

**UNIVERSITE ABDELMALEK ESSAADI
FACULTE DES SCIENCES et TECHNIQUES
TANGER**

UFR : Océanologie et climatologie de part et d'autre du détroit de Gibraltar

THESE

Présentée

Pour l'obtention du

DOCTORAT EN SCIENCES ET TECHNIQUES

Par :

RAISSOUNI Ahmed

Discipline : Géosciences de l'environnement

Spécialité : Géomatique Appliquée à l'Environnement

Modélisation et cartographie de la sensibilité et de l'aléa d'érosion des sols
à l'échelle régionale par SIG et USLE (Rif Nord occidental, Maroc).

Soutenue le 29 Décembre 2012 devant le Jury

Pr. EL MOUMNI Bouchta	Faculté Poly-disciplinaire de Larache	Président
Pr. ZARHLOUL Yassine	Faculté des Sciences d'Oujda	Rapporteur
Pr. LAHRACH Abderrahim	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Rapporteur
Pr. ER-RAIOUI Hassan	Faculté des Sciences et Techniques Tanger	Rapporteur
Pr. ZOURARAH Khalid	Faculté des Sciences d'El Jadida	Examineur
Pr. EL ARRIM Abdelkrim	Faculté des Sciences et Techniques Tanger	Directeur de Thèse
Pr. MAATOUK Mustapha	Faculté des Sciences et Techniques Tanger	Co-Encadrant

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا عَلَّمْتَنَا

إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ.

(سورة البقرة آية 32).

A la mémoire de mon défunt Père

A qui je dois toute ma vie et toute ma carrière

Celui qui m'a éduqué enfant et m'a poussé grand

A qui je dois mon enthousiasme à la recherche

Et pour lui seul, avant moi-même, je voulais avoir cette thèse

C'était son rêve de me voir Docteur un jour

Que les miséricordes de DIEU soient sur vous

DEDICACES

Je dédis ce manuscrite à deux personnes

Celles que j'aime le plus dans ce monde

A Ma mère

Que les mots m'échappent pour lui exprimer

mon amour et ma gratitude pour tout ce qu'elle m'a offert...

Rien ne sera plus exprimant que « je t'aime ».

A Ma femme

Ma chère et aimée Lamiae

Merci d'être dans ma vie

Que DIEU te bénisse et que DIEU nous garde ensemble

Pour une vie pleine de bonheur et de joie

REMERCIEMENTS

Les pages qui suivent dressent un bilan des travaux que j'ai réalisé... ils n'auraient probablement pas vu le jour et, en tout cas, n'auraient pas eu la même saveur, sans l'aide précieuse que tous, m'ont apporté, au long de ce parcours.

À l'heure de terminer ce doctorat, mes premières pensées vont à ma famille dont le soutien tant moral que financier m'a permis d'accomplir de longues études. Ce que je dois à mes chers parents va bien au delà des remerciements ou même de la gratitude. Mon vocabulaire est trop limité pour exprimer leur importance dans ce travail et dans ma vie. Ils le savent.

Mener une recherche de thèse jusqu'à son terme est un exercice long, solitaire, rythmé d'imprévus dans son déroulement et ses résultats... qui n'aurait pas été possible sans l'entourage de mes proches et l'apport des chercheurs qui m'ont montré le chemin à prendre.

La réalisation de cette thèse fut une occasion merveilleuse de rencontrer et d'échanger avec de nombreuses personnes.

Comme le veut la tradition, je vais tenter de satisfaire au difficile exercice de la page des remerciements, peut-être la tâche la plus ardue de ces années de thèse. Non qu'exprimer ma gratitude envers les personnes en qui j'ai trouvé un soutien soit contre ma nature, bien au contraire. La difficulté tient plutôt dans le fait de n'oublier personne et comme dit toujours mon cher Encadrant « donner à César ce qui lui appartient » et je dis là, « donner à César ce qu'il mérite ». J'aborde cette partie avec enthousiasme puisqu'elle représente la fin de ce travail de thèse et la possibilité de remercier toutes les personnes qui ont permis à cette thèse de naître, de vivre et d'aboutir à une fin heureuse.

C'est pourquoi, je remercie par avance tous ceux dont le nom n'apparaît pas dans cette page et qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre, par leur aide ou simplement la sympathie qu'ils m'ont témoignée. Ils se reconnaîtront. Je reconnais que chacune a, à des degrés divers, mais avec une égale bienveillance, apporté une contribution positive à la finalisation de cette thèse. Mes dettes de reconnaissance sont, à ce point de vue, énormes à leur égard. Pour les autres, merci également. Ils se reconnaîtront aussi...

