation universelle des pertes du sol est un modèle simple et pratique. Ainsi, elle a été mise en pratique dans de nombreux pays du Nord et adaptée à différents pays du Sud et en milieu tropical. Ce modèle a été appliqué au Maroc en 2004 sur le bassin versant de l'oued Boussouab (Rif oriental). Ce travail a utilisé des cartes thématiques des différents facteurs de l'équation universelle de pertes en sol dans un système d'information géographique ce qui a permis d'une manière efficace d'analyser les risques d'érosion et de mieux déterminer le taux d'érosion par le ruissèlement en nappe (Sadiki et al, 2004).

Cinq grands facteurs servent à calculer les pertes de terre en un endroit donné. Chaque facteur est une estimation numérique d'une composante précise qui affecte la gravité de l'érosion du sol à un endroit donné. Les valeurs d'érosion obtenues par l'application de ces facteurs peuvent varier considérablement en raison des différentes conditions météorologiques.

L'USLE présente l'érosion hydrique comme une fonction multiplicative de plusieurs facteurs de sorte que si un d'entre eux tend vers zéro, l'érosion s'annule. Ce modèle de prédiction de l'érosion est constitué de 5 facteurs (Eq.1) :

$$A = R * K * LS * C * P \quad \text{Eq.1}$$

Avec

**A** : représente la perte en terre. Elle s'exprime en unité de masse par unité de surface et par unité de temps, soit en tonnes par hectare et par an ; aux États unis l'unité est le tonne par acre par an ;

**R** : Indice d'agressivité des pluies (Mj.mm/ha.an) ;

**K** : Indice d'érodabilité du sol ;

**LS** : Indice de pente et de longueur de pente ;

**C** : Indice de culture caractérisant la couverture végétale ;

**P** : Indice des aménagements utilisés pour lutter contre l'érosion.

L'utilisation de l'équation universelle de perte de sol offre un privilège de bénéficier d'un modèle basé sur une vaste base de données obtenue par expérimentation. C'est pour cette raison qu'elle s'est rapidement taillé une place privilégiée comme outil d'évaluation possible. Elle améliore ainsi la qualité des décisions dans la limite permise par les contraintes socioéconomiques.

a) ***Facteur d'agressivité climatique***

Facteur d'agressivité climatique ou d'érosivité de pluie est égal à E. l'énergie cinétique des pluies, que multiplie I30 (l'intensité maximale des pluies durant 30 minutes exprimées en cm par heure). Cet indice correspond aux risques érosifs potentiels dans une région donnée où se manifeste l'érosion en nappe sur une parcelle nue de 9 % de pente.

Au Maroc, le calcul du facteur R par la méthode directe de Wischmeier et Smith ne peut s'appliquer que dans certaines régions qui sont équipées par un pluviographe qui enregistre instantanément les pluies. Un certain nombre d'auteurs ont développé des formules alternatives qui se basent sur les données disponibles pour déterminer l'agressivité climatique.

Fournier (1960) propose une relation parabolique entre l'agressivité du climat et le facteur précipitation :

$$C=Pi^2 /P \quad \text{Eq.2}$$

Où : Pi : précipitations moyennes du mois le plus humide.

P : précipitations annuelles.

- Kalman (1967) a trouvé la corrélation suivante, qui se base sur des régressions multiples :

$$R=143. \text{Log} (P.P24. 10^{-6}) + 89.7 \quad \text{Eq.3}$$

Où

R : Valeur moyenne de l'agressivité climatique en pied-tonne/acre.mm/1000 heures ;

P : Moyenne des précipitations annuelles (mm/an);

P24 : Moyennes des pluies maximales en 24 heures dans la période considérée (mm/jour). Pour exprimer R en Newton /heure, on multiplie par 0,6706.

-Arnoldus (1980) a proposé pour ses études au Maroc d'exprimer R en fonction des précipitations moyennes annuelles et mensuelles :

$$R= 1,735*10*(1,5*\log\Sigma (pi^2/P)- 0,8188) \quad \text{Eq.4}$$

P : Précipitation moyenne annuelle de la durée d'observation (m m);

Pi : Précipitation moyenne mensuelle du mois i (mm).

En 1987, Rango et Arnoldus, ont modifié la formule d'Arnoldus (1980) comme suit :

$$\text{Log R} = 1.74.\log(\pi^2/P) + 1.29 \quad \text{Eq.5}$$

b) ***Facteur d'érodabilité du sol (K)***

Le facteur d'érodabilité du sol K est la réponse moyenne du sol et du profil pédologique à la capacité érosive des pluies (Heusch, 1971). Autrement dit, c'est également la facilité avec laquelle un sol se détache sous l'énergie des gouttes des pluies ou du ruissèlement. Ce facteur est pris en considération puisque les sols ne s'érodent pas de la même façon dans les conditions standards, telles que définies par Wischmeier et Smith (1978).

Aux États-Unis, Wischmeier et Smith (1978) ont défini la parcelle nue standard de référence comme une parcelle ayant une pente de 9 % et une longueur de 22,2 m, travaillée dans le sens de la pente et sans enfouissement de matière organique depuis trois ans. Sur ces parcelles de référence, sous pluie naturelle et sous pluie simulée, Wischmeier et ses collaborateurs ont établi des régressions multiples entre l'érodabilité des sols et 23 paramètres différents du sol. Après simplification, il s'est avéré que l'érodabilité dépend essentiellement du taux de matières organiques du sol, de la texture du sol et enfin de la structure de l'horizon de surface et de sa perméabilité.

Singer (1978) a montré qu'il faut rajouter quelques facteurs supplémentaires dans le cas des sols californiens, en particulier, il faut tenir compte du fer et de l'alumine libre, du type d'argile minéralogique et de la salinité des matériaux.

Dans le même contexte et à l'issue d'une étude réalisée au Maroc sur 9 types de sols, Merzouk (1985) a montré d'une part que les fragments grossiers exposés à la surface du sol diminuent les pertes en sol. D'autre part, Merzouk et Blacke (1991) estiment que le facteur K de Wischmeier sous-estime l'érodabilité des sols calcaires, qui semble être corrélée positivement avec la teneur en calcium.

Plusieurs méthodes d'évaluation de la valeur du facteur d'érodabilité K ont été mises au point. Néanmoins, l'approximation de la valeur algébrique du K par le nomographe de Wischmeier et al. (1971) reste la plus répandue à travers le monde. Elle a été déterminée pour les sols où la fraction de limon est inférieure à 70 %, selon la relation suivante :

$$100 \cdot K = 2.1 M 1.14 \cdot 10^{-4}(12-a) + 3.25 (b-2) + 2.5 (c-3) \quad \text{Eq.6}$$

K : indice d'érodabilité sans dimension dans le système américain (ton. Acre. H)/100. Acre. Pied. Ton. Pouce) à multiplier par 1,317 pour l'exprimer dans le système métrique (tonne. Heure/Newton.Heure).

$M = (\% \text{ sable fin} + \text{limon}) * (100 - \% \text{ argile}),$

a = % matière organique,

b = code de la perméabilité, et

c = code de la structure

Les différents constats cités au-dessus (Singer, 1978; Merzouk, 1985; etc.) ont amené les chercheurs de l'USDA (ministère américain de l'Agriculture) en 1980 à mettre au point une formule qui corrige le facteur K en tenant compte de la proportion des éléments grossiers à la surface du sol. Cette correction a renforcé le caractère universel de ce modèle puisque son utilisation est rendue plus fiable dans les régions arides des États unis et dans les régions méditerranéennes notamment en Afrique du Nord.

Cette formule est :

$$K_{\text{ajusté}} = K (0.983 - 0.0189 X + 0.0000973 X^2) \quad \text{Eq.7}$$

X = Pourcentage des éléments grossiers ;

K calculé par l'équation de Wischmeier et Smith ou déterminé par l'abaque.

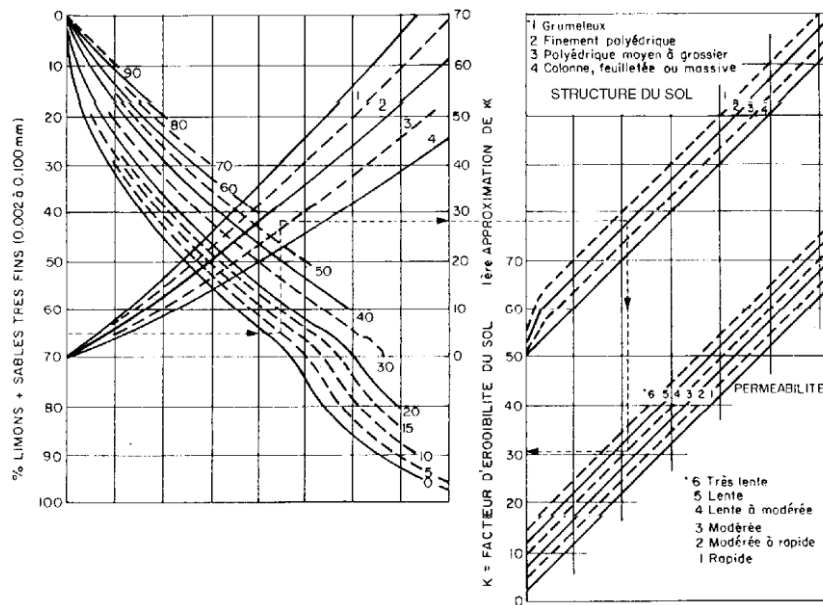


Figure I. 3 Nomogramme permettant une évaluation rapide du facteur "K" d'érodabilité des sols (d'après Wischmeier, Johnson et Cross, 1971)

### c) *Facteur topographique (LS)*

Le facteur topographique, dans la formule empirique de Wischmeier et Smith (1978) implique les effets combinés de l'inclinaison de la pente (S), de sa longueur (L) et de la forme des versants sur le taux d'érosion. il se calcul par l'équation suivante :

$$LS = (L/22.15)^m * (65.41 * \sin^2(S) + 4.56 * \sin(S) + 0.065) m \quad \text{Eq.8}$$

Où

L=Longueur de la pente ;

S=Degrés de pente en % ;

m = Facteur qui dépend de la valeur de S :

m = 0,5 pour S > 5.0%

m = 0,4 pour 3.5 <= S <= 4.5%

m = 0,3 pour 1.0 <= S <= 3.0%

m = 0,2 pour S = 1.0%

La longueur de pente peut être déterminée par une équation qui met en relation la pente et sa longueur moyenne (Horton, 1945) :

$$B = S/2L \quad \text{Eq.9}$$

Où

B : la longueur moyenne de la pente du bassin versant (m) ;

S : la superficie du bassin versant (m<sup>2</sup>) ; et

L : la longueur du réseau hydrographique (m).

### d) *Facteur du couvert végétal et de l'occupation des sols (C)*

Le couvert végétal est certainement le facteur le plus important puisqu'il diminue l'effet de splash des gouttes de pluie, ralentit la vitesse du ruissèlement et maintient une bonne porosité à la surface du sol, etc.

L'importance de ce facteur est colossale, si on considère les autres facteurs comme étant constants, l'érosion est 1000 fois supérieure sur un terrain nu par comparaison à un terrain dont la couverture du sol est de 100 % (Roose, 1996). Cependant, il est difficile d'évoquer l'action protectrice d'un couvert végétal sans préciser les techniques culturales au sens le plus large.

L'effet général du couvert végétal et les pratiques culturales sur les pertes en sols sont subdivisés en une série de sous facteurs dans la version révisée de l'équation universelle des pertes en sol (Renard et al, 1995) :

- L'impact de l'utilisation antérieure ;
- L'effet de la canopée ;

- L'effet de la couverture de surface et de la rugosité ; et
- L'effet de l'humidité du sol sur la réduction du ruissèlement.

Au Maroc, malgré de nombreuses études expérimentales concernant la quantification de l'érosion hydrique par l'USLE, le RUSLE ou le MUSLE, on constate toujours une absence des valeurs expérimentales du facteur C pour les différents types de végétaux et cultures.

#### e) *Facteur des pratiques antiérosives (P)*

Ce facteur explique l'intervention de l'homme en créant des pratiques antiérosives qui préservent le sol et diminuent la dégradation des terres. Il prend en compte les techniques de conservation des sols adoptées : contour des cultures par haie, culture en courbes de niveau, et en banquettes. Les valeurs de P varient selon la pratique adoptée et aussi selon la pente. La valeur de P est égale à 1 lorsqu'aucune intervention antiérosive n'est utilisée.

### **I.3. Modélisation de la susceptibilité aux glissements de terrain**

L'importance de la cartographie des glissements de terrain ne peut être sous-estimée en raison des énormes pertes et dommages subis par l'environnement et la population vulnérable croissante. La cartographie des glissements de terrain peut être motivée par l'une des raisons suivantes : inventaire des glissements de terrain, évaluation de la susceptibilité, évaluation des risques / cartographie de zonage ou évaluation et atténuation des risques. L'inventaire des glissements de terrain, type de distribution de la carte de glissement de terrain, est la forme la plus simple de carte de glissement de terrain montrant les glissements de terrain passés et actuels. Leur signification est discutée dans la section 3.3. Contrairement aux inventaires centrés sur le passé, le zonage des risques, les cartes de susceptibilité et les cartes d'évaluation des risques sont axés sur les glissements de terrain futurs dans le but d'accroître la sensibilisation, la préparation et l'atténuation (Hervás and Bobrowsky, 2009).

La susceptibilité aux glissements de terrain est définie par Guzzetti et al. (2006) comme la probabilité d'occurrence de glissements de terrain / de rupture de pente, compte tenu d'un ensemble de facteurs de prédisposition géo environnementaux. D'un autre côté, un risque de glissement de terrain dépasse la susceptibilité aux glissements de terrain et inclut la distribution spatiale (emplacement), la magnitude (volume, intensité, superficie) et le délai dans lequel le glissement de terrain est attendu (Guzzetti et al., 1999).

Le risque de glissement de terrain consiste à mesurer la probabilité et la gravité des conséquences négatives d'un glissement de terrain sur la santé, les biens ou l'environnement

(Ercanoglu, 2008). Ainsi, l'analyse des risques devrait impliquer les éléments de danger, de vulnérabilité et d'exposition (Catani et al., 2005). Selon Crozier et Glade (2010), la vulnérabilité au glissement de terrain est le degré de perte attendu associé à un niveau donné d'intensité du risque de glissement de terrain. Par conséquent, l'évaluation de la vulnérabilité nécessite une compréhension des éléments à risque (personnes ou biens) ; leur emplacement par rapport au glissement de terrain, l'exposition ; et les caractéristiques des glissements de terrain (par exemple, la distance d'écoulement, le volume, la vitesse, la surface) (Dai et al., 2002).

### **I.3.1. Concepts de base pour l'analyse de la susceptibilité et de l'aléa**

Les méthodes de cartographie de la susceptibilité et de l'aléa "mouvements de versant" ont été développées depuis les années 1970 pour faire face à des problèmes pratiques d'aménagement (Kienholz, 1978 ; Brabb et al., 1979 ; Carrara et al., 1979). Depuis ces premiers essais, les trois décennies suivantes ont été l'occasion d'un développement intensif de la littérature scientifique sur ce propos. Ainsi, de nombreuses études de cas discutant de l'application de ces méthodes peuvent être trouvées (entre autres dans, Dai & Lee, 2001 ; Yao et al., 2008 ; Ayalew & Yamagishi, 2005 ; Thiery et al., 2007 ; Thiery et al., 2013) ; d'autres présentent des innovations méthodologiques (entre autres, El Jazouli, Barakat et al. 2019 ; Althuwaynee and Pradhan 2016, Shahabi et al. 2015 ; Atkinson & Massari, 2011) ou des synthèses (entre autres, Soeters & van Westen, 1996 ; Guzzetti et al., 2006 ; van Westen et al., 2008)

Les cartes de susceptibilité ou d'aléa présentent d'importantes différences de précision et de fiabilité (Cascini et al., 2005). Ces cartes sont généralement préparées avec une large gamme de données d'entrée qui peuvent être qualitatives ou quantitatives. Parfois, les données nécessaires à la réalisation de ces cartes sont indisponibles. Ainsi, malgré une demande croissante d'outils de gestion de l'aléa et du risque, la majeure partie des démarches opérationnelles fixées sur le plan national en Europe se base sur des approches types "expertes" souvent critiquées par les scientifiques pour leur manque d'objectivité (Malet & Maquaire, 2008 ; Corominas & Mavrouli, 2012).

### **I.3.2. Méthodes pour la cartographie de la susceptibilité et de l'aléa**

De très nombreuses méthodes existent pour la cartographie de la susceptibilité et de l'aléa. Celles-ci mobilisent différents aspects de la géomorphologie, de la géotechnique ou de la statistique, et s'illustrent par des méthodes plus ou moins complexes permettant d'atteindre différents degrés de certitude et différentes qualités de zonage. Sur le plan méthodologique,

deux grands types d'approches peuvent être identifiées pour la cartographie de la susceptibilité et/ou de l'aléa : les approches qualitatives et les approches quantitatives.

a) *Approches qualitatives*

Les techniques qualitatives sont de nature subjective, en ce sens qu'elles dépendent de l'expérience et des connaissances des experts pour quantifier l'importance relative des diverses couches thématiques causant des glissements de terrain et, par conséquent, les cartes des risques sont présentées en termes descriptifs. Les méthodes quantitatives sont considérées comme des moyens plus objectifs de relier la distribution spatiale des glissements de terrain aux facteurs responsables des glissements de terrain. Ils résultent en des estimations / probabilités numériques d'occurrence de glissement de terrain dans une zone.

Les méthodes de cartographie directe dépendent dans une large mesure du degré de risque et sont basées sur l'expérience du cartographe géomorphologique. Les méthodes de cartographie indirecte impliquent l'identification et la cartographie des zones d'entraînement (fournies par l'inventaire des glissements de terrain), suivi de la cartographie des facteurs d'instabilité des pentes, et enfin de la carte de rupture des pentes selon le degré de contribution des facteurs d'instabilité des pentes. Classification en zones dangereuses (Guzzetti et al., 1999).

La cartographie d'inventaire, ainsi que les approches expertes (ou heuristiques) font partie des méthodes qualitatives.

**L'inventaire des glissements** constitue la source d'information de base de toute analyse spatiale, permettant de calibrer et/ou valider les modèles (Guzzetti et al., 1999). Même si ceux-ci ne sont pas directement nécessaires à la construction des modèles (exemple des modèles déterministes), les informations sur la localisation des phénomènes permettent une validation du pouvoir prédictif des résultats (Santacana et al., 2003 ; Beguería, 2006 ; Guzzetti et al., 2006).

Les inventaires doivent ainsi faire l'objet d'une attention particulière, et des moyens conséquents doivent être alloués à leur réalisation, dans la mesure où seuls des inventaires de bonne qualité permettront une analyse spatiale robuste (Glade & Crozier, 2005). À échelle large, les inventaires peuvent contenir des informations très précises sur les caractéristiques des mouvements de versant (type de phénomène, âge, état d'activité, période de retour, etc.) et peuvent ainsi être considérés comme des formes élémentaires de cartes de susceptibilité (Thierry, 2007). À petite échelle, l'inventaire représenté sous forme ponctuelle peut également

constituer une première approche de la cartographie de la susceptibilité, informant sur la répartition générale des phénomènes (Gibson et al., 2013). Ces cartes se contentent de faire un état des lieux de la localisation des mouvements de versant et ne proposent pas d'informations sur la localisation potentielle d'autres phénomènes (Kanungo et al., 2012).

**L'approche experte ou heuristique** constitue un second type d'approche qualitative. Dans ce cas, la localisation potentielle de la susceptibilité ou de l'aléa est basée sur la connaissance à priori et l'expérience locale (ou par analogie avec des cas similaires) d'un expert en charge de l'étude. Les approches expertes sont basées sur l'utilisation de données spatialisées pour la localisation des zones potentiellement instables (pente, géologie, hydrologie, géomorphologie, géotechnique, occupation du sol, etc.). Ces données sont acquises au travers de campagnes de terrain, de l'analyse d'images satellitaires ou photos aériennes ou peuvent être directement disponibles. Dans le cas des approches expertes, la cartographie géomorphologique ou morphodynamique constitue une des bases essentielles de l'évaluation de la susceptibilité ou de l'aléa (Kienholz, 1978 ; Amadesi & Vianello, 1978 ; Porcher & Guillope, 1979).

L'expert pondère ainsi les différents facteurs sur la base de sa propre expérience. La méthode de cartographie peut être directe, l'expert définissant manuellement les limites de différentes zones potentiellement stables ou instables (van Westen, 2008 ; Thiery, 2007). Il peut également avoir recours à des applications sous SIG (systèmes d'analyse hiérarchique ou cartes d'index) permettant d'attribuer un poids à chacun des facteurs de prédisposition représentés par différentes couches thématiques. Celles-ci sont ensuite automatiquement combinées (Stevenson, 1977 ; Saaty, 1980 ; Castellanos Abella & van Westen, 2008 ; Malet et al., 2011).

Cependant, l'estimation des poids est fortement dépendante de la personne en charge de l'étude. Les critères d'évaluation ne sont pas nécessairement clairs et identifiables par d'autres, ce qui constitue le problème majeur de ce type d'approche. Le caractère reproductible des cartes expertes est donc limité. Cependant, la subjectivité n'est pas nécessairement mauvaise dans la mesure où elle est basée sur l'opinion d'un expert (van Westen, 2000). Si ce dernier possède une solide connaissance du terrain et des processus, les cartes peuvent être très précises et applicables, notamment pour des approches préliminaires de la susceptibilité (Glade & Crozier, 2005

#### b) *Approches semi-quantitatives*

Les méthodes des logiques floues ; une des méthodes semi-quantitatives (Thiery, 2007), permet de formaliser des règles définies par l'expert. Elle garde la souplesse de l'approche experte,

mais, est considérée comme plus objective par le cadre formaliste qu'elle impose à son application (Poiraud, 2012). De nombreux exemples d'application des logiques floues à la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de versant peuvent être trouvés, entre autres dans les travaux de Bonham-Carter (1994), Ercanoglu & Gokceoglu (2002), Pradhan (2011), Thiery et al. (2013). D'autre part, certains systèmes AHP peuvent être considérés comme un autre type de méthodes semi-quantitatives, notamment les systèmes de combinaison par paires (Saaty, 1980 ; Saaty & Vargas, 2001).

### c) *Approches quantitatives*

Par opposition aux méthodes expertes, les approches quantitatives sont basées sur des critères de pondération "objectifs", théoriquement reproductibles, produisant des résultats identiques avec les mêmes jeux de données. Ces méthodes incluent les approches statistiques, les approches probabilistes, l'intelligence artificielle, les modèles déterministes et les approches temporelles.

Au sein de ces méthodes, les approches probabilistes sont les plus utilisées. Celles-ci analysent les relations statistiques entre la localisation des phénomènes (passés et présents) et un jeu de données spatialisées représentant les facteurs de prédisposition (pente, géologie, occupation du sol, formations superficielles, etc.). Sur la base de cette relation, une densité de phénomènes peut être calculée permettant de dériver des pondérations.

Les méthodes bivariées peuvent être utilisées pour comparer chaque facteur avec la localisation des phénomènes. Les poids sont ici calculés en fonction de la relation entre chaque facteur et les mouvements de versant de manière indépendante. Plusieurs méthodes bivariées ont été proposées dans la littérature.

Les principales divergences concernent la méthode sélectionnée pour le calcul des pondérations (allant du simple calcul de densité à l'introduction de méthodes bayésiennes). Les méthodes les plus couramment utilisées sont la méthode de susceptibilité (landslide susceptibility method) (Brabb, 1984 ; van Westen, 1993), la méthode de pondération de l'information (information value method) (Yin & Yan, 1988 ; Saha et al., 2005 ; (Roslee, Mickey et al. 2017)) et la théorie de l'évidence (Weight of Evidence) (van Westen, 1993 ; Lee et al., 2002 ; Thiery, 2007 ; (Hong, Ilija et al. 2017)).

Cependant, en utilisant des méthodes de statistiques multivariées, toutes les combinaisons entre les facteurs peuvent être mises en relation avec la localisation des glissements via une matrice. Cette matrice peut ensuite être analysée par des tests statistiques tels que l'analyse discriminante

(Baeza & Corominas, 2001 ; Santacana et al., 2003), la régression multiple (Carrara, 1983 ; Chung et al., 1995), la régression logistique (Ayalew & Yamagishi, 2005 ; Kalantar, Pradhan et al. 2018) ou les modèles additifs généralisés (Brenning & Trombotto, 2006 ; Brenning, 2008 ; Petschko et al., 2012). Parmi ces méthodes, la régression logistique est la plus employée actuellement et de nombreuses études comparatives la considèrent comme la méthode la plus robuste pour la cartographie de la susceptibilité (Rossi et al., 2010 ; (Kumar, Thakur et al. 2017; Du, Zhang et al. 2017).

Plus récemment, de nouvelles méthodes, principalement issues de l'intelligence artificielle, sont également utilisées pour la cartographie de la susceptibilité telles que les réseaux de neurones (Lee et al., 2003 ; Ercanoglu, 2005 ; (Alimohammadlou, Najafi et al. 2014), les arbres de décision (Yeon et al., 2010 ; Nefeslioglu et al., 2010 ; Hong, Pradhan et al. 2015) ou les machines à vecteur de support (Yao et al., 2008 ; Xu et al., 2012). Les réseaux de neurones, par exemple, fonctionnent sur le principe de pondération par apprentissage progressif (rétropropagation). L'objectif est d'ajuster les poids via une multitude d'itérations, en considérant les erreurs entre les valeurs obtenues et l'objectif espéré (reconnaissance des glissements) (Lee et al., 2003).

Ces tests statistiques donnent des informations (scores) sur les facteurs ou la combinaison de facteurs permettant d'expliquer au mieux l'occurrence des mouvements de versant. Les zones dépourvues de mouvement, mais, dont l'association des scores équivaut à celles affectées par des mouvements, sont considérées comme susceptibles. Le résultat de ces méthodes de cartographie ne propose qu'une évaluation de la susceptibilité (probabilité spatiale), dans la mesure où celles-ci ne contiennent pas d'informations sur l'occurrence temporelle ou la magnitude des phénomènes. Pour la cartographie de l'aléa stricto sensu, deux types d'approches quantitatives existent : les approches déterministes et les approches temporelles.

**Les méthodes déterministes** utilisent des données topographiques (pente, exposition et courbure des versants, etc.) couplées à des données hydrologiques (saturation des sols, perméabilité, conductivité hydraulique, etc.) et des données géotechniques (cohésion, angle de frottement interne, poids spécifique, etc.) pour analyser la stabilité des versants (facteur de sécurité), (Morgenstern, 1992). Ces approches sont, pour la plupart, basées sur des modèles de pente infinie à l'image des célèbres SHALSTAB (Montgomery & Dietrich, 1994 ; Dietrich & Montgomery, 1998) ou SINMAP (Pack et al., 1998 ; Pack et al., 1999).

Les méthodes déterministes nécessitent de disposer de jeux de données très importantes qui doivent être acquises par de longues campagnes de mesure sur le terrain et en laboratoire. Ces modèles sont donc généralement appliqués à très grande échelle sur des sites de faible extension. La généralisation de ces approches à l'échelle du bassin versant oblige à introduire de nombreuses approximations dans l'interpolation des données, ce qui les rend généralement moins performantes que des approches statistiques à échelle large (Zizioli et al., 2013).

Enfin, les méthodes temporelles visent à intégrer des informations sur la variation temporelle de la fréquence et de la magnitude des phénomènes aux cartes de susceptibilité (Zêzere et al., 2004 ; Remondo et al., 2005). Cette méthode est généralement appliquée aux mouvements de versant à commande hydrologique déclenchés par des précipitations intenses. La probabilité de survenance des phénomènes est estimée en lien avec la période de retour des événements déclencheurs. Une analyse du couple intensité/durée des précipitations et des dates d'occurrence des phénomènes permet d'établir un ou plusieurs seuils de déclenchement (Corominas et al., 2003).

Le couple magnitude/fréquence des mouvements peut également être analysé par des méthodes statistiques, permettant une approche probabiliste (Malamud et al., 2004). Les résultats finaux sont généralement présentés sous forme de cartes multiples, proposant différents scénarios selon plusieurs périodes de retour et plusieurs degrés d'intensité (Guzzetti et al., 2005 ; Jaiswal et al., 2010). Les méthodes temporelles nécessitent la disponibilité de jeux de données précis relatifs à la date de déclenchement des phénomènes, et ce en quantité suffisante, pour pouvoir mener une analyse statistique. De même, des données pluviométriques, au pas de temps journalier, sont indispensables.

### **I.3.3. Méthode AHP (Analytic Hierarchy Process)**

#### **a) *Fondements de la méthode***

La méthode AHP est une approche analytique multicritère d'aide à la décision. Elle repose foncièrement sur des calculs complexes ayant recours à l'algèbre matricielle. Cette méthode a été utilisée dans plusieurs domaines, tous aussi variés les uns que les autres, tels que ceux concernant : la planification des transports combinés, le rationnement de l'énergie, la gestion de risques de projets, l'analyse comparative des opérations logistiques, la gestion de la qualité des services dans le domaine hospitalier, le domaine du management des opérations, l'allocation des ressources en matière de gestion de portefeuille de produits, ainsi que plusieurs applications concernant les entreprises, etc.

La méthode AHP a été développée par Saaty (1970), et permet de décomposer un problème complexe en un système hiérarchique, dans lequel sont établies des combinaisons binaires à chacun des niveaux de la hiérarchie. Classant hiérarchiquement les situations que rencontre l'entreprise, le décideur peut en déduire des priorités relatives, en faire une synthèse plus facile à appréhender et s'en servir pour allouer efficacement ses ressources et définir les objectifs prioritaires dans une meilleure cohérence. Le classement s'effectue au moins trois niveaux (environnement, objectifs de l'entreprise, cours des activités) auxquels sont associés différents critères. Ainsi, il est possible de déterminer l'alternative la plus pertinente, en fonction de la priorité accordée à chacun des critères pris en considération.

AHP consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique reflétant les interactions entre les divers éléments du problème, à procéder ensuite à des comparaisons par paires des éléments de la hiérarchie, et enfin à déterminer les priorités des actions.

#### ***b) Choix d'une méthode d'aide à la décision pour la susceptibilité aux glissements de terrain***

Les méthodes d'aide à la décision interviennent pour faciliter les problèmes de choix de différentes alternatives, de décision ou d'évaluation dans des situations complexes, où plusieurs critères qualitatifs et quantitatifs entrent en jeu. Elles permettent d'en agréger plusieurs avec l'objectif de sélectionner une ou plusieurs actions, options ou solutions. Ici, l'objectif est de prioriser les différents enjeux en fonction de leur vulnérabilité face à l'aléa. Il est donc nécessaire de recourir à une procédure de classement, afin de les pondérer. Plusieurs méthodes d'aide à la décision existent, avec chacune leurs avantages et leurs faiblesses. L'utilisation d'une méthode plutôt qu'une autre est définie par des paramètres principaux tels que les objectifs, la simplicité d'utilisation, la finesse de l'évaluation, la flexibilité, le temps nécessaire à leur mise en œuvre et le retour d'expérience. Après une évaluation de ces différentes techniques (dans Renard, 2010), notre choix s'est tourné vers la comparaison par paire, et plus précisément l'Analytic Hierarchy Process (AHP – Saaty, 1980). Elle permet d'ordonner les alternatives sur la base soit d'un critère unique, soit de différents critères appréhendés dans leur pluralité.

L'AHP est une théorie de mesure de critères d'une situation donnée, fondée sur la dérivation de priorités d'importance relative à partir de comparaisons par paires d'alternatives homogènes partageant un attribut commun (Saaty, 1994 ; Kendrick et Saaty, 2007). Cette méthode emprunte à l'approche systémique (se focalisant sur le fonctionnement de l'ensemble) et à

l'approche déductive (interrelation des parties) pour structurer une situation complexe en différents éléments pouvant interagir les uns avec les autres, afin de les quantifier pour leur attribuer des valeurs relatives à leurs impacts sur le système global (Griot, 2003). Cette quantification des valeurs des différents éléments repose sur l'expérience et le jugement d'experts, pour, à terme, obtenir des pondérations des différentes composantes : ici, les fonctions de susceptibilité.

### c) *Stratégie d'application de la méthode AHP*

Trois grandes étapes sont requises pour obtenir de bons résultats (Saaty, 1977 ; Saaty et Vargas, 2001) :

(i) **La structuration de la hiérarchie** en plusieurs niveaux représentant un/des thème(s) (par exemple pour les 'mouvements de versant', le thème 'géologie' peut représenter la lithologie + les formations superficielles). Plusieurs niveaux sont possibles : par exemple, une fois le 'problème' décomposé et structuré en hiérarchie, les poids relatifs des éléments de chaque niveau sont déterminés ;

(ii) **La pondération relative** : la méthode par AHP prend en compte les facteurs qualitatifs et quantitatifs : il est possible de pondérer simplement de manière 'experte' comme pour les cartes d'index ou par comparaison par paire (pairwise combination). Sans détailler le processus de fonctionnement de la comparaison par paire, cette technique se divise en deux étapes avec (i) l'attribution d'un coefficient représentant une expression linguistique en valeur numérique (généralement de 1 à 9) et (ii) le calcul d'un poids final exprimant l'importance d'un facteur par rapport à un autre. Saaty (1977) propose une échelle, pour les poids finaux, allant de 1 à 9 ; avec 1 = égal, 5 = fort, 7 = plus fort, 9 = extrême ;

(iii) **La pondération globale** : pour chaque niveau, chaque facteur est classé suivant son poids relatif. Le poids global, qui représente le degré d'importance du niveau, est ensuite introduit soit de manière experte soit par calcul suivant les poids relatifs (Saaty et Vargas, 2001).

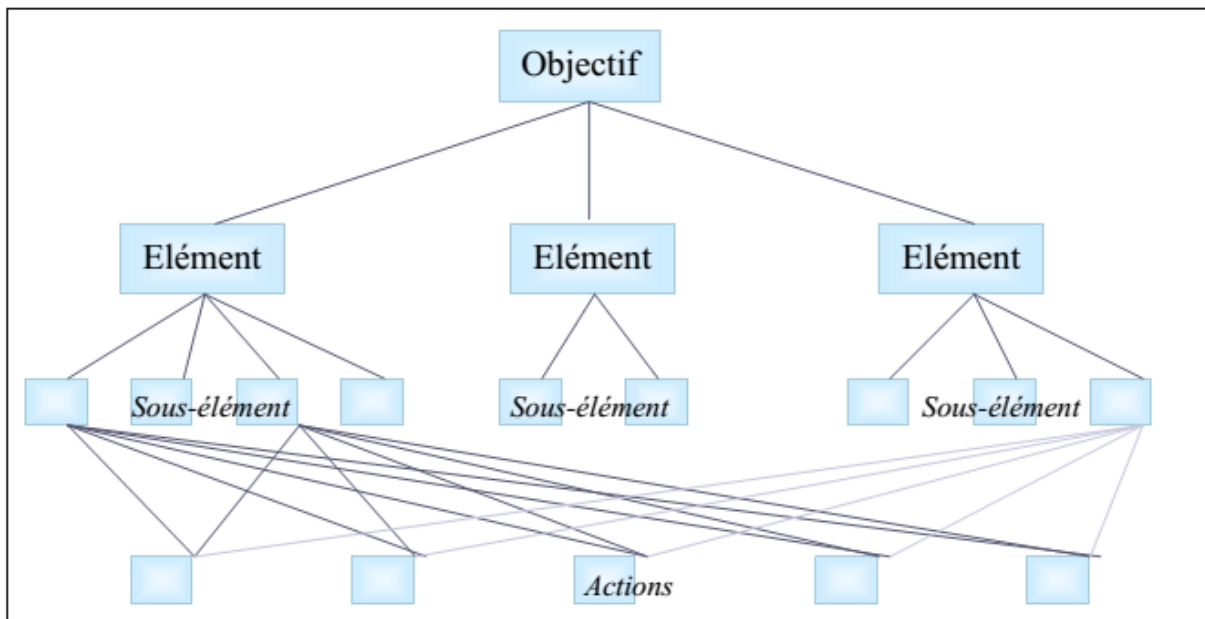


Figure I. 4 Structure hiérarchique d'un problème selon la méthode AHP

De nombreux exemples d'application de l'AHP à la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de versant peuvent être trouvés, entre autres, dans Bonham-Carter (1994), Ercanoglu & Gokceoglu (2002), Pradhan (2011), Thiery et al. (2013).

#### I.3.4. Évaluation et validation du modèle de performance de glissement de terrain

L'évaluation de la qualité d'un modèle de glissement de terrain peut comporter trois aspects : précision, robustesse (sensibilité des données) ou adéquation dans la description du processus de glissement de terrain. La précision dans la prévision des données observées est considérée comme le paramètre d'évaluation le plus important et implique l'analyse de la concordance entre les résultats du modèle et les données observées (Frattini et al., 2010). Les données observées sont l'inventaire des glissements de terrain, montrant la présence ou l'absence de glissements de terrain.

La prédiction de la présence ou de l'absence d'un glissement de terrain peut être jugée par le nombre d'erreurs de prédiction. Faux positifs ou faux négatifs. Le faux négatif (type d'erreur II / erreur d'omission) se produit lorsqu'une zone de glissement de terrain est identifiée comme stable, alors que le faux positif (type d'erreur I / erreur de commission) se produit lorsque la zone stable est identifiée comme étant une zone de glissement de terrain (Frattini et al., 2010). Certaines erreurs de prédiction peuvent être attribuées aux données et au modèle de glissement de terrain choisi. Les résultats du modèle peuvent donc être trompeurs (Fielding et Bell, 1997).

Bien que le taux de vrais positifs et le taux de faux positifs puissent être utilisés comme évaluateurs de performances (par exemple, Brenning, 2005), ils sont insuffisants, car ils ignorent les faux négatifs et les faux positifs (Frattini et al., 2010). Les courbes ROC qui utilisent à la fois le taux de vrais positifs et le taux de faux positifs sont préférées. Plus la valeur de l'aire sous la courbe ROC (AUC) est grand, plus le modèle permettant de prévoir les glissements de terrain est précis (Chung et Fabbri, 2003) et plus la courbe ROC est semblable à une diagonale (modèle trivial), plus la probabilité de classification des glissements de terrain par hasard (Frattini et al., 2010). Au niveau d'une ligne ROC diagonale parfaite, l'AUC équivaut à 0,5, alors que des valeurs de prédiction de haute précision sont obtenues lorsque l'AUC s'approche de 1.