En premier lieu, j'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à mon Directeur de thèse et mon ex-encadrant en projet de fin d'étude de Maîtrise, Monsieur Abdelkrim EL ARRIM, Professeur Habilité à La Faculté des Sciences et Techniques de Tanger et à mon Co-Directeur Monsieur Mustapha MAATOUK, Professeur Habilité également à la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger. Leur connaissance a été aussi bientôt, en 1996 quand j'étais encore étudiant en deuxième année... une connaissance qui a bien évolué au fil des années d'études universitaires et qui s'est renforcée de plus en plus en

m'inscrivant en thèse sous leur direction. Sans eux, je n'aurais pas pu atteindre ce jour peut être. Je leur exprime mes profondes gratitude.

Monsieur Abdelkrim EL ARRIM, mon parrain scientifique, plus qu'un encadrant ou un collègue, je crois avoir trouvé en lui un ami et même un grand frère, qui m'a aidé aussi bien dans le travail que dans la vie lorsque j'en avais besoin. Je le remercie pour sa disponibilité, ses compétences et sa grande ouverture d'esprit durant ces années de recherche.

Il m'a offert une grande liberté de recherche tout en soulevant des questions clés pour la qualité scientifique du travail. Nous avons commencé à travailler ensemble à mon retour à la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, après des années d'études à l'Université Mohammed V à Rabat. Je lui exprime ma gratitude, la plus profonde, de m'avoir accepté au sein de son équipe et d'avoir assuré l'encadrement de ce travail, de m'avoir donné sa confiance, pour m'avoir permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions et en toute liberté, pour partager avec moi son bureau également... Je lui adresse mes vifs remerciements.

Malgré ses nombreuses occupations, il est toujours disponible à me guider et à me prodiguer les conseils judicieux. Merci d'avoir toujours été présent pour tous les petits soucis, merci pour avoir toujours su trouver les mots justes pour me réconforter, pour son soutien constant, ses conseils éclairés.... Il m'a soutenu et encouragé dans les périodes de doute.

Ses remarques successives ont permis d'améliorer les différentes versions de ce travail. Il a toujours trouvé comme encadrant le juste équilibre entre la liberté qu'il m'a laissée dans le choix des grandes orientations et dans la détermination des pistes à suivre, d'une part, et un soutien total et sans faille dans les moments délicats, d'autre part. De lui, j'ai toujours reçu non seulement les encouragements dont le doctorant a tant besoin, mais aussi les précieux conseils pratiques que seul un homme, ayant des qualités humaines comme lui, peut amener à prodiguer. Grâce à son approche respectueuse de la personne humaine, je me suis continuellement senti à l'aise. Je lui en sais infiniment gré.

Je le remercie pour son calme olympien et sa patience immuable, pour la finesse de ses attitudes sur le plan aussi bien humain que scientifique.

Le respect et l'admiration que je lui porte ne sont pas protocolaires et je m'estime très honorée de faire partie de ses étudiants.

Mes respects et mes vifs remerciements vont également à Mme Hanane EL KHACHANI, pour sa contribution, ses discussions, son soutien moral et sa sympathie sans précédents. Elle m'a considéré toujours comme un petit frère, s'intéressant toujours à mes soucis et mes problèmes tant professionnels que familiales. Merci infiniment.

J'exprime aussi mes vifs remerciements au professeur Mustapha MAATOUK dont la serviabilité et la sympathie sont reconnues par tout le monde, qui m'a réservé des moments précieux de formation et de discussion et m'a facilité toutes les conditions pour mener ce travail à bien. Je N'oublierais jamais, qu'au début de ma Thèse, alors que je n'avais pas encore choisi cette thématique, il m'avait confié ses travaux inachevés et ses données pour

s'en servir comme base pour mon sujet de recherche, chose que personne ne le fera pour quelqu'un d'autre, je lui suis très reconnaissant pour ce geste très noble et très généreux. Je le remercie infiniment pour son apport à la grande cohérence de ce manuscrit, sa disponibilité et sa sympathie. Qu'il trouve ici le témoignage de mon profond et sincère respect.

Je remercie également Mr Passalacqua, Professeur au Département DICAT à l'Université de Gênes qui a accepté de m'accueillir au sein de son laboratoire et toute son équipe pour son accueil chaleureux durant mon séjour en Italie, pour leur sincère amitié et leur sympathie durant le séjour. Je leur souhaite bonne continuation et bon courage pour leurs thèses de Doctorat. Malgré la divergence de nos axes de recherche, le Professeur PASSALACQUA n'a pas hésité à discuter avec moi et s'intéresser à mes travaux, à me chercher des solutions et de l'aide, à m'informer de tout ce qui pourra m'être utile, et même en m'intégrant au sein de son groupe de travail au sein d'un projet en me confiant la tâche coïncidant avec mes travaux.

Je tiens à remercier vivement Messieurs les membres de mon jury de thèse, qui ont accepté d'examiner mon travail malgré leurs nombreuses responsabilités, Monsieur Yassine ZARHLOUL, Professeur assistant à la Faculté des Sciences d'Oujda et Monsieur Abderrahim LAHRACH, Professeur à la Faculté des Sciences de Fès. Je leur présente mes meilleurs respects et mes vifs remerciements pour le temps, l'effort et l'intérêt qu'ils ont porté à ce manuscrit et à ce travail. Je leur remercie également de m'avoir fait l'honneur d'être membres de ce jury en tant que rapporteurs. J'éprouve un profond respect pour leur travail et leur parcours, ainsi que pour leurs qualités humaines. Le regard critique, juste et avisé qu'ils ont porté sur mes travaux ne peut que m'encourager à être encore plus perspicace et engagé dans mes recherches. Leur lecture attentive de mon manuscrit et leurs remarques permettront un débat animé tel que espéré.

Mes vifs remerciements au Professeur Hassan Er-Raioui, enseignant au sein de notre département à la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger. Ça fait Maintenant des années que je le connais depuis qu'il m'a enseigné en ma deuxième année universitaire. je me rappelle les beaux moments que j'ai passé en tant qu'étudiant lors de son cours ainsi que celles que j'ai passé avec lui pendant mes années de thèse. Je reconnais en lui sa gentillesse, son calme, sa sympathie et ses discussions fructueuses ainsi que ses conseils sans précédents.

Je suis très reconnaissant envers le Professeur Boucheta EL MOUMNI, Doyen de la Faculté polydisciplinaire de Larache, mon ancien Enseignant, Chef de notre Maîtrise à l'époque à la FST de Tanger et Chef de l'UFR à laquelle je suis inscrit en thèse. Je le remercie vivement de bien vouloir accepter de présider le jury de cette thèse et d'examiner ce travail de recherche malgré ses grandes et nombreuses occupations. Je lui exprime mes très vifs remerciements et mon profond respect.

Je suis très reconnaissant envers Monsieur Khalid ZOURARAH, Professeur à la Faculté des Sciences d'El Jadida, d'avoir accepté d'examiner cette thèse et de se déplacer ce long chemin pour faire partie du jury de ma thèse en tant qu'examineur. Votre expérience pluridisciplinaire Monsieur donnera à cette soutenance un goût différent et permettra d'enrichir le débat.

Je ne pourrais oublier les enseignantes et les enseignants de notre département que beaucoup d'entre eux me traitaient comme collègue plus qu'un doctorant. Je cite plus particulièrement Pr. Miriam WAHBI, pour sa sympathie et sa disponibilité en cas de besoin technique concernant sa spécialité de Télédétection, Pr. Amina AMHAREF, pour ses discussions et pour ses encouragements, Pr. Abdelghani AFILAL TRIBAK, pour les moments de discussion amical, Pr. Abdelhamid ROSSI, pour sa sympathie et sa modestie, Pr. Jamal Eddine EL ABDELLAOUI, Pr. Tawfiq EL MOURABIT, Pr. Brahim DAMNATI, Pr. Saad BAKKALI, Pr. Khadija ABOUMARIA, Pr. Mohamed Najib ZAGHLOUL, Pr. Asmae CHEDDADI, Pr. Kacem BOUHMADI... Merci à vous tous et merci à tous les autres que je ne peux les citer tous par nom.

Enfin, au-delà de l'aide scientifique, je ne saurais oublier le soutien et la sympathie que m'ont témoignés tous ceux que j'ai côtoyés pendant ma thèse, je leur tire mon chapeau.

A la première personne que je dois remercier, mon étudiante que j'ai co-encadré en Maitrise et en Master, puis ma collègue puisqu'elle est en thèse maintenant, et qui est devenue maintenant ma femme la bien aimée. Tous les mots du monde ne pourront servir pour la remercier de son soutien moral et matériel. Je la trouvais à mes côtés pendant les moments d'espoir et de désespoir, de joie ou de tristesse, de force et de faiblesse.... Je dois avouer, que c'est grâce à mon implication dans ses travaux que j'ai pu apprendre et découvrir de nouvelles choses et je dois dire que le présent travail lui doit beaucoup, sans son soutien et son aide, et plus spécialement sans sa présence à mes côtés, ce rapport n'aura ni la forme ni le goût qu'il a maintenant. Les remerciements n'ont aucune valeur dans ce cas, je lui donne alors tous mes sentiments, du fond de mon cœur.