D'autre part, les courbes de taux de réussite (SR) représentent un graphique des unités de glissement de terrain correctement classées (axe des ordonnées), par rapport au pourcentage de la zone classée instable (axe des x) (Chung et Fabbri, 2003 ; Frattini et al., 2010). Huang et Kao (2006) ont mis au point un taux de réussite modifié afin d'éviter les prédictions de sûr et sous-estimation avec le rapport / courbe de taux de réussite. L'axe des abscisses de la RMS est le nombre total de sites de glissements de terrain, à la fois dans les sites de glissements de terrain réels et dans les cellules stables. Les conséquences économiques des cartes de susceptibilité aux glissements de terrain sont une valeur économique accrue pour les zones stables mal classées et une valeur économique réduite pour les zones de glissements de terrain / zones instables (Fielding et Bell, 1997). Les couts d'une mauvaise classification peuvent être analysés à l'aide de courbes de couts (Drummond et Holte, 2000). Les autres statistiques d'évaluation sont k-index (Landis et Koch, 1977) et les métriques d'évaluation dépendantes du seuil critique critiquées par Frattini et al. (2010) sur la base de la division des cellules / objets en valeurs de susceptibilité stable ou instable, à savoir : le score de menace, le score de compétence de Gibert, le score de compétence Pierce, le score de compétence Heidke et le Q. de Yule. La statistique Kappa peut également être utilisée, car mesure de l'accord entre les données observées et prédites, en tenant compte d'un accord éventuel avec la prédiction (Carletta, 1996). Cependant, la statistique Kappa est critiqué dans l'évaluation du modèle de glissement de terrain, car elle donne des performances incohérentes lorsque la couverture de glissement de terrain change (Huang et Kao, 2006).

Les enregistrements d'inventaire de glissements de terrain de télédétection peuvent également être utilisés pour la validation / l'étalonnage du modèle de glissement de terrain en les utilisant comme données de formation et en effectuant une analyse en retour (Scaioni et al., 2014). En

outre, la comparaison des emplacements connus de glissements de terrain avec une carte de susceptibilité aux glissements de terrain pour évaluer les zones de chevauchement, les limites ou de simples statistiques tels que le rapport de surfaces ou la fraction de pixels peut valider les modèles géostatiques de glissements de terrain (Lee, 2005). Les données de surveillance des glissements de terrain à mouvement lent issus des techniques de radar à synthèse d'ouverture Interférométrie (InSAR) peuvent également être utilisées pour calibrer des modèles de glissements de terrain afin de prévoir les risques de glissements de terrain (Bai et al., 2012).

**CHAPITRE II :**  
**PRESENTATION DE LA ZONE**  
**D'ETUDE**

## II.1.Cadre géographique

L'étude a été menée dans le haut bassin du fleuve Oum Er-Rbia qui prend naissance dans le Moyen Atlas à une trentaine de km au NE de la ville de Khénifra où une dizaine de sources constituent son origine hydrologique (Figure II.7). Sur son cours supérieur, les massifs montagneux reçoivent des précipitations relativement abondantes. Par ailleurs, l'Oum Er Rbia se distingue dans cette région par un profil en long irrégulier et des pentes fortes. Enrichi par les eaux de ces sources dont une partie est salée (Loup, 1960), l'Oum Er Rbia est caractérisé par des débits assez constants au cours de l'année, les débits d'étiage n'étant jamais inférieurs à  $7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . En aval de Khénifra, il reçoit en rive gauche ses premiers affluents, les oueds Srou et Ououmana.

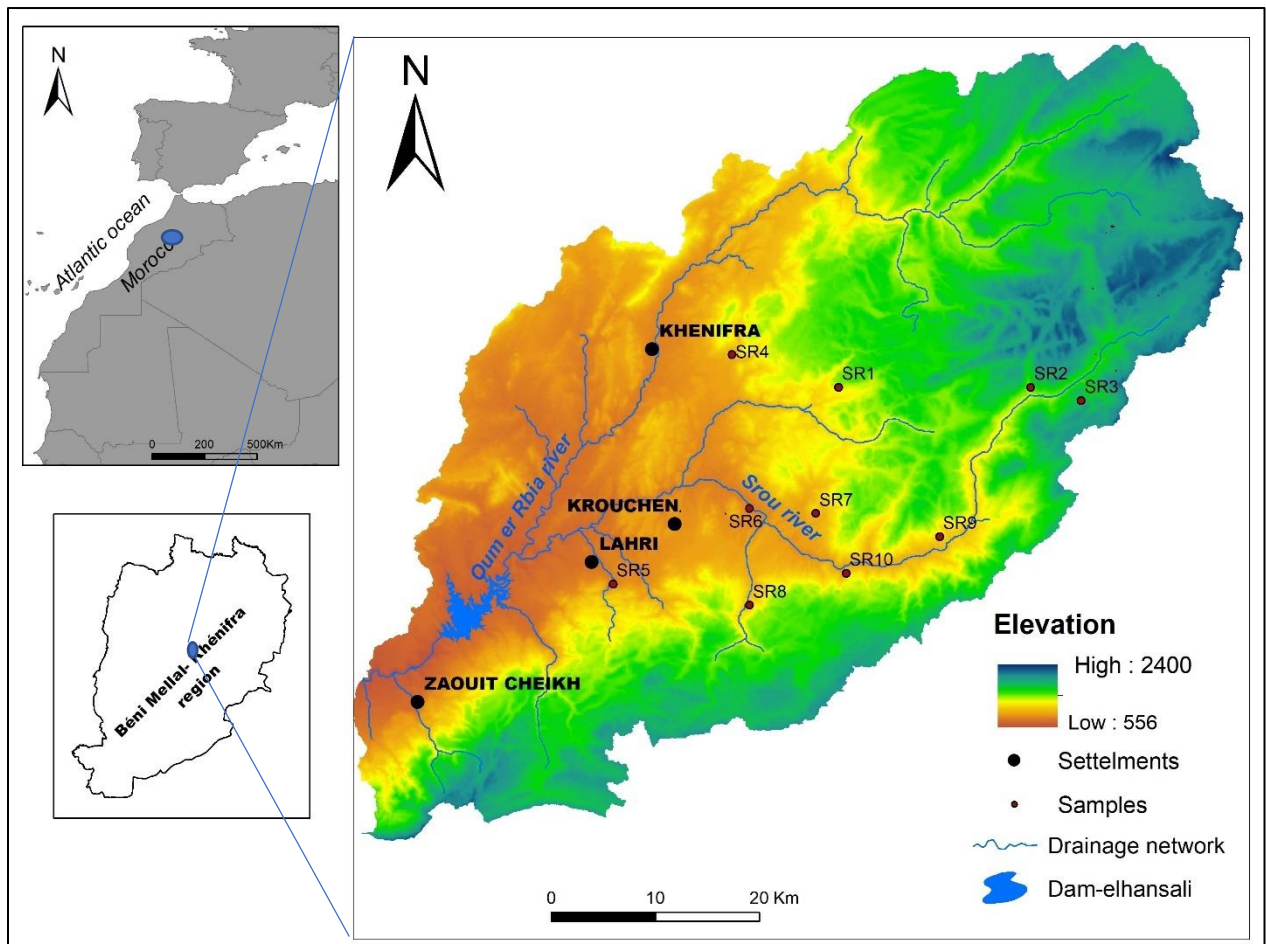


Figure II. 5 Localisation géographique du bassin du haut Oum Er-Rbia

Le bassin étudié est délimité à l'ouest par le Massif central hercynien, au nord par le causse d'Ajdir et au sud-est par la plaine de la Haute Moulouya. Il occupe une superficie de  $3\,612,21 \text{ km}^2$ , il se localise entièrement dans des terrains montagneux avec une diversité de reliefs, de caractéristiques structurales, de dépressions fermées, de ravins et de formes d'accumulation

représentées par les terrasses alluviales. La variation d'altitude de la zone est comprise entre 556 et 2400 m (Figure II.7).

## **II.2.Cadre climatologique**

Le climat de la Province de Khénifra est de type méditerranéen continental de montagne. Il se caractérise par un hiver pluvieux et froid avec des périodes d'enneigement dans les hautes montagnes, et un été sec et chaud avec des périodes d'orage.

- Les Précipitations : Le régime de précipitation est de type saisonnier avec un maximum de pluie et de neige en hiver. La pluviométrie annuelle varie, selon les régions entre 400 et 700 mm en fonction de l'altitude et de l'exposition.
- La Température : Les températures moyennes enregistrées varient d'un minimum de 4°C (janvier) à un maximum de 35°C (juillet - août).

La période hivernale est caractérisée par un froid vif. En revanche, pendant la période estivale apparaissent de très fortes chaleurs.

## **II.3.Cadre hydrogéologique**

Sur le plan hydrogéologique, deux niveaux semblent les plus importants régionalement :

- les calcaires liasiques perméables et karstifiées, constituant l'aquifère principal, qui donnent naissance à de nombreuses sources dont les plus importantes sont celles de l'Oum Er Rbia ;
- les formations du Trias essentiellement argileuses et salifères, jouent un rôle primordial. D'une part, le Trias constitue un niveau de base imperméable et continu pour l'aquifère liasique, d'autre part, il est responsable de la salinité des eaux.

L'abondance des niveaux salifères sur l'ensemble de l'échelle stratigraphique du Maroc, est l'une des principales causes directes de la salinité des eaux. Au niveau du haut bassin d'Oum Er Rbia, le Trias est la principale source de salinité des eaux. Le Trias qui constitue un ensemble tendre et imperméable joue un rôle primordial dans l'hydrogéologie de la région.

La succession de la trilogie triasique, grès, argiles et basaltes est parfois incomplète. Lorsque les basaltes sont absents, les calcaires liasiques reposent directement sur les argiles salifères ce qui induit une forte salinité des eaux des aquifères sus-jacents. L'Oum Er Rbia, fleuve le plus important du Maroc transporte des eaux salées sur une grande longueur et pendant plusieurs mois par an, la cause principale est l'apport d'un certain nombre de sources salées sur une bonne partie de son cours supérieur, s'ajoutent ensuite les apports de l'oued Srou, principal affluent du

haut Oum Er Rbia qui draine un bassin versant où prédominent les affleurements des terrains triasiques.

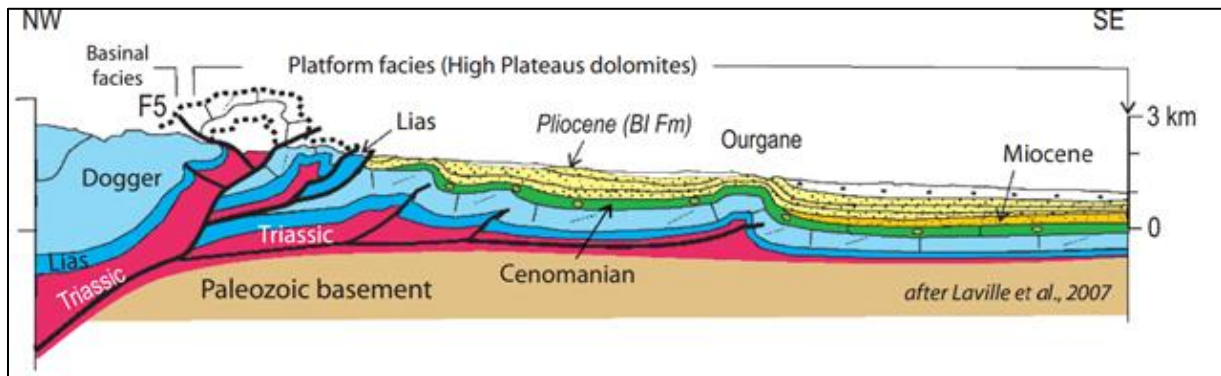


Figure II. 6 : Coupe transversale du Faille du Moyen Atlas Sud dans son segment central au sud du plus haut sommet du Moyen Atlas (J. Bou Naceur, 3137 m.s.l.), après Laville et al. (2007).

#### II.4.Cadre géologique

Le haut bassin versant de l'Oum Er Rbia fait partie du Moyen Atlas. La puissante série stratigraphique du bassin étudié est composée à sa base par un socle paléozoïque sur lequel repose, en discordance, une couverture sédimentaire allant du Trias supérieur jusqu'au Quaternaire (Figure II.8). Les dépôts les plus récents (Crétacé moyen et supérieur) affleurent localement dans la vaste cuvette synclinale de Bekrit. Enfin, des dépôts tertiaires et quaternaires et des alluvions récentes sont localisés dans des structures en cuvettes.

##### ➤ Trias

Le Trias qui forme le substratum imperméable et continu de l'aquifère liasique semble être à l'origine de la salinité d'une grande partie des eaux marocaines. Les basaltes argileux sont localement gréseux de couleur rouge. Il constitue une épaisse et lourde séquence de roches tendres, interposée entre le socle primaire et la couverture calcaire du Lias. Ainsi, les affleurements du Trias apparaissent presque continuellement sur toute la bordure occidentale du causse moyen atlasique (Figure II.9). En effet, au niveau de la vallée de l'Oued Srou et ses affluents, le trias constitue un matelas à niveau salifère plus étendu qui est à l'origine de la plupart des eaux salées de la région.

La série sédimentaire jurassique débute par une alternance de dolomies et d'argiles rouges qui marque le passage d'une sédimentation à dominance continentale du Trias supérieur à une sédimentation marine qui s'affirme au Lias par des dépôts carbonatés.

Par ailleurs, ce Trias se caractérise par la présence de trois faciès visibles :

- Les grès rouges apparaissent à la base du Trias en affleurements limités au plateau de Talarine, au Nord Est de Kerrouchane ;
- Les argilites rouges et salifères qui s'étendent sur une grande surface ;
- Les basaltes doléritiques qui se situent au-dessus des argilites, sont altérés et parfois redressés et interstratifiés. Les formations triasiques, en particulier les argilites, sont très sensibles à tout le processus d'érosion hydrique en raison de leur texture.

### ➤ **Lias**

Le Lias est constitué de lias inférieur, du lias moyen et du crétacé.

- Lias inférieur : il occupe une grande surface des causses suivants : El Hammam, Ajdir. Il est représenté en majorité par la dolomie. Il est noté aussi l'affleurement des dolomies sableuses à la base du lias inférieur, alors que la dolomie massive occupe le dessus sous forme de gros bancs diaclasés au niveau du causse d'Ajdir et le causse du Srou ;
- Lias moyen à dominance de calcaire caractérisé par une surface lisse et plus uniforme. Il est très diaclasé avec souvent de fines inter stratifications marneuses ;
- Crétacé constitué par des formations marines et néogènes occupant principalement la région de la haute Moulouya et qui se compose de calcaires dolomitiques et d'entablements marno-calcaires blancs ou jaunâtres.

Les dépôts du Lias inférieur sont représentés par une puissante formation calcaro-dolomitique. Ces dépôts sont pratiquement concordants sur ceux du Trias supérieur (figure 2.8). Les formations carbonatées calcaires et dolomies du Lias inférieur dont l'épaisseur peut dépasser 300 m constituent l'aquifère principal du secteur étudié.

Les formations carbonatées (calcaires et dolomies) du Lias inférieur et moyen forment l'ossature du Causse moyen atlasique.

### ➤ **Région des causses**

Cette région a une structure subtabulaire dont le modelé est influencé par les processus karstiques (dolines, lapiez). Elle est constituée du causse d'El Hammam, le causse d'Ajdir, le Causse d'Aghbal et le causse du Srou. Elle est aussi caractérisée par le défoncement de la topographie sommitale, l'existence d'un réseau d'inégale densité de vallées sèches et de vallées d'écoulement pérenne et par l'élaboration de dépressions fermées d'inégale ampleur (Ajdir,

Afiroua et Azigza). Ces structures constituent des cuvettes de dissolution d'origine karstique qui forment en saison pluvieuse des dayas témoignant du phénomène de colluvionnement important des hautes surfaces des causses.

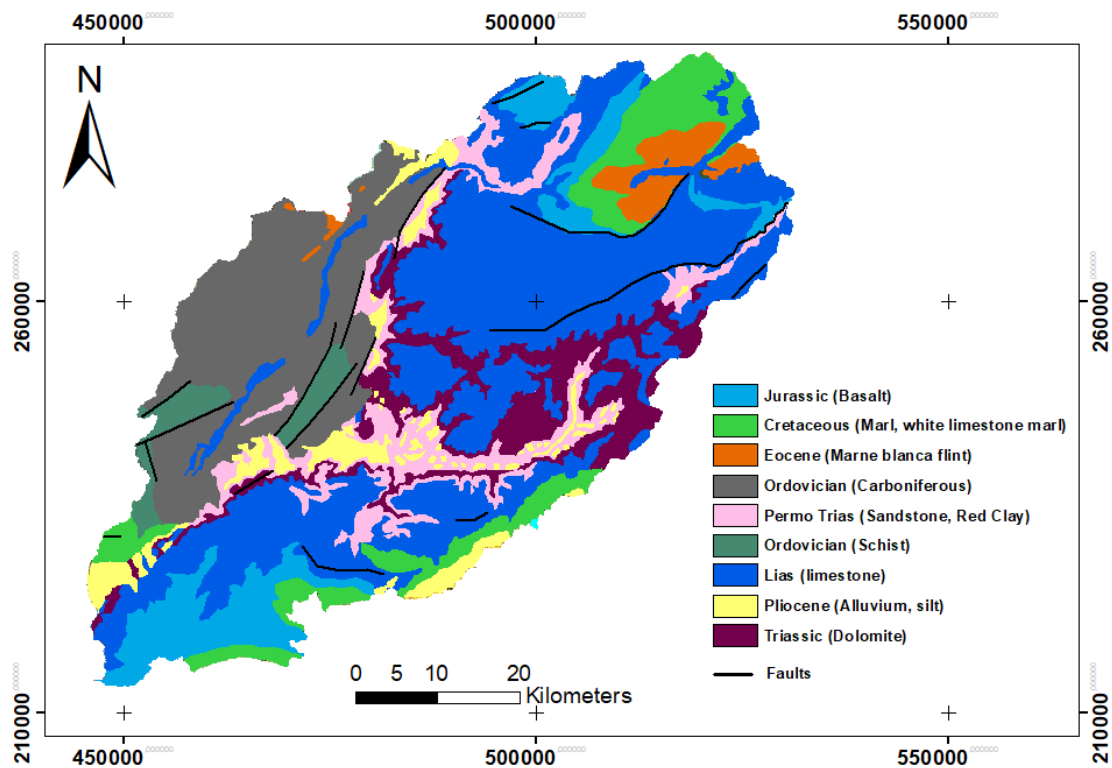


Figure II. 7: Extrait de la zone d'étude digitalisé de la carte géologique du Maroc au 1 : 500 000

### ➤ Région des hautes plaines et plateaux étagés

La région constitue un ensemble compact d'affleurements du Paléozoïque et du Trias en position de col entre l'Oued Oum-Rbia et la vallée de l'Oued Srou. De point de vue morphologique, cette zone se différencie en deux domaines séparés par la brutale dénivellation de Foum Teguet. Le premier domaine est situé au nord et représenté par les hautes plaines et glacis étagés de Mririt, M'çaouar, Guertila et Bou Chber qui se situent à 200 m au-dessus des bassins de Khénifra. C'est un modèle très contrasté de croupes et de versants entaillés dans les Schistes primaires. Le second est situé au sud et constitué des bassins de khénifra, la vaste dépression d'El Héri-Tighassaline et la plaine rouge d'El Harouch qui sont largement excavés et parsemés de crêtes, de collines schisteuses et triasiques en contre bas des hautes plaines. Ces structures sont entaillées dans les terrains tendres du Trias où des assises rouges de l'Autunien très redressées affleurent en chevrons et recouvertes en discordance par les argilites rouges du

Trias (Figure II.9). Il est à noter que cette région montre une structure ployée en plis schisteux étroits et serrés.

### ➤ **Région de la Haute Moulouya**

Cette région qui se situe au Sud-Est du bassin versant étudié, comporte le plateau d'Aghbalou n'Serdane. Elle est entaillée dans les calcaires tendres et les marnes du crétacé.

## **II.5.Cadre socioéconomique**

L'économie est essentiellement agricole (arboriculture fruitière, culture de l'olivier, céréales, élevage...) utilisant une forte main-d'œuvre locale (48,4 % de la population active), les services d'action sociale et sanitaire étant le deuxième pourvoyeur d'emplois. Quant à l'industrie et au secteur du bâtiment / travaux publics, ils représentent respectivement 10,7% et 7,5% de la population active. Ce rapide panorama économique ne doit cependant pas faire oublier la spécificité forestière du secteur et particulièrement son importance pour la région et le Maroc avec la présence du cèdre, contribuant fortement au développement local, malgré sa fragilité pour cause de surexploitation. Sur le plan touristique enfin, le territoire recèle d'un vaste potentiel « nature » largement sous-exploité et composé essentiellement de ressources naturelles autour notamment des cédraies, des lacs et du patrimoine cynégétique.

L'érosion hydrique est aggravée par certaines pratiques culturelles (défrichement, jachère nue, labour dans le sens de la pente, etc.). En fonction de la raideur de la pente, les processus érosifs déterminent une morphologie variée où les glissements de terrain surplombent les versants ravinés et les bad-lands qui occupent seulement 10 % de la surface de la zone, mais qui fournissent 50 à 60 % de la dégradation spécifique moyenne de la zone, estimée à 1 200 t/km<sup>2</sup>/an. Le reste provient du sapement des berges lors des crues torrentielles (ministère de l'Agriculture, 1994 ; El Jihad, 1999).

## **II.6.Cadre Géomorphologique du haut bassin d'Oum Er Rbia**

### ***II.6.1. Caractéristiques morphométriques***

L'analyse morphométrique des bassins versants consiste en une caractérisation de leur relief et de leur réseau hydrographique. Elle permet de décrypter les zones anomalies des reliefs (pentes fortes, surfaces d'érosion...) et des objets hydrographiques (ruptures de pente, déviations de drains, changements brusques de directions...) en se basant sur le calcul de plusieurs indices morphométriques. Ces marqueurs permettent aussi une comparaison entre les caractéristiques morphologiques des bassins versants. L'étude morphométrique est réalisée en

utilisant des cartes topographiques et des modules numériques de terrain traités par des systèmes d'information géographique (SIG). Les caractéristiques suivantes ont été déterminées : Indice de compacité, les caractéristiques de relief et les caractéristiques hydrographiques.

**a) *Superficie (S) du bassin :***

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie liés à sa surface (Musy & Higy, 2004). La surface du bassin versant peut être mesurée par superposition d'une grille dessinée sur papier transparent, par l'utilisation d'un planimètre ou mieux par des techniques de digitalisation. Elle peut être déterminée avec une précision acceptable, excepté en zone très plate.

**b) *Indice global de pente***

$I_g = D/L$  est calculé après construction de la courbe hypsométrique du bassin qui donne le pourcentage de la superficie  $S$  du bassin versant situé au-dessus d'une altitude donnée  $H$ . en fonction de cette même altitude. Puisque dans une région de géomorphologie homogène, la pente diminue de l'amont vers l'aval, l'indice  $I_g$  diminue lorsque  $S$  augmente. Néanmoins, la longueur du rectangle équivalent étant généralement proche de celle du plus long cours d'eau,  $I_g$  reste voisin de la pente longitudinale. Si les pentes transversales sont peu différentes de  $I_g$  (différence de moins de 20%), ce dernier représente assez bien la pente du bassin.

**c) *Indice de compacité***

L'indice de compacité ( $I_{comp} = 0,282 \cdot P \cdot S^{-1/2}$ ), qui intervient dans le calcul de l'indice de pente, ne peut être calculé, avec suffisamment de précision, que si le périmètre  $P$  est mesuré sur un contour de bassin très simplifié. Pour cela, il est nécessaire de supprimer toutes les sinuosités qui ne correspondent pas à la tête d'un thalweg actif. Pour vérifier que la stylisation du périmètre est suffisante, on s'assurera que la longueur du rectangle équivalent  $L$  n'est pas sensiblement supérieure à la longueur du plus long cours d'eau, depuis son origine jusqu'à l'exutoire.  $P$  est mesuré à l'aide d'un curvimètre ou d'une bande de papier.

L'Indice de compacité de Gravelius (1914)  $K_G$ , défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface :

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Eq.10}$$

Avec

$K_G$  : Indice de compacité de Gravelius

À : Surface du bassin versant

P : périmètre du bassin

Pour le haut bassin versant de l'Oum Er Rbia, on a la surface est de 3612.2 km<sup>2</sup> et le périmètre est de 465 km. L'indice de compacité  $K_G$  est égal à 2.16 ; le bassin est de forme relativement allongée traduisant une érosion linéaire et régressive.

#### **d) *Hypsométrie***

Pour mieux comprendre les variations d'altitudes au sein du haut bassin versant d'Oum Er Rbia, nous avons procédé à la détermination de la courbe hypsométrique qui nous a permis de traduire la répartition des altitudes à l'intérieur de la zone d'étude et permet en outre de déterminer les altitudes caractéristiques (Figure II.10).

#### **e) *Répartition des altitudes***

La zone d'étude est une région montagneuse. Les altitudes sont comprises entre 567 et 2401m (Figure II.10). Elle est caractérisée par un relief très accentué et très varié, résultant de l'action combinée de la tectonique, de l'érosion régressive de l'oued Oum Er Rbia, l'oued Srou et de ses affluents, et de la succession des cycles d'érosion.

Les pourcentages des superficies montrent que la classe la plus représentée est celle qui varie de 1455m à 1900m avec un pourcentage de 43.33%. Ces altitudes sont localisées dans le bassin notamment NE et au Sud.

#### **f) *Courbe hypsométrique***

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus ou au-dessous de l'altitude représentée en ordonnée. Elle exprime ainsi la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude. La courbe hypsométrique donne des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage (Figure II.11). Elle fournit déjà pas mal de renseignements qualitatifs sur l'allure du relief. Une pente forte à l'origine (vers les plus basses altitudes) indique souvent des plaines ou des pénéplaines ; si la pente est très forte, il y a des chances pour qu'on ait de vastes zones d'inondation. Une pente très faible dans la même région révèle au contraire une vallée encaissée. Une pente forte dans le milieu ou dans les hautes altitudes indique probablement un grand plateau, etc.

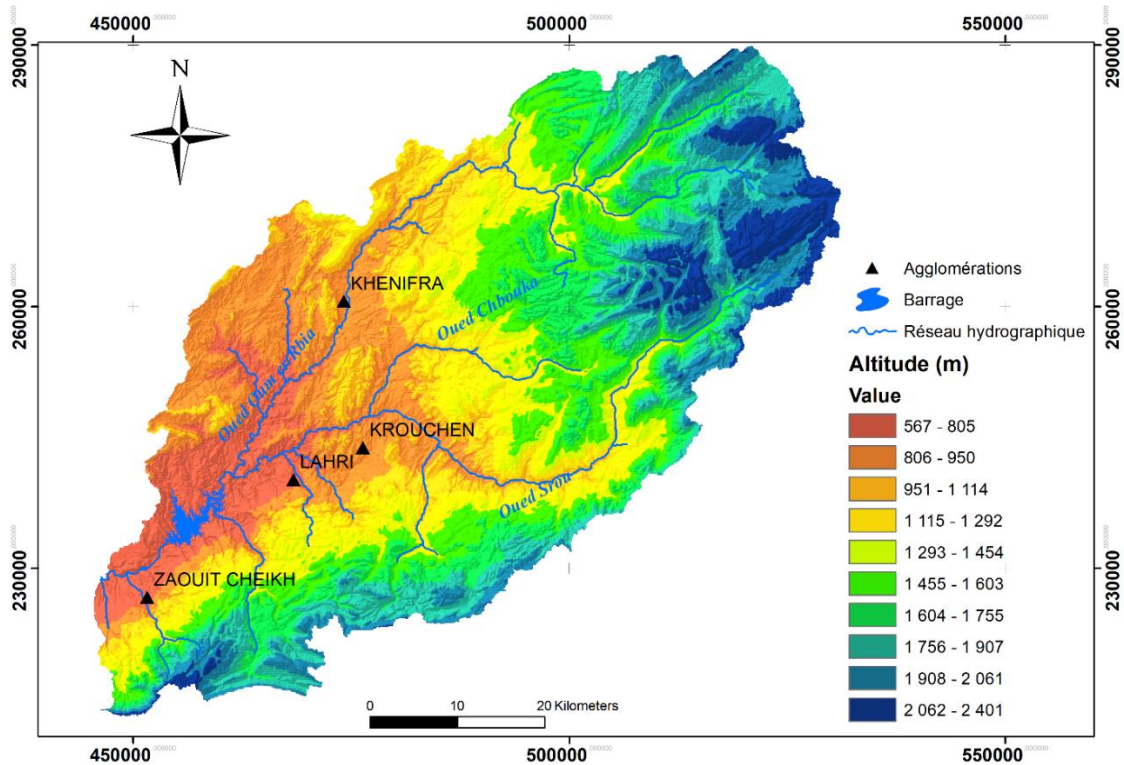


Figure II. 8 : Carte hypsométrique des altitudes du haut bassin versant d’Oum Er Rbia

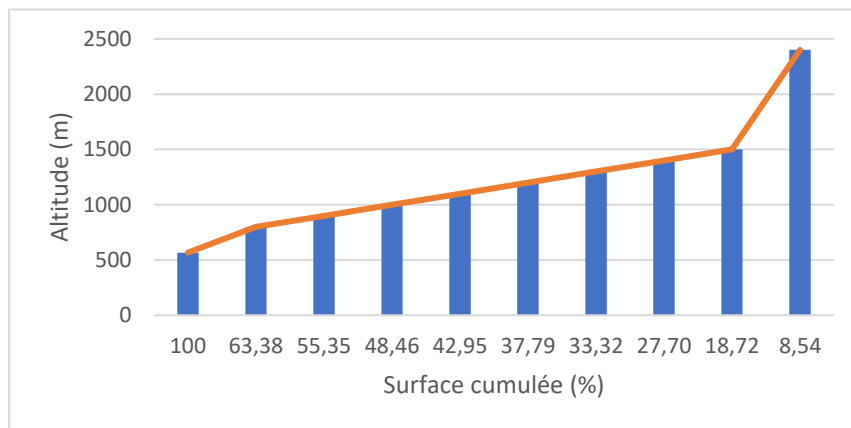


Figure II. 9: Courbe hypsométrique du bassin amont d’Oum Er Rbia

### Conclusion

En guise de conclusion, la détermination des divers paramètres morpho-métriques de notre zone d’étude nous a permis d’éclaircir ses particularités topographiques. Il en sort, une altitude minimale et maximale 567 m et 2401 m. Tenant compte du facteur pente, la zone d’étude montre une grande possibilité de générer du ruissellement. En effet, le relief est assez contrasté avec des altitudes extrêmes des bassins versants atteignant les 2401m et des pentes moyennes à fortes.

**Partie II**

**CHANGEMENT ET  
DYNAMIQUE D'OCCUPATION  
DE SOL ET DU COUVERT  
VÉGÉTAL**

# **Chapitre I**

## **Changement et dynamique d'occupation de sol et du couvert végétal**

## **I.1. Cartographie du changement de l'occupation et de l'utilisation du sol**

La terre est une ressource naturelle essentielle dans le monde pour la préservation des écosystèmes terrestres et la subsistance de l'humanité. La dégradation des terres est le produit de nombreux processus tels que les changements dans l'utilisation des terres et le climat mondial. Les changements dans les modèles d'utilisation des terres dus aux pratiques agricoles intensives et à la déforestation, en relation avec la croissance démographique, accélèrent les processus de dégradation des terres fertiles. L'érosion des sols par l'eau est un autre des processus focaux à l'origine de la dégradation des terres (Blanco et al. 2017; El Jazouli et coll. 2017), et par conséquent, ont dirigé la réduction de la productivité du sol, les inondations et les pertes d'habitat (Kidane -Alemu, 2015; Park, Oh, Jeon, Jung, Choi, 2011). L'érosion des sols est devenue une catastrophe environnementale mondiale (Duran et coll., 2011 ; Liu et coll., 2010, Blanco et coll., 2017). Il provoque des troubles environnementaux extrêmes, y compris la perte de nutriments végétaux et d'autres produits chimiques. Ainsi, l'évaluation de l'érosion des sols est devenue particulièrement importante au cours des dernières années, et un intérêt sérieux a été payé pour relier son taux à l'utilisation des terres / changement de couverture.

L'analyse spatiale et temporelle des terres et les relations entre les facteurs à l'origine de ces variations permettraient une meilleure gestion de l'utilisation des terres. Plusieurs études mondiales ont été réalisées pour évaluer l'utilisation des sols et leurs impacts environnementaux en appliquant diverses méthodes (Abdulkareem et al., 2018 ; Barakat et al. 2018a, b ; Zadbagher et al. 2018, Hegazy et Kaloop 2015).

La télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) sont largement utilisés pour détecter les variations d'utilisation des sols. Les images de télédétection à dates multiples fournissent des informations à moindre cout et permettent de classer les différentes composantes (Ozesmi et Bauer 2002) en utilisant l'une des nombreuses techniques de classification telles que la classification supervisée, la classification non supervisée et l'analyse en composantes principales.

La présente étude visait d'abord à identifier et à prédire les changements dans les classes de LULC sur une décennie ; deuxièmement d'évaluer l'impact des changements dans l'utilisation des terres sur l'étendue et le taux d'érosion des sols ; et enfin, pour obtenir la variation temporelle et la distribution spatiale de l'érosion du sol en utilisant le changement temporel LULC. L'approche suivie est basée sur la modélisation de l'érosion du sol et du changement LULC en appliquant le SIG et la télédétection. Sur la base de données auxiliaire,

une analyse de la chaîne CA-Markov a été mise en œuvre pour prévoir le changement de LULC pour l'année 2030. L'équation RUSLE a été utilisée pour quantifier les taux d'érosion du sol. L'emploi de CA-Markov et de RUSLE dans une région montagneuse et semi-aride est la contribution principale et nouvelle de cette étude au Maroc. Les résultats ont fourni des informations vitales pour la planification et la mise en œuvre des mesures de conservation des sols dans la zone d'étude.

## **I.2. Matériels et méthodes**

Les principales données spatiales et temporelles utilisées dans cette étude telles que ; Landsat ETM 30m (2003), Landsat 8 OLI 30m (2013) et Sentinel S2A 10m. Les images satellitaires ont été téléchargées en libre accès à <http://earthexplorer.usgs.gov>. Les images Landsat acquises auprès de l'USGS étaient du niveau L1T, qui étaient déjà corrigés géométriquement et orthométriquement (USGS, 2014b). Le prétraitement de l'imagerie Landsat appliquée dans cette étude comprend : a) la conversion des valeurs du nombre numérique (DN) de l'image en sommet de la réflectance atmosphérique (TOAR) avec correction atmosphérique selon la procédure du logiciel ENVI. La correction atmosphérique était en cours de traitement à l'aide de l'extension semi-automatique de la commande de classification (Congedo, 2016) basée sur le modèle Dark Object Subtraction (DOS). Tous les traitements d'images, classification et analyse SIG ont été effectués à l'aide des logiciels ENVI, ArcGIS et IDRISI TerrSet. Le modèle d'élévation numérique ASTER (DEM) avec une résolution spatiale de 30 m a été utilisé pour extraire les caractéristiques topographiques de la zone d'étude, telles que l'élévation, l'aspect, la pente et la longueur de la pente.

Les images ont été acquises dans des conditions atmosphériques claires et non nuageuses. Le capteur Oli présente les caractéristiques résumées dans les tableaux III.1 et III.2:

Tableau III. 1 : Caractéristiques physiques du capteur OLI (Source : U.S. Geological Survey Department of the Interior/USGS).

Bande spectrale	Longueurs d'onde	Résolution	Utilisations
1- Aérosol	0,433-0,453 $\mu\text{m}$	30 m	Estimation des aérosols atmosphériques, zones côtières
2- Bleu	0,450-0,515 $\mu\text{m}$	30 m	Différenciation sol / végétaux
3- Vert	0,525-0,600 $\mu\text{m}$	30 m	Végétation
4- Rouge	0,630-0,680 $\mu\text{m}$	30 m	Différenciation des espèces végétales
5- Proche Infrarouge	0,845-0,885 $\mu\text{m}$	30 m	Biomasse
6- Infrarouge moyen 1	1,560-1,660 $\mu\text{m}$	30 m	Différenciation neige/nuage
7- Infrarouge moyen 2	2,100-2,300 $\mu\text{m}$	30 m	Lithologie
8- Panchromatique	0,500-0,680 $\mu\text{m}$	15 m	Urbanisme
9- Cirrus	1,360-1,390 $\mu\text{m}$	30 m	Détection des nuages

Tableau III. 2: Caractéristiques du Landsat 8 OLI

Altitude	705 km
Inclination	98.2 degrees
orbit	sun-synchronous polar
orbit period	98.9 minutes
revisit time	16 days
Scene size	170 km x 185 km

### **I.2.1. Classification supervisée : Préparation des cartes LULC**

C'est une étape qui nécessite le choix d'un algorithme de classification le mieux adapté aux données traitées. Puisque dans une image numérique, les couleurs ne sont en fait qu'une transposition conventionnelle de valeurs numériques, il est également possible d'exploiter la puissance de calcul d'un ordinateur pour classer les pixels en fonction de leurs valeurs numériques, c'est à dire en fin de compte en fonction des propriétés spectrales des objets correspondants. C'est le principe de base des classifications d'image.

L'algorithme du maximum de vraisemblance est une méthode de classification dirigée appartenant aux classificateurs paramétriques. Elle s'applique à l'échelle du pixel. Plusieurs études ont démontré l'efficacité de cette méthode par rapport aux autres classificateurs (Su, 2000). Caloz et Collet (2001) estiment que cette méthode de classification est la plus aboutie,

car elle s'appuie sur des considérations théoriques approfondies. Développée pour un grand nombre de situations étrangères au traitement d'images, elle cherche à estimer la probabilité d'occurrence d'un évènement en faisant intervenir toutes les connaissances que nous possédons à priori à son sujet. C'est l'approche bayésienne des probabilités.

Le processus de classification par maximum de vraisemblance s'inscrit dans un cheminement classique de classification dirigée. En premier lieu, les définitions des classes thématiques sont établies. Par la suite, des zones d'entraînement sont déterminées à l'aide des connaissances à priori du territoire. Cette connaissance est appelée vérité terrain. Les zones d'entraînement sont ensuite caractérisées par une signature spectrale propre. Finalement, l'image est classifiée selon la règle de décision choisie, le classificateur du maximum de vraisemblance et les zones d'entraînement établies.

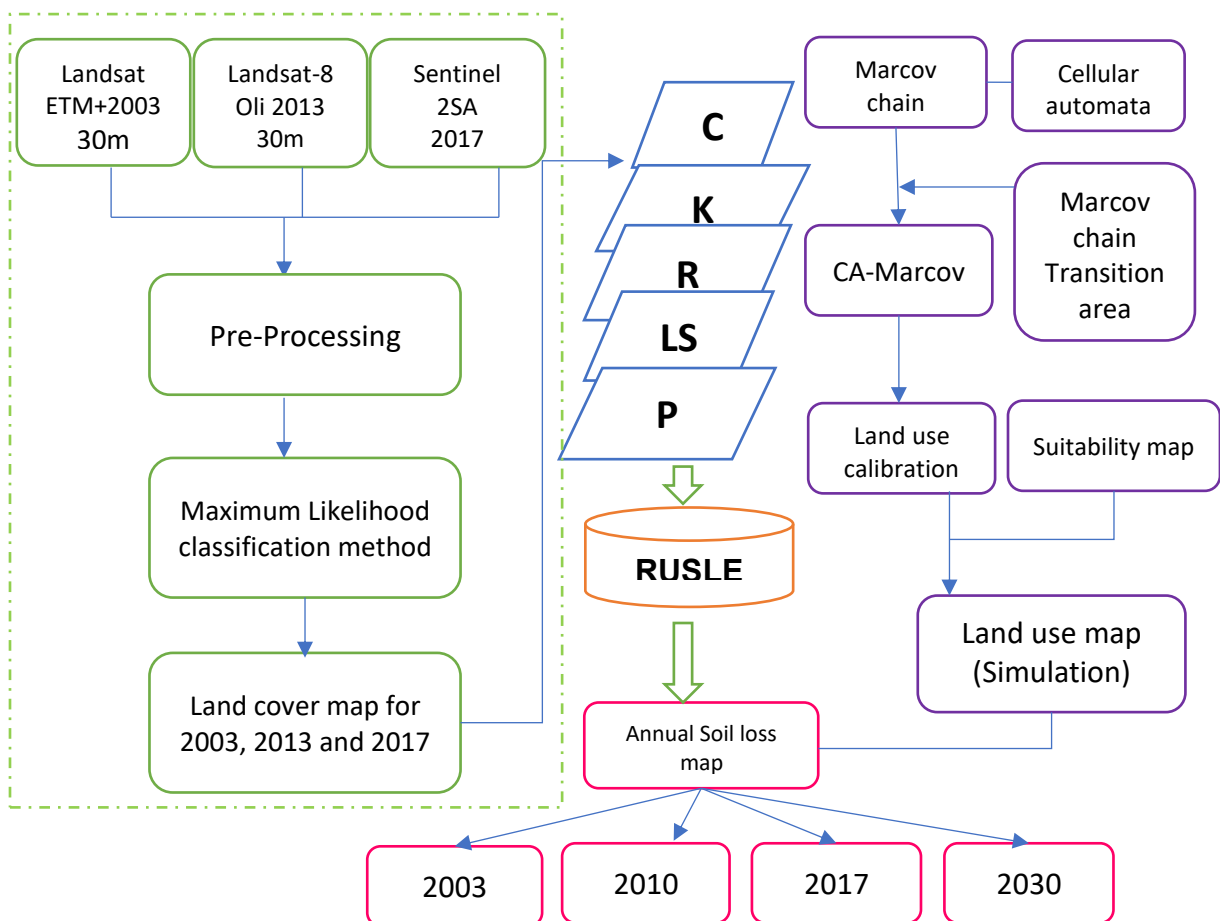


Figure III. 10: Organigramme de la méthode utilisée

### I.2.2. Le modèle CA-Markov

Le modèle CA-Markov a été utilisé pour prévoir et montrer une meilleure simulation du changement LULC à la fois en quantité et en espace en amont du bassin versant de l'Oum Er

Rbia. Le CA-Markov est un arrangement Change/Time ou Environnement/Simulation intégré au logiciel IDRISI TerrSet. La prévision de changement LULC utilisant CA-Markov à l'aide de tableaux de conversion et de probabilités conditionnelles de la carte de conversion appliquée pour simuler et prévoir les états de changement LULC (Figure III.12). Par conséquent, pour simuler les changements futurs de LULC à notre site d'étude à l'aide d'un modèle CA-Markov, les processus spécifiques suivants ont été suivis :

Les cartes classées LULC pour 2003, 2013 et 2017 ont été utilisées pour acquérir le changement dynamique pour les classes LULC entre 2003 et 2013, 2013 et 2017 en raison de la demande principale que Markov démontre (Klimsiak, 2016 ; Gidey et coll., 2017).

➤ **Cartes potentielles de transition générées**

Les cartes LULC, qui ont été utilisées pour prévoir le LULC en 2017 et 2030, ont été produites en raison des progrès fondamentaux qui se sont issues parmi les classes LULC de 2003 à 2013, des examens sur le terrain et l'apprentissage des créateurs sur la scène considérée pour caractériser les contrôles de changement et reconnaître les éléments et les impératifs. La matrice de probabilité de transition de LULC entre la première période et la deuxième sera la base de la probabilité de changement d'utilisation des terres d'une période à l'autre.

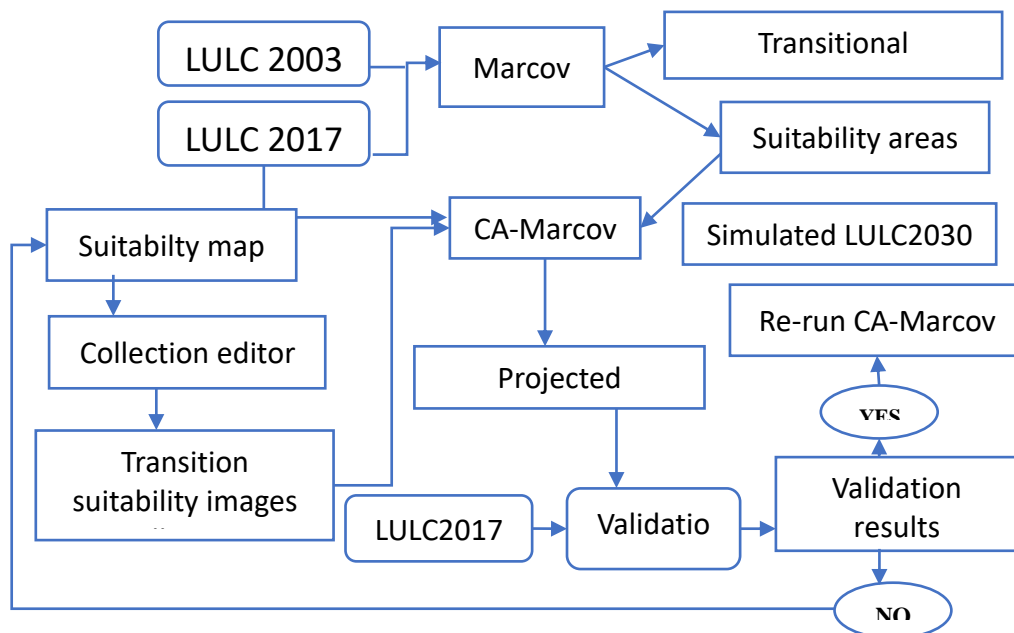


Figure III. 11 : Organigramme du modèle CA-Markov

Les cartes de la pertinence des progrès du LULC sont mises en place en accumulant un rassemblement de cartes (composants et limitations) en utilisant la stratégie d'évaluation

multicritère (MCE), tandis que les documents des zones de changement Markov sont créés en exécutant un module Markov avant l'exécution d'un module CA-Markov au milieu de l'exécution du changement de LULC (Figure III.13).

### **I.3. Résultats**

#### **I.3.1. Modélisation de changement de l'occupation de sol**

Les cartes d'occupation du sol pour 2003, 2013 et 2017 ont été obtenues après l'application d'opérations de prétraitement primaires, par la méthode de classification supervisée utilisant l'algorithme de vraisemblance maximale pour la zone d'étude et ont été classées en six classes : zones bâties, forêt, masse d'eau, sol nu, agriculture, sol non cultivé comme indiqué sur la figure III.14. En 2003, ces classes affectent respectivement les zones 0,40% (14,70 km<sup>2</sup>), 16,23% (587. Km<sup>2</sup>), 0,41% (14,97 km<sup>2</sup>), 58,63% (2120,72 km<sup>2</sup>), 4,80% (173,77 km<sup>2</sup>) et 19,50 (705,66 km<sup>2</sup>). En 2013, LULC a été principalement classée comme sol nu d'une superficie de 540,05 km<sup>2</sup> ou 14,93%. Entre temps, les autres classes comprenaient les zones bâties, les forêts, les masses d'eau, l'agriculture et les sols non cultivés d'une superficie respective de 20,17, 2520,01, 17,23, 147,62 et 371,85 km<sup>2</sup>.

En 2017, LULC était principalement classée comme terrain nu avec une superficie de 432,53 km<sup>2</sup> ou 11,95%. Les autres classes comprenaient momentanément les zones bâties, les forêts, les masses d'eau, l'agriculture et les terres non cultivées d'une superficie de 26,63, 2536,73, 18,84, 111,91 et 490,29 km<sup>2</sup>, respectivement (tableau III.4).

#### **I.3.2. Analyse de la matrice de probabilité de transition**

La matrice de probabilité de transition indique les directions de transfert LULC dans la zone d'étude calculée à l'aide de la chaîne de Markov. Les valeurs en gras le long de la diagonale de probabilité de transition indiquent la probabilité qu'un type LULC reste inchangé du temps  $t_0$  au temps  $t$  ( $t > t_0$ ), alors que la diagonale croisée indique la probabilité qu'un LULC donné subisse un changement d'une catégorie à une autre. Les résultats ont confirmé qu'au cours de la période d'étude, différents types de LULC ont découvert diverses conditions dynamiques. Les forêts, les terrains nus et les masses d'eau sont les types LULC les plus stables, avec des probabilités de transition supérieures à 0,90. Les zones bâties, l'agriculture et les terres non cultivées ont montré une faible persistance, avec des probabilités respectives de 0,74, 0,86 et 0,87 (tableau III.5).

Entre 2003 et 2017, l'expansion des zones bâties a entraîné l'utilisation de grandes quantités de terres agricoles, de sols nus et de terres non cultivées (tableau III.4). Outre l'expansion zones

bâties, le surpâturage et la déforestation ont entraîné la conversion des forêts en terres nues ou en terres incultes.

### **I.3.3. Préviation des changements LULC sur la base du modèle CA – Markov**

Pour identifier la probabilité de changement et de zones de transition, les données LULC de 2003 et 2017 ont été utilisées par le modèle de la chaîne de Markov. Pour la validation du modèle, une comparaison des cartes LULC approuvée pour l'année 2017 avec la carte simulée par CA Markov, basée sur les statistiques Kappa, ainsi qu'une comparaison de chaque zone LULC simulée avec la zone réelle, ont été utilisés. Les valeurs statistiques Kappa (0,91) et une précision globale supérieure à 91% montrent qu'il existe un bon accord entre le résultat prévu et la valeur réelle des types LULC pour l'année de base. L'évolution de l'étendue entre les deux cartes de l'année 2017 révèle que toutes les classes LULC ont des erreurs relatives inférieures à 6%. Comme il a également été examiné par des études antérieures dans d'autres domaines (Yang et al., 2014 ; Gidey et al., 2017), ces résultats ont montré que le modèle CA Markov était efficace pour prétendre au changement de LULC en 2013. Ce modèle pourrait donc : être persistant dans la prévision du futur changement LULC avec l'hypothèse qu'un taux de changement constant se produira dans le futur.

Dans de nombreuses études, on note notamment, Rendana et al. (2015) ont mentionné que les automates cellulaires et le modèle d'évaluation de la chaîne de Markov ont été utilisés pour prédire le futur type LULC et qu'un vaste échange dans LULC a été déterminé entre 1997 et 2014 (18,95%). En outre, il prévoyait que les eaux libres, l'agriculture mixte, les terres ouvertes et les zones bâties augmenteraient de 80,37 (0,54%), 501,02 (12,24%), 499,95 (5,47%) et 119,88 ha (0,85%) en 2020.

De même, Yulianto et al. (2016) ont des forêts réduites de 10, 52 ha, des terres arides de 13,22 ha, des rizières de 14,49 ha et des arbustes de 1,15 ha par an respectivement, des sols nus de 6, 79 ha, de 11 ha, 14 ha, 11 peuplements, 49 ha et 9, 7 ha. Dans le bassin versant de Tondano, Sulawesi Nord-Indonésie. De plus, Gashaw et al. (2017) ont déterminé que les terres cultivées dans le bassin versant d'Andassa devraient passer de 6% à 8% en 2015 à 83,3% au cours de la période de 2030. En outre, l'auteur a précisé que l'augmentation rapide de la surface bâtie augmenterait de 1,1 % au cours de la période 2015 à 2 % en 2030, respectivement. Cela démontre clairement la propagation des zones urbaines et des activités agricoles dans le bassin versant qui conduit à l'augmentation de la perte de sol dans différentes classes d'érosion des sols.

Le futur changement de LULC en 2030 a été prédit en utilisant une carte de base d'utilisation des sols pour 2017, après la simulation réussie des changements en 2017, la matrice de transition de 2003 à 2017 et une carte de transition potentielle pour 2017. Les changements d'utilisation des sols de 2003 à 2017 dans notre bassin ont été étudiés à l'aide de l'IDRISSI TerrSet. Les classes d'utilisation des terres ont été classées en trois catégories : zones bâties, forêt, masse d'eau, sol nu, agriculture et terre non cultivée (Figure III.14). Sur la base de l'analyse des tendances temporelles (tableau III.6), les tendances générales des modifications de LULC au cours de l'étude ont révélé qu'en 2003, les forêts, les masses d'eau, le bâti, les terres nues et les terres non cultivées constituaient les principales classes de LULC, avec 16,23%, 0,41 %, 0,41% et 58,63% de la superficie totale des terres, respectivement. Cependant, en 2030, les résultats prévus confirmaient qu'avec une augmentation brutale par rapport à l'année de base, le terrain nu deviendrait le LULC dominant près de la zone bâtie (11,32%) et la forêt, le troisième (15,39%), suivis des terres non cultivées (12,60%).

Entre 2003 et 2013, les forêts, les masses d'eau et les zones construites ont connu des changements de -1,30%, + 0,06% et + 0,15% de leur superficie totale, respectivement. Les mêmes tendances de changement ont été observées pour ces trois types de LULC entre 2017 et 2030, avec des taux de changement différents chaque année. Les terres non cultivées ont continué à diminuer de -0,9% par an, les plans d'eau ont diminué de -0,05%, tandis que la surface bâtie a augmenté de 10,59% (Figure III.15).

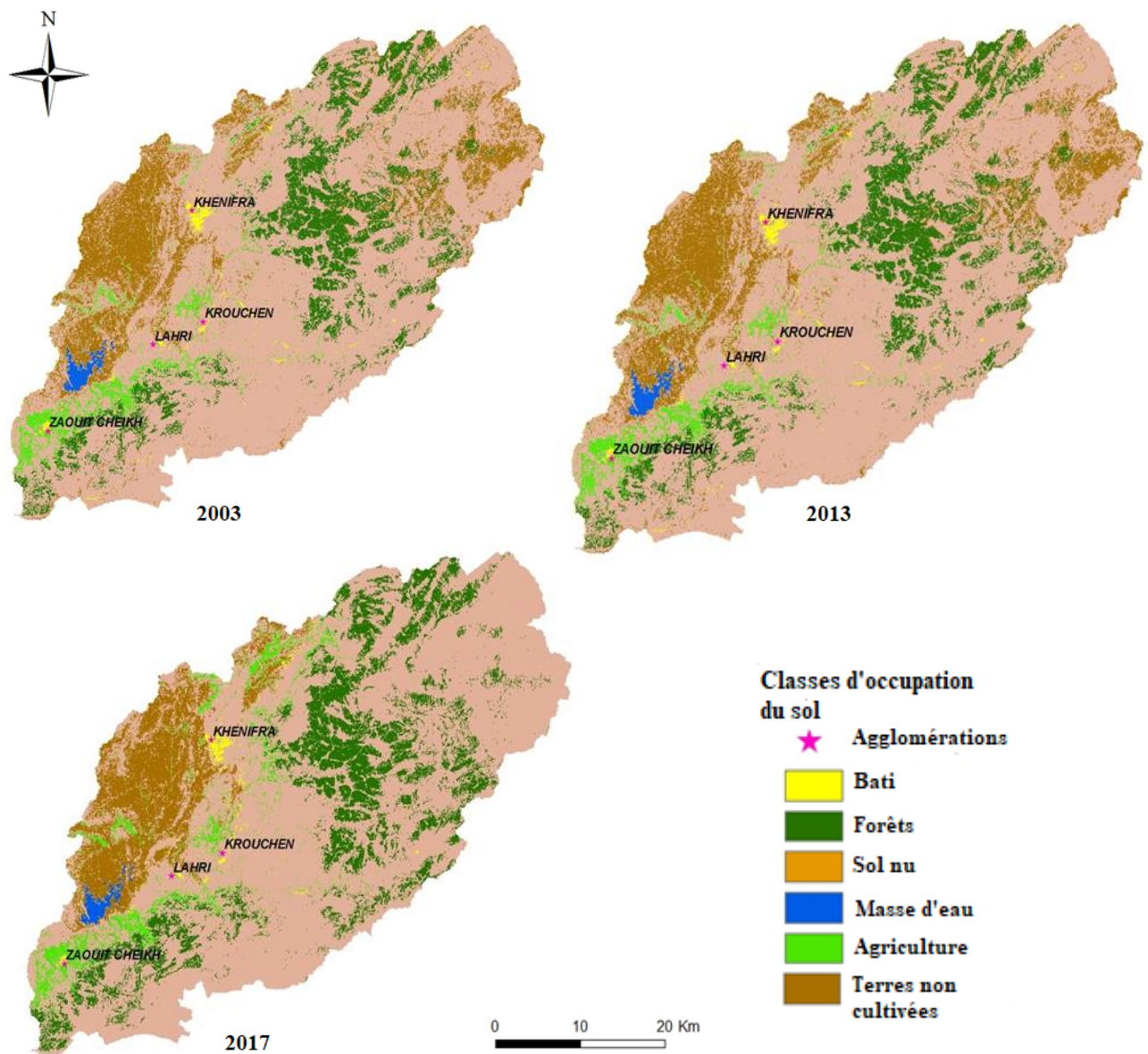


Figure III. 12: Occupation du sol du bassin d'étude pour les trois années 2003, 2013 et 2017

Tableau III. 3 : Matrice de probabilité de transition de la chaîne de Markov des types LULC pour la période 2003-2017

Types d'utilisation du sol	Bâti	Forêt	Terre nue	Plans d'eau	Agriculture	Terres non cultivées
Bâti	<b>0.7460</b>	0.0010	0.5082	0.0000	0.0026	0.0423
Forêt	0.0001	<b>0.9499</b>	0.3352	0.0000	0.0146	0.0001
Terre nue	0.0046	0.0525	<b>0.9060</b>	0.0005	0.0306	0.0058
plans d'eau	0.0000	0.0002	0.0277	<b>0.9716</b>	0.0001	0.0004
Agriculture	0.0004	0.1845	0.5612	0.0001	<b>0.8624</b>	0.0055
Terres non cultivées	0.0074	0.0044	0.5631	0.0032	0.0353	<b>0.8766</b>

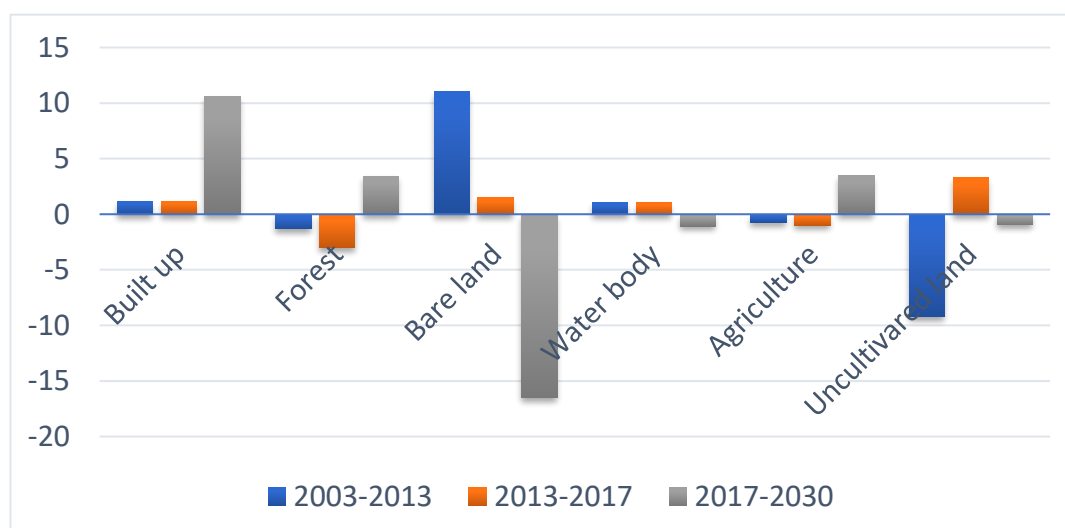


Figure III. 13 : Gain / perte (%) de surface pour chaque LULC entre différentes périodes.

Même si la croissance continue de croître à un taux supérieur à celui des autres catégories LULC, les résultats actuels indiquent que le taux d'expansion observé entre 2003 et 2017 a été le plus élevé de la période sous revue. C'est peut-être parce que cette période a coïncidé avec l'urbanisation de la région générée par l'exode rural dans cette région, où de grandes quantités de terres non cultivées ont été transformées en une zone bâtie. Plus précisément, cette conversion a impliqué des terrains bâtis, forestiers et nus à haute valeur environnementale sur des chantiers de construction à faible valeur environnementale.

Tableau III. 4: Changements de LULC entre 2003-2013 et 2017 dans le haut bassin d'Oum Er Rbia

Occupation des sols	Couverture totale de la zone (km <sup>2</sup> )			Gain / Perte (%) entre différentes périodes	
	2003	2013	2017	2003-2017 (%)	2013-2017 (%)
Bâti	14.70	20.17	26.63	0.32	0.17
Forêt	587.11	540.05	432.53	-4.27	2.97
Eau	14.97	2520.01	2536.73	69.72	0.468
Terrain nu	2120.72	17.23	18.84	-58.11	0.04
Agriculture	173.77	147.62	111.91	-1.71	0.98
Terrain non cultivé	705.66	371.85	490.29	-5.95	3.27

#### I.4. Conclusion

L'analyse de différentes cartes d'occupation du sol montre l'impact très important des activités anthropiques, notamment l'extension des surfaces incultes et les zones bâties et la régression du couvert forestier. Ces résultats obtenus révèlent la nécessité de politiques et de réglementations appropriées, notamment pour limiter les zones urbaines tentaculaires de facteurs de risque défavorables à l'érosion des sols. Ainsi que le Modèle CA-Markov recommandé comme outil approprié pour la poursuite de la recherche sur la nature complexe des zones urbaines et des LULC.

Les changements dans l'utilisation des terres ont un effet marqué sur l'érosion des sols, ce qui renforcerait l'importance de la gestion des terres pour minimiser les effets des changements climatiques sur les ressources en eau des sols.

## **CHAPITRE II**

### **Cartographie et quantification de l'érosion hydrique et lutte contre l'érosion hydrique dans le sous-bassin versant de l'oued Ikkour**

## **II.1.Introduction**

L'érosion des sols est un processus naturel et c'est un phénomène géologique normal associé au cycle hydrologique. Il s'agit d'un processus graduel qui se produit lorsque l'impact de l'eau se détache et élimine les particules de sol provoquant sa détérioration. L'érosion des sols dans les bassins versants et les dépôts ultérieurs dans les rivières, les lacs et les réservoirs sont très préoccupants pour deux raisons. Premièrement, le sol riche et fertile est érodé dans les bassins versants. Deuxièmement, il y a une réduction de la capacité du réservoir ainsi qu'une dégradation de la qualité de l'eau en aval. La perte de sol est le résultat de l'érosion du sol. Cela, à son tour, diminue la fertilité du sol et réduit le rendement des cultures.

Au Maroc, l'érosion constitue la principale cause de dégradation à l'égard du capital sol et à l'environnement faisant partie intégrante de la zone méditerranéenne. Selon le Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification, l'érosion des sols constitue un processus de dégradation des ressources naturelles qui touche, avec des intensités diverses, une grande partie du territoire national.

Le sous-bassin versant d'Ikkour est situé dans le Moyen Atlas (Maroc) est connu pour avoir d'importants problèmes d'érosion des sols. Il fait partie du haut bassin d'Oum Er-Rbia. Cette étude a été réalisée sur le sous-bassin versant d'Ikkour a pour but d'estimer l'érosion des sols quantitativement par l'approche USLE et qualitativement à l'aide des indices spectraux. Les résultats ont fait l'objet dans Geoscience Letters (El Jazouli et al., 2017)

## **II.2.Zone d'étude**

Le sous-bassin d'Ikkour est situé dans le sud-ouest partie marocaine du Moyen Atlas (Figure IV.16) à  $32^{\circ} 2' - 32^{\circ}40'N$  et  $5^{\circ}50' - 5^{\circ}58'O$ , et couvre une superficie de 55 km<sup>2</sup>. Le climat du bassin versant de l'oued Ikkour est de type semi-aride. Les pluies sont fréquemment groupées durant quelques jours par mois. Le nombre de jours de pluie par ans est de 73 à Beni Mellal. Les précipitations sont caractérisées par une répartition irrégulière, elles s'échelonnent irrégulièrement d'Octobre-Novembre à Avril-Mai avec une prédominance en Décembre et elles sont quasi-inexistantes en Juillet et Août. La moyenne Les précipitations annuelles dans le bassin de l'Oum Er Rbia sont de 666 mm. La température varie entre 5 et 50 ° C avec une moyenne valeur de 17,7 ° C.

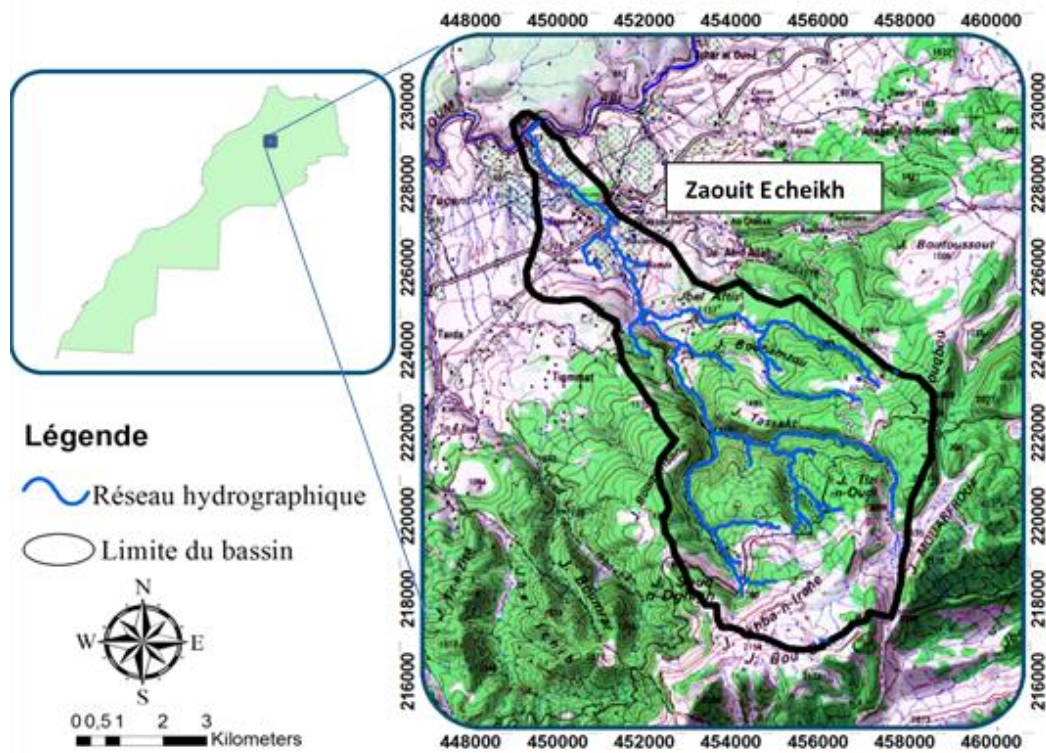


Figure IV. 14: Situation géographique de la zone d'étude

La géologie de la région est dominée par les formations jurassiques. Ces formations sont principalement composées de calcaire, de calcaire dolomitique et de marnes sous-jacentes à des formations généralement permo-triasiques composées d'argiles rouges et de basaltes doléritiques, et recouvertes par endroits de terrasses quaternaires. Les sols et leur évolution dépendent essentiellement de la nature des substrats lithologiques qui, sous l'influence de facteurs environnementaux (climat, végétation, exposition, topographie...) donnent naissance à différents types de sols. Ce site est situé dans des zones montagneuses et est marqué par une grande irrégularité des quantités de précipitations et une régression du couvert végétal due à l'action humaine.

L'Oued Ikkour qui est un affluent de l'Oum Er Rbia. La rivière traverse une distance de 15 km avant d'atteindre la ville de Zaouit Cheikh. Il est caractérisé par une pente raide de  $10^\circ$  en moyenne, une forme allongée et un indice de compacité de 1,25. Le sous-bassin d'Ikkour présente des terrains accidentés avec la plus haute altitude de 2209 m. Il est marqué par une régression de la couverture forestière due au pâturage intensif et la déforestation.

### II.3.Méthodologie

L'équation universelle des pertes de sol (USLE) est considérée comme le meilleur modèle dans le monde utilisé pour l'estimation de l'érosion de surface (par exemple, Zhang et al., 2008

; Alexakis et al., 2013 ; Perović et al., 2013 ; Chatterjee et al., 2014 ; Kourgialas et al., 2016). Sa version révisée, RUSLE (Renard et al., 1997), a été principalement utilisée pour fournir un compagnon de perte de sol (Demirci et Karaburun, 2012 ; Kumar et al., 2014 ; Ganasri et Ramesh, 2015 ; Napoli et al., 2016 ; Rawat et al., 2016). Autres études (Baumgardner et al., 1986 ; Yesou et al., 1993 ; Escadafal et al., 1994 ; Hill et al., 1994 ; Haboudane et al., 2002) ont montré l'intérêt des spectres des indices basés sur la réflectance du sol, tels que l'indice de forme (FI), l'indice de coloration (CI), l'indice de luminosité (BI) et le normal-indice de végétation différencié (NDVI), pour la caractérisation de l'état de surface du sol, en particulier dans les terres arides et semi-arides.

Compte tenu des aspects susmentionnés, cette étude a été menée pour évaluer les taux d'érosion des sols dans la région d'Ikkour, sous-bassin versant situé dans le haut bassin de l'Oum Er Rbia qui subit des effets néfastes à travers l'homme et ses activités (Barakat et al., 2016). Le sous-bassin versant sélectionné est très vulnérable à l'érosion ; il constitue l'une des zones de l'Atlas marocain où la série calcaire Liasique affleure largement avec des reliefs très accentués. En outre, le sous-bassin versant est caractérisé par un climat semi-aride à subhumide marqué par des contraintes spatiales et une variabilité temporelle des précipitations. Ces facteurs naturels associés à l'occupation des sols ont favorisé sa vulnérabilité à l'érosion. À cet égard, il est devenu nécessaire de quantifier et cartographier l'érosion des sols dans le sous-bassin versant d'Ikkour.

Dans cette étude, les modèles USLE et les indices spectraux combinés avec les techniques SIG ont été utilisés pour estimer l'érosion des sols dans le sous-bassin versant d'Ikkour et évaluer la répartition spatiale des zones sujettes à l'érosion des sols. Les résultats obtenus par les deux modèles ont été comparés afin de compléter et valider les résultats obtenus concernant une vaste région, et finalement s'engager mutuellement à identifier et à produire les cartes de susceptibilité à l'érosion.

### **II.3.1 Données utilisées**

La base des données élaborée à cet effet consiste en un ensemble de données géospatiales et géoréférencées qui ont été utilisées pour l'élaboration de la carte des pertes en terre. Pour l'élaboration de la carte des pertes en terre, il y a lieu de collecter un certain nombre de données concernant le facteur climatique, édaphique, topographique ainsi que le facteur du couvert végétal.

Les images satellitaires constituent un outil important dans la cartographie de l'occupation du sol ainsi que dans la planification et la gestion des ressources, elles sont descriptives et apportent une information spatiale et spectrale, beaucoup plus importante par rapport aux autres sources d'information (Pouchin, 2001) permettant la caractérisation des objets dans une large bande spectrale. L'interprétation visuelle ou automatique permet d'identifier des objets et d'extraire de l'information. Dans le sous-bassin étudié afin de déterminer le sol texture et teneur en matière organique. La texture du sol était déterminée par la méthode de la pipette de Robinson, et le sol EC a été déterminé à partir de la suspension préparée par ajouter 50 ml d'eau désionisée à 10 g de sédiment et secouer pendant 30 min. Les paramètres topographiques du sous-bassin les cartes de facteurs thématiques ont été extraites en utilisant le logiciel ArcGIS 10.2.

### **II.3.2 Approche des indices spectraux à l'étude de la dégradation des sols**

L'image OLI a été corrigée des anomalies radiométriques propres au capteur, des effets atmosphériques et des distorsions géométriques et topographiques.

L'analyse statistique multivariée a démontré qu'il est possible de discerner les niveaux de dégradation des sols en utilisant au moins deux catégories de variables : la brillance et la pente entre le visible et le proche infrarouge (Chikhaoui et al., 2006). Cela nous a amené à calculer l'indice de brillance (IB) et l'indice de forme (IF). Ce dernier est fortement corrélé à la pente (Escadafal et al., 1994). Pour mieux étudier la dégradation du sol.

#### **a) Indice de forme**

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons à ces indices spectraux. En effet, les travaux d'Escadafal et al. (1994) ont proposé l'indice de forme (IF) afin d'étudier les sols. Cet indice décrit la forme du spectre de réflectance qui dépend des propriétés physico-chimiques de la cible étudiée. L'utilisation de l'IF leur a ainsi permis de discerner les différents niveaux de dégradation du sol en milieu semi-aride. Toutefois, plusieurs travaux ont démontré l'intérêt de l'intégration des bandes du domaine spectral de l'infrarouge de courtes longueurs d'ondes (SWIR) dans le calcul de l'IF afin d'améliorer la qualité du résultat de l'étude de la dégradation des sols (Chikhaoui, 2005 ; Haboudane et al, 2002).

L'IF permet de décrire la forme du spectre du sol selon la formule suivante :

$$IF = (2 * OI4 - OI3 - OI2)/(OI3 - OI2) \quad \text{Eq.11}$$

### **b) Indice de coloration**

La couleur est un critère important lors de la caractérisation des sols, car elle résulte de sa composition minéralogique et de sa teneur en matière organique (Irons et al., 1989). Cette dernière donne au sol une couleur sombre, alors que les oxydes-hydroxydes de fer lui donnent une couleur rouge, et les carbonates de calcium lui donnent une couleur claire et brillante (Legros, 1996). Ainsi, dans les régions arides, la présence des affleurements des croûtes et des écroûtements gypseux et calcaires provoque une faible coloration des sols (Belghith, 2003). Bien entendu, les processus d'érosion peuvent soit détériorer l'horizon superficiel riche en matière organique, rendant ainsi le sol plus clair et plus brillant, soit détruire complètement le sol et faire affleurer en surface la roche mère, dont la couleur peut être totalement différente de celle du sol intact (Haboudane, 1999). Escadafal et al. (1994) ont développé l'IC qui est un simple rapport normalisé des bandes rouge et bleu. La réflectance dans cette région du spectre est grandement affectée par le phénomène d'absorption causé par l'oxyde de fer (hématite et goethite).

L'IC permet de décrire la forme du spectre du sol selon la formule suivante :

$$IC = (Oli4 - Oli2)/Oli4 \quad \text{Eq.12}$$

### **c) Indice de brillance**

L'indice de brillance est construit à partir des canaux rouges (R) et proches infrarouges (PIR) suivant l'équation 13 :

$$IB = \sqrt{(RxR + PIRxPIR)}. \quad \text{Eq.13}$$

L'indice de brillance représente la moyenne des brillances de l'image. Cet indice est donc sensible à la brillance des sols, reliée à son humidité et à la présence de sels en surface. L'IB permet de dissocier les couvertures végétales des ententes minérales nues, et cela d'autant mieux si les sols sont secs et clairs (sables siliceux, nodules calcaires, croûtes gypseuses, etc.). Cet indice a été fortement corrélé avec la présence d des oxydes de fer dans les dunes sablonneuses dans un milieu semi-aride (Levin et al., 2005).

### **d) Indice de végétation normalisé (NDVI)**

L'indice de végétation par différence normalisé, appelé aussi NDVI est construit à partir des canaux rouges (R) et proches infrarouges (PIR). L'indice de végétation normalisé met en valeur la différence entre la bande visible du rouge et celle du proche infrarouge.

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R) \quad \text{Eq.14}$$

Cet indice est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation.

Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages pour lesquels la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0.

Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7. Les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses.