Toute ma sympathie et mon amitié sincère vont à mes très chères amies et collègues au département des Sciences de la Terre à la FST de Tanger, je cite plus spécialement Lahoucine, Issam, Saida, Soumaya, Houda, Narjisse, Salima et les autres, pour tous leurs encouragements, leur humour et de tous les jours des repas en groupe, leur enthousiasme, leur gentillesse et leur aide précieuse, de temps ni d'espace, pour leur esprit "grande famille" des plus étonnants et sacrément réconfortant, pour leur ambiance agréable, leur sympathie, leur amitié et leur soutien sans mesure durant toutes ces années de recherche. ... Parce que ça m'a été d'une grande complicité qui m'a permis de garder le moral jusqu'au bout!!

Merci spéciale pour Lahoucine pour les mises à jour anti-virus et autres soucis informatiques...

Et un autre merci spéciale pour Saida pour tous les aides en matériel de Laboratoire, sa disponibilité et sa serviabilité...

Je ne voudrais pas oublier l'ensemble de mes collègues de notre département ainsi que des autres départements de notre Faculté, avec qui j'ai passé d'agréables moments durant ces dernières années...

Un grand merci aux personnels de la Faculté, je cite plus particulièrement Asma TOUHAMI KADIRI, la secrétaire de notre département, qui représentait pour nous beaucoup plus, notre

merci de son amitié, de son soutien moral, de son aide...et plus spécialement pour sa confiance.

Je cite également Khadija STITOU, Souad CHEKKOUR, Mohammed BEN TAOUIT, Mohammed KDIOUI, Mohammed HAMDAOUI, le personnel du service de reprographie ainsi que d'autres personnes, qu'ils me pardonnent de ne pas citer leurs noms tous ... toutes ces personnes qui m'ont donnée leur sympathie, leur respect et leur confiance et qui n'ont pas hésité de m'aider et de me faciliter les tâches administratives.

Je dédie enfin ce manuscrit à mon défunt Père et à ma Mère, pour la confiance qu'ils m'ont toujours accordée, pour leurs encouragements et leur soutien en tous instants. Merci pour leur entière implication et leur curiosité qu'ils m'ont également transmise. Aucun dictionnaire avec n'importe quelle langue ne pourra me fournir le vocabulaire nécessaire pour leur exprimer ce que je sens envers eux... qu'ils sachent que, même si je ne me suis pas trop exprimé ici, les expressions que j'ai pour eux dans mon cœur sont beaucoup plus difficiles d'être transmises en mots sur un papier... Rien au monde ne me permettra de leur rendre ce qu'ils méritent.

À ma sœur Fatima et mes deux frères Mohammed et Idriss, à mon beau frère Khalil et à mes neveux Saber et Yassir, à mes belles sœurs Hajar et Fatima, à mes tantes et oncles ainsi qu'à mes cousins et cousines dont je ne peux citer leurs noms tous, pour leur irremplaçable et inconditionnel soutien et pour leurs encouragements. Ils ont été présents pour écarter les doutes, soigner les blessures et partager les joies. Tous m'ont donné tout le courage dont j'avais besoin pour avancer toujours plus loin. Cette thèse est un peu la leur, aussi.

Enfin, je remercie toutes les personnes intéressées par mon travail, en espérant qu'elles puissent trouver dans mon rapport de thèse des explications utiles.

Merci encore à tous.

RÉSUMÉ

Ce travail vise à montrer l'intérêt que peut apporter un outil tel que les Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour l'évaluation de la sensibilité des sols à l'érosion et la modélisation de l'aléa d'érosion, en élaborant une carte globale de sensibilité pour la péninsule tingitane et des cartes de vulnérabilité dans six sous bassin versant, en tenant compte des facteurs physico-climatiques, responsables de l'érosion hydrique, à savoir la pente, la pluviométrie, la lithologie, l'occupation du sol ainsi que sa nature.

La carte de sensibilité a été effectuée en se basant sur un modèle qualitatif, modifié selon les conditions du milieu. Le modèle général se base sur la superposition de l'effet de trois paramètres essentiels qui sont la lithologie, la pente et le couvert végétal. Chacun de ces paramètres est multiplié par un pourcentage de contribution. Le pourcentage d'un des facteurs pourrait augmenter ou diminuer d'une région ou une autre en fonction de son importance dans le phénomène d'érosion. Cette application a été effectuée en intégrant neuf conditions possibles dans le modèle pour obtenir une seule carte de sensibilité des sols à l'érosion de toute la région.