La figure IV.15 décrit les étapes suivies dans ce chapitre :

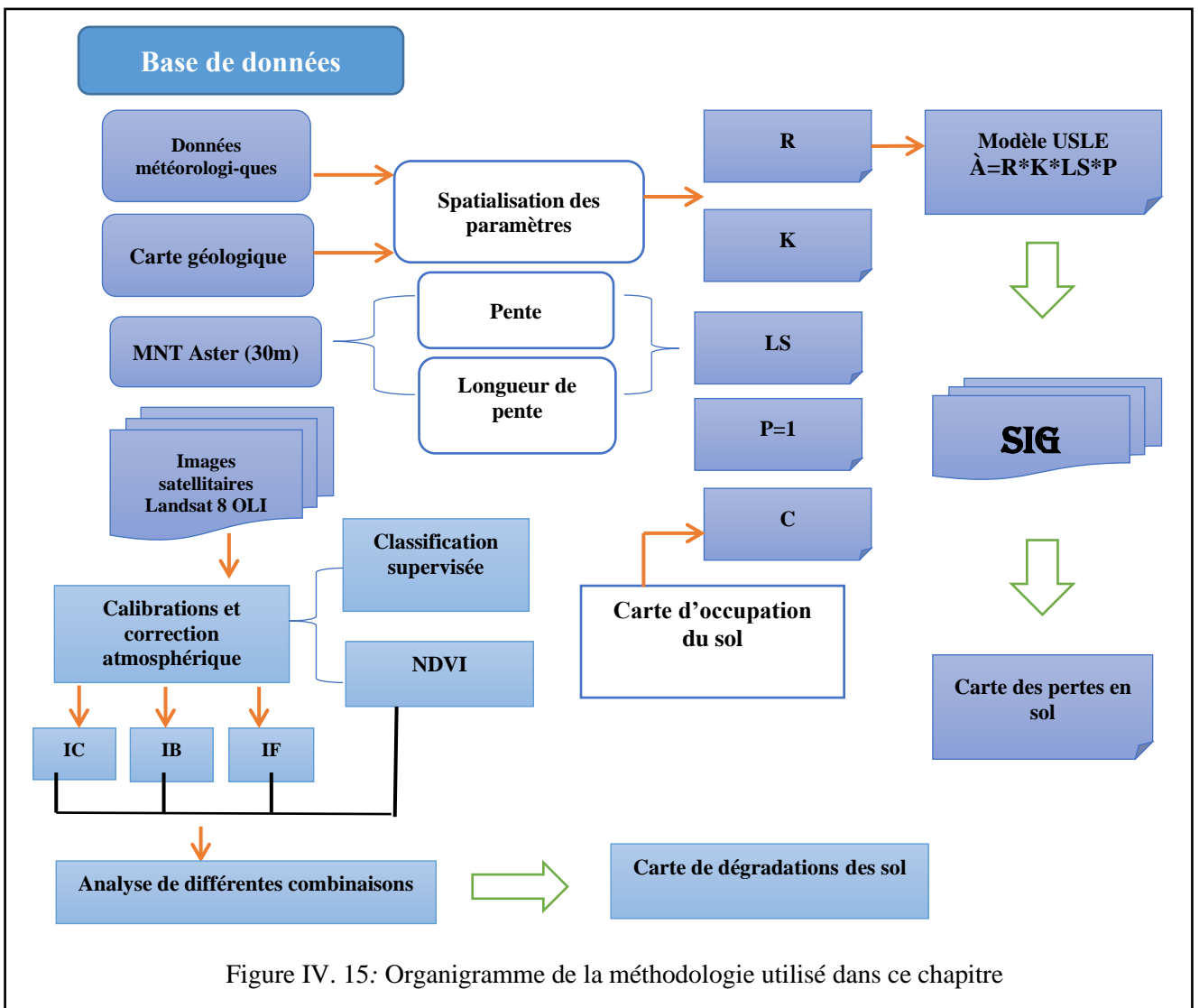


Figure IV. 15: Organigramme de la méthodologie utilisé dans ce chapitre

## II.4. Résultats

L'intégration du modèle de l'Équation Universelle de Perte en sol de Wischmeier et Smith (1978) dans le SIG, a permis de cartographier les différents facteurs du modèle et de disposer d'une base de données qui contient les valeurs brutes de chaque facteur.

### II.4.1. Agressivité des pluies

L'agressivité des pluies correspond à la somme des précipitations moyennes mensuelles sur la somme des précipitations moyennes annuelles sur 20 ans. Il a été calculé pour 5 stations météorologiques réparties dans la région en appliquant l'équation d'Arnoldus. Puis on a interpolé les résultats pour obtenir la carte d'érosivité des pluies présentant des valeurs variantes entre 29 au Nord et 58 au Sud (Figure IV.16a).

### II.4.2. Facteur topographique (LS)

Le traitement du MNT a permis de faire une interpolation des altitudes et de produire la carte des pentes et la carte du facteur LS.

#### ➤ Classes d'altitudes

L'analyse du MNT montre une variation accrue de l'amplitude au niveau du sous-bassin puisque les altitudes varient de 584 m à plus de 2209 m (Tableau IV.5)

Tableau IV. 5 : Répartition des classes d'altitudes du bassin versant Ikkour

Classe des altitudes(m)	Superficie (en Ha)	% de la superficie
584-913	937,41	17
913-1260	876,30	16
1260-1570	1011,94	19
1570-1851	1296,66	23
1851-2209	1336,97	25
Total	5459,30	100

➤ **Pente**

L'analyse du Tableau IV.5 montre que le bassin est dominé par un relief modérément accidenté. Néanmoins, les reliefs puissants représentent près de 20 % de la superficie du bassin avec des degrés de pente atteignant 20° et plus au niveau des zones montagneuses (Figure IV.17a).

➤ **Facteur LS**

Le facteur LS est synthétisé à partir de la combinaison des facteurs de pente et de la longueur de pente. Il varie de 0 à 10,23. Les valeurs les plus élevées s'observent au niveau des cours d'eau, où les pentes sont élevées et la concentration des eaux de ruissellement est maximale. Ces ruissellements génèrent une énergie mécanique croissante qui provoque l'arrachement des particules des sols au fur et à mesure qu'il y a accumulation des eaux et là où les pentes sont de plus en plus sévères. La figure IV.17b présente la répartition spatiale de l'indice topographique LS généré dans le SIG qui met bien en évidence l'ampleur de l'érosion ravinante qui sillonne le sous-bassin de l'oued Ikkour.

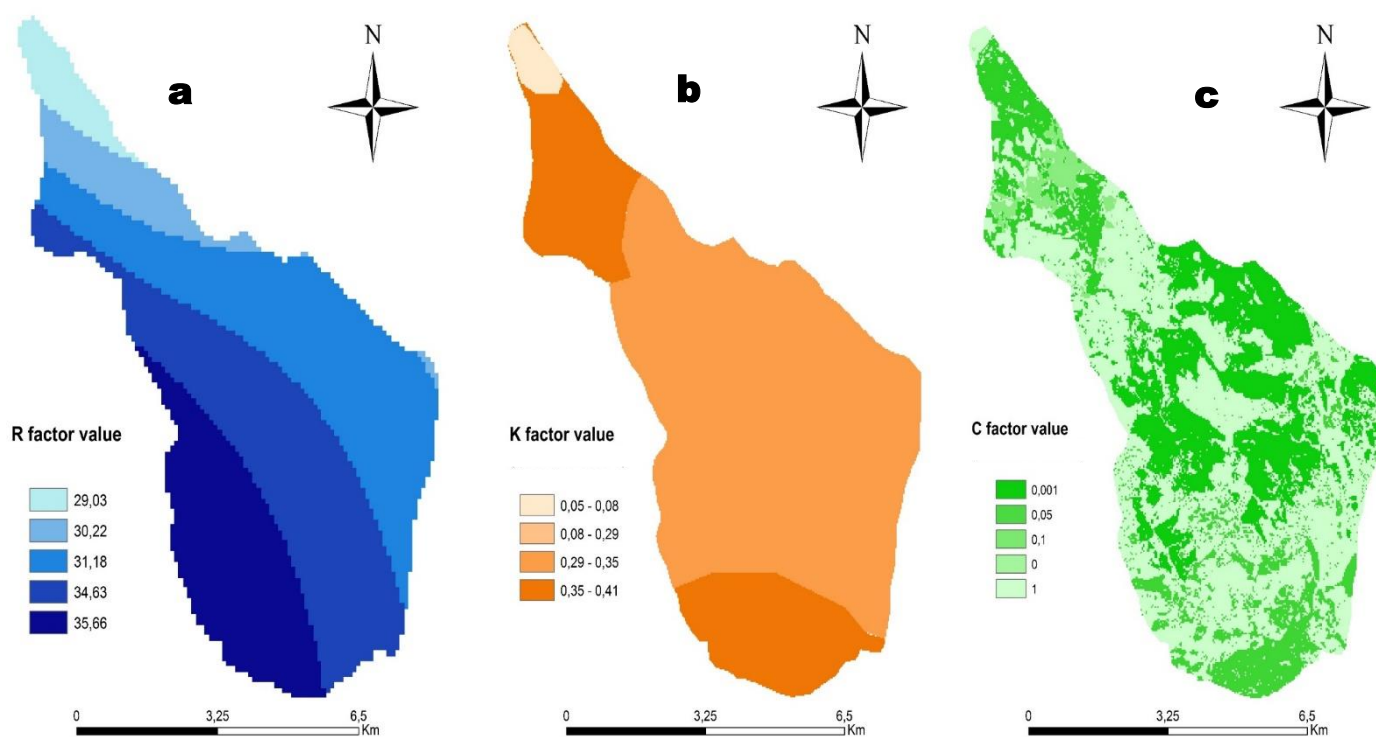


Figure IV. 16: Carte des facteurs de l'érosion du bassin versant Ikkour(a) facteur R, (b) facteur K et (c) facteur C

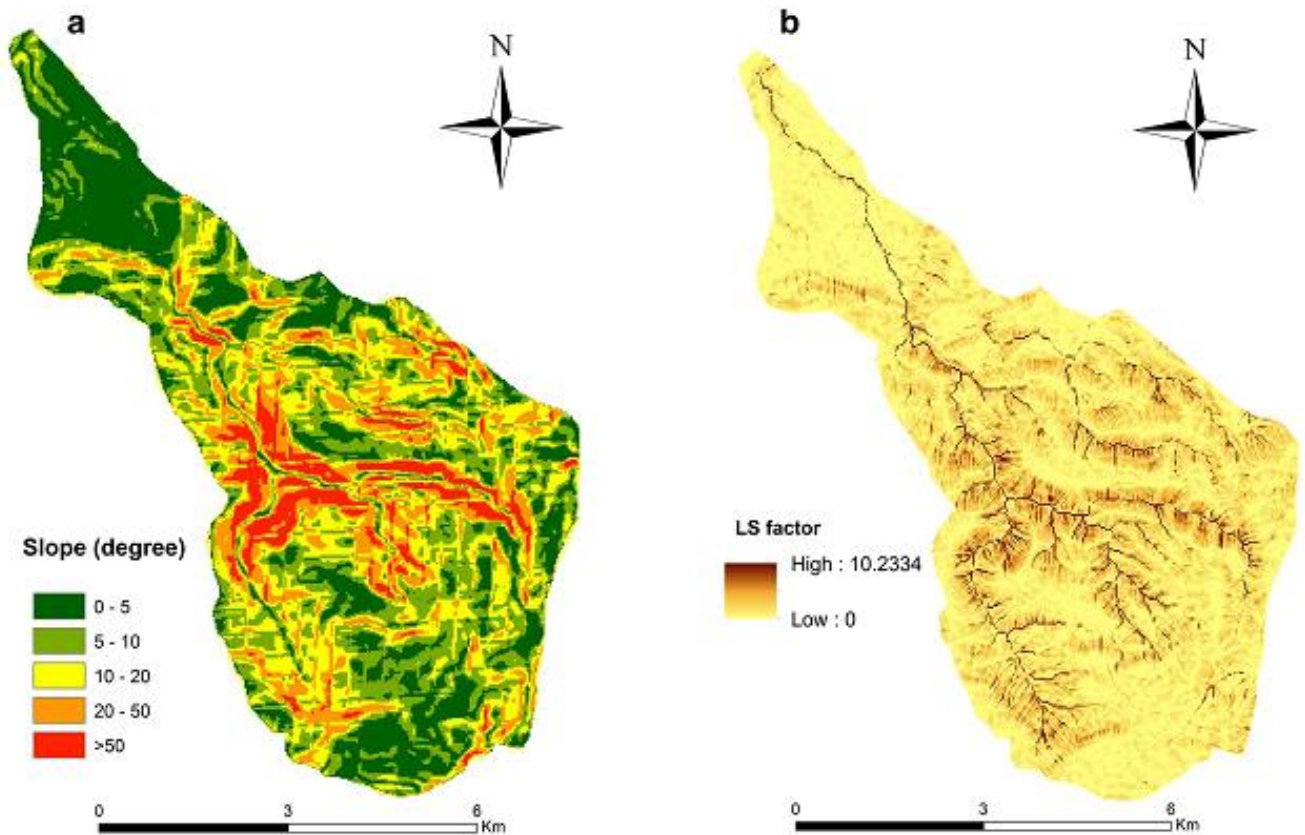


Figure IV. 17: Carte de la pente (a) et du facteur LS (b) du bassin versant Ikkour

Le facteur LS est le facteur essentiel du risque érosif. En région méditerranéenne, les pentes sont liées à la lithologie et au type de sol (Roose et al., 1993) : les roches dures protègent souvent des pentes fortes et des sols résistants tandis que les roches tendres donnent des sols fragiles sur des pentes plus douces ; les pertes en terre peuvent donc être supérieures sur les pentes modérées. Les sols de montagne, souvent superficiels, sont mélangés à divers fragments de roche qui vont augmenter leur résistance à la battance des gouttes de pluie et au cisaillement du ruissellement (Roose et al., 1993).

#### II.4.3. Facteur d'érodabilité des sols

L'évaluation de l'érodabilité d'un sol consiste à apprécier sa prédisposition à s'éroder par le seul fait de ses caractéristiques intrinsèques, tous les autres facteurs de l'érosion étant constants et les techniques culturales étant choisies pour fragiliser le sol au maximum.

La carte du facteur K des sols a permis de visualiser la répartition des sols du bassin versant d'Ikkour selon leur érodabilité. L'analyse de la figure IV.16b permet de déduire que la majorité des sols fortement (0,35 à 0,45) à très fortement érodible (0,45 à 0,5) se situent principalement dans le centre du bassin.

Tableau IV. 6 : Répartition de la surface selon le facteur LS du bassin versant Ikkour

Classe du facteur LS	Superficie en Ha	% de la superficie
0-0,15	3639,68	66,41
0,15-0,49	1471,57	26,85
0,49-1,34	291,75	5,32
1,34-3,17	45,08	0,82
3,17-10,23	9,94	0,18
Total	5480,18	100

La majorité des sols dans cette classe d'érodibilité sont des sols peu évolués sur une roche mère de type marne, marnes armées et peu armé. D'après Pajot (1963), les marnes sont caractérisées par une altération mécanique rapide, résultant d'une hydratation des argiles gonflantes, aboutissant à la formation d'une masse meuble d'argile carbonatée, et vu que leur teneur en calcaire varie généralement entre 15 et 30%, la capacité d'échange est souvent très élevée ce qui implique une stabilité structurale faible.

Les sols classés dans la gamme moyennement érodibles sont surtout des sols peu évolués sur des roches cohérentes (calcaires, dolomies) qui se caractérisent par une faible susceptibilité à l'érosion.

#### **II.4.4. Facteur du couvert végétal**

Le facteur C exprime l'influence du couvert végétal et les techniques culturales dans le modèle. Ce facteur est un simple rapport entre l'érosion sur un sol nu et l'érosion observée sous un système de production. Il reste le plus important des facteurs pour réduire les risques d'érosion. La couverture végétale et les techniques culturales constituent le facteur principal dépendant directement de l'action humaine qui accélère ou réduit l'érosion selon le cas. Son efficacité dans la réduction de l'érosion dépend de la densité des strates arbustives et herbacées ainsi que la densité des racines et l'épaisseur de la litière.

Le facteur C a été déterminé en se basant sur la classification supervisée maximum de vraisemblance de l'image satellitaire Landsat OLI 8 occupant tout le bassin versant.

Les classes obtenues sont validées par Google Earth et l'expertise des gens de terrain, nous avons attribué la valeur 0,7 à la forêt, les valeurs 0,7 au parcours, la valeur de 1 a été attribuée au terrain nu et la valeur 0,001 aux agglomérations, le facteur C relatif aux cultures est de l'ordre de 0,54 pour les arboricultures (Figure IV.16c).

#### **II.4.5. Facteur des pratiques antiérosives P**

En raison de l'insuffisance des informations sur les pratiques antiérosives et sur les caractéristiques des formations superficielles de la région d'étude, Les pratiques agricoles dans la zone d'étude se limitent généralement à l'arboriculture fruitière à base d'olivier associée à des cultures maraichères ou fourragères dans les endroits irrigués. Le travail de préparation du sol ne prend pas généralement (sauf certains cas limités) le caractère antiérosif (culture contre pente, terrassements,). Ainsi, nous avons fixé la valeur du facteur P à 1 sur l'ensemble du bassin versant. Nous avons opté pour cette approche du fait que les pratiques de soutien couvrent des superficies modestes ainsi et que ces travaux n'ont pu être observés sur les images satellitaires Landsat 8-Oli.

#### **II.4.6. Risque érosif**

L'évaluation et la cartographie des différents facteurs de l'érosion (R, K, LS, C, P) et leur superposition à l'aide du SIG, ont permis d'élaborer une carte (figure 27a) des pertes en terre. Chaque pixel de la carte possède une valeur unique d'érosion.

Pour mieux analyser et apprécier les résultats, on a opté pour un regroupement des données par classe de pertes en sol. Ce regroupement a été inspiré des études antérieures (Tahri et Merzouk, 1993, Dahman, 1994).

L'analyse du tableau IV.7 montre que les sols touchés par une forte érosion hydrique couvrent une superficie de 293 d'ha ; soit 6% de la superficie totale de la région d'étude. Quant aux zones à faible érosion, elles occupent 4271ha soit 80%.

Les valeurs faibles du risque érosif occupent la partie Nord et la partie Sud-Ouest du bassin. Les terrains dans ces régions sont quasiment plats (pente inférieure à 10%). Alors que les valeurs fortes se localisent dans la région Ouest du territoire. Le risque érosif est important dans ces régions à cause de la forte inclinaison des terrains mais aussi aux fortes valeurs du facteur R malgré l'existence d'une végétation dans ces régions (facteur protecteur C). La dominance de la classe faible d'érosion peut s'expliquer par le décapage des sols en général et

l'affleurement de la roche mère ce qui conduit à un ruissellement intense (inondations) et voir même les éboulements rocheux.

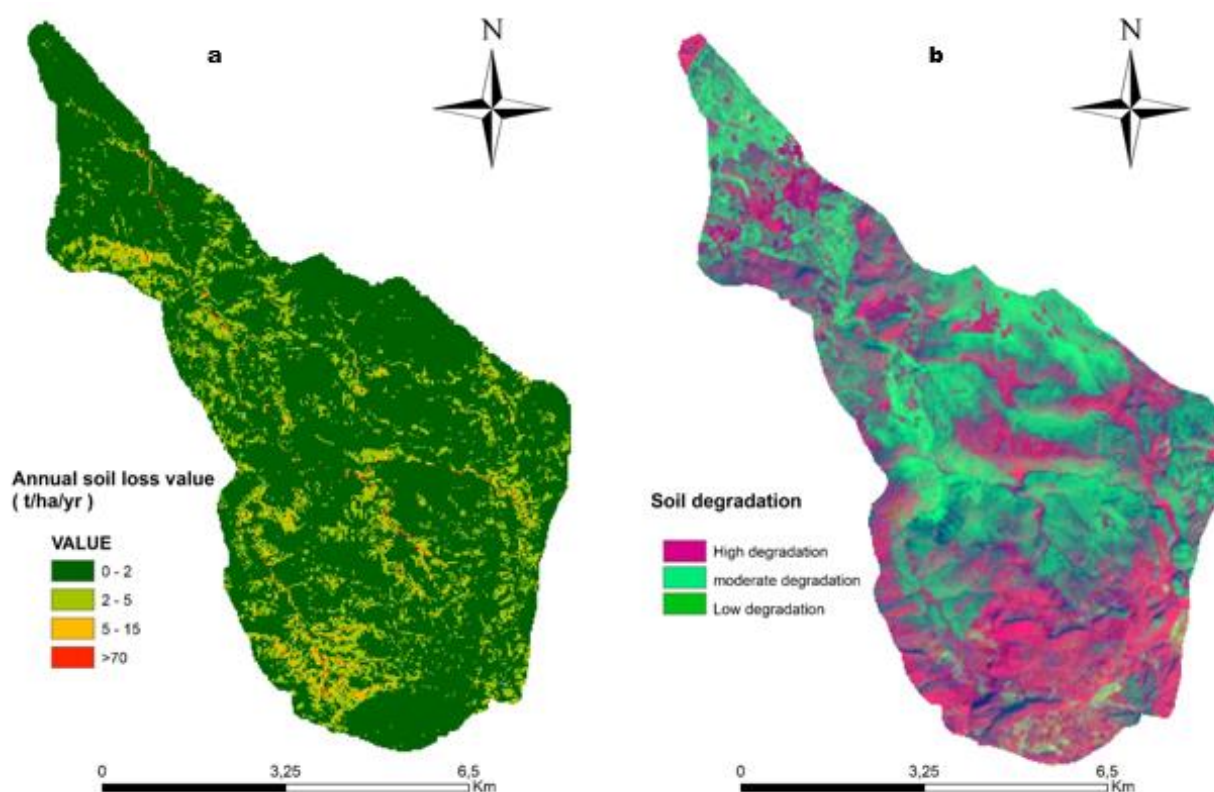


Figure IV. 18: Carte des pertes en sol (a), carte de dégradation des sols obtenue à l'aide l'utilisation conjointe de l'IC, NDVI, et l'IF (b)

Tableau IV. 7: Pertes en sol dans le bassin versant Ikkour

Classes de pertes en sol (T/ha/an)	Intensité de l'érosion	Superficie en ha par classe de perte	% par rapport à la superficie du bassin
0-2	Faible	4271,30	80
2-5	Modérée	787,87	14,65
5-20	Forte	293	6
20-50	Très forte	20,25	0,37
>50	Extrêmement forte	4	0,07

La carte d'érosion réalisée par USLE fournit des informations synthétiques et systématiques sur la nature, l'intensité et la répartition spatiale du phénomène, et permet donc d'identifier les zones les plus affectées et les types d'érosion dominants à long terme. Cette carte quantitative peut être un outil indispensable à la gestion intégrée des sols. Elle peut également servir de guide dans l'établissement d'une réglementation de cultures ou des aménagements anti érosifs pour limiter l'érosion à un niveau acceptable.

#### II.4.7. Indices spectraux

Dans la littérature, plusieurs approches utilisent les indices spectraux pour cartographier

Dégradation des sols	Superficie (en km <sup>2</sup> )	Superficie (en %)
<b>Elevée</b>	18,81	35
<b>Modérée</b>	22,85	42
<b>Faible</b>	12,45	23

la dégradation du sol (Haboddane et al, Maimouni et al, Escadafal et al., 1994). Parmi ces approches nous sommes intéressés notamment à l'utilisation des indices qui sont basés sur la forme de la courbe des réflectances des sols tels que l'indice de forme (IF), l'indice de brillance (IB), l'indice de coloration (IC) et l'indice de végétation NDVI.

Après cette première étape d'analyse qui a mis la lumière sur l'importance des bandes spectrales les plus appropriées pour les calculs de nos indices spectraux, dans une seconde étape nous avons étudié plus de 20 combinaisons de composés colorés dans le système RGB (« red green blue ») du système de traitement d'image en considérant les différents indices (IF, IC, IB, NDVI). Parmi toutes les combinaisons analysées et comparées, seulement une a été retenues à cause de son potentiel caractérisant une meilleure discrimination des sols à différents niveaux de dégradation en particulier et des différentes classes d'occupation du sol en général. Elle considère les trois indices IC (4-2), NDVI (5-3), IF (4-2-3) et elle est illustrée par la figure 26 (b) En effet, Les sols très dégradés sont associés à des faibles valeurs d'IF, alors que les sols faiblement dégradés se distinguent par des fortes valeurs. Le NDVI a démontré son potentiel dans l'étude de la dégradation des sols à travers plusieurs travaux (Bannari et al. 2002). Les sols très dégradés ont un IC relativement élevé, tandis que les sols développés caractérisé par des valeurs faibles de l'IC (Tableau IV.8).

Tableau IV. 8: Classification de la dégradation des sols dans le bassin versant Ikkour

## II.5. Conclusion

Cette étude a été réalisée pour estimer l'érosion des sols dans le bassin versant d'Ikkour à l'aide de deux approches RUSLE/USLE et des indices spectraux moyennant les SIG et la télédétection.

L'approche quantitative du modèle USLE a montré que la perte annuelle moyenne dans le bassin versant est de 0,68 t/ha/an. Cette quantité de perte de sol serait favorisée par les facteurs d'érosion contrôlant le sol pertes, telles que les fortes pentes (près de 40% de la surface totale zone du bassin versant montrait une valeur de pente supérieure à 20%), les terres modérément érodables (57% des terres présentaient un Facteur K entre 0,45 et 0,5) et couvert végétal dégradé.

L'approche par index spectral (CI, NDVI, FI) a permis pour produire la carte de dégradation des sols. Il a montré que les terres fortement dégradées sont situées en amont partie du bassin versant étudié. En revanche, les terres dégradées sont situées dans la partie aval du bassin versant. Ils se caractérisent par leur fertilité et la richesse et sont protégés par l'arboriculture.

L'utilisation combinée des deux approches, quantitativement par USLE et qualitativement par la méthode de l'indice spectral, montre un certain accord vers les sites les plus vulnérables à l'érosion hydrique. Les deux approches complètent les uns aux autres et chacun apporte sa part d'informations : les indices spectraux ont montré différents niveaux de dégradation du sol. Tandis que la méthode USLE fournit une analyse quantitative argument visant à illustrer la sensibilité de l'étude zone contre l'érosion hydrique.

Dans l'ensemble, nous avons suggéré que la combinaison de deux approches, USLE et indices spectraux, pourraient être un outil indispensable pour la gestion intégrée des sols, en particulier avec la perspective d'évaluer et de cartographier le risque d'érosion du sol. Il pourrait également servir d'outil pour aider à mise en place d'une culture et d'une gouvernance efficaces et gestion des pratiques de portage réduisant le taux de l'érosion des sols. Les résultats de cette étude sont très prometteurs et peuvent aider les décideurs à développer des stratégies de gestion des sols contre l'érosion.

## **CHAPITRE III**

### **Cartographie et quantification de l'érosion hydrique : Cas du haut bassin versant d'Oum Er Rbia**

### III.1. Introduction

En vue d'une modélisation cartographique de l'érosion, il est nécessaire de définir ses différents paramètres. Ces derniers représentent les informations qui caractérisent les facteurs de l'érosion. Par exemple, le facteur topographique peut être caractérisé par différents paramètres, dont le degré de pente et sa longueur sont les plus importants. De même pour le facteur climatique, l'énergie cinétique de la pluie est considérée souvent comme étant le paramètre le plus pertinent. Cependant, la rareté des stations climatiques et l'absence de certaines données comme l'intensité de pluie en 30 min nous obligent à chercher un autre paramètre, comme les moyennes mensuelles et annuelles de précipitations.

L'objectif de ce chapitre est dans un premier temps, d'identifier, localiser et caractériser les facteurs favorisant l'érosion hydrique qui peut engendrer des risques aux personnes et aux biens dans le haut bassin d'Oum Er-Rbia. Dans un second temps d'adopter une méthodologie qui permettra d'évaluer qualitativement les niveaux de dégradation des sols par télédétection et quantitativement par le calcul du taux de pertes en sol sur deux échelles sur le micro-bassin de l'oued Ikkour et la totalité de la zone d'étude pour faire ressortir à la fin du travail des documents que les planificateurs et décideurs peuvent s'en servir après dans l'aménagement. Les principaux résultats de ce travail de quantification de l'érosion hydrique dans du haut bassin versant d'Oum Er Rbia a fait l'objet d'un article paru dans Remote Sensing Applications : Society and Environment (El Jazouli et al. 2019b)

### III.2. RUSLE/USLE

Le modèle RUSLE (Renard et al., 1997) est une mise à jour du modèle USLE de Wischmeier et Smith (1978). Ce nouveau modèle estime le taux annuel moyen de perte de sol et établit la répartition spatiale de la carte des risques d'érosion. Il a été reconnu comme le modèle le plus couramment utilisé pour quantifier la perte de sol et guider les plans de conservation du sol pour contrôler l'érosion hydrique (Millward et Mersey, 1999).

Le modèle RUSLE est empirique qui combine les cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique : l'agressivité des précipitations, l'érosion du sol, l'inclinaison et la longueur des pentes, l'utilisation des terres et les pratiques anti-érosifs : Il se présente comme suit :

$$A = R * K * L * S * C * P \quad \text{Eq.15}$$

où:  $A$  est la perte de sol par unité ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ),  $R$  est le facteur d'érosion des précipitations ruissèlement ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ),  $K$  est le facteur d'érodibilité des sols ( $\text{Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ),

LS est une combinaison de l'inclinaison et la longueur de pente (sans dimension), C et le facteur du couvert végétal et P le facteur des pratiques antiérosives.

Les différents facteurs de l'USLE sont tous des rapports de pertes en terre relatifs à l'influence de chaque facteur de telle sorte que le produit de l'ensemble est le taux de perte de terre totale de la zone étudiée. Si l'un des rapports tend vers 0 la perte en terre tend vers 0.

Le modèle de chaque facteur a été mis en évidence dans des conditions pour lesquelles tous les autres facteurs sont égaux à 1 pour que la variation de perte enregistrée soit uniquement liée au seul facteur qu'on fait varier.

### III.3. Résultats

#### III.3.1. Cartographie des différents facteurs du modèle RUSLE : Approche par bassin versant : Le haut bassin d'Oum Er-Rbia

L'intégration du modèle modifié de l'Équation universelle de Perte en sol de Wischmeier et Smith (1978) dans le SIG, a permis de cartographier les différents facteurs du modèle et de disposer d'une base de données qui contient les valeurs brutes de chaque facteur.

##### a) *Agressivité des pluies (R)*

L'agressivité des pluies (R) correspond à la somme des précipitations moyennes mensuelles sur la somme des précipitations moyennes annuelles sur 20 ans. Elle a été calculée pour 7 stations météorologiques réparties dans la région en appliquant l'équation d'Arnoldus. Puis on a interpolé les résultats pour obtenir la carte d'érosivité des pluies présentant des valeurs variantes entre 29 au Nord (Barrage Ahmed EL Hansali) et 58 au Sud (Takbalt).

Le choix de cette formule est justifié sur le manque de données détaillées sur les précipitations de 30 min et par le fait qu'elle est la plus utilisée avec celle de Kalman (1967) au Maroc. Le tableau V.9 donne les valeurs de l'indice d'agressivité des pluies pour chaque station utilisée.

Tableau V. 9: Caractéristiques et valeurs de l'indice d'agressivité des pluies (R)

Station	X	Y	R
Ansar Oufounas	512800	204800	364,9
Arhbalou n Ikhwane	506000	259800	805,2
Azrou n'Ait Lahcen	484000	233500	569,4
Beni Khilil	474200	240700	575,3
Chacha n Amellah	467500	243200	448,2
El Heri	478500	251200	619,9
Khénifra	474800	259700	537

Kerrouchen	508500	246000	554,9
Ouiouane	504500	281500	765,4
Sanwal	517000	263000	549,6
Tabouazant	531100	217400	335
Taghat	476200	266900	543,5
Taghzout	461850	235350	483,9

### ➤ Normalité de la distribution du facteur R

En statistique classique, les méthodes reposent souvent sur un postulat de normalité des erreurs du modèle. En krigeage, c'est différent. Des hypothèses sont émises seulement sur les moments de la distribution de  $z(u)$  par l'intermédiaire de  $\delta(u)$  et non sur la loi de la distribution. L'utilisateur du krigeage peut donc croire que la performance de la méthode est indépendante de la loi de distribution des données. Malheureusement, ce n'est pas le cas. Le krigeage a tendance à fournir de meilleures prévisions lorsque les données suivent une loi normale. Donc avant de passer à la mise en œuvre du krigeage, il est très intéressant de s'attarder sur cet aspect.

### ➤ Krigeage

Après avoir étudié la normalité de la distribution des données, l'interpolation spatiale par le krigeage a permis de produire la carte d'érosivité des pluies (Figure V.21). Nous avons constaté que les valeurs élevées de R se présentent dans les zones sud-ouest du bassin avec un maximum de 58 et un minimum de 29 dans la partie nord du bassin. Ceci nous conduit à dire qu'il n'y a pas vraiment une grande variabilité du facteur R à l'échelle du bassin. Toutefois en terme absolu et selon la grille de classement des risques d'agressivité climatique établie par Manrique en 1988, on constate que le bassin versant étudié présente un risque érosif très faible.

#### b) *Facteur d'érodibilité des sols (K)*

L'érodibilité d'un sol traduit sa résistance inhérente au détachement de particules (dégradation) et à leur transport par l'eau des précipitations (érosion). Elle est déterminée par la force de cohésion entre les particules de sol et peut varier selon la présence ou non d'un couvert végétal, de la teneur en eau du sol et du développement de sa structure. L'évaluation de l'érodibilité d'un sol consiste à apprécier sa prédisposition à s'éroder par le seul fait de ses caractéristiques intrinsèques, tous les autres facteurs de l'érosion étant constants et les techniques culturales étant choisies pour fragiliser le sol au maximum.

Le facteur d'érodabilité du sol K est la réponse moyenne du sol et du profil pédologique à la capacité érosive des pluies (Heusch, 1971). Autrement dit, c'est également la facilité avec

laquelle un sol se détache sous l'énergie des gouttes des pluies ou du ruissèlement. Ce facteur est pris en considération puisque les sols ne s'érodent pas de la même façon dans les conditions standards, telles que définies par Wischmeier et Smith (1978).

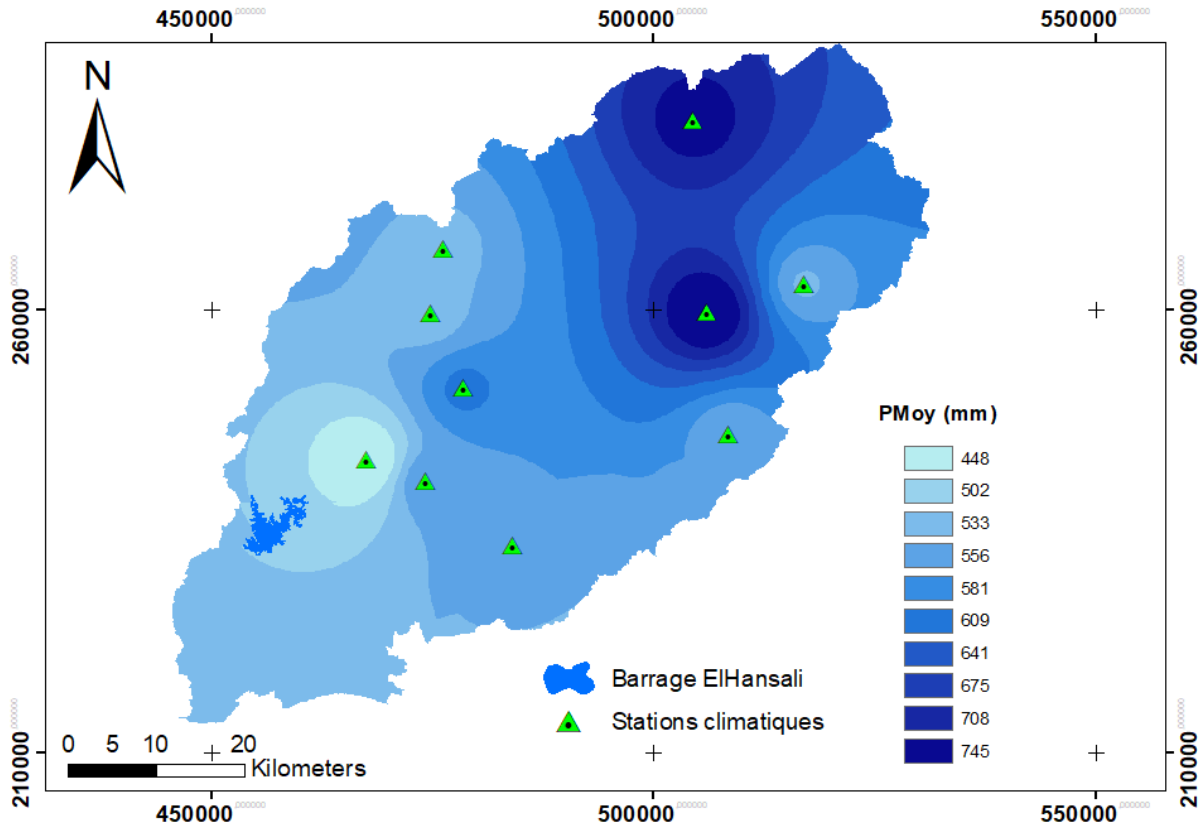


Figure V. 19: Carte de l'érosivité des pluies du haut bassin versant d'Oum Er Rbia

Le facteur d'érodibilité du sol K a été calculé pour les conditions marocaines par Merzouk en utilisant une équation à trois paramètres (Eq.16) :

$$K = 311.63 - 4.48 * (SG\% + S\%) + 613.4 * EC + 6.45 \quad \text{Eq.16}$$

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

La carte du facteur d'érodibilité des sols (Figure V.25) a été élaborée sur la base d'une rasterisation de la carte des unités homogènes en fonction des valeurs de k calculées.

Pour déterminer les valeurs du facteur K, on a eu recours aux résultats des analyses granulométriques, de la matière organique et de la conductivité électrique, qui ont été effectuées sur une quarantaine d'échantillons. Les sites d'échantillonnage et d'observation ont été choisis sur la base de la carte des unités homogènes, élaborée à partir de la superposition de la carte géologique, la carte du couvert végétal et la carte physiographique.

## (1) Caractéristiques physico-chimiques

### (a) Analyses au laboratoire

Les échantillons des sols ont été recueillis sur le haut bassin d'Oum Er Rbia en plusieurs campagnes de mesures et d'échantillonnage. Après ils ont été traités au Laboratoire de sédimentologie, Département de sciences de la terre au sein de l'université Sultan Moulay Slimane. Les principaux traitements effectués sont la granulométrie et les analyses des paramètres chimiques des sols.



Figure V. 20 : Prélèvement des échantillons des sols au niveau du bassin

L'étude de laboratoire est une étude déterminatrice de l'ensemble des caractéristiques des sols et qui permet une comparaison réelle entre les types des sols.

### (b) Préparation des échantillons

Les échantillons du sol ont subi les prétraitements suivants à savoir : Le séchage à l'air libre, et un tamisage à travers un tamis de 2 mm afin de constituer un échantillon de terre fine.

#### ➤ pH

Le pH est l'abréviation du potentiel hydrogène qui est un paramètre servant à définir si un milieu est acide ou basique. Le pH de chaque échantillon a été déterminé en utilisant de l'eau distillée. La valeur du pH détermine les comportements physiques (stabilité de la structure, résistance à la battance...), chimiques (fonctionnement de la CEC, assimilabilité du phosphore, biodisponibilité des oligo-éléments et microéléments...) et biologiques (humification et minéralisation des matières organiques) du sol.

Tableau V. 10 Le statut acido-basique des sols selon le projet PNUD FAO

Échelle	0	2	3	4	5	6	
pH	4 5,5	4,5	5		6	6,5 7	7,5 8 8,5
Degré	Très acide	Acide	Peu acide		Neutre	Peu alcalin	Alcalin

Cette valeur du pH est soumise à des variations saisonnières. Elle varie avec l'état hydrique du sol, la température, la présence ou non d'une culture en période de croissance active soit avec les saisons. Ainsi le pH a tendance à baisser en saison sèche (acidité) et à augmenter en hivernage (basicité).

Ces variations qui peuvent atteindre et parfois dépasser un (01) point de pH s'expliquent notamment par :

La production d'acides organiques en période de forte activité biologique, favorisée par la chaleur et l'humidité du sol ; la dilution des ions H<sup>+</sup> sous l'effet des pluies plus intenses de l'hivernage.

#### ➤ **Texture**

La texture indique l'abondance relative dans le sol, de particules de dimensions variées (sable, limon ou argile), et de la texture dépendent la facilité avec laquelle le sol pourra être travaillé, la quantité d'eau et d'air qu'il retient, et la vitesse à laquelle l'eau peut entrer et circuler dans le sol (FAO, 1990). La texture d'un sol influence toutes ses autres propriétés physiques, y compris le drainage, la capacité de rétention, sa température, l'aération et la structure.

L'étude de la texture des sols consiste en une analyse granulométrique : analyse consistant à classer les éléments du sol d'après leur grosseur et à déterminer le pourcentage de chaque fraction.

La distribution granulométrique est un des plus importants paramètres physiques d'un sol. La division du sol (classification) est en premier lieu basée sur la distribution granulométrique. Quand on détermine précisément la taille des particules dans les échantillons, en plus de la détermination avec tamis, d'autres méthodes devront être appliquées. Une méthode simple pour la détermination de la taille des particules est la méthode "Robinson".

Les résultats de l'analyse granulométrique révèlent des pourcentages de sable qui sont supérieurs à 70%). D'après le triangle de texture (FAO) qui permet de déterminer la classe

texturale des sols, la zone d'étude présente des sols essentiellement argileux marneux (figure 24).

➤ **La matière organique et carbone organique**

La matière organique joue un rôle fondamental pour le maintien de sols vivants à long terme. Un taux de matière organique élevé favorise le développement des microorganismes et de la faune des sols. Ce sont ces mêmes microorganismes qui mettent ensuite les éléments minéraux à disposition des plantes grâce à la minéralisation de cette matière organique. Les caractéristiques des matières organiques et leur contenu dans les sols doivent donc être considérés comme des critères indispensables au diagnostic en matière de fertilité.

La matière organique est constituée de 58% de carbone ; sa détermination permet d'estimer la teneur du sol en matière organique.

La teneur en matière organique est estimée comme suit :

$$\%M = 1.724 \times \%C \quad \text{Eq.17}$$



Figure V. 21: Protocole granulométrique par pipette de Rhobinson

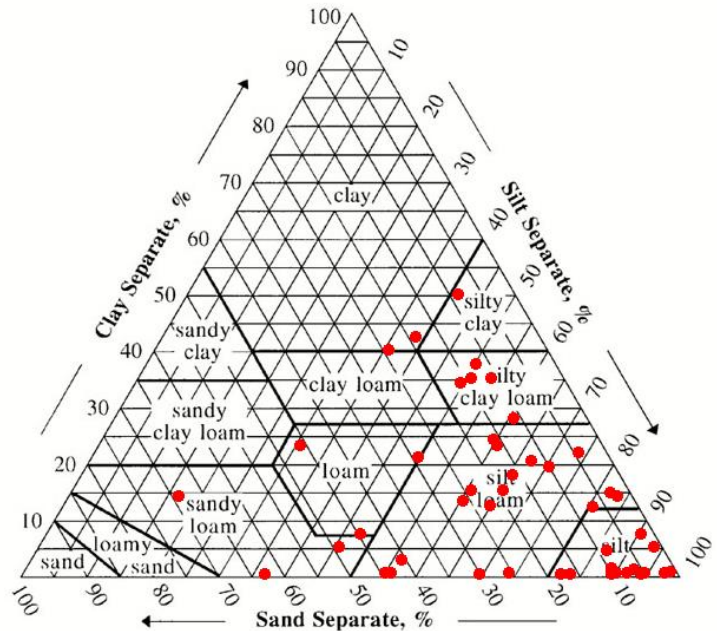


Figure V. 22: Diagramme de texture des échantillons de la zone d'étude

### ➤ La conductivité électrique

La salinité du sol fait référence à la présence de sels solubles dans la zone racinaire. Il est considéré comme le plus risqué sur le plan écologique et constitue un obstacle à la productivité agricole, en particulier dans les zones arides et semi-arides (FAO 2011). Elle présente le facteur principal de la dégradation du sol.

Dans cette étude, la mesure de la conductivité électrique a été effectuée conformément à IS : 14767-2000 en utilisant un EC-Meter (analyseur d'eau Systronic 371). La conductivité électrique (CE) est directement proportionnelle à la teneur en sels d'un sol. Elle est exprimée en déci Siemens par mètre (dS/m) ou en millimes par centimètre (ms/cm).

Les résultats ont montré que le sol est caractérisé par une salinité moyenne à faible, comprise entre 0,03 et 0,89 dS/m. Les valeurs du facteur K varient entre 0,43 et 0,82. Les valeurs minimales se localisent à l'Est du bassin, plus précisément sur les bords des affluents principaux de l'oued, ce qui correspond aux dépôts des terrasses fluviales généralement très friables. Les valeurs moyennes correspondent essentiellement à des formations détritiques ou des grès alors que les valeurs les plus élevées correspondent à des formations de type flysch, ce qui est normal pour donner suite à la grande friabilité de ce type de roches à cause de sa composition en alternances pélitico gréseuses.

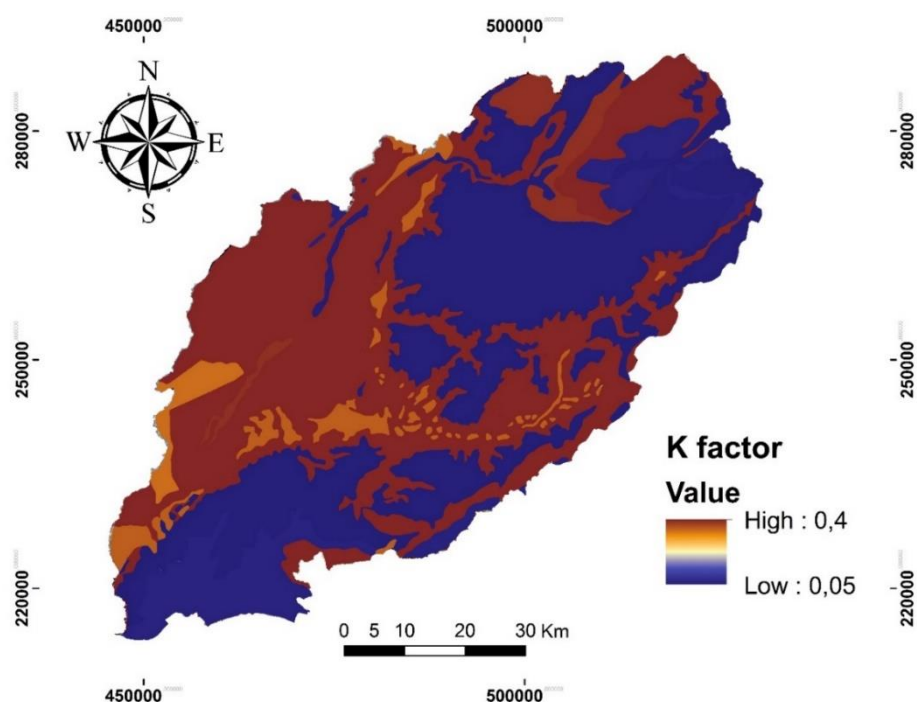


Figure V. 23: Carte d'érodabilité des sols du haut bassin versant d'Oum Er Rbia

### c) *Facteur topographique (LS)*

Le facteur topographique, dans la formule empirique de Wischmeier et Smith (1978) implique les effets combinés de l'inclinaison de la pente (S), de sa longueur (L) et de la forme des versants sur le taux d'érosion. Il se calcule par l'équation suivante :

$$LS = (L/22.15) m * (65.41 * \sin^2(S) + 4.56 * \sin(S) + 0.065)m \quad \text{Eq.18}$$

Le critère de pente est utilisé pour mettre en évidence la capacité d'un ruissèlement à détacher et transporter des particules de sol :

Nous avons observé que les valeurs du facteur LS les plus élevées (>100) dans le bassin versant de l'étude ont été rencontrées près du réseau hydraulique dont les berges présentaient un changement brutal de pente, tandis que le reste de la zone présentant une pente douce et principalement des prairies demeurait très faible (0,00).

D'après Zingg (1940) (cité par El Bouqdaoui, 2007) l'érosion augmentait de façon exponentielle avec le degré de pente et que l'exposant moyen approchait la valeur de 1,4. Il avait également conclu que les pertes en sol étaient fonction de la longueur de la pente.

De même, Ibrahim (2005) rapporte que lorsque l'inclinaison de la pente augmente, l'énergie cinétique des pluies reste constante, mais le transport s'accélère vers le bas à cause d'une augmentation de l'énergie cinétique du ruissèlement.

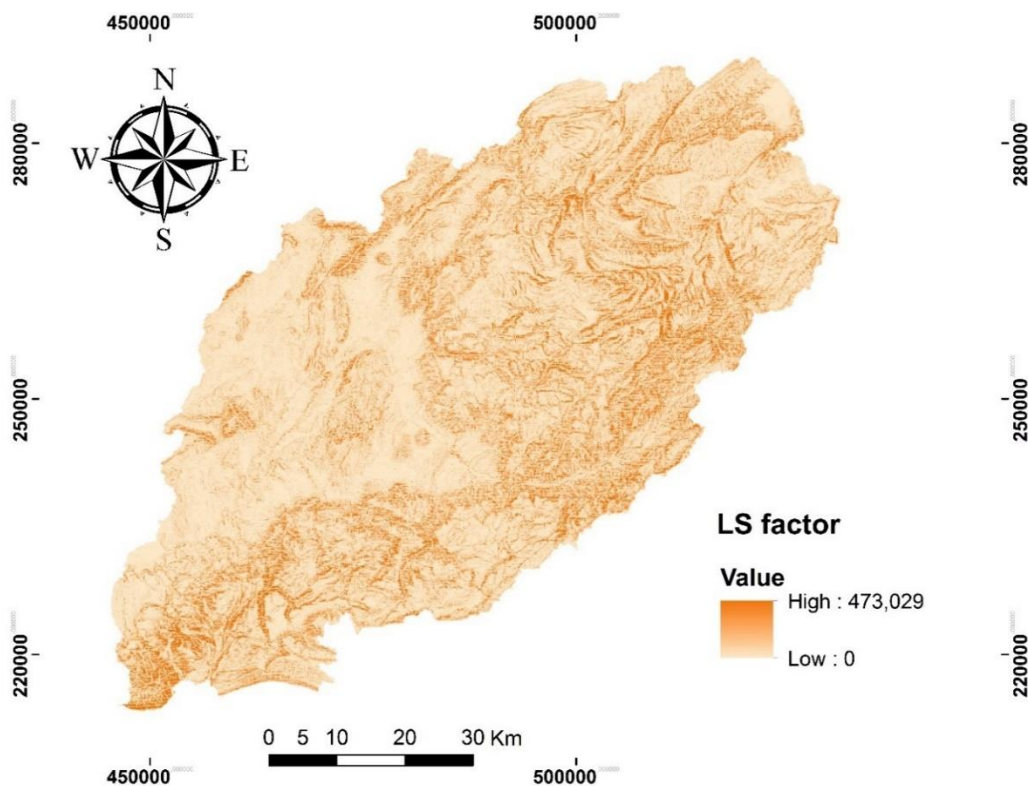


Figure V. 24: Carte du facteur topographique LS

#### d) *Facteur d'occupation du sol (C)*

Le facteur C exprime l'influence du couvert végétal et les techniques culturales dans le modèle. Ce facteur est un simple rapport entre l'érosion sur un sol nu et l'érosion observée sous un système de production. Il reste le plus important des facteurs pour réduire les risques d'érosion. La couverture végétale et les techniques culturales constituent le facteur principal dépendant directement de l'action humaine qui accélère ou réduit l'érosion selon le cas. Son efficacité dans la réduction de l'érosion dépend de la densité des strates arbustives et herbacées ainsi que la densité des racines et l'épaisseur de la litière.

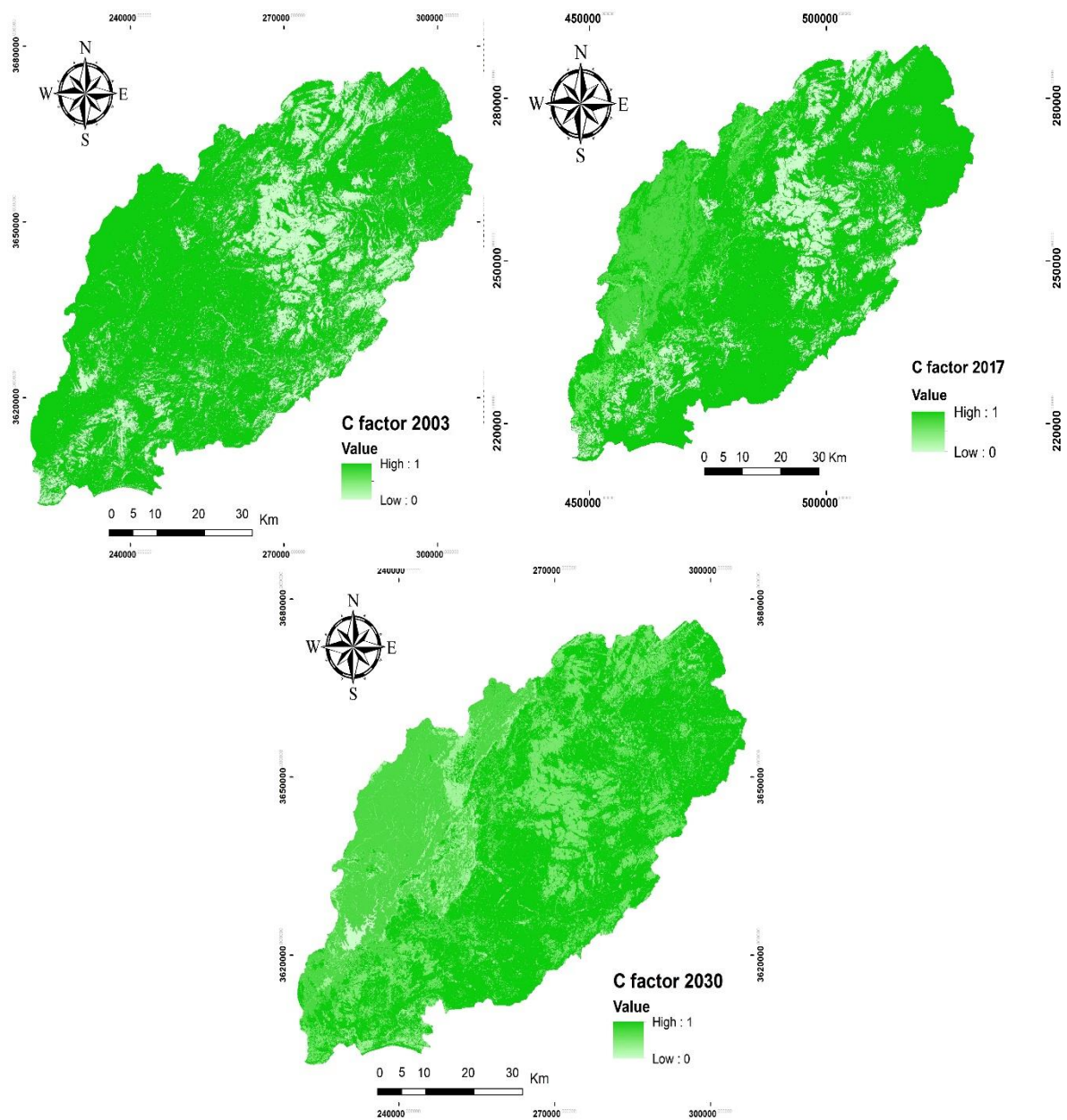


Figure V. 25: Carte du facteur C des trois années 2003, 2017 et 2030

Le facteur C a été déterminé en se basant sur la classification supervisée maximum de vraisemblance de des trois images satellitaire Landsat ETM+, Landsat 8 OLI et Sentinel S2A occupant tout le bassin versant. Les classes obtenues sont validées par Google Earth et les compagnes de terrain, nous avons attribué la valeur 0,003 au bâti, 0,75 aux terres non cultivées, 0,004 à la forêt, 0.4 pour les agricultures et 1 a été attribuée au terrain nu (FigureV.27).

e) *Pratiques anti-érosives (P)*

L'efficacité des interventions de conservation de sol se manifeste dans l'établissement des cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage. Par conséquent, l'indice de pratique antiérosive du sol exprime les pertes en terre d'un terrain sur lequel les aménagements de lutte contre l'érosion sont bien déterminés, par rapport à celles d'un terrain cultivé en pente (dont l'inclinaison de la pente est très forte).

f) *Estimation du taux d'érosion*

L'évaluation et la cartographie des différents facteurs de l'érosion (R, K, LS, C, P) et leur superposition à l'aide du SIG, ont permis d'élaborer une carte (Figure V.28) des pertes en terre. Chaque pixel de la carte possède une valeur unique d'érosion.

Les valeurs faibles du risque érosif occupent la partie Nord et la partie Sud-Ouest du bassin. Les terrains dans ces régions sont quasiment plats (pente inférieure à 10%). Alors que les valeurs fortes se localisent dans la région Ouest du territoire. Le risque érosif est important dans ces régions à cause de la forte inclinaison des terrains, mais aussi aux fortes valeurs du facteur R malgré l'existence d'une végétation dans ces régions (facteur protecteur C). La dominance de la classe faible d'érosion peut s'expliquer par le décapage des sols en général et l'affleurement de la roche mère ce qui conduit à un ruissèlement intense (inondations) et voir même les éboulements rocheux.

La distribution inégale du phénomène d'érosion hydrique dans le bassin versant résulte de l'impact variable dans l'espace des divers facteurs et processus d'érosion.

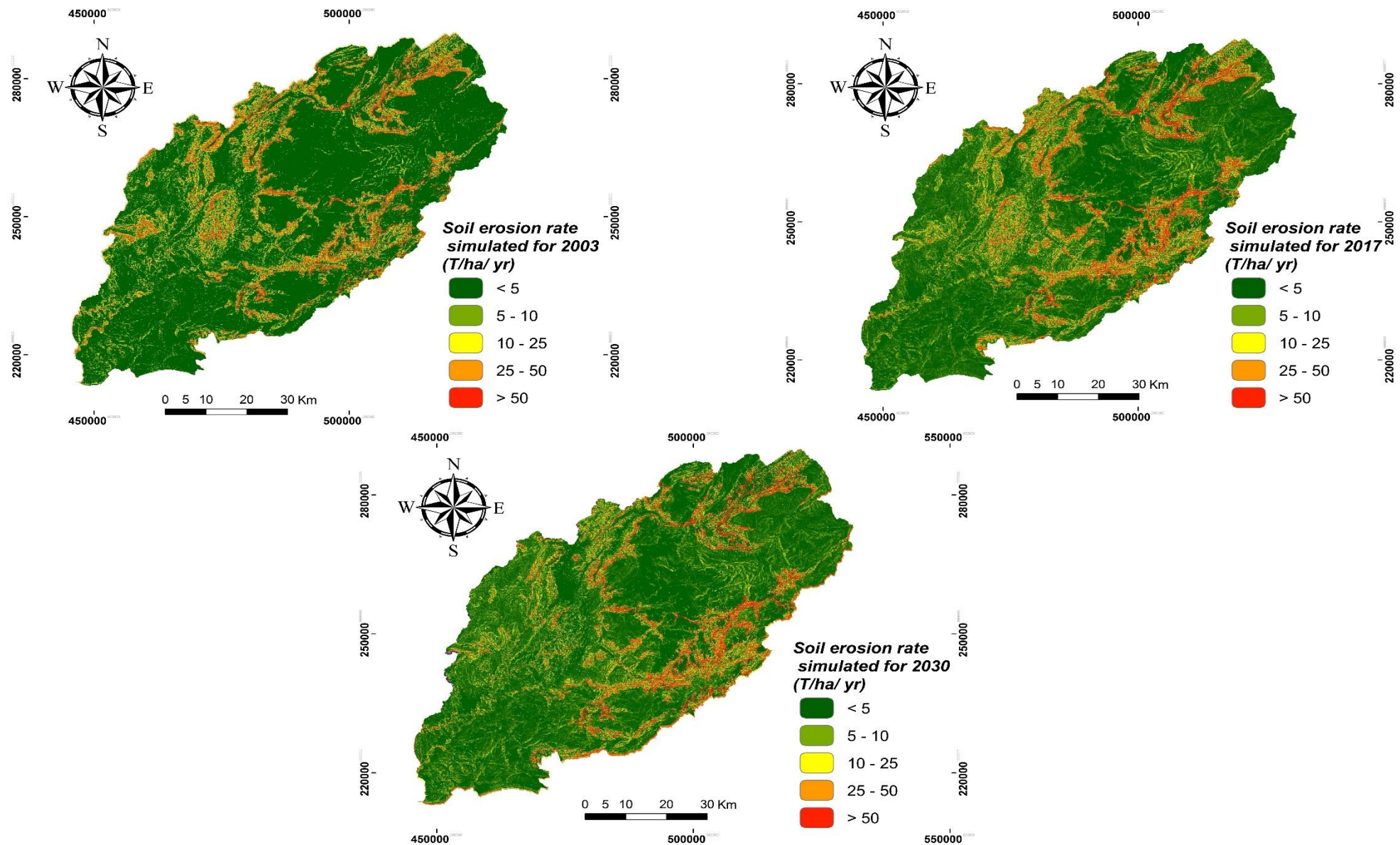


Figure V. 26: Carte de pertes en sol pour les années de 2003, 2017 et 2030

### II.3.2. Impacts du changement de la couverture végétale sur l'érosion des sols

Pour estimer les taux d'érosion du sol, les couches à cinq facteurs produits ont été transformées en une grille avec des cellules de 30×30 m dans un système de coordonnées uniforme. Les valeurs du facteur R de chaque station climatique ont été calculées. Ensuite, la carte du facteur R de la zone d'étude a été interpolée à l'aide d'une interpolation de Krigeage dans un système d'information géographique (Figure V.21). Les valeurs de R ont diminué de 272 MJ mm ha<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> au nord-ouest à 179 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> au sud-est, en fonction des caractéristiques des précipitations. La carte des valeurs de facteur K produites pour montrer la distribution spatiale de l'érodibilité du sol (Figure V.25) indique que les valeurs de facteur K vont de 0,32 à 0,44 t ha h ha<sup>-1</sup> MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>. À cette époque, un DEM avec une résolution spatiale de 30 m était utilisé pour générer une carte des facteurs L et S. La carte obtenue a montré que les valeurs de LS variaient de 0 à 473,03 (Figure V.26).

Le facteur C à trois périodes, 2003, 2013, 2017 et 2030, illustré à la (Figure. V.27), a été obtenu à partir de la valeur LULC et l'attribution des valeurs de C issues d'études antérieures. Les quantités maximales de C étaient pour la masse d'eau et la valeur minimale de C représentait la forêt pour les quatre dates. On a supposé que les valeurs du facteur P étaient de 1 pour le bassin versant, car seul un endroit totalement petit utilisait des pratiques de conservation.

Ensuite, les valeurs annuelles de perte de sol ont été classées en cinq classes de vulnérabilité à l'érosion, comme indiqué sur la figure 15. Les résultats montrent qu'il y a eu un changement de zone dans chaque catégorie de vulnérabilité à l'érosion de 2003 à 2013, 2017 et 2030. En 2003, 84% de la zone d'étude était classée comme une érosion faiblement vulnérable avec un taux d'érosion annuel. <58 t ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>. Considérant qu'en 2013, 2017 et 2030, la zone couverte par les zones de faible érosion 69 %. Les valeurs les plus élevées se rencontrent dans les zones de sol nu le long des rivières, des routes et des glissements de terrain.

Comme le montre la figure V.28, le taux moyen de perte de sol est de 142 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, 55% de la superficie du bassin étant érodée de 40 à 400 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> principalement dans les zones à forte pente et érodabilité élevées avec faible couvert végétal, ce qui reflète l'importance de ce phénomène dans le bassin étudié. L'évaluation qualitative de l'érosion dans le Haut- Oum Er Le bassin de Rbia a confirmé la prédominance du terrain accidenté, constitué de pentes abruptes à très abruptes de 43% de la surface du bassin. De plus, la lithologie est assez molle sur les pentes avec la prédominance de roches sédimentaires ou de sols faiblement ou moyennement compactés (ardoise, schiste, marnes, etc.) (Figure V.25). La zone soumise à une

érosion modérée est vulnérable, passant de 9,25% en 2003 à 18,36 en 2013-2017 et à 30,78% en 2030. La zone soumise à une forte érosion a enregistré une augmentation de 10 fois entre 2003 et 2017. En 2003, la zone vulnérable à l'érosion couvrait 6,59% de la zone d'étude. La perte de sol annuelle moyenne pour l'ensemble du bassin versant a été estimée à  $58 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . Ces dernières années, l'exploitation forestière illégale et la conversion sans restriction de la couverture végétale sans tenir compte des incidences sur l'environnement ont provoqué une érosion extrême du haut bassin d'Oum Er Rbia. Sur la base des résultats de cette étude, on peut conclure que la fourniture d'une végétation adéquate et le reboisement dans le bassin hydrographique réduiront considérablement l'érosion des sols. À titre comparatif, des études menées à l'échelle du Rif ont révélé des taux d'érosion plus élevés, par exemple  $65 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  a été estimé dans le bassin de Nakhla, Tribak et al. 2012),  $61 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  au niveau du bassin versant de l'oued Telata dans l'est de Prérif (Poesen J et al.1994),  $55,35 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  au niveau Wadi Boussouab (Sadiki et al.2004). Les résultats de la présente étude ont révélé que toute diminution de la couverture végétale aura une conséquence directe sur le taux d'érosion du sol. De plus, les résultats ont montré que la déforestation et la conversion en les zones bâties sont les facteurs les plus importants de l'érosion induite par changement d'utilisation des terres, montrant la plus forte corrélation entre les facteurs d'érosion et en confirmant les études précédentes qui montrent que le changement climatique va contribuer aux changements d'utilisation des terres et à l'intensification de l'agriculture (Zare et al., 2001). En attendant, selon Panagos et al. 2015, le facteur C et les taux de perte de sol associé peuvent potentiellement être influencés par les changements d'occupation des sols, en particulier déforestation. Ainsi, ce dernier pourrait être est le seul facteur de risque d'érosion des sols qui puisse être modifié par la politique à des couts raisonnables et réduire les pertes de sol futures dues à l'érosion hydrique.



Figure V. 27 : Exemples de type d'érosion dans haut bassin versant d'Oum Er Rbia

### III.3.3. Validation des résultats

Une validation rigoureuse nécessite la mise en correspondance de mesures d'érosion réalisées sur terrain avec les résultats du modèle sur des parcelles représentatives du bassin et sur une durée de quelques années. Diverses méthodes ont été utilisées pour valider les résultats de ce type d'approche, on peut citer à titre d'exemple : mesure d'accumulation des sédiments dans une retenue, mesure par traceurs radioactifs et susceptibilité magnétique des sédiments (Ait Fora, 1995) ou encore confrontation directe avec la réalité de terrain selon des critères visuels adaptés (Bou Kheir, 2001-b). Dans cette perspective, nous avons adopté cette dernière technique accompagnée d'une étude sur un petit bassin versant en favorisant l'apport de la télédétection.

### **III.4. Conclusion**

La mesure des phénomènes d'érosion avec l'approche de Wischmeier and Smith (1978) apporte les données quantitatives et qualitatives précises qui sont indispensables à la gestion intégrée et constituent une base sûre pour la planification et la conception des activités requises de lutte antiérosive. Vu de cet angle d'analyse, il est possible de dire que la méthode RUSLE apporte des informations sur les zones à grandes pertes de sols, et permet ainsi de déterminer les zones prioritaires aux interventions de lutte contre l'érosion.

Les valeurs les plus élevées se produisent à des endroits de sol nu situé le long des rivières, des routes et des glissements de terrain.

Le taux des pertes en sol moyen est de 210 t/ha/an, avec 55 % de la superficie du bassin est soumise à une érosion comprise entre 40 et 400 t/ha/an enregistrée principalement au niveau des zones à pente forte et érodibilité élevée avec un faible couvert végétal, ce qui témoigne de l'importance de ce phénomène au niveau du bassin étudié. L'évaluation qualitative de l'érosion sur le bassin du haut Oum Er-Rbia a confirmé la dominance du relief accidenté, constitué de pentes abruptes à très abruptes sur 43 % de la surface du bassin. Aussi, la lithologie est assez tendre sur les pentes avec une dominance des roches ou sols sédimentaires faiblement ou modérément compactés (ardoise, schiste, marne, etc.)

Aussi, CA – Markov est un modèle approprié pour prévoir les futurs changements de LULC. Ce modèle, associé aux données SIG et de télédétection, fournit des outils qui pourraient jouer un rôle déterminant dans les études du changement de l'occupation des sol en relation avec l'érosion et aider les planificateurs à résoudre les problèmes liés aux changements environnementaux et aux activités humaines.

L'érosion dans le haut bassin versant d'Oum Er Rbia est contrôlée principalement par le facteur topographique. Enfin, ce travail a pu atteindre son objectif d'évaluer, à l'échelle d'un bassin hydrographique, les taux d'érosion potentielle, de délimiter des zones présentant différentes classes de risque et de révéler les déterminants de la dégradation des sols.

**PARTIE III**

**MODELISATION ET CARTOGRAPHIE**

**DE LA SUSCEPTIBILITE AUX**

**GLISSEMENTS DE TERRAIN DANS LE**

**HAUT BASSIN D'OUM ER RBIA**

## **CHAPITRE I :**

# **Cartographie et la modélisation de la susceptibilité aux glissements de terrain dans le haut bassin de l'Oum Er Rbia par la méthode d'analyse multicritère AHP**

## **I. Introduction**

Les glissements de terrain peuvent se produire sur des pentes peu profondes et escarpées, en fonction de la compétence du matériau rocheux sous-jacent, de l'orientation de la stratification, du type de joint et de la teneur en eau. Les glissements de terrain doivent être reconnus par le géologue de terrain lors de la cartographie géologique. Les glissements de terrain peuvent être petits ou grands, actifs ou en phase de reliction. Les zones de terrain actives sont généralement reconnaissables à la présence de dorsaux, de fissures et de matériel récemment mobilisé. Les glissements de terrain antiques, par contraste, peuvent ne pas être évidents du tout et s'être fondus dans le paysage naturel des milliers d'années.

Les glissements de terrain revêtent de nombreuses formes, telles que chutes, bascules, glissades, épandages et écoulements. En fait, la plupart sont complexes et présentent bon nombre de ces caractéristiques sur un même terrain (Cruden et Varnes, 1996). La figure 4.8 illustre les principales caractéristiques d'un glissement de terrain en rotation. La principale caractéristique du paysage est souvent la principale cicatrice ou cicatrice arquée, qui en est le point d'origine. La pente ascendante de ceci peut être davantage une preuve de fissuration. La pente descendante de ce point est le matériau qui a glissé dans sa plus grande mesure au bout (McDonald, 2000). Les parties du glissement de terrain qui sont en tension peuvent être cartographiées par la présence de fissures et de fissures. Les parties du glissement de terrain sous compression présentent des pliages et présentent des crêtes et des buttes parallèles. Une observation clé sur les glissements de terrain en mouvement est que les arbres qui poussaient autrefois à la verticale grandissent maintenant sous un angle ou sont inclinés à leur base alors qu'ils s'efforcent de grandir verticalement. La cartographie des lignes de drainage et des sources est très importante, car la présence d'eau souterraine augmente les pressions interstitielles internes, ce qui mobilise davantage le côté terre.

La susceptibilité aux glissements de terrain est définie par Guzzetti et al. (2005) comme la probabilité d'occurrence de glissements de terrain / de pentes, compte tenu d'un ensemble de facteurs prédisposants géo-environnementaux. D'autre part, un risque de glissement de terrain va au-delà de la susceptibilité aux glissements de terrain et inclut la distribution spatiale (emplacement), la magnitude (volume, intensité, surface) et la période pendant laquelle le phénomène de glissement de terrain est attendu (Guzzetti et al., 1999). Le risque de glissement de terrain consiste à mesurer la probabilité et la gravité des conséquences néfastes d'un glissement de terrain sur la santé, les biens ou l'environnement (Ercanoglu, 2008). Ainsi, l'analyse des risques devrait inclure les éléments de danger, de vulnérabilité et d'exposition

(Catani et al., 2005). Selon Crozier et Glade (2010), la vulnérabilité au glissement de terrain est le degré de perte attendu associé à un niveau donné d'intensité de risque de glissement de terrain. Par conséquent, l'évaluation de la vulnérabilité nécessite une compréhension des éléments à risque (personnes ou biens) ; leur emplacement par rapport au glissement de terrain, leur exposition ; et les caractéristiques des glissements de terrain (distance parcourue, volume, vitesse, surface, par exemple) (Dai et al., 2002).

Ce chapitre a pour objectif de passer en revue les méthodes de cartographie des glissements de terrain, l'accent étant mis principalement sur l'importance des données RS pour la préparation des facteurs déclenchants et prédisposant aux glissements de terrain, la source des cartes d'inventaire, l'utilisation du cadre basé sur un SIG pour l'évaluation et la modélisation des risques de glissements de terrain, et enfin la contribution de cette recherche à l'écart existant.

### **I.1. Méthodes de cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain**

Les phénomènes de glissement de terrain impliquent des interrelations complexes de divers facteurs et, par conséquent, il n'existe aucune méthode unique pour cartographier, délimiter de manière adéquate les risques de glissement de terrain et évaluer les risques (Guzzetti, 2006). Au lieu de cela, le choix d'une technique de cartographie des glissements de terrain dépend de l'étendue et la complexité de la zone d'étude, expertise / compétences de l'investigateur, disponibilité d'un inventaire à jour des glissements de terrain de la zone d'intérêt et ressources / données disponibles (Guzzetti et al., 2000). En général, les glissements de terrain sont la conséquence d'une rupture de pente et il est donc supposons qu'elles peuvent être régies par des lois mécaniques utilisant des méthodes empiriques, statistiques ou déterministes (Dietrich et al., 1995 ; Guzzetti et al., 1999). La prévision de l'occurrence de glissements de terrain et la quantification de l'impact sont des aspects importants de l'évaluation des risques de glissements de terrain (Bovolo et Bathurst, 2012). L'évaluation vise à atténuer les risques de glissements de terrain et a pour résultat la production de cartes des dangers et des risques. L'analyse de la relation entre les glissements de terrain et la distribution spatiale des facteurs à l'origine des glissements de terrain permet d'évaluer les risques de glissements de terrain. Ainsi, l'évaluation des risques de glissement de terrain nécessite la cartographie et le classement des divers facteurs d'instabilité des pentes afin d'attribuer un indice de risque (Guzzetti et al., 1999). Diverses méthodes de cartographie des glissements de terrain sont passées en revue et classées principalement en : méthodes de mappage qualitatives versus quantitatives et directes / indirectes (Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Catani et al., 2005 ; Kanungo et al., 2009 ; Pardeshi et

al., 2013). Un SIG permet la gestion des données spatiales et l'évaluation des aspects qualitatifs et quantitatifs des risques de glissements de terrain.

Les techniques qualitatives sont de nature subjective, en ce sens qu'elles dépendent de l'expérience et des connaissances des experts pour quantifier l'importance relative des diverses couches thématiques causant des glissements de terrain, de sorte que les cartes de risque sont présentées sous forme descriptive. Les méthodes quantitatives sont considérées comme des moyens plus objectifs d'établir un lien entre la distribution spatiale des glissements de terrain et les facteurs en cause. Ils donnent des estimations / probabilités numériques d'occurrence de glissements de terrain dans une région. Les méthodes de cartographie directes dépendent dans une large mesure du degré de risque et sont basées sur l'expérience du cartographe géomorphologique. Les méthodes de cartographie indirecte impliquent l'évaluation progressive des dangers de glissement de terrain, en commençant par l'identification et la cartographie des zones d'entraînement (fournies par l'inventaire des glissements de terrain), suivie de la cartographie des facteurs d'instabilité des pentes et enfin de la création d'une carte des ruptures, en fonction du degré de contribution des facteurs d'instabilité des classifications en zones à risque (Guzzetti et al., 1999).