La carte obtenue montre une sensibilité élevée essentiellement dans les secteurs internes de la zone. Cette sensibilité, élevée et trop répartie, est expliquée par la grande répartition des activités agricoles et des terres arables sur des formations essentiellement pélitico-gréseuses ou argileuses. S'ajoute à cela la dégradation intense des zones à végétation naturelle.

Une application plus approfondie et plus limitée, sur les six bassins versants de la zone d'étude, à savoir les bassins versants des barrages Smir, Raouz, Ibn Batouta, Ajras et des oueds Aliane et Mgaz Es-Sebt, a été également réalisée en effectuant une modélisation de l'aléa d'érosion des sols à travers l'utilisation de l'équation universelle des pertes des sols (USLE) adoptée selon les conditions marocaines. La modélisation a été effectuée sur chaque bassin à part en cartographiant les différents facteurs qui contribuent dans le processus de l'érosion sous SIG et leur superposition aboutit à une carte quantitative de l'aléa d'érosion des sols.

Les sous bassins versants ont montré généralement des classes d'érosion très faibles à très élevées. Les classes d'érosion moyennes à fortes sont généralement les plus dominants dans les six bassins étudiés, ce qui coïncide avec la répartition des classes de chaque facteur. 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 : Erosion, SIG, Télédétection, modélisation, cartographie, sensibilité, bassin Versant, Rif nord occidental, Maroc.

ABSTRACT

This work aims to demonstrate the benefits that can provide a tool such as GIS to assess the sensitivity of soil erosion and modeling of soil erosion hazards in order to a watershed management, and that within developing a global map of erosion sensitivity of the Tingitane peninsula and a vulnerability maps in six subwatersheds, taking into account the physico-climatic factors responsible for water erosion, such as slope, rainfall, lithology, land and nature.

The sensitivity map was made based on a qualitative model, modified according to environmental conditions. The general model is based on the superposition of the effect of three parameters that are lithology, slope and vegetation cover. Each of these parameters is multiplied by a percentage of contribution.

In this study we conducted a superposition of these three factors with a variable percentage of contribution, which varies from one area to another depending on the physical conditions of the environment. The percentage of a factor can increase or decrease, from one region to another, depending on its importance in the erosion process according to site conditions. This application was made possible by integrating nine possible conditions in the model to finally get one map of soil sensitivity to erosion throughout the region, taking into account the variation of environmental conditions and variable contribution of different parameters.

The resulting map shows a high sensitivity mainly in the inland areas of the region. The high sensitivity and too dispersed is explained by the wide distribution of agricultural and arable land formations mainly on sandy or flysch formations. Add to this the intense degradation of natural vegetation areas.

The second part of this study is more detailed and spatially limited in six subwatersheds in the study area (Smir, Raouz, Ibn Batouta and Ajras Dams, Aliane wadi and Mgaz Es-Sebt wadi). In these basins, we conducted a modeling of soil erosion through the application of the universal soil loss equation (USLE) adapted to Moroccan conditions. Modeling was performed by mapping, on each basin, the various factors that contribute to the process of erosion into a Geographic Information System (GIS) platform and their superposition to obtain a quantitative map of soil erosion hazard.

Sub watersheds generally show erosion classes ranging from very low to very high. Classes of medium to high erosion are generally more dominant in the six basins studied, which coincides with the distribution of classes of each factor. Alternatively, this high erosivity is the result of a high friability of rocks, high aggressiveness of rainfall and relatively high and rugged relief. Add to that the degradation of the natural vegetation and the development of human occupation.

Mots clés : Erosion, GIS, Remote sensing, modeling, mapping, sensitivity, watershed, northwestern Rif, Morocco.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Précipitations moyennes mensuelles (en mm) pour la période 1921-2001.	64
Tableau 2 : Précipitations moyennes mensuelles (en mm) pour la période 1968-2005.	64
Tableau 3 : Températures moyennes mensuelles 1990-2001 en °C	65
Tableau 4 : Températures moyennes mensuelles °C.	66
Tableau 5 : Valeurs mensuelles d'ETP (mm) dans la Station de Tétouan	67
Tableau 6 : Présentation générale des barrages implantés dans la région d'étude.	69
Tableau 7 : Superficie (ha) des forêts naturelles et reboisées, région Tanger-Tétouan.	83
Tableau 8 : Répartition de différentes unités d'occupation du sol dans la RTT.	84
Tableau 9 : Classes de lithologie en fonction de l'indice de sensibilité attribué.	99
Tableau 10 : Classes de végétation en fonction de l'indice de sensibilité attribué.	100
Tableau 11 : Classes de pente en fonction de l'indice de sensibilité attribué.	102
Tableau 12 : Unités Cartographiques des Matériaux de la zone d'étude (UCM).	108
Tableau 13 : Unités Cartographiques d'Altitude reclassées (UCA).	109
Tableau 14 : Unités Cartographiques de Pente reclassées (UCP).	111
Tableau 15 : Unités Cartographiques Physiographiques de la zone d'étude (UCPh).	111
Tableau 16 : Unités Cartographiques de Végétation de la zone d'étude (UCV).	112
Tableau 17 : Echelle granulométrique de la texture du sol.	118
Tableau 18: Répartition des classes de sensibilité des sols à l'érosion dans la zone d'étude.	124
Tableau 19 : Répartition des valeurs du facteur K dans le bassin versant du barrage Smir	126
Tableau 20 : Répartition des classes du facteur LS dans le bassin versant de Smir.	128
Tableau 21 : Répartition des classes du facteur C dans le bassin versant du barrage Smir.	128
Tableau 22 : Classes des pertes en sol (en T/ha/an) dans le bassin versant du barrage Smir.	129
Tableau 23 : Répartition des classes du facteur K dans le bassin versant du barrage Raouz.	132
Tableau 24 : Répartition des classes du facteur LS dans le bassin versant du barrage Raouz.	133
Tableau 25 : Répartition des classes du facteur C dans le bassin versant du barrage Raouz.	134
Tableau 26 : Répartition des classes d'érosion dans le bassin versant du barrage Raouz.	136
Tableau 27 : Répartition du facteur K dans le bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt.	138
Tableau 28 : Répartition du facteur LS dans le bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt.	139

Tableau 29 : Répartition du facteur C dans le bassin versant de l’oued Mgaz Es-Sebt.	139
Tableau 30 : Répartition des classes d’érosion dans le bassin versant de l’oued Mgaz Es-Sebt.	140
Tableau 31 : Répartition des classes du facteur K dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta.	142
Tableau 32 : Répartition des classes du facteur LS dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta.	143
Tableau 33 : Répartition des classes du facteur C dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta.	143
Tableau 34 : Répartition des classes de pertes en sols (en T/ha/an) dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta.	144
Tableau 35 : Répartition des classes du facteur K dans le bassin versant de l’oued Aliane.	148
Tableau 36 : Répartition des classes du facteur LS dans le bassin versant de l’oued Aliane.	149
Tableau 37 : Répartition des classes du facteur C dans le bassin versant de l’oued Aliane.	149
Tableau 38 : Répartition des classes des pertes en sol (en T/ha/an) dans le bassin versant de l’oued Aliane.	151
Tableau 39 : Répartition des classes du facteur K dans le bassin versant du barrage Ajras.	153
Tableau 40 : Répartition des classes du facteur LS dans le bassin versant du barrage Ajras.	154
Tableau 41 : Répartition des classes du facteur C dans le bassin versant du barrage Ajras.	155
Tableau 42 : Répartition des classes des pertes en sol (en T/ha/an) dans le bassin versant du barrage Ajras.	156

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Normographe de l'érodibilité du sol.	56
Figure 2 : Situation géographique de la zone d'étude.	62
Figure 3 : Découpage administrative de la zone d'étude.	62
Figure 4 : Report des stations météorologiques du Nord du Maroc dans le climagramme d'Emberger.	63
Figure 5 : Courbe des précipitations moyennes mensuelles 1921-2001 (Tanger)	64
Figure 6 : Courbe des précipitations moyennes mensuelles 1968-2005 (Tétouan)	65
Figure 7: Températures moyennes mensuelles 1990-2001 en °C (Station Tanger)	66
Figure 8 : Températures moyennes mensuelles 1990-2004 en °C (Station Tanger)	66
Figure 9 : Carte hydrologique de la péninsule Tingitane.	69
Figure 10: Carte structurale de la chaîne rifaine (Suter, 1980).	71
Figure 11 : Schéma structural de la pininsule Tingitane (modifié).	76
Figure 12 : Carte géologique de la péninsule Tingitane (modifiée).	77
Figure 13 : Carte géomorphologique de la péninsule Tingitane.	79
Figure 14 : Carte d'Altitude de la péninsule Tingitane.	80
Figure 15 : Carte d'occupation du sol de la péninsule Tingitane.	85
Figure 16 : Organigramme méthodologique du modèle qualitatif.	96
Figure 17 : Organigramme méthodologique de la modélisation quantitative de l'érosion.	97
Figure 18 : Carte lithologique de la péninsule Tingitane en fonction du code de sensibilité.	98
Figure 19 : Carte de végétation de la péninsule Tingitane par code de sensibilité.	101
Figure 20 : Carte de pente de la péninsule Tingitane en fonction du code de sensibilité.	101
Figure 21: Schéma explicatif de la combinaison des différentes conditions prises en compte dans la réalisation de la carte de sensibilité à l'érosion.	103
Figure 22 : Cartes des résultats intermédiaires des différentes conditions prises en compte dans la démarche suivie.	104
Figure 23 : Organigramme des étapes de l'élaboration d'une carte des unités homogènes	106
Figure 24 : Carte des Unités Cartographiques des Matériaux de la zone d'étude.	107
Figure 25 : Carte du MNT reclassée.	109