Comme la susceptibilité aux glissements de terrain commence par l'étape fournissant l'inventaire des glissements de terrain (Pradhan et al. 2010), cette étude a débuté par la préparation d'une carte d'inventaire des glissements de terrain du bassin versant du haut Oum Er Rbia à partir de l'enquête sur le terrain le long du réseau routier et de l'interprétation des images de Google Earth. Huit facteurs affectant les glissements de terrain, à savoir la pente, le drainage, la lithologie, l'utilisation des sols, l'aspect des pentes, les routes, les failles et l'altitude ont été utilisés pour l'analyse de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la présente étude. Ces facteurs sélectionnés interviennent soit dans la stabilité des pentes et des massifs rocheux, soit exposés à un risque de glissement de terrain. Les différentes couches thématiques relatives à ces facteurs ont été générées puis combinées à l'aide de pondérations de facteurs et de sous-facteurs déterminés par la méthode AHP afin de générer la carte de susceptibilité aux glissements de terrain. La combinaison de toutes les couches thématiques en accord avec les résultats AHP a été réalisée dans un environnement SIG en utilisant la méthode de combinaison linéaire pondérée (WLC). Après l'identification de la sensibilité aux glissements de terrain dans la zone d'étude, l'exactitude de la sensibilité aux glissements de terrain a été évaluée en comparant la carte d'inventaire des glissements de terrain à la carte de susceptibilité aux glissements de terrain.

## I.2. Préparation des cartes des facteurs contributifs à la susceptibilité aux glissements de terrain

Les principales données nécessaires à l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain et des risques liés aux glissements de terrain dans cette étude ont été recueillies à partir de diverses sources (Tableau VI.11), puis construites à partir d'une base de données spatiale. Pour chacune de ces cartes thématiques, l'incidence des glissements de terrain dans leurs classes a été évaluée.

Tableau VI. 11: Sources de données utilisées

Données	Description	Source
Landsat 8 OLI	Téléchargé	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov">https://earthexplorer.usgs.gov</a>
Aster GDEM (Digital Elevation Model DEM) Resolution 30m	Téléchargé	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov">https://earthexplorer.usgs.gov</a>
Pente	Derivé du DEM 30 m	DEM 30 m
Elevation (m)	Derivé du DEM 30 m	DEM 30 m
Aspect	Derivé du DEM 30 m m	DEM 30 m
Land use	Derivé du Landsat 8 Oli image et d'observation du terrain.	Landsat 8 Oli image
Failles	Digitaliser de la carte géologique 1:500.000 de Rabat	la carte géologique 1:500.000 de Rabat
Routes	Extrait	Google Earth
Réseau hydrographique	Extrait	DEM 30 m
Localisation des glissements de terrain	Occurrence des glissements de terrain	Données du terrain/littérature

Après l'inventaire des glissements de terrain, selon nos observations sur le terrain, les couches thématiques des facteurs sélectionnés régissant les glissements de terrain, y compris la valeur de la pente, l'aspect de la pente, l'altitude, la lithologie, l'utilisation / la couverture du sol, la distance aux routes, la distance au réseau de drainage, la distance aux failles développées. Toutes les couches produites ont ensuite été combinées en utilisant des poids de facteurs et de sous-facteurs déterminés par la méthode AHP pour générer la carte de susceptibilité aux

glissements de terrain. Toutes les couches thématiques ont été intégrées à l'environnement SIG par la combinaison de la méthode WLC et de la méthode AHP.

Les cartes thématiques de distance au réseau de drainage, aux failles et aux routes ont été calculées par l'outil de distance euclidienne dans les outils d'analyse spatiale d'ArcGIS 10.6. Une image Landsat 8 Oli avec une résolution spatiale de  $30 \times 30$  m acquise le 15/01/2016 a également été utilisée pour générer la carte d'utilisation / couverture du sol après corrections radiométriques et atmosphériques. La carte d'utilisation / couverture du sol a été produite par une classification supervisée des données satellitaires à l'aide du logiciel ENVI 5.0.

Les facteurs liés à la topographie, tels que le degré de la pente, l'aspect de la pente et l'altitude, ont été dérivés d'un modèle numérique d'altitude de 30 m de la zone d'étude. La couche numérique du réseau de drainage a également été produite à partir de 30 m de DEM avec les outils d'hydrologie du logiciel ArcGIS 10.6.

Toutes les couches thématiques ont été converties au format raster avec une résolution de cellules de  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  et chaque raster a été classé en plusieurs classes afin de calculer le nombre de pixels de glissement de terrain et de non-glissement de terrain. La procédure de préparation pour chaque couche thématique est résumée ci-dessous.

### **I.2.1. Facteurs topographiques**

Dans la présente étude, les données relatives aux facteurs topographiques ont été extraites du DEM de 30 m. L'aspect de la pente faisant référence à la direction de la pente (Poudyal et al. 2010 ; Pourghasemi et al. 2012) est fréquemment utilisés comme facteur de conditionnement des glissements de terrain. Ce facteur a été reclassé en neuf classes directionnelles (Figure VI.30a). L'angle de pente, considéré comme un facteur causal principal, est fréquemment utilisé pour cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain (Wei Chen et al. 2017 ; Nourani et al. 2014). Dans la présente étude, la carte des angles de pente a été reclassée en sept classes avec un intervalle de  $5^\circ$  (Figure VI.28b). La carte thématique d'élévation a été extraite et générée à partir d'un DEM de 30 m à l'aide du logiciel ArcGIS. Placé entre 556 et 2400 m, il a été reclassé en cinq classes (Figure VI.28c).

### **I.2.2. Occupation de sol**

Le changement d'utilisation des sols est influencé par des facteurs liés aux besoins de la population, tels que la conversion des terres agricoles et forestières en zones urbaines, la conversion de forêts en terres agricoles et la réduction de la pente involontaire ou contraire à

l'éthique pour le développement des infrastructures. L'utilisation des terres est un facteur majeur dans la cartographie de la sensibilité aux glissements de terrain. Dans cette étude, l'utilisation des terres a été générée à l'aide de l'image Landsat 8 Oli, en appliquant une classification supervisée Probabilité avec les logiciels ArcGIS 10.2.2 et Envi 5.0, puis reclassée en six classes, à savoir forêt, agriculture, terres non cultivées, terres nues, zones urbaines, et plans d'eau (Figure VI.28d).

### **I.2.3. Distance au drainage**

Les rivières jouent un rôle majeur dans le développement des glissements de terrain (Park et al. 2013). Ils peuvent entraîner la faillite des berges en raison de la sous-cotation des pentes et la modification du sol provoquée par l'érosion des ravins peut également influencer sur le déclenchement des glissements de terrain (Dai et Lee 2002 ; Bui et al. 2011). Dans la présente étude, le réseau de drainage a été réalisé à partir de 30 m DEM avec des outils d'hydrologie dans ArcGIS 10.6. Quatre tampons différents ont été générés à l'aide de la méthode de distance euclidienne afin de déterminer dans quelle mesure les cours d'eau pourraient affecter les pentes de la rive (Figure VI.29a).

### **I.2.4. Distance aux routes**

La distance aux routes est l'un des principaux facteurs anthropiques influant sur les occurrences de glissements de terrain (Nourani et al. 2014 ; Yilmaz 2010). En fait, lors des travaux sur le terrain, certains glissements de terrain dus à des travaux de construction de routes sont détectés. Dans la présente étude, quatre zones tampons différentes ont été générées à un intervalle de 250 m (Figure 29b).

### **I.2.5. Distance aux failles**

Les zones de failles géologiques sont généralement très sensibles aux glissements de terrain, car la résistance de la roche environnante diminue en raison de ruptures tectoniques (Chen et al. 2017). Dans cette étude, les tampons de failles ont été reclassés en cinq catégories afin de produire la carte de distance aux failles à un intervalle de 1 000 m en utilisant la distance euclidienne (Figure VI.29c), basée sur la carte géologique de Rabat.

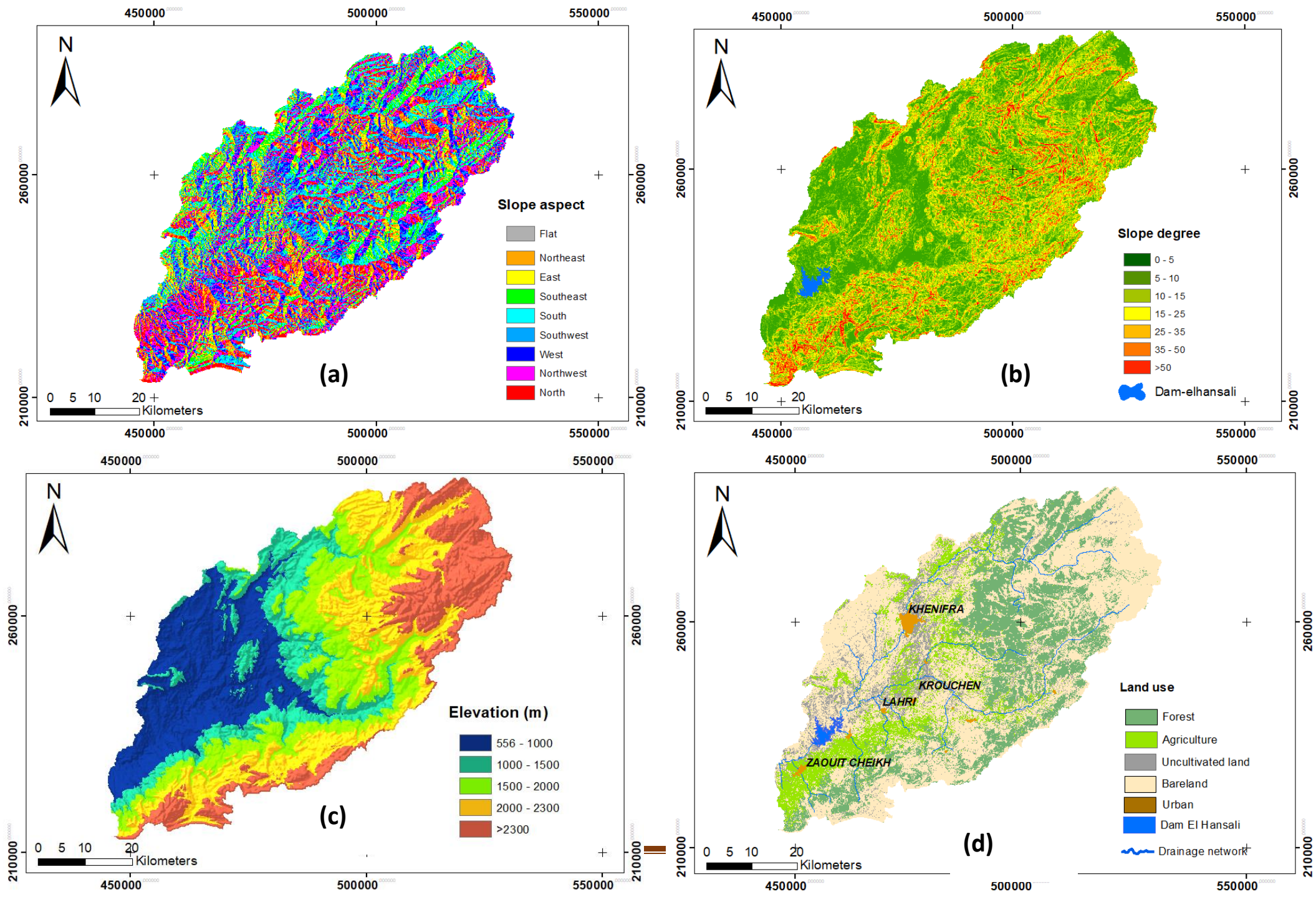


Figure VI. 28: Cartes des facteurs contributifs à la susceptibilité aux glissements de terrain produites pour la zone d'étude : (a) aspect de la pente, (b) la pente, (c) élévation, (d) utilisation des sols.

### **I.2.6. Lithologie**

La lithologie est un facteur fréquemment utilisé dans les analyses de susceptibilité aux glissements de terrain (Althuwaynee et Pradhan 2016). La carte lithologique extraite de la carte géologique de Rabat à l'échelle 1 : 500 000 a montré que la zone d'étude est recouverte de divers types d'unités lithologiques. Ces unités ont été classées en sept classes, comme illustrées à la Figure VI.30d. Plus les glissements de terrain se produisent sur les terres argileuses et marneuses le long du l'oued Srou et de l'oued Oum Er Rbia dans le nord et le milieu de la zone d'étude.

### **I.3. Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain**

La méthode AHP a été utilisée pour déterminer le poids relatif et la priorité des glissements de terrain à facteur individuel et sous-facteur causant des glissements de terrain dans le haut bassin d'Oum Er Rbia. AHP est une approche de prise de décision multicritère à objectifs multiples, qui permet à l'utilisateur d'atteindre une échelle plutôt qu'un ensemble de solutions alternatives (Saaty, 1980). Il aide les décideurs à découvrir les combinaisons les mieux adaptées à leur objectif et à leur compréhension du problème. Cette méthode est largement utilisée dans l'analyse de la susceptibilité aux glissements de terrain. Le processus est mis en œuvre en plusieurs étapes consécutives tel que : développer la structure hiérarchique du projet, effectuer des comparaisons binaires (binaires) des critères par rapport à l'objectif, établir une matrice de jugement comparatif, calculer des vecteurs de priorité, donner la valeur d'indice aléatoire (AI), calculer la moyenne de la valeur  $\lambda_{max}$ , calculer l'indice de cohérence (IC), calculer le rapport de cohérence (RC), établir un tableau de comparaisons complètes des critères, établir un sous-critère par rapport au nombre de critères étudiés, établir les sous-critères du tableau de comparaison, déterminer la performance de la valeur relative de chaque critère en contribuant à la valeur des critères, calculer l'agrégation de projets, établir la comparaison par les pairs des variantes de l'étude, établir le tableau de comparaisons alternatives, déterminez la performance de la valeur relative de chaque alternative par rapport projeter l'agrégation, calculer l'agrégation finale du projet, et exprimer la décision finale (Tableau VI.12).

Tableau VI. 12 : Pondération des sous-facteurs à l'aide de la matrice appariée AHP

<b>Facteurs</b>	<b>Sous critères</b>	<b>Poids</b>	<b>CR</b>
Elevation	556-1000	0.153	0.096
	1000-1500	0.418	
	1500-2000	0.272	
	2000-2300	0.91	
	>2300	0.051	
Aspect	Flat	0.319	0.043
	North	0.211	
	Northeast	0.150	
	East	0.104	
	Southeast	0.08	
	South	0.056	
	Southwest	0.034	
	West	0.032	
	Northwest	0.013	
Pente	0-5	0.256	0.060
	5-10	0.297	
	10-15	0.186	
	15-25	0.112	
	25-35	0.870	
	35-50	0.440	
	>50	0.180	
	Distance au drainage	0-250	
250-500		0.124	
500-750		0.37	
750<		0.024	

Tableau VI.12 : Pondération des sous-facteurs à l'aide de la matrice appariée AHP : suite

Land use	Foret Agriculture Terrain non cultivé Sol nu bâti Barrage EL HANSALI	0.374 0.251 0.160 0.111 0.680 0.360	0.044
Distance au routes	0-250 250-500 500-750 750<	0.232 0.098 0.071 0.024	0.006
Distance to Faults	(1)0-200 (2)200-400 (3)400-600 (4)600-1000 (5)1000<	0.319 0.211 0.320 0.560 1.04	0.006
Lithologie	Alluvion,silt Argile Basalte Limestone Carboniferes Dolomie Sandstone Marne rouge Marne-Blanca flit Marno_ blanc limestone Shale	0.424 0.265 0.148 0.790 0.05 0.330 0.16 0.38 0.154 0.387	0.096

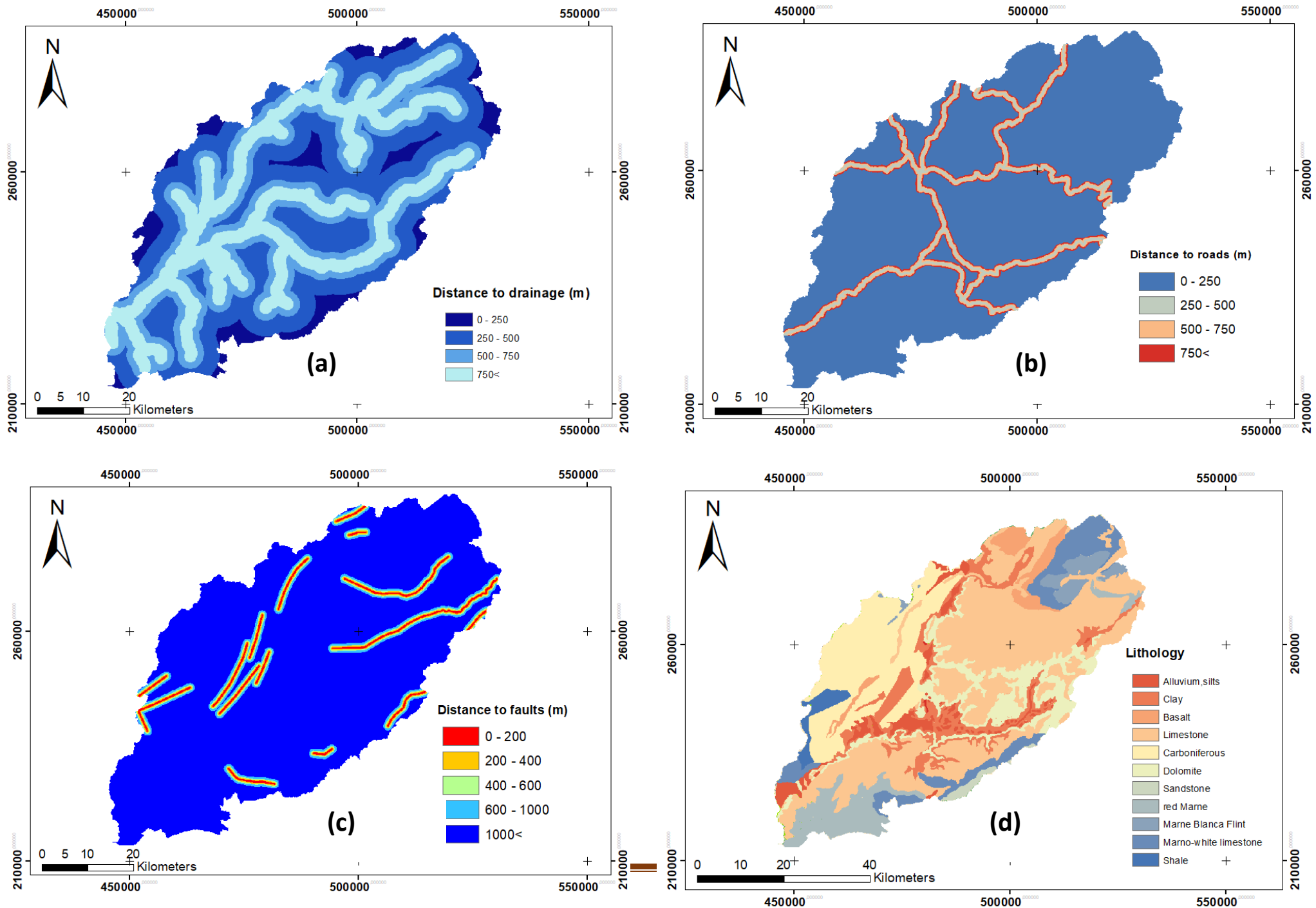


Figure VI. 29: Cartes de facteurs contribuant à la susceptibilité aux glissements de terrain produite pour la zone d'étude : (a) distance du réseau de drainage, (b) distance des routes, (c) distance aux failles, (d) Lithologie

Dans cette approche de classification hiérarchique, il est également possible de vérifier la cohérence de notre approche en calculant la cohérence ou le ratio de cohérence (CR) exprimé par l'équation ci-dessous. Ce dernier constitue un test de réception des poids des différents critères (Saaty 1977). Cette étape vise à détecter toute incohérence dans la comparaison de l'importance de chaque critère. Le rapport de cohérence CR est approximativement un indicateur mathématique du jugement concernant une décision prise au hasard ; il est calculé en utilisant l'équation suivante :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Eq.19}$$

Où RI est l'indice de cohérence aléatoire et IC est l'indice de cohérence qui est exprimé comme suivant :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - 1}{n - 1} \quad \text{Eq.20}$$

Où  $\lambda_{max}$  est la valeur propre la plus grande ou principale de la matrice et est calculé à partir de la matrice et n est l'ordre de la matrice. Selon Saaty, le rapport de cohérence doit être  $\leq 10\%$  ou une imprécision inférieure à 10%. Le principe consiste à comparer le jugement à la pondération aléatoire des éléments. Enfin, les poids acquisitifs ont été intégrés aux différentes classes de causalité dans un seul indice de susceptibilité aux glissements de terrain à l'aide de l'équation ci-dessous :

$$LSI = \sum_{i=1}^n R_i * W_i \quad \text{Eq.21}$$

Où  $R_i$  correspond aux classes d'évaluation, chaque couche et  $W_i$  correspond aux poids de chacun des facteurs de conditionnement des glissements de terrain. La carte LSI résultante a été classée en cinq classes (très faible, faible, modérée, élevée et très élevée) sur la base de ruptures naturelles pour définir les intervalles de classe dans la carte de susceptibilité aux glissements de terrain.

#### **I.4. Résultats et discussion**

Dans cette étude, l'AHP basée sur un SIG a été utilisée comme approche d'évaluation multicritère pour identifier les occurrences potentielles de glissements de terrain dans le haut bassin d'Oum Er Rbia. Huit facteurs de conditionnement des glissements de terrain, à savoir le degré de la pente, l'aspect, l'altitude, la lithologie, l'utilisation des terres, la distance au réseau de drainage, distance par rapport aux routes et aux failles, ont été utilisés pour l'analyse de la susceptibilité.

Le modèle AHP est classiquement basé sur un système de notation fourni par des experts. En fait, l'avis d'experts est très utile pour résoudre des problèmes complexes tels que les glissements de terrain. Cependant, dans une certaine mesure, les opinions peuvent changer pour chaque expert et donc être sujettes à des limitations cognitives liées à l'incertitude et à la subjectivité. Par conséquent, il est important d'analyser la relation spatiale entre les facteurs de conditionnement des glissements de terrain et leurs emplacements. Dans cette étude, l'analyse spatiale de chaque paramètre et les observations de terrain ont été considérées pour un jugement d'expert. Comme le montrent les tableaux VI.13 et VI.14, la matrice de comparaison par paires des facteurs et des sous-facteurs et leurs pondérations relatives sont traitées sur la base de la méthodologie de Saaty (2001).

Tableau VI. 13: Échelle fondamentale de Saaty (1977).

Value	Definition	Explanation
1	Equally important	Two decision elements equally influence the parent decision element.
3	Moderately more important	One decision element is moderately more influential than the other.
5	Much more important	One decision element has more influence than the other.
7	Very much more important	One decision element has significantly more influence over the other.
9	Extremely more important	The difference between influences of the two decision elements is extremely significant.
2, 4, 6, 8	Intermediate judgment values	Judgment values between equally, moderately, much, very much and extremely.

La ROC a été calculée pour tous les facteurs et était inférieure à 0,10, ce qui signifie que les poids attribués étaient appropriés et fiables. En conséquence, une carte de susceptibilité aux glissements de terrain a été produite dans les SIG. Les valeurs de LSI de la zone d'étude comprise entre 1,88 et 17 ont été reclassées en cinq classes de susceptibilité aux glissements de terrain : très faible, faible, modérée, élevée et très élevée, à l'aide du classificateur à rupture naturelle (Figure VI.30). D'après les résultats des analyses présentées dans le tableau 13, les occurrences de risque très faibles, faibles et modérées représentent respectivement 30,16%, 12,66% et 25,75% de la superficie de la zone d'étude. Les zones de susceptibilité élevée et très élevée représentent respectivement 22,59% et 9,11% de la zone d'étude totale (Tableau VI.13).

Tableau VI. 14: Matrice de comparaison par paires et vecteur propre principal normalisé pour les facteurs causaux de glissements de terrain requis pour l'application de la méthode AHP.

<i>Critères</i>	<b>Matrice de comparaison par paires</b>								<i>Poids</i>
	Lithologie	Pente	Land use / land cover	Distance aux routes	Distance au drainage	Distance aux failles	Elevation	Aspect	
Lithologie	1								0.363
Pente	1	1							0.288
Land use/land cover	1/5	1/2	1						0.136
Distance aux routes	1/5	1/4	1/2	1					0.710
Distance au drainage	1/9	1/8	1/4	1/2	1				0.480
Distance aux failles	1/8	1/9	1/5	1/8	1/5	1			0.037
Elevation	1/8	1/7	1/5	1/2	1/2	1/5	1		0.270
Aspect	1/8	1/8	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	0.310

D'après la carte de susceptibilité aux glissements de terrain (Figure VI.32), les zones très vulnérables aux glissements de terrain se trouvent dans les parties nord et est du bassin versant le long des vallées proches du réseau de drainage caractérisé par des pentes abruptes favorisant l'érosion et les glissements. La zone occidentale présente des zones de très faible vulnérabilité avec un terrain plus plat, un couvert forestier dense et un couvert forestier clairsemé. Comme indiqué sur la carte de susceptibilité aux glissements de terrain, les glissements de terrain affectent principalement les formations argileuses situées sur les pentes abruptes du lit de la rivière. Les formations affleurantes caractérisées par un pourcentage élevé d'argile ou de marnes sont déboisées et labourées par les agriculteurs locaux. Le travail de ces terres les rend, en plus de leur lessivage et de leur érosion, moins consolidées et plus perméables, et donc vulnérables aux glissements de terrain. Les roches carbonatées et de grès, qui ont une résistance mécanique élevée, ont présenté des densités sans valeur de glissements de terrain. Cependant, ils sont modérément impliqués dans les glissements de terrain lorsqu'ils forment un substrat incliné des formations argileuses et marneuses.

Dans le but de valider la carte finale, des points de localisation des glissements de terrain ont été collectés à l'aide du système GPS (Global Position System) lors de visites sur le terrain (Figure VI.31,33).

Cependant, certains facteurs de précondition plus ou moins importants peuvent parfois avoir un effet déclencheur, mais dans des conditions spécifiques (He et Beighley, 2008). Par exemple, de nouvelles excavations routières ou de nouvelles constructions sur les terrains susceptibles aux glissements de terrain peuvent activer la survenue de glissements de terrain, ainsi que la présence temporaire d'eau les précipitations. De plus, c'est le cas pour la plupart des glissements de terrain dans notre zone d'étude qui sont enregistrés principalement près des routes. En outre, le village d'El Kbab situé sur le côté sud de la rivière Srou ayant une pente raide est sujette à des glissements de terrain en raison de l'absence de planification de l'utilisation des terres, de la construction de maisons et de la déforestation.

Pour valider le taux de précision du modèle de susceptibilité aux glissements de terrain (carte) dans la présente étude, en utilisant la méthode de la courbe ROC, les glissements totaux observés dans la zone d'étude ont été divisés en deux groupes : 70 et 30% des 50 emplacements de glissements de terrain ont été utilisés pour la formation et la validation des modèles, respectivement. Les courbes de taux de réussite et de taux de prédiction ont été créées sur la base des données d'apprentissage et des données de validation, respectivement. Par conséquent, cinquante points de localisation de glissements de terrain ont été recueillis à l'aide du GPS du système de positionnement global au cours de visites sur le terrain et comparés à cinq niveaux de carte de susceptibilité.

La courbe ROC a été produite en traçant les pourcentages cumulés de LSI par ordre décroissant par rapport au pourcentage cumulé de glissements de terrain sur les axes X et Y, respectivement (Figure VI.32). L'aire sous la courbe (AUC) de la courbe de précision a été calculée par la méthode du trapèze simple et sa valeur était de 0,767. L'analyse a révélé que le taux de réussite global de la carte de zonation de la susceptibilité aux glissements de terrain est de 76,7%. Certes, de nombreuses approches pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain ont été développées au cours des deux dernières décennies, c'est-à-dire une cartographie basée sur l'inventaire, l'analyse statistique, la décision heuristique, semi-quantitative, quantitative, probabiliste et multicritère. Cependant, aucune de ces approches n'est universellement acceptée pour des analyses efficaces de la susceptibilité lors d'un glissement de terrain, car leur précision est encore discutée. Dans cette étude, un processus de prise de décision SIG multicritère a été appliqué de la plus haute importance pour déterminer les occurrences probables de glissements de terrain. Cette approche implique la prise en compte de plusieurs variables explicatives de glissements de terrain dont l'identification de la contribution de chacun d'eux constitue un défi.

Par conséquent, AHP a été sollicité pour établir des échelles de priorité de différents facteurs et sous-facteurs causant les glissements de terrain, par le biais de comparaisons par paires basées sur les jugements d'experts. D'après l'efficacité spatiale de la carte de susceptibilité aux glissements de terrain générée, vérifiée par l'AUC (76,7% de précision), on constate que le modèle utilisé a donné de bons résultats pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la zone d'étude.

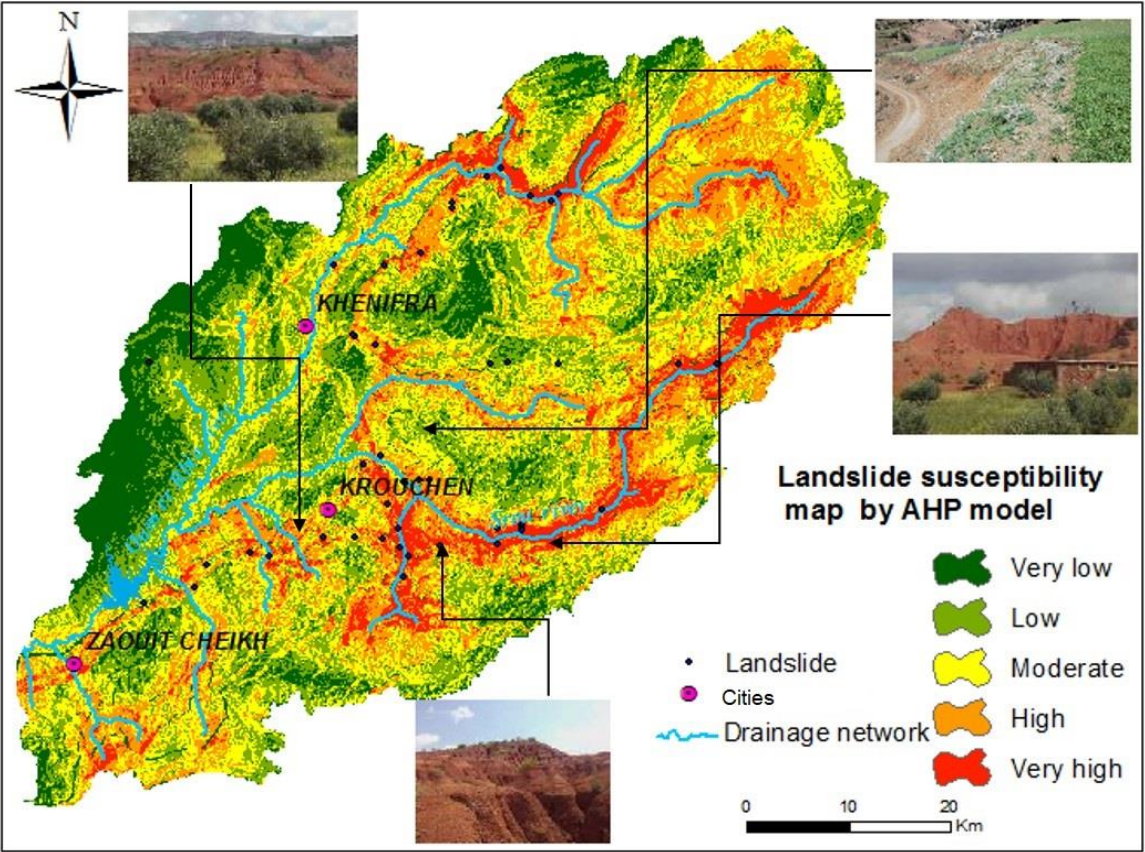


Figure VI. 30: Carte de susceptibilité aux glissements de terrain basée sur le modèle AHP

Tableau VI. 15: Classes de cartes de la susceptibilité aux glissements de terrain

Classes de la susceptibilité	Superficie (km <sup>2</sup> )	Superficie (%)
Très faible	1089.59	30.16
Faible	457.45	12.66
Modéré	930.04	25.75
Elevé	816.10	22.59
Très élevé	318.50	9.11
<b>Total</b>	<b>3611.68</b>	<b>100.00</b>



Figure VI. 31 : photo de la zone d'étude montrant des traces de glissements de terrain

Malgré ces résultats encourageants et la flexibilité du modèle, le principal problème est celui de la causalité liée aux glissements de terrain dans notre zone d'étude. Certains scientifiques ont abordé cette question dans le monde entier (Chacon et al. 2006 ; Van Westen et al. 2006). Le manque d'images à haute résolution et de MNT, de cartes géologiques à grande échelle, des cartes forestières détaillées, de cartes pédologiques et de données sur les glissements de terrain dans la zone d'étude a constitué le principal obstacle à la sélection des données paramètres liées aux glissements de terrain et dans le temps. Pour ces raisons, notamment en raison du manque d'informations publiquement disponibles sur les glissements de terrain dans le haut bassin d'Oum Er Rbia, la méthode AHP a été choisie, car elle reste utile, en particulier pour les évaluations à grande échelle ou pour les zones dépourvues d'inventaire des glissements de terrain (Zhou et al. 2016).

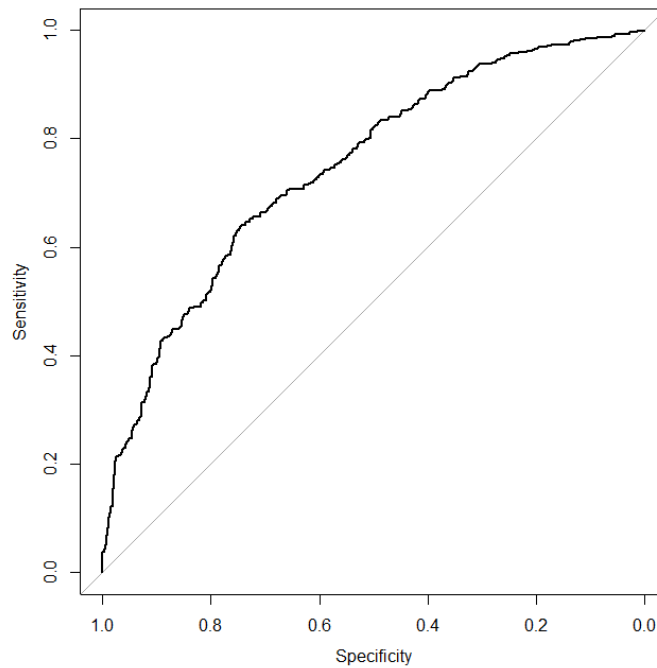


Figure VI. 32: Courbe ROC pour la carte de susceptibilité aux glissements de terrain obtenue par la méthode AHP

### **I.5. Conclusion**

Le glissement de terrain est un risque naturel vital. Par conséquent, la reconnaissance des zones exposées aux glissements de terrain et la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain constituent l'intérêt des organisations et des chercheurs responsables. L'analyse de la sensibilité aux glissements de terrain peut être réalisée dans la mesure où il existe peu de données sur les facteurs qui les provoquent à l'aide de la méthode AHP, ce qui permet une analyse rapide et pratique des glissements de terrain sur la base de la collecte et de la manipulation de données et de l'analyse des données environnementales nécessaires pour la prédisposition aux glissements de terrain.

Le haut bassin d'Oum Er Rbia est sujet aux glissements de terrain en raison de son environnement géologique et géomorphologique. Dans cette étude, la relation spatiale entre les occurrences de glissements de terrain et les facteurs de causalité, notamment l'élévation, le degré de la pente, l'aspect de la pente, la lithologie, l'utilisation / la couverture du sol, la distance au réseau de drainage, les routes et les failles ont été évaluées à l'aide de techniques AHP et SIG. La performance du modèle a été validée à l'aide de 30% des données de glissements de terrain cartographiées par des enquêtes sur le terrain à l'aide de tracés AUC. La carte de sensibilité aux glissements de terrain a été classée selon la méthode de la fracturation naturelle en cinq classes d'une superficie de 30,16%, 12,66%, 25,75%, 22,59% et 9,11% de la superficie totale de l'étude, pour les très faibles, faibles, modérées, élevées et très faibles, respectivement. Les zones de susceptibilité très élevée et très élevée sont indiquées le long des rives escarpées des principales rivières (Srou et Oum Er Rbia) et de leurs affluents, ainsi que le long des

principales failles de la zone d'étude. Ils sont également contrôlés par les roches argileuses et marneuses, qui ont la plus forte densité de glissements de terrain. En outre, les activités humaines, à savoir la construction de routes et de maisons et l'extension de terres agricoles en forêts, interviennent en provoquant des glissements de terrain en modifiant la stabilité des pentes le long des rives du fleuve.

Les valeurs de l'AUC de 76,7% confirment la bonne précision du modèle LSI-AHP dans l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la zone d'étude, à condition que les conditions et les caractéristiques sur le terrain aient été correctement déterminées par une expertise appropriée. En outre, la carte de sensibilité aux glissements de terrain du haut bassin d'Oum Er Rbia fournit davantage d'informations sur les glissements de terrain actuels et futurs, ce qui la rend viable. Cette carte peut être utile aux planificateurs et aux décideurs pour la planification de l'utilisation des sols et la gestion des pentes dans la zone d'étude afin de prévenir les risques de glissements de terrain et de prendre des mesures de sécurité préventives appropriées.