Figure 26 : Carte de la pente reclassée.	110
Figure 27 : Carte physiographique de la zone d'étude.	110
Figure 28 : Carte du couvert végétal de la zone d'étude.	112
Figure 29 : Carte de position géographique des bassins versants étudiés.	115
Figure 30: Carte des unités homogènes du bassin versant du barrage Smir.	115
Figure 31: Carte des unités homogènes du bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt.	116
Figure 32: Carte des unités homogènes du bassin versant du barrage Raouz.	116
Figure 33: Carte des unités homogènes du bassin versant du barrage Ibn Batouta.	116
Figure 34: Carte des unités homogènes du bassin versant de l'oued Aliane.	117
Figure 35: Carte des unités homogènes du bassin versant du barrage Ajras.	117
Figure 36 : Etapes du traitement de l'image satellitaire sous Logiciel ENVI.	120
Figure 37 : Carte de sensibilité des sols à l'érosion de la péninsule tingitane.	125
Figure 38 : Carte de répartition du facteur R dans le bassin versant du barrage Smir.	127
Figure 39 : Carte de répartition du facteur K dans le bassin versant du barrage Smir.	127
Figure 40 : Carte de répartition du facteur LS dans le bassin versant du barrage Smir.	129
Figure 41 : Carte de répartition du facteur C dans le bassin versant du barrage Smir.	129
Figure 42 : Carte d'aléa d'érosion en t/ha/an dans le bassin versant du barrage Smir.	130
Figure 43 : Cartes des paramètres physiques du bassin versant du barrage Smir (A : Altitudes ; B : Pentes ; C : Lithologie et D : Végétation).	131
Figure 44: Carte de répartition du facteur d'érosivité de la pluie (R).	132
Figure 45 : Carte de répartition du facteur d'érodibilité des sols (K).	133
Figure 46 : Carte de répartition du facteur topographique (LS).	134
Figure 47 : Carte de répartition du facteur de couvert végétal (C).	135
Figure 48 : Carte d'aléa d'érosion en en t/ha/an du bassin Raouz.	136
Figure 49 : Cartes des paramètres physiques du bassin versant du barrage Raouz (A : Altitudes ; B : Pentes ; C : Lithologie et D : Végétation).	137
Figure 50 : Carte d'érosivité climatique dans le bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt.	138
Figure 51 : Carte d'érodibilité des sols dans le bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt.	138
Figure 52 : Carte du facteur topographique LS dans le bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt.	139
Figure 53 : Carte du facteur C dans le bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt.	139
Figure 54 : Carte d'aléa d'érosion en t/ha/an du bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt.	141

Figure 55 : Cartes des paramètres physiques du bassin versant de l’oued Mgaz Es-Sebt. (A : Altitudes ; B : Pentes ; C : Lithologie et D : Végétation).	141
Figure 56 : Carte de répartition du facteur R dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta.	144
Figure 57 : Carte de répartition du facteur K dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta.	441
Figure 58 : Carte de répartition du facteur LS dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta.	144
Figure 59 : Carte de répartition du facteur K dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta.	144
Figure 60 : Cartes des paramètres physiques du bassin versant du barrage Ibn Batouta. (A : Altitudes ; B : Pentes ; C : Lithologie et D : Végétation).	146
Figure 61 : Pertes en sols (en T/ha/an) dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta.	147
Figure 62 : Carte du facteur climatique R dans le bassin versant de l’oued Aliane.	148
Figure 63 : Carte du facteur d’érodibilité des sols dans le bassin versant de l’oued Aliane.	148
Figure 64 : Carte du facteur topographique LS dans le bassin versant de l’oued Aliane.	150
Figure 65 : Carte du facteur couvert végétal C dans le bassin versant de l’oued Aliane.	150
Figure 66 : Carte de pertes potentielles en sol dans le bassin versant de l’oued Aliane.	151
Figure 67 : Cartes des paramètres physiques du bassin versant de l’oued Aliane (A : Altitudes ; B : Pentes ; C : Lithologie et D : Végétation).	152
Figure 68 : Carte du facteur d’érosivité de pluie R dans le bassin versant du barrage Ajras.	154
Figure 69 : Carte du facteur d’érodibilité des sols dans le bassin versant du barrage Ajras.	154
Figure 70 : Carte du facteur topographique LS dans le bassin versant du barrage Ajras.	155
Tableau 71 : Carte du facteur couvert végétal C dans le bassin versant du barrage Ajras.	156
Figure 72 : Cartes des paramètres physiques du bassin versant du Barrage Ajras. (A : Altitudes ; B : Pentes ; C : Lithologie et D : Végétation).	157
Figure 73 : Carte de risque potentiel d’érosion dans le bassin versant du barrage Ajras.	158