Figure VI. 33 : photo d'un exemple de route détruite à cause du glissement de terrain

## **CHAPITRE II**

### **Caractérisation minéralogique et géotechnique des sols susceptibles aux glissements de terrain (haut bassin d'Oum Er Rbia)**

## **II.1. Introduction**

L'évaluation de la sensibilité aux glissements de terrain est devenue une préoccupation majeure dans les zones montagneuses. Elle constitue un élément clé des efforts déployés par les gestionnaires pour prévenir les catastrophes, atténuer les risques et en gérer les conséquences (Yalcin 2008, Althuwaynee, Pradhan et al 2014, Gioacchino Francesco Andriani 2015, Vakhshoori, Zare et al. 2016, Sangchini, Emami et al 2016, El Jazouli, Barakat et al 2019,). Par conséquent, les propriétés des unités lithologiques sont très importantes pour la propension aux glissements de terrain. Les unités altérées agissent comme un sol d'un point de vue mécanique, déterminant ainsi les propriétés géotechniques de l'unité nécessaire (Yalcin 2011).

En effet la majorité des instabilités de terrain sont caractérisées par un comportement plastique faisant intervenir le facteur eau qui joue un rôle primordial dans le déclenchement du phénomène. La plupart des terrains des zones d'étudiées longeant les routes sont constituées des marnes, des manteaux d'altération des marnes et des argiles. En présence d'une certaine quantité d'eau, la cohésion de ces matériaux diminue. Plus les roches sont imprégnées d'eau, plus la plasticité s'accroît. On peut même arriver au stade de liquidité ou liquéfaction (coulée boueuse).

Cette étude peut fournir des informations permettant de localiser des zones de construction sûres dans des régions exposées aux glissements de terrain, protégeant ainsi les vies et les biens. Par conséquent, dix glissements de terrain ont été étudiés dans la province de Khénifra. L'existence de pentes abruptes et de roches non consolidées (argile et marnes) représente les principaux facteurs affectant les glissements de terrain (Jazouli, Barakat et al. 2019)

Le présent travail visait à caractériser, à cartographier, à évaluer des échantillons sélectionnés, qui semblaient être riches en argile à partir de cette séquence sédimentaire, ont été collectés et soumis à un programme de tests de laboratoire détaillé, comprenant : la minéralogie (fractions en vrac et argile), les limites d'Atterberg et la distribution granulométrique) et des analyses quantitatives par diffraction des rayons X (XRD).

## **II.2. Matériel et méthodes**

### **II.2.1. Composition minéralogique**

En termes de minéralogie, les constituants inorganiques majeurs des sols sont les minéraux primaires constitutifs de la roche mère (i.e. quartz, feldspaths), mais aussi les minéraux secondaires issus de l'altération des minéraux primaires et de la précipitation d'éléments

dissouts. Cependant, la minéralogie est à l'origine de la réactivité spécifique des sols. Les argiles et les oxydes et hydroxydes métalliques notamment ont les plus grandes réactivités par rapport aux autres compartiments du sol (quartz, feldspaths). Les argiles minéralogiques sont des phyllosilicates d'aluminium empilés sous forme de feuillets composés de couches tétraédriques de silice et octaédrique d'hydroxydes métalliques. Ces différentes couches sont séparées par des espaces interfoliaires, où l'eau peut circuler (Robert 1996). Par exemple dans le cas des argiles gonflantes, l'eau pénètre dans ces espaces interfoliaires. Elles sont constituées de couches d'octaèdre « O » ( $Al(OH)_6$ ) et de couches de tétraèdre « T » ( $SiO_4$ ) reliées par les atomes de O et OH mis en commun.

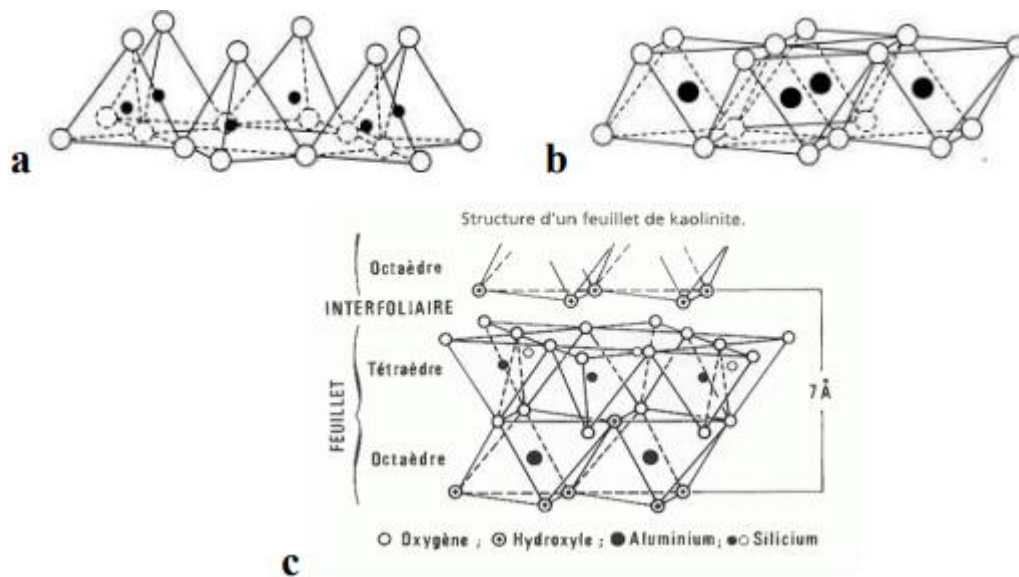


Figure VII. 34 : Exemple de réseau de couche tétraèdre (a) et d'octaèdre (b) formant les argiles (Hillel 1998), et l'exemple de la structure d'un feuillet de kaolinite (T/O) (c).

## II.2.2. Propriétés géotechniques des sols

L'échantillonnage a été effectué de mars à mai 2016/2017, période qui a coïncidé avec un temps sec. Quarantaine d'échantillons de sol ont été prélevés dans le sol à une profondeur d'environ 30 cm dans les champs potentiellement exposés au risque de glissement de terrain, et leurs coordonnées ont été enregistrées à l'aide du système de positionnement global (GPS). Les échantillons prélevés au hasard et placés dans des sacs en polyéthylène étiquetés ont été apportés au laboratoire. Ils ont été séchés à l'air et scellés dans des sacs en polyéthylène propres.

### a. Limites d'atterberg

Les minéraux argileux sont des aluminosilicates hydratés de la famille des phyllosilicates. Ces minéraux sont les composants principaux des roches argileuses et le matériau obtenu à partir de

ces roches après un affinage possible (Deer 1992, Horn 1998, Nesse 2000). Les structures en feuilles des minéraux argileux ont une influence sur les propriétés physicochimiques du sol, telles que la capacité d'échange cationique, la plasticité, l'ouvrabilité et la réfractarité (Horn 1998, Carrière, Jongmans et al. 2018).

Les limites d'Atterberg constituent une mesure de base de la plasticité du sol en fonction des variations d'humidité. La plasticité du sol est due au gonflement des minéraux argileux ; Les sols sans argile gonflante ne sont pas des plastiques (Gourley 1993, Mitchell 1993, Thomas 2000). Les sols argileux se comportent différemment selon la teneur en eau ; ils peuvent apparaître à l'état solide, semi-solide, plastique ou semi-liquide. Les limites entre ces quatre états de sol s'appellent des limites d'Atterberg, à savoir une limite de retrait, une limite de matière plastique et une limite de liquidité (Das 2002). La limite de retrait (SL) est une limite entre les états solide et semi-solide du sol ; c'est un point où le sol ne se contracte plus en raison du séchage. La limite plastique (PL) du sol est à un point où le sol change d'état de semi-solide à plastique à cause de l'augmentation de la teneur en eau. La limite de liquidité (LL) du sol est à un point où le sol passe de l'état plastique à l'état liquide lorsque la teneur en eau augmente (Das 2002). La limite de liquidité a été réalisée avec le gobelet Casagrande. Le test PL a été réalisé en malaxant et en enroulant des échantillons de sol entre les doigts et le pouce en un fil de 6 mm de diamètre. Chaque fil a ensuite été roulé entre les doigts sur une pâte de verre plate et propre avec suffisamment de pression pour réduire le diamètre à 3 mm. À exactement 3 mm, la pâte de sol commence à s'effriter et ne peut plus rouler. Le processus a été répété jusqu'à l'apparition de fissures longitudinales et transversales à un diamètre laminé de 3 mm. Immédiatement, la teneur en humidité du fil de fissure a été déterminée.

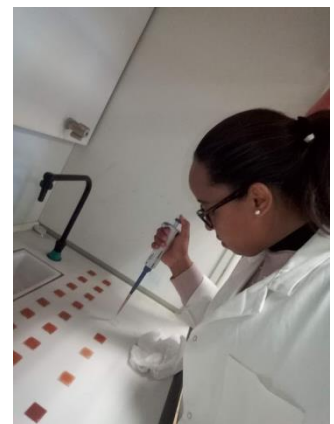


Figure VII. 31: Préparation des échantillons en poudre et lames orientés pour la DRX

Les limites d'Atterberg sont largement utilisées dans les applications d'ingénierie en raison des bonnes corrélations qu'elles montrent avec les propriétés d'ingénierie du sol (Das 2002). Leur utilisation s'étend aux spécifications et normes de qualité de la construction telles que l'American Society of Testing Materials (ASTM). Les limites d'Atterberg ont été utilisées dans cette étude pour estimer le potentiel de gonflement de chaque échantillon de sol et le classer ensuite en conséquence, de manière à évaluer leur rôle en tant que facteurs contribuant à l'amélioration de la sensibilité aux glissements de terrain.



Figure VII. 36: Échantillons préparés pour les analyses géotechniques : Limite d'Atterberg et casagrande

Les limites d'Atterberg mesurées ont été utilisées pour déterminer l'indice de liquidité (LI) et l'indice de plasticité (IP). L'indice de liquidité est une mesure de la consistance relative des sols plastiques à l'état naturel ; il est calculé par l'équation suivante :

$$LI = \frac{W-PL}{LL-PL} \quad \text{Eq.22}$$

Où, W est la teneur en eau naturelle

PL est la limite plastique du sol

LL est la limite de liquidité du sol

L'indice de plasticité (IP) est une mesure de la plasticité du sol ; il indique la gamme de teneurs en eau auxquelles les sols présentent des propriétés plastiques (Wroth et Wood, 1978). Il est calculé en tant que différence numérique entre la limite de liquidité et la limite de plasticité (Eq.23).

$$PI = LL - PL \quad \text{Eq.23}$$

L'indice de plasticité de n'importe quel sol peut varier de plastique non plastique à légèrement plastique, faible, moyen, élevé à très élevé et peut donc être utilisé pour classer le sol en conséquence. L'indice de plasticité a été utilisé pour classer les échantillons de sol dans cette étude.

### **b. L'essai au bleu de méthylène**

Également appelé « essai au bleu », est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la propriété d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient. Le bleu de méthylène est en effet adsorbé préférentiellement par les argiles du type montmorillonites (argiles gonflantes) et les matières organiques. Les autres argiles (Illites et Kaolinites) sont peu sensibles au bleu.

Tableau VII. 16: Nature de sol en fonction de valeur du bleu du sol.

Valeur du bleu du sol (VBS)	Nature du sol
<0,2	Sols sableux
0,2 - 2,5	Sols limoneux
2,5 – 6	Sols limoneux-argileux
6 – 8	Sols argileux
>8	Sols très argileux

### **c. Répartition granulométrique**

L'influence de la distribution granulométrique sur la fréquence et la vitesse des glissements de terrain était significative (Yalcin 2007). Des analyses au tamis et à l'aréomètre ont été entreprises pour déterminer la taille des grains de sol dans la zone du glissement de terrain. La distribution granulométrique du sol dans les zones de glissements de terrain et leur voisinage ont été déterminés en séparant les particules à l'aide d'un tamis conventionnel, d'un tamis fin et d'une pipette de Robinson. Tab.1 illustre la distribution granulométrique des fractions d'argile, de limon, de sable et de gravier du glissement de terrain, des alluvions, des alluvions et des matériaux de glissement de terrain se caractérisant par une texture de limon à limon argileux.

### **d. Diffraction des rayons X**

La diffraction des rayons X est une méthode adaptée à l'identification de la composition minéralogique des assemblages argileux. Elle consiste à appliquer un rayonnement d'une longueur d'onde du domaine des rayons X (entre 0.1 et 10 nm) sur un échantillon orienté ou non. L'analyse des phases cristallines est rendue possible grâce aux périodicités de

l'arrangement atomique des cristaux. Ces périodicités sont dues à un empilement de plans identiques dans un cristal et sont décrites par des longueurs correspondant aux distances entre les plans d'empilement. Cette distance entre les plans réticulaires est nommée distance réticulaire (Figure VII.39). Ainsi, lorsque le rayonnement pénètre le cristal, une partie de l'énergie est absorbée entraînant l'excitation des atomes et l'émission de radiations par les plans atomiques. Le faisceau diffracté mesuré résulte de l'ensemble des interactions constructives des rayons émis par les atomes d'un même plan. Selon la loi de Bragg :

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

n nombre entier correspondant à l'ordre de diffraction

$\lambda$  longueur d'onde du rayonnement

d distance réticulaire

$\theta$  angle de diffraction

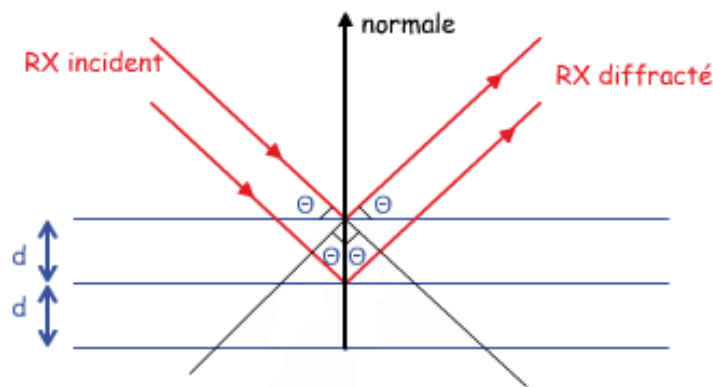


Figure VII. 37: Schéma de diffraction des rayons X par une famille de plan réticulaire d est la distance réticulaire.

Après diffraction on obtient un diffractogramme du faisceau diffracté en fonction de l'angle de diffraction  $2\theta$  ou de la distance réticulaire d (en Å). L'identification des phases présentes dans un échantillon se fait par comparaison de son diffractogramme (positions et intensités des raies diffractées) avec des diffractogrammes de phases connues.

Deux méthodes d'investigation par diffraction des rayons X sont classiquement appliquées par les laboratoires d'analyse. Dans un premier temps une analyse sur poudre totale fournit les éléments d'une semi-quantification de tous les minéraux présents et notamment la fraction totale regroupant minéraux phyllosilicates (Tableau VII.17). D'autre part, l'analyse de la fraction argileuse (inférieure à 2  $\mu\text{m}$ ) extraite du matériau est préparée sous forme de lames

orientées. Elle fournit une bonne estimation des divers composants argileux grâce à l'application de trois diagnostics : « normal », avec l'éthylène glycol et enfin après chauffage (500°C) (Figure VII.35).

### **II.2.3. Identification des minéraux par analyse par diffraction des rayons X (XRD)**

La minéralogie de l'argile a été déterminée par la méthode de diffraction aux rayons X. L'analyse DRX a nécessité que les échantillons de taille de particules inférieure à 75 µm soient ensuite broyés en une fraction préférable inférieure à 10 µm. Comme indiqué dans (Loubser 2008), cette taille est réalisable avec un broyage humide. Cela est nécessaire pour réduire le bruit de fond pendant l'analyse.

Les 20 échantillons de sol ont été caractérisés par des analyses de laboratoire standard sur des lames minces désorientées sur un diffractomètre Bruker D8 Advance de l'université du Sultan Moulay Slimane et au laboratoire d'hydrogéologie, sol, argile et altération de l'université de Poitiers. Les diffractogrammes ont été traités avec les logiciels DIFFRAC plus EVA et X'Pert HighScore. Ces analyses ont fourni une première indication sur la nature des minéraux présents, la nature des minéraux argileux et sur leurs proportions.

## **II.3. Résultats et discussion**

### **II.3.1. Classification des sols basée sur les limites d'Atterberg et le bleu de méthylène**

Des tests aux limites d'Atterberg ont été menés pour estimer le potentiel de gonflement des sols et soutenir la classification des sols par DRX. Il était important de soutenir la classification XRD des sols de sorte que tous les sols classés comme gonflants ou non gonflants aient la propriété de gonflement correspondante (plasticité).

La figure VII.38 montre les résultats du test des limites d'Atterberg, à savoir la limite de liquidité et la limite de plasticité. Les résultats de limite de liquidité et de limite plastique ont été utilisés pour calculer l'indice de plasticité, qui est une différence numérique entre eux. Les résultats ont montré que la plasticité du sol dans la zone d'étude allait des sols non plastiques aux sols ayant une plasticité intermédiaire. Le tableau 1 indique la plage d'indices de plasticité, les catégories d'indices de plasticité et le nombre d'échantillons dans chaque catégorie, ainsi que le pourcentage de chaque classe de texture du sol.

Les valeurs de VBS obtenu dans le tableau VII.17 sont comprises entre 1 et 3.75. En basant sur ce tableau, qui présente le type de sol en fonction de la valeur du bleu du sol, les échantillons étudiés sont classés dans la catégorie des sols limoneux et limoneux-argileux.

Tableau VII. 17: Valeurs du bleu du sol (VBS).

Echantillon	VBS
S 1	2,25
S 2	1,75
S 3	1
S 4	1
S 5	1,2
S 6	1,25
S 7	3,25
S 8	3,75
S 9	3,25
S 10	1,5

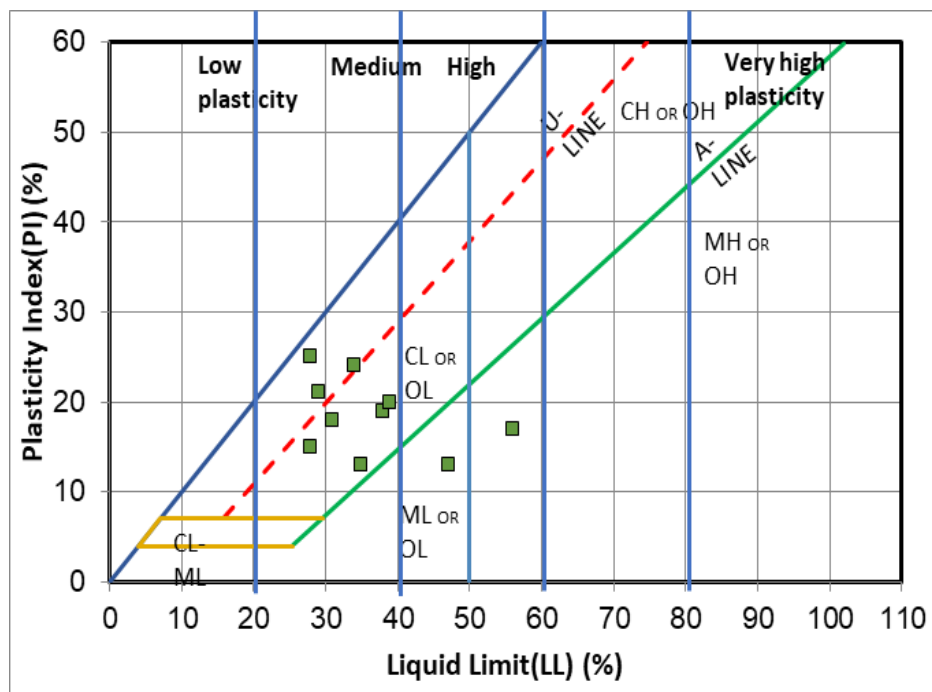


Figure VII. 33: Distributions des échantillons sur la carte de plasticité (ML : limons, sables fins limoneux ou argileux, avec une légère plasticité, CL : argiles, argiles limoneuses, argiles sableuses de faible plasticité, OL : limons et argiles limoneuses de plasticité intermédiaire, MH : limons de hautes plasticités, CH : argiles à haute plasticité, OH: argiles à très haute plasticité).

La plupart des échantillons étudiés, correspondant aux argiles des différents sites, ont une plasticité moyenne à élevée avec des valeurs de PI comprises entre 13 et 24% (Figure VII.39). Ceci conduit à considérer l'IP comme l'un des paramètres importants dans les propriétés de rétention d'eau du sol et donc de gonflement. Comme commodité pour comparer différents sols, Casagrande (1948) a mis au point un diagramme de plasticité (Figure VII.39) dans lequel une limite empirique appelée ligne «A» sépare les argiles des limons. Les sols de même origine géologique se trouvent généralement sur le graphique de plasticité sous forme de lignes droites parallèles à la ligne A. Plus l'indice de plasticité est grand, plus le changement de volume sera important. On trouve des argiles « grasses » ou plastiques au-dessus de la ligne. Les limons et les argiles contenant une grande partie de la « farine de roche » (minéraux non argileux finement broyés) se situent sous la ligne A.

Des études similaires ont obtenu les mêmes résultats. Hungr O (2014) a indiqué que les coulées de débris seraient probablement déclenchées lorsque les matériaux seraient proches de leur limite de liquidité. Gougazeh et Al-Shabatat (2018) ont également signalé que les matériaux alluviaux sont légèrement à modérément plastiques, alors que les matériaux des glissements de terrain sont classés en plasticité modérée à élevée et qu'ils reflètent un potentiel de gonflement élevé en raison de la présence d'une quantité considérable d'argiles expansives (smectite).

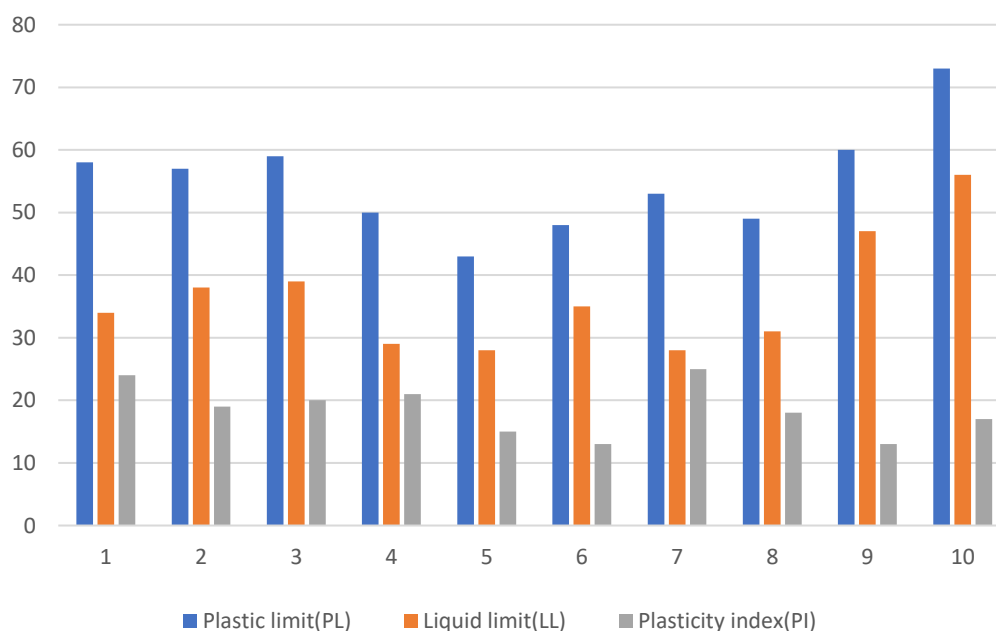


Figure VII. 39 : Résultats de l'analyse de la limite d'Atterberg

### **II.3.2. Classification des sols par DRX**

Les résultats des échantillons étudiés sont exprimés sous forme d'estimations semi-quantitatives de l'abondance des minéraux en pourcentage en poids de l'analyse de la roche entière. Les minéraux identifiés dans la zone d'étude étaient des groupes de minéraux argileux tels que la kaolinite, l'illite et la smectite. Les minéraux argileux ont été identifiés avec leur matériau de base, tels que la silice, les micas, les feldspaths et le quartz. Les autres minéraux reconnus comprennent l'hématite et la goethite. Le minéral le plus dominant identifié était le quartz ; Parmi les minéraux argileux, les minérales illites étaient les plus dominants, tandis que les alluvions sont principalement composées de quartz, de calcite et de smectite (montmorillonite). Les résultats de l'analyse par diffractométrie aux rayons X des argiles présentes dans les formations (Figure VII.41,42) ont montré une prédominance de quartz, d'illite et une faible quantité de kaolinite et de calcite. La dolomite est absente dans les matériaux alluvionnaires, alors qu'elle est présente sous forme de traces dans les matériaux du glissement de terrain.

Les sols étaient principalement de couleur jaune rougeâtre, de texture variable (argile limoneuse - argile limono-argileuse et limon argileux) et de plasticité moyenne. Comparés aux sols d'autres parties du monde, ils se sont développés sur des cônes volcaniques ou associés à un glissement de terrain. Bien que les caractéristiques physiques suggèrent que les sols ne sont pas dans un état critique, les activités humaines en cours peuvent améliorer les conditions climatiques en profondeur et, en définitive, modifier les caractéristiques physiques des sols actuels pour les rendre critiques. Les formations flush caractérisées par un pourcentage élevé d'argile ou de marne sont déboisées et labourées par les agriculteurs locaux. Le travail de ces terres les rend, en plus de leur lessivage et de leur érosion, moins consolidées et plus perméables, et donc vulnérables aux glissements de terrain.

L'analyse de la minéralogie qualitative nous a permis de regrouper les échantillons en groupe comme suit :

Tableau VII. 18 : Regroupements des argiles dominants dans la zone d'étude

<b>Regroupements possibles selon les espèces argileuses dominantes</b>	
1/	Kaolinite
	KH01, KH20
2/	Interstratifié smectite/illite
	KH03
3/	Interstratifié smectite/illite et chlorite/smectite
	KH07
4a/	chlorite
	KH10, KH13, KH19
4b/	chlorite + Interstratifié chlorite/smectite

C/S Interstratifié chlorite/smectite

C chlorite

S/I Interstratifié smectite/illite

I/S Interstratifié illite/smectite

I illite

K kaolinite

Tableau VII. 19 : Minéralogie qualitative des argiles par DRX

<b>Minéralogie qualitative</b>						
<b>Minéraux argileux</b>						
	<b>C/S</b>	<b>C</b>	<b>S/I</b>	<b>I/S</b>	<b>I</b>	<b>K</b>
KH-01				+	++++	+++++
KH-03	+	+	+++++		++	+
KH-07	+++	+	+++		++	+
KH-10		+++		+	+++++	tr
KH-13		+++		+	+++++	
KH-15	+++	++	+		++++	
KH-17	++	+++		+	++++	
KH-19		++		+	+++++	
KH-20				tr	++++	++++
KH-23	++	+++			++++	

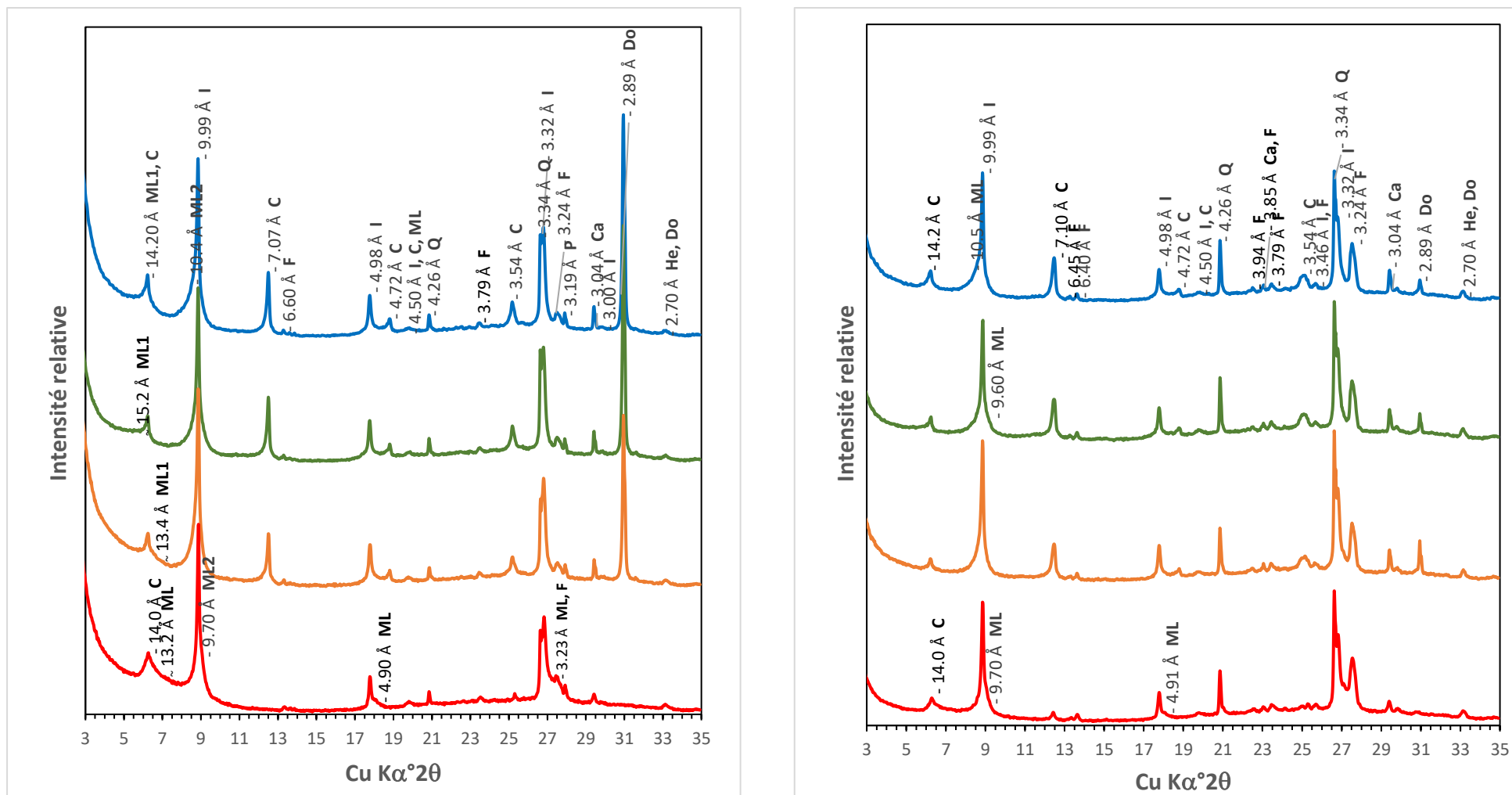


Figure VII. 40: Diffractogrammes de préparation orientée séchée à l'air (1), glycolée (2), chauffée à 350°C (3) et 550°C (4) de l'échantillon KH-1 et KH 10 Minéraux : (Ca) Calcite, (Do) Dolomite, (F) Feldspath-K, (He) Hématite, (I) Illite, (ML) Interstratifié type illite/smectite, Q) Quartz.



### **II.3.3. Relation entre la susceptibilité aux glissements de terrain et l'analyse géotechnique et minéralogique**

De nombreux glissements de terrain sont survenus dans la zone d'étude en raison des fortes précipitations, de la nature argileuse et marneuse des rochers affleurants et des vallées associées aux pentes abruptes (El Jazouli, Barakat et al. 2019). Une enquête générale sur le terrain a révélé qu'environ 51 glissements de terrain ont eu lieu dans cette région au cours de cette période. Sur la base des résultats de l'enquête générale sur le terrain, une zone présentant une forte fréquence de susceptibilité aux glissements de terrain a été sélectionnée pour une enquête plus détaillée. Une étude de terrain détaillée a été réalisée pour 10 glissements de terrain. Les matériaux du sol sont friables et ont une texture à grain grossier de taille moyenne et se caractérisent par l'emplacement perturbé de gros blocs de calcaire (El Jazouli, Barakat et al. 2019).

Comme l'indique également la carte de susceptibilité aux glissements de terrain intégrant huit facteurs liés aux glissements de terrain produits à l'aide de l'AHP (El jazouli, Barakat et al.2019), les glissements de terrain affectent principalement les formations argileuses situées sur les pentes abruptes du lit d'une rivière. Les formations affleurantes caractérisées par un pourcentage élevé d'argile ou de marnes sont déboisées et labourées par les agriculteurs locaux. Les roches carbonatées et de grès, qui ont une résistance mécanique élevée, ont présenté des densités sans valeur de glissements de terrain. Cependant, ils sont modérément impliqués dans les glissements de terrain lorsqu'ils forment un substrat incliné de formations argileuses et marneuses, validés par les limites de DRX et d'Atterberg.

Les modifications de la couverture terrestre, en particulier la végétation, constituent un paramètre important affectant les ruptures de talus (Jazouli, Barakat et al. 2019).

Cette étude a montré que les paramètres de résistance au cisaillement diminuaient avec l'augmentation de la teneur en humidité et que le nombre de glissements de terrain augmentait par rapport à la distribution granulométrique de l'argile.

Les glissements de terrain se sont produits principalement dans des unités de schistes marneux recouvertes de dépôts de sol non consolidés et dans des zones comportant des lignes de drainage touchées par l'érosion et le ravinement.

## II.4. Conclusion

Une grande variété de facteurs contribue à la susceptibilité aux glissements de terrain. Ils sont généralement liés à la lithologie, à la pente, à l'aspect, à l'altitude, à la couverture végétale, aux discontinuités, à l'emplacement des rivières et des routes. Bien que ces facteurs varient d'une région à l'autre, leur effet est connu dans une certaine mesure et ne montre pas de grandes variations en dehors de la géologie. L'un des principaux défauts des études sur les glissements de terrain appliquées à l'échelle régionale est que le paramètre de lithologie est déterminé avec une approche très générale. En d'autres termes, ces études classent les unités en fonction de leurs noms en termes géologiques et les relient à la susceptibilité aux glissements de terrain. Cependant, il s'agit d'une approche plutôt grossière, ces variations d'unités ayant des effets différents sur les glissements de terrain. Les unités lithologiques ne pouvaient pas conserver les propriétés principales de discontinuité, d'élasticité, de résistance, etc. Pour cette raison, les unités présentaient différents degrés de vieillissement. Sous l'action de l'eau, la déformation mécanique des argiles constituant la fraction dominante des formations géologiques de la pente en est la cause principale. La richesse de ces argiles en kaolinite, smectite et illite au fort pouvoir absorbant de l'eau a augmenté la déformation mécanique. C'est une source d'effet différent des glissements de terrain. Notre étude peut être considérée comme une première tentative pour lier des caractérisations géotechniques simples de glissements de terrain en argile à une minéralisation en argile en utilisant des tests de limites XRD et Atterberg pour appuyer la classification des sols par DRX. Il ouvre des perspectives prometteuses pour la surveillance des glissements de terrain et suggère que des mesures pourraient être utilisées pour évaluer les conditions des matériaux argileux déclenchant des glissements de terrain.

Alternativement, ces résultats mettent en évidence la valeur potentielle de l'étude géotechnique sur la susceptibilité aux glissements de terrain dans le haut bassin de la rivière Oum Er Rbia pour mieux comprendre les sols argileux, ce qui considère la cause principale du déclenchement des glissements de terrain.

**CONCLUSION GÉNÉRALE**  
**ET**  
**RECOMMANDATIONS**

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'étude a été menée dans le haut bassin d'Oum Er Rbia, dans la province de Khenifra, au sud-ouest du Moyen Atlas. Le bassin étudié est délimité à l'ouest par le Massif central hercynien, au nord par le causse d'Ajdir et au sud-est par la plaine de la Haute Moulouya. Il occupe une superficie de 3 612,21 km<sup>2</sup>, qui se trouve entièrement dans le terrain montagneux avec une diversité de reliefs, de caractéristiques structurelles, de dépressions fermées, de ravins et de formes d'accumulation représentées par des terrasses alluviales. La variation d'altitude de la zone est comprise entre 662 et 2400 m.

Le haut bassin d'Oum Er Rbia fait partie du Moyen Atlas et du Massif central. Selon les cartes géologiques de Rabat (1976) à l'échelle 1/500 000, les formations géologiques de la région sont composées principalement de formations calcaires subtabulaires crétacées, de calcaires dolomitiques liasiques, de basaltes doléritiques et d'argiles rouges, ainsi que de mouches et de quartzites paléozoïques. De nombreux types de sols ont été formés à partir de nombreux types de sols, tels que les sols alluviaux et colluviaux (plus fréquents), les vertisols, les sols calcimagnétiques et les sols isohumiques très profonds concentrés dans les vallées et les zones plates, et les sols fersiallitiques dans les régions antiques, terrasses ou forêts. La présence de vallées profondes associées à des pentes abruptes, l'exposition à de fortes précipitations et l'argile et la marlynature des rochers affleurants constituent des atouts importants.

Le problème de l'érosion des sols abordé au travers de l'équation de Wischmeier & Smith s'applique aisément au Systèmes d'Information Géographique par la comptabilité entre l'USLE et l'algèbre de carte : chaque facteur est une couche qui après multiplication avec les autres donne une solution générale renseignant sur un risque d'érosion ou une érodibilité. En revanche, l'intégration du modèle dans un SIG présente beaucoup d'avantages, surtout ceux liés au grand nombre de résultats relatifs aux facteurs impliqués dans le processus de l'érosion. Le SIG permet de gérer d'une façon rationnelle une multitude de données relatives aux différents facteurs de la dégradation des sols, ce qui nous a permis de conclure que les facteurs essentiels dans la zone d'étude, en plus d'autres, sont l'érodibilité des sols, la pente et le couvert végétal. Le SIG permet également l'enrichissement et l'actualisation permanente et offre la possibilité d'une mise à jour continue de la base de données.

La première carte de perte en sol du sous bassin de l'oued Ikkour ainsi que les cartes des risques d'érosion du bassin versant du haut Oum Er Rbia obtenues mettent en exergue les pertes

de terres déterminées dans ce bassin résultent de l'interaction des différents facteurs qui se conjuguent pour accélérer de l'érosion.

Cette quantification montre l'ampleur du phénomène d'érosion résultant de différents facteurs: les précipitations irrégulières et parfois violentes, la nature lithologique très sensible du terrain couvrant 33,6 % sous forme d'argiles rouges et basaltes doléritiques triasiques, l'érodibilité des sols (presque la majorité de la zone étudiée présente une érodibilité modérée), l'importance des pentes, le couvert végétal souvent réduit à cause des conditions climatiques défavorables et des actions anthropiques. L'érosion moyenne comprise entre 7 et 25 t/ha/an représente 15,9% de la superficie totale du bassin alors que l'érosion très forte dépassant 400 t/ha/an touche 69,4%. Ainsi, les pertes en sol au niveau du bassin versant de l'oued Srou sont très importantes (Loukili, 2009, El Hmaidi et al., 2012).

La région montre six classes de sol, il s'agit de sols :

- Sols peu évolués qui sont les plus abondants, de profondeur variable, souvent caillouteux et pauvre en matière organique
- des minéraux bruts, caractérisés par une composition minéralogique proche de celle de la roche-mère et une très faible teneur en matière organique, présente sous forme d'affleurements tendre (régosol) et dur (lithosol),
- des calcimagnésiques, sols à profil calcaire et humifère, très variables en fonction de la pente, le relief et l'exposition,
- des vertisols, caractérisés par une forte teneur en argile, assez profonds et à texture fine,
- des fersiallitiques, définis par la présence de minéraux argileux d'oxyhydroxydes de fer libre, ils sont assez profonds et à texture variable,
- des isohumiques, ils sont très limités dans le secteur d'étude, à texture fine, profonds, ils se distinguent par leur richesse en matière organique.

Le cours supérieur de l'oued Srou présente des sols originaires de coulées de solifluxion et de couverture colluviale.

La cartographie de l'occupation des sols dans la zone d'étude a été réalisée à partir de la réalité de terrain et de la classification des images satellitaires OLI et Sentinel 2. La photo-interprétation des images de Google Earth et des missions de terrain ont été effectuée aussi pour valider les cartes finales. L'évaluation de résultats des classifications a été faite à partir de la matrice de confusion qui nous a permis de calculer les indices Kappa 0,93 comme résultat de

la confusion entre les cartes d'occupation du sol issues des images satellitaires et celle de la réalité de terrain). Ces dernières indiquent que les classifications sont de bonne qualité. Un Kappa de 93 signifie que 93% des bonnes classifications ne sont pas dus au hasard.

Les observations faites ont permis de ressortir que l'érosion hydrique et les glissements de terrain sont omniprésents et visibles dans l'ensemble du bassin versant du haut d'Oum Er Rbia. Les versants subissent une érosion plus forte alors que l'érosion réduite s'observe sur les replats et dans les vallées alluviales, liée au transport dynamique de l'eau dans les différents faciès. Cette étude a permis de construire un diagnostic des problèmes de l'érosion et de sa gravité dans la zone d'étude, traversée par plusieurs entailles fluviales. Celles-ci se connectent aux principaux cours d'eau, en l'occurrence Srou, chbouka et Oum Er Rbia.

Le haut bassin d'Oum Er Rbia est sujet aux glissements de terrain en raison de son environnement géologique et géomorphologique. Dans cette étude, la relation spatiale entre les occurrences de glissements de terrain et les facteurs de causalité, notamment l'élévation, le degré de la pente, l'aspect de la pente, la lithologie, l'utilisation / la couverture du sol, la distance au réseau de drainage, les routes et les failles ont été évaluées à l'aide de techniques AHP et SIG a été mis en évidence. La performance du modèle a été validée à l'aide de 30% des données de glissements de terrain cartographiées par des enquêtes sur le terrain à l'aide de tracés AUC. La carte de sensibilité aux glissements de terrain a été classée selon la méthode de la fracturation naturelle en cinq classes d'une superficie de 30,16%, 12,66%, 25,75%, 22,59% et 9,11% de la superficie totale de l'étude, pour les très faibles, faibles, modérées, élevées et très faibles, respectivement.

En guise de conclusion, mis à part les paramètres d'ordre naturel, l'intervention humaine, dans les processus de l'érosion, joue un rôle très important en tant qu'un facteur anthropique. La dégradation des zones à végétation naturelle et les activités agricoles intenses, souvent traditionnelles et sans aucunes pratiques, ont participé à l'augmentation des risques d'érosion dans la région et l'intensification des pertes en sols.

Ce travail a permis donc de mettre en exergue l'apport de l'approche spatialisée à la modélisation des bassins versants en s'appuyant sur les avantages offerts par la nouvelle technologie à référence spatiale pour l'alimentation des modèles par des données d'entrées comme la télédétection et les fonctionnalités des SIG.

## RECOMMANDATIONS

La mise en œuvre de recommandations appropriées est fort souhaitable pour réduire les dégâts causés par la dégradation des terres qu'elle soit naturelle ou anthropique par :

- Une sensibilisation des agriculteurs en leur expliquant les problèmes de la dégradation des terres, leur cause et les méthodes de correction (technique de culture suivant les courbes de niveau, type de culture...etc),
- Un suivi de parcelles expérimentales de mesure de l'érosion hydrique, dont l'implantation devrait tenir compte de toutes les formes de dégradation est fort souhaitable dans la région afin de mieux préserver les terres,
- Un arrêt du défrichement et du déboisement, une amélioration de l'infiltration de l'eau par apport de fertilisant, des plantations d'arbres et de plantes adaptables aux types de sols afin d'améliorer la teneur d'eau dans les sols et de réduire les glissements de terrain. Elwell (1981) a trouvé qu'il suffisait de couvrir 40 % du sol par des cultures pour réduire l'érosion de 80 % sur des oxysols au Zimbabwe),
- Des cultures en terrasses, l'installation de systèmes de protection (murs en gabions, murettes, endiguement, fossés pour la collecte des eaux de ruissèlement et leur dérivation vers des exutoires naturels ou aménagés loin des zones cultivées...etc),
- L'aménagement des ravins afin de limiter leur creusement et leur évolution vers l'amont par l'érosion régressive.

La majorité des méthodes de lutte antiérosive réduisent le ruissèlement, mais sont sans effet sur l'énergie des pluies et la dégradation des terres et de leur fertilité. La dégradation des terres est un problème qui a des retombés socioéconomiques à l'échelle locale, régionale et nationale. La résolution de ce problème nécessite une méthodologie, un programme de recherches et des expérimentations locales pour une bonne évaluation des facteurs d'érosion.

Enfin, sur la base du présent travail qui a délimité, à échelle moyenne, les zones à risque d'érosion hydrique, du glissements de terrain et les facteurs déterminants de la dégradation des terres, le choix d'une zone à analyser en détail à grande échelle qui devrait constituer une zone de référence représentative de l'ensemble du bassin versant s'impose pour affiner les résultats et pour délimiter les zones les plus exposées aux risques d'érosion afin de protéger le milieu naturel, d'éviter la pollution de l'eau, l'envasement du barrage Ahmed El Hansali, situé à l'aval du bassin et de limiter les flux de migration de la population. On peut citer par la suite quelques aménagements antiérosifs et leurs définitions.

## **Définition des aménagements antiérosifs proposés à utiliser dans la région d'étude**

Les aménagements proposés répondent aux exigences techniques et proviennent des recherches bibliographiques, mais aussi des idées de la population de la région et des intervenants agricoles et environnementaux.

### a) Aménagement des versants

**Cordons en pierres sèches :** Ce sont des murets en pierres sèches confectionnés et disposés suivant les courbes de niveau. Derrière cet obstacle perméable, les eaux de ruissellement et les travaux du sol accumulent progressivement des sédiments sur lesquels vont se développer des arbres de consolidation (arbres arboricoles ou arbustes fourragers). C'est une technique moins coûteuse, qui contribue aux ralentissements des ruissellements et au piégeage des sédiments, tout en servant au nettoyage des terrains des pierres.

**Bandes enherbées :** Ce sont des bandes de cultures pérennes (espèces fourragères, etc.) plantées en courbes de niveau afin de fractionner la longueur de la pente et ainsi diminuer l'énergie générée par les ruissellements qui arrachent les particules des sols.

**Les traitements des cours d'eau :** Les traitements des cours d'eau constituent sans doute dans le scénario antiérosif la mesure la plus importante, car le ravinement est la forme d'érosion la plus intense et la plus grave dans la zone à l'étude. Outre qu'ils freinent les ravinements, ils permettent la recharge de la nappe de la région et de gagner d'autres superficies très utiles susceptibles d'être exploitées par des plantations arboricoles par le remblaiement progressif des ravins.

**Les seuils en pierres sèches :** Ces ouvrages permettent d'arrêter l'érosion latérale provoquée par les crues et de stabiliser les lits des ravins érodés par le creusement vertical. Il s'agit d'ouvrages filtrants qui servent à piéger les sédiments et à ralentir le ruissellement.

**Les seuils en gabions :** Ce sont des ouvrages filtrants implantés transversalement dans les lits des ravins. Ils servent à ralentir les ruissellements et permettent la rétention d'une grande partie des sédiments.

# **RÉFÉRENCES**

## **BIBLIOGRAPHIQUES**

- Ait Fora (1995) Spatial modeling of water erosion in a Moroccan Rif watershed: validation of the geomatic approach by sedimentology, radioactive tracers and magnetic susceptibility of sediments. PhD Thesis, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- Al Karkouri J. (2003). Dégénération du milieu naturel dans le bassin de Beni Boufrah (Rif central-Maroc) : analyse des facteurs et des processus, essai de quantification et modélisation spatiale. Thèse d'État, Univ. Mohammed V, Fac. Lett. Rabat, 392 p.
- Althuwaynee, O.F., and B. Pradhan. 2016. Semi-quantitative landslide risk assessment using GIS-based exposure analysis in Kuala Lumpur City. *Geomatics Natural Hazards & Risk* 8(2): 1–27.
- Althuwaynee, O. F., et al. (2014). "Estimation of rainfall threshold and its use in landslide hazard mapping of Kuala Lumpur metropolitan and surrounding areas." *Landslides* 12(5): 861-875.
- Alimohammadlou, Y., et al. (2014). "Estimation of rainfall-induced landslides using ANN and fuzzy clustering methods: a case study in Saen Slope, Azerbaijan province, Iran." 120: 149-162.
- Amadesi, E. & Vianello, G. (1978) Nuova guida alla realizzazione di una carta della stabilità dei versanti. *Memorie Società Geologica Italiana*, 19: 53–60
- Andriani, G. F., Diprizio, G., & Pellegrini, V. (2015). Landslide susceptibility of the La Catola Torrent catchment area (Daunia Apennines, southern Italy): a new complex multi-step approach. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 5* (pp. 387-392). Springer, Cham.
- Atkinson, P.M. & Massari, R. (2011) Autologistic modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy. *Geomorphology*, 130 (1): 55–64.
- Ayalew, L. & Yamagishi, H. (2005) The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65 (1) :
- Arabi M. 1991 - Influence de quatre systèmes de production sur le ruissèlement et l'érosion en milieu montagnard méditerranéen (Médéa, Algérie). Thèse géographie, univ. Grenoble, 272 p.
- Arnold J. G., Srinivasan R., Muttiah R. S. et al. (1998). Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34 (1), 73-89.
- Avenard (1965). "L'érosion actuelle dans le bassin de Sebou." *INRA-Rabat*: 114p
- Barakat, A., Meddah, R., Afdali, M., & Touhami, F. (2018). Physicochemical and microbial assessment of spring water quality for drinking supply in Piedmont of Béni-Mellal Atlas (Morocco). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. doi: 10.1016/j.pce.2018.01.006.
- Barakat, A., El Baghdadi, M., Rais, J., Aghezzaf, B., & Slassi, M. (2016). Assessment of spatial and seasonal water quality variation of Oum Er Rbia River (Morocco) using multivariate statistical techniques. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(4), 284-292.
- Basharat, M., Shah, H. R., & Hameed, N. (2016). Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from NW Himalayas, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4), 292

- Bastola, S., Dialynas, Y. G., Bras, R. L., Noto, L. V., & Istanbuluoglu, E. (2018). The role of vegetation on gully erosion stabilization at a severely degraded landscape: A case study from Calhoun Experimental Critical Zone Observatory. *Geomorphology*, 308, 25-39.
- Beguería, S. (2006) Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*, 37 (3) : 315–329.
- Benmansour, M., Mabit, L., Nouira, A., Moussadek, R., Bouksirate, H., Duchemin, M., & Benkdad, A. (2013). Assessment of soil erosion and deposition rates in a Moroccan agricultural field using fallout  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$ . *Journal of environmental radioactivity*, 115, 97-106.
- Beydoun, Z. (1977). "Petroleum prospects of Lebanon : reevaluation." *AAPG Bulletin* 61(1): 43-64.
- Beuselinck, L., Hairsine, P. B., Govers, G., & Poesen, J. (2002). Evaluating a single-class net deposition equation in overland flow conditions. *Water Resources Research*, 38(7).
- Blanco, P. D., Hardtke, L. A., Rostagno, C. M., del Valle, H. F., & Metternicht, G. I. (2017). Soil Degradation in Peninsula Valdes: Causes, Factors, Processes, and Assessment Methods. *Late Cenozoic of Península Valdés, Patagonia, Argentina*, Springer : 191-213.
- Breckling, B., Reuter, H., Middelhoff, U., Glemnitz, M., Wurbs, A., Schmidt, G., ... & Windhorst, W. (2011). Risk indication of genetically modified organisms (GMO): Modelling environmental exposure and dispersal across different scales: Oilseed rape in Northern Germany as an integrated case study. *Ecological Indicators*, 11(4), 936-941.
- Bonham-Carter, G. (1994) *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Pergamon press. 416p.
- Borst H.L., Woodburd R., 1940. Rain simulator studies of slop on erosion and runoff. USDA, soil conservation, p : 30.
- Bunzl K., Kracke W. (1988). Cumulative deposition of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  from global fallout in soils from forest, grassland and arable land in Bavaria. *Journal of Environmental Radioactivity*, 8, 114p.
- Brabb, E.E. (1984) Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. In : IV International Symposium on Landslides (1) : 307-323.
- Brabb, E., Malgot, J. & Mahr, T. (1979) Engineering geological mapping of the West Carpathian landslide areas. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 19 (1) : 116–121.
- Carrara, A., Catalano, E., Reali, C. & Sorriso-Valvo, M. (1979) Computer-assisted techniques for regional landslide evaluation. In: *Proceedings of Polish-Italian Seminar on Superficial Mass Movement in Mountain Regions*, Szymbark : 47–62
- Carrière, S. R., et al. (2018). "Rheological properties of clayey soils originating from flow-like landslides." *Landslides* 15(8): 1615-1630.
- Casagrande, A. (1948). "Classification and identification of soils." *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 113: 901-930.
- Cascini, L., Bonnard, C., Corominas, J., Jibson, R. & Montero-Olarte, J. (2005) Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development. In Hungr O, Fell R, Couture R, Eberhardt E (eds) *Landslide risk management*. Balkema pp. 199–235.
- Castellanos Abella, E. (2008) Multi-scale landslide risk assessment in Cuba. International Institute for Geo-information Science and. Earth Observation, Enschede, The Netherlands.

- Catani, F., Casagli, N., Ermini, L., Righini, G., & Menduni, G. (2005). Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River basin. *Landslides*, 2(4), 329–342. doi:10.1007/s10346-005-0021-0
- Chacón, J., Irigaray, C., Fernandez, T. & El Hamdouni, R. (2006) Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65 (4) : 341–411.
- Chaplot, V., and Bissonnais Y. L. (2000). Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes, *Earth Surf. Processes and Landforms*, 25 (2), 145–153.
- Congedo, L. (2016). Semi-automatic classification plugin documentation. Release, 4(29), 1–266. doi:10.13140/RG.2.2.29474.02242/1
- Corominas, J. & Mavrouli, O. (2012) Comparison of landslide hazard and risk assessment practices in Europe. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. p.8557.
- Cruden, D. M. , (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 43(1), 27-29.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. *Landslides: investigation and mitigation*, 247, 36-75.
- Chmelová, R., & Sarapatka, B. (2002). Soil erosion by water: Contemporary research methods and their use. *Geographica*, 37, 23-30.
- Crozier, M. J., & Glade, T. (2010). Hazard assessment for risk analysis and risk management. In *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention* (Alcántara-Ayala Irasema and Goudie Andrew, pp. 221–232). Cambridge University Press.
- Dai, F.C. & Lee, C.F. (2001) Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system: a case study. *Canadian Geotechnical Journal*, 38 (5) : 911–923.
- Daoudi, L., Knidiri, A., El Idrissi, H. E. B., Rhouta, B., & Fagel, N. (2015). Role of the texture of fibrous clay minerals in the plasticity behavior of host materials (Plateau du Kik, Western High Atlas, Morocco). *Applied Clay Science*, 118, 283-289
- Das, B. M. (2002). " Principles of Geotechnical Engineering (5th Ed) Thompson leanings." California state University, Sacramento
- Davis, S., & Deweist, R. (1966). "Hydrogeology," John Willey and Sons Ltd., Chichester, 463 p
- Daghmoumi R. (1994) Contribution of geology and GIS to the study of the watersheds of Aoudour (Central Rif). Thesis 3rd cycle, Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 162 p.
- Dautrebande, S., & Sohier, C. (2006). L'érosion hydrique et les pertes en sols agricoles en Région wallonne. Rapport analytique 2006 sur l'état de l'environnement wallon.
- Deer, W. A., Howie, R.A., & Zussman, J. (1992). "An introduction to The Rock Forming Minerals. " (2nd Ed) England: Pearson, Prentice Hall.
- Delacourt, C., (2004). Velocity field of the "La Clapière" landslide measured by the correlation of aerial and QuickBird satellite images. *Geophys. Res. Lett.* 31.
- Delhoume J.P. (1987). Ruissellement et érosion en bioclimat méditerranéen semi-aride de Tunisie Centrale. In << Processus et mesures de l'érosion >> Edn.CNRS, Paris : 487-507.
- Delhumeau M. (1981). Etude de la dynamique de l'eau sur parcelles du bassin de l'Oued Sidi Ben Naceur, Nord Tunisie. Rapport ORSTOM Tunis, 80 p.

- Diko, M.L., Banyini, S.C. & Monareng, B.F., (2014), 'Landslide susceptibility on selected slopes in Dzanani, Limpopo Province, South Africa', *Jàmbá: Journal of Disaster Risk Studies* 6(1), Art. #101, 7 pages. [http:// dx.doi.org/10.4102/jamba.v6i1.101](http://dx.doi.org/10.4102/jamba.v6i1.101)
- Du, G.-l., et al. (2017). "Landslide susceptibility mapping using an integrated model of information value method and logistic regression in the Bailongjiang watershed, Gansu Province, China." *Journal of Mountain Science* 14(2): 249-268
- Ekosse, G.E., Ngole, V., Sendze, Y. & Ayonghe, S.N., (2005), 'Environmental mineralogy of unconsolidated surface sediments associated with the 2001 landslides on volcanic cones, Mabeta New Layout, Limbe, Cameroon', *Global Journal of Environmental Studies* 4(2), 115–122.
- El Bouqdaoui, K. (2007). Methodological approach to evaluate the potential risk of soil erosion in the Srou watershed (Moyen Atlas, Morocco) using remote sensing and GIS.
- El Jazouli, A., Barakat, A., & Khellouk, R. (2019). GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). *Geoenvironmental Disasters*, 6(1), 3.
- El Jazouli, A., Barakat, A., Khellouk, R., Rais, J., & El Baghdadi, M. (2019). Remote sensing and GIS techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the Oum Er Rbia River (Morocco). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 13, 361-374.
- El Yadari, H., Chikhaoui, M., Naimi, M., Sabir, M., & Raclot, D. (2019). Techniques de conservation des eaux et des sols au Maroc: Aperçu et perspectives. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 7(2).
- Erb, K. H., Luysaert, S., Meyfroidt, P., Pongratz, J., Don, A., Kloster, S., ... & Haberl, H. (2017). Land management: data availability and process understanding for global change studies. *Global change biology*, 23(2), 512-533.
- Ercanoglu, M. & Gokceoglu, C. (2002) Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environmental Geology*, 41 (6) : 720–730.
- Ercanoglu, M. (2008). An overview on the Landslide susceptibility assessment Techniques. In *Environment and geoscience proceedings of the 1st WSEAS international conference on environmental and geological science and engineering (EG'08)* (pp. 131–134). Malta: WSEAS (Organization).
- Fall, M. & Sarr, M.A., 2007, 'Geotechnical characterization of expansive soils and their implications in ground movements in Dakar', *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 66, 279–288. <http://dx.doi.org/10.1007/s10064-006-0070-1>
- FAO: Food and Agriculture Organisation. (1990). Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides. Rome, *Bulletin pédologique*, n° 57, 182 p.
- FAO, (1990). "Erosion Mapping Using High Resolution Satellite Data and Geographic Information System. Pilot Study in the State of Parana, Brasil," Remote Sensing Center, Rome, 147 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization) (1977) Assessing Soil Degradation. *FAO Soil Bulletin*, 34, 83 p. <http://www.fao.org/3/a-ar114e.pdf>
- Ferreira, V., & Panagopoulos, T. (2014). Seasonality of soil erosion under Mediterranean conditions at the Alqueva dam watershed. *Environ Manag* 54(2014):67–83. doi:10.1007/s00267-014-0281-3

- Flanagan D.C., Nearing M.A. (1995). USDA-Water Erosion Prediction project: Hill slope profile and watershed model documentation, NSERLR eport no. 10 USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette. IN, 47097-1196
- Ganasri, B.P., Ramesh, H., (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers* 7, 953–961. doi: 10.1016/j.gsf.2015.10.007
- Gashaw T, Tulu T, Argaw M, Worqlul AW (2017) Evaluation and prediction of land use/land cover changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Environ Syst Res* 6(1) :17
- Gidey, E., Dikinya, O., Sebego, R., Segosebe, E., & Zenebe, A. (2017). Cellular automata and Markov Chain (CA\_Markov) model-based predictions of future land use and land cover scenarios (2015–2033) in Raya, northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-18.
- Glade, T. & Crozier, M.J. (2005) A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. *In* :Glade, T., Anderson, M. G., Crozier, M. (eds), *Landslide hazard and risk* : 75–138.
- Gougazeh, M. and A. Al-Shabatat (2018). "Geological and geotechnical properties of soil materials at Tannur dam, Wadi Al Hasa, South Jordan." *Journal of Taibah University for Science* 7(4): 216-224.
- Gourley, C. S., Newill, D. & Schreiner, H.D (1993). " Expansive soil: TRL’s research strategy, in Fookes, P.G., and Parry, R.H.G., eds." *First International Symposium on Engineering Characteristics of Arid Soils*, Volume PA1301/93:City University, London, July 5-8, Overseas Center, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK: 247-260.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181–216. doi:10.1016/S0169-555X(99)00078-1
- Guzzetti, F. (2006) *Landslide hazard and risk assessment*. Universitäts und Landesbibliothek Bonn. 373p.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. T. (2008). *The landslide handbook: a guide to understanding landslides* (p. 1325). Reston, VA, USA: US Geological Survey.
- Hingray, Benoît, Cécile Picouet, and André Musy (2009). *Hydrologie 2-Une science pour l'ingénieur*. Vol. 21. PPUR presses polytechniques
- Heusch B., (1986) : Cinquante ans de banquettes de DRS-CES en Afrique du Nord, Un bilan, *Cah Orstom Sér Pédol*, 22 : 153-162.
- Hervás, J., & Bobrowsky, P. (2009). Mapping: Inventories, Susceptibility, Hazard and Risk. In K. Sassa & P. Canuti (Eds.), *Landslides – Disaster Risk Reduction* (Vol. 19, pp. 321–349). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-69970-5\_19
- Horn, G. F. J. S., J.H. (1998). "Clay in The mineral resources of South Africa (M.G.C. Wilson and C.R. Anhaeusser, eds): ." *Handbook, Council for Geoscience* 16: 106 -135.
- Hungr O, L. S., Picarelli L (2014). "The Varnes classification of landslide types, an update." *Landslides* 11(2):167–194.
- Hong, H., Ilia, I., Tsangaratos, P., Chen, W., & Xu, C. (2017). A hybrid fuzzy weight of evidence method in landslide susceptibility analysis on the Wuyuan area, China. *Geomorphology*, 290, 1-16.

- Hong, H., Pradhan, B., Xu, C., & Bui, D. T. (2015). Spatial prediction of landslide hazard at the Yihuang area (China) using two-class kernel logistic regression, alternating decision tree and support vector machines. *Catena*, 133, 266-281.
- Ibrahimi, S., (2005) : « Application du <sup>210</sup>Pb comme une alternative à l'utilisation du <sup>137</sup>Cs pour l'étude de la redistribution du sol sur des transects cultivés et non cultivés « Bassin versants El Hachef et Raouz, nord du Maroc ». Thèse présentée pour l'obtention du doctorat en Sciences, Université Abdelmalek Essaadi, Tanger, Maroc.
- Ibrahimi, S., Damnati, B., Radakovitch, O., Hassouni, K., & Simon, B. (2005). Using conversion models to estimate soil erosion and deposition rates, from the <sup>137</sup>Cs measurements in cultivated soils (north Morocco). *Revista de la Sociedad Geologica de Espana*, 18(3-4), 217-224.
- Kalantar, B., Pradhan, B., Naghibi, S. A., Motevalli, A., & Mansor, S. (2018). Assessment of the effects of training data selection on the landslide susceptibility mapping: a comparison between support vector machine (SVM), logistic regression (LR) and artificial neural networks (ANN). *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 49-69.
- Kanungo, D.P., Arora, M.K., Sarkar, S. & Gupta, R.P. (2012) Landslide Susceptibility Zonation (LSZ) Mapping : a review. *Journal of South Asia Disaster Studies* 2 (1) : 81–105
- Kavian, A., Hoseinpour Sabet, S., Solaimani, K., & Jafari, B. (2017). Simulating the effects of land use changes on soil erosion using RUSLE model. *Geocarto International*, 32(1), 97-111.
- Kienholz, H. (1978) Maps of geomorphology and natural hazards of Grindelwald, Switzerland : scale : 10,000. *Arctic and Alpine Research*, 10 (2): 169–184.
- Klimsiak, T. (2016). Right Markov processes and systems of semilinear equations with measure data. *Potential Analysis*, 44(2), 373-399
- Kumar, D., Thakur, M., Dubey, C. S., & Shukla, D. P. (2017). Landslide susceptibility mapping & prediction using support vector machine for Mandakini River Basin, Garhwal Himalaya, India. *Geomorphology*, 295, 115-125.
- Laabari, J. E. (1993). [Integration of the universal soil loss equation in the geographic information system in order to map erosion factors and its intensity in the subwatershed of the watershed of Aoulouz].
- Lahlou A. (1997). Specific degradation of watersheds in Morocco. Report No. 1000. Ministry of Equipment and National Promotion, Directorate of Hydraulics, Operations Division, Water Management Department, Rabat, Morocco
- Lazzari, M., Gioia, D., Piccarreta, M., Danese, M., Lanorte, A., (2015). Sediment yield and erosion rate estimation in the mountain catchments of the Camastra artificial reservoir (Southern Italy): A comparison between different empirical methods. *Catena* 127, 323–339.
- Leh, M., Bajwa, S., & Chaubey, I. (2013). Impact of land use change on erosion risk: an integrated remote sensing, geographic information system and modeling methodology. *Land Degradation & Development*, 24(5), 409-421.
- Liao, K., Xu, S., Wu, J., & Zhu, Q. (2013). Spatial estimation of surface soil texture using remote sensing data. *Soil science and plant nutrition*, 59(4), 488-500.
- Liu, Y. S., Wang, J. Y., & Long, H. L. (2010). Analysis of arable land loss and its impact on rural sustainability in Southern Jiangsu Province of China. *Journal of Environmental Management*, 91(3), 646-653.

- Ludwing B., Auzet A.V., Boiffin J., King D. and Chadoeuf J., (1996). Etat de surface, structure hydrographique et érosion en rigole des bassins versants cultivés du Nord de la France. *Revue d'Etude et Gestion des Sols*, Vol. 3, N°1 ; p. 53-70.
- Malet, J.P. & Maquaire, O. (2008) Risk assessment methods of landslides. *Ramsoil, risk assessment methodologies for soil threats*, Sixth Framework Programme, Project Report 2.2. 29p
- Mayer L.D, Harmon W.C., (1992). Interrill runoff and erosion effects of sideslop shape, rain energy and rain intensity. *Am. Soc. Agr. Eng. Trans* 35, p1199-1203.
- Mas, J. F., Kolb, M., Paegelow, M., Olmedo, M. T. C., & Houet, T. (2014). Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environmental Modelling & Software*, 51, 94-111.
- Millward A., Mersey JE. (1999). Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. *Catena*, 38, 109-129.
- Mitchell, J. K. (1993). " Fundamentals of Soil Behavior, New York." John Wiley & Son, Inc.
- Moukhchane, M. (1999). Quantification de l'érosion par le <sup>137</sup>Cs et le <sup>210</sup>Pb en excès : cas d'une parcelle au niveau du bassin versant du barrage Nakhla (Région de Tétouan, Nord-ouest du Maroc).
- Musy, A. & Higy C. (2004), *Hydrologie, une science de la nature*, PPUR, 314 P
- Nesse, W. D. (2000). "Introduction to Mineralogy. New York Oxford." University Press, Inc.
- Ngole, V.M., Ekosse, G. & Ayonghe, S.N., (2007), 'Physico-chemical, mineralogical and chemical considerations in understanding the 2001 Mabeta New Layout landslide, Cameroon', *Journal of Applied Science and Environmental Management* 11(2), 201–208.
- Nouira, A., Sayouty, E. H., & Benmansour, M. (2003). Use of <sup>137</sup>Cs technique for soil erosion study in the agricultural region of Casablanca in Morocco. *Journal of environmental radioactivity*, 68(1), 11-26.
- OUALLALI, Abdessalam, MOUKHCHANE, Mohamed, AASSOUMI, Habiba, et al. (2016). The Mapping of the Soils' Degradation State by Adaptation the PAP/RAC Guidelines in the Watershed of Wadi Arbaa Ayacha, Western Rif, Morocco. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, , vol. 4, no 07, p. 77.
- OZER, Pierre. *Introduction aux risques naturels*. 2009.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., Montanarella, L., (2015). Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy* 48,
- Paiboonvorachat, C. and T. J. Oyana (2011). Land-cover changes and potential impacts on soil erosion in the Nan watershed, Thailand. *International Journal of Remote Sensing* 32(21): 6587-6609.
- Plangoen, P., et al. (2013). Simulating the Impact of Future Land Use and Climate Change on Soil Erosion and Deposition in the Mae Nam Nan Sub-Catchment, Thailand. *Sustainability* 5(8): 3244-3274.
- Poesen J., Lavee H., (1994) Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena* 23 1-28.
- Poiraud, A. (2012) Les glissements de terrain dans le bassin du tertiaire volcanisé du Puy-en-Velay (Massif central, France). Caractérisation, facteurs de contrôle et cartographie de l'aléa. Thèse de doctorat de l'Université de Blaise Pascal de Clermont-Ferrand. 563p.

- Porcher, M. & Guillope, P. (1979) Cartographie des risques ZERMOS appliquée à des plans d'occupation des sols en Normandie. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 99: 43–54.
- Pouchin, 2001
- Pradhan, B. (2011) Use of GIS-based fuzzy logic relations and its cross application to produce landslide susceptibility maps in three test areas in Malaysia. *Environmental earth sciences*, 63 (2): 329–349.
- Roose, E. and J.-M. J. C. d. O. Sarrailh, *SeHrie PeHdologie* (1990). "Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles." 25(1): 2
- Roslee, R., Mickey, A. C., Simon, N., & Norhisham, M. N. (2017). Landslide susceptibility analysis (LSA) using weighted overlay method (WOM) along the Genting Sempah to Bentong Highway, Pahang.
- Saaty, L. & Vargas, L.. (2001) *Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Springer. 345p.
- Saaty, T.L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation*. McGraw-Hill California University, 287p.
- Santacana, N., Baeza, B., Corominas, J., De Paz, A. & Marturiá, J. (2003) A GIS-based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural Hazards*, 30 (3): 281–295.
- Sangchini, E. K., et al. (2016). "Assessment and comparison of combined bivariate and AHP models with logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Chaharmahal-e-Bakhtiari Province, Iran." *Arabian Journal of Geosciences* 9(3).
- Shahabi, H., M. Hashim, and B.B. Ahmad. 2015. Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, and fuzzy logic methods at the central Zab basin, Iran. *Environmental Earth Sciences* 73: 8647–8668.
- Soeters, R. & Van Westen, C.J. (1996) Slope instability recognition, analysis, and zonation. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds), *Landslides Investigation and Mitigation*. Special Report, vol. 247 : 129–177.
- Stevenson, P.C. (1977) An empirical method for the evaluation of relative landslip risk. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 16 (1): 69–72.
- Thomas, P. J., Baker, J.C., & Zelazy, L. W. (2000). "An Expansive soil index for predicting shrink-swell potential." *soil Society of American Journal* 64: 268-274.
- Thiery, Y. (2007) *Susceptibilité du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) aux mouvements de versant: cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste*. Thèse de doctorat de l'Université de Caen Basse-Normandie. 443p.
- Thiery, Y., Maquaire, O. & Fressard, M. (2013) Application of expert rules in indirect approaches for landslide susceptibility assessment. *Landslides*: 1–14
- Van Westen, C.J., Castellanos, E. & Kuriakose, S.L. (2008) Spatial data for landslide susceptibility hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering geology*, 102 (3): 112–131.
- Van Westen, C.J. (1993) Application of geographic information systems to landslide hazard zonation.

- Yao, X., Tham, L.G. & Dai, F.C. (2008) Landslide susceptibility mapping based on support vector machine: a case study on natural slopes of Hong Kong, China. *Geomorphology*, 101 (4): 572–582.
- Zizioli, D., Meisina, C., Valentino, R. & Montrasio, L. (2013) Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility: a case history in Oltrepo Pavese, Northern Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 559–573.
- Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK, Yoder DC (1997) Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook, No. 703, 404 pp
- Rendana M, Rahim SA, Wan Mohd RI, Lihan T, Rahman ZA (2015) CA\_Markov for predicting land use changes in tropical catchment area: a case study in Cameron Highland, Malaysia. *J Appl Sci* 15(4):689–695
- Ritchie J.C. & Machenry J.R. (1990). Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: *Journal of Environmental Quality*, 19, 215-233.
- Roose E., (1994) - Introduction to the conservatory management of water, biomass and soil fertility (GCES). *Bull. Pédol. FAO*, 70, 420 p.
- Roose, E., Lelong, F., & Colombani, J. (1983). Influence of bioclimate and soil management on water balance elements in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 28(2), 283-309.
- Sadiki, A., Bouhlassa, S., Auajjar, J., Faleh, A., & Macaire, J. J. (2004). Use of a GIS for the evaluation and mapping of erosion risks by the Universal Equation of Soil Loss in the Eastern Rif (Morocco): Case of the Wadi Boussouab Watershed. *Bulletin of the Scientific Institute, Rabat, Earth Sciences section*, 26(2004), 69-79.
- Sharma, A., Tiwari, K. N., & Bhadoria, P. B. S. (2011). Effect of land use land cover change on soil erosion potential in an agricultural watershed. *Environnemental monitoring and assessment*, 173(1-4), 789-801.
- Simonneaux, Vincent, Cheggour, Aouatif, deschamps, Charles, et al. (2015). Land use and climate change effects on soil erosion in a semi-arid mountainous watershed (High Atlas, Morocco). *Journal of arid environments*, vol. 122, p. 64-75.
- Tribak A., El Garouani A., Abachour M. (2012). Water erosion in tertiary marl series of the Oriental Préfif (Morocco): agents, processes and quantitative evaluation. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.* 1 47-52.
- Vakhshoori, V., et al. (2016). "Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzy logic, and frequency ratio methods." 7(5): 1731-1752.
- Vijith, H., & Dodge-Wan, D. (2017). Spatio-temporal changes in rate of soil loss and erosion vulnerability of selected region in the tropical forests of Borneo during last three decades. *Earth Science Informatics*, 1-11.
- Wischmeier WH, Smith DD (1978) Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning, Agriculture Handbook, No 537. US Department of Agriculture Science and Education Administration, Washington, p 163
- Wroth, C. and D. Wood (1978). "The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils." *Canadian Geotechnical Journal* 15(2): 137-145.
- Xinbao Z., Walling D.E., Mingy F. et al. (2003). 210Pbex depth distribution in soil and calibration models for assessment of soil erosion rates from 210Pbex measurements. *Chinese Journal*, Vol 48, n°8, 813-818.

- Yalcin, A. (2007). "The effects of clay on landslides: A case study." *Applied Clay Science* 38(1-2): 77-85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2007.01.007>
- Yalcin, A. J. C. (2008). "GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations." *72(1)*: 1-12.
- Yalcin, A. (2011). "A geotechnical study on the landslides in the Trabzon Province, NE, Turkey." *Applied Clay Science* 52(1-2): 11-19.
- Yang, X., Zheng, X. Q., & Chen, R. (2014). A land use change model: Integrating landscape pattern indexes and Markov-CA. *Ecological Modelling*, 283, 1-7.
- Yirsaw, E., Wu, W., Shi, X., Temesgen, H., & Bekele, B. (2017). Land Use/Land Cover Change Modeling and the Prediction of Subsequent Changes in Ecosystem Service Values in a Coastal Area of China, the Su-Xi-Chang Region. *Sustainability*, 9(7), 1204.
- Yulianto F, Prasasti I, Pasaribu JM, Fitriana HL, Haryani NS, Sofan P (2016) The dynamics of land use/land cover change modeling and their implication for the flood damage assessment in the Tondano watershed, North Sulawesi, Indonesia. *Model Earth Syst Environ* 2(1):47
- Zare, M., Panagopoulos, T., & Loures, L. (2017). Simulating the impacts of future land use change on soil erosion in the Kasilian watershed, Iran. *Land Use Policy*, 67, 558-572.



Annexe 1 : Exemple d'érosion et de glissements dans le bassin étudié (photos prise le samedi 7 mai 2016)



Annexe 2. Transport de matériaux de grande taille par l'oued Ikkour