SOMMAIRE

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	viii
ABSTRACT	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xii
SOMMAIRE	xv
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	24
PARTIE I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	30
Chapitre I : Le Sol.....	31
I. INTRODUCTION.....	31
II. LE SOL.....	32
III. LES FONCTIONS DU SOL.....	33
1. Fonctions écologiques.....	33
1.1. Fonction de milieu biologique.....	33
<i>a. Environnement physique.....</i>	<i>33</i>
<i>b. Environnement physico-chimique.....</i>	<i>33</i>
<i>c. Environnement chimique.....</i>	<i>33</i>
<i>d. Environnement biologique.....</i>	<i>33</i>
1.2. Fonction de déterminant de la qualité de l'environnement.....	33
1.3. Fonction dans les cycles biogéochimiques	33
2. Fonctions technologiques.....	33
2.1. La fonction du support mécanique.....	33
2.2. La fonction source de matériaux.....	34

2.3. La fonction de réceptacle de déchets industriels et urbains	34
3. Les fonctions socio-économiques	34
IV. LE SYSTEME SOL.....	34
V. CONCLUSION.....	35
Chapitre II : Dégradation des sols – Erosion.....	36
I. INTRODUCTION.....	36
II. LA NOTION DU RISQUE	37
1. Définition.....	37
2. Gestion du risque	37
2. Le risque d'érosion	37
2.1. L'érosion	37
2.2. La tolérance en perte de sol.....	38
2.3. La variabilité spatio-temporelle de l'érosion.....	38
<i>a. La variabilité de l'érosion dans l'espace.....</i>	<i>38</i>
<i>b. La variabilité de l'érosion dans le temps.....</i>	<i>38</i>
III. LE DECLenchement DE L'EROSION HYDRIQUE	39
1. La définition de l'érosion hydrique.....	39
2. Les processus de l'érosion hydrique.....	39
2.1. Le détachement	39
2.2. Le transport	39
2.3. Le dépôt.....	39
3. Les différents types de l'érosion hydrique.....	40
3.1. L'érosion linéaire.....	40
<i>a. L'érosion en rigoles (Rill erosion).....</i>	<i>40</i>
<i>b. L'érosion en ravine (Gully erosion).....</i>	<i>40</i>
3.2. L'érosion en masse.....	40
<i>a. Le glissement de terrain.....</i>	<i>41</i>

<i>b. Les coulées de boue</i>	41
3.3. L'érosion en nappes	41
<i>a. Définition</i>	41
<i>b. Les formes et les symptômes de l'érosion en nappes</i>	42
<i>c. Les conséquences de l'érosion en nappes</i>	42
4. Les facteurs de l'érosion hydrique	43
4.1. Le climat et l'hydrologie.....	43
4.2. Le Sol.....	43
4.3. La topographie.....	44
<i>a. L'inclinaison de la pente</i>	44
<i>b. La longueur de pente</i>	44
<i>c. Concavités, talwegs et convexités</i>	44
<i>d. L'exposition des pentes</i>	45
4.4. La végétation.....	45
4.5. Activités humaines.....	45
5. Les paramètres de contrôle de ruissellement et de l'érosion	46
5.1. Les paramètres de contrôle.....	46
5.2. L'hiérarchisation des différents paramètres.....	46
IV. CONCLUSION.....	48
Chapitre III : La modélisation de l'érosion	49
I. L'HISTORIQUE SUR LA MODELISATION DE PERTE DE SOL	49
II. LES DIFFERENTS TYPES DE MODELES D'EROSION	51
1. Les modèles à base physique	51
2. Les modèles à base empirique	52
3. Les avantages et inconvénients de la modélisation de l'érosion.....	53
III. L'EQUATION UNIVERSELLE DE PERTES DE SOLS : USLE	53
1. Le facteur d'érosivité de la pluie R	54

2. Le facteur d'érodibilité du sol K.....	55
3. Le facteur topographique LS	56
4. Le facteur du couvert végétal C.....	56
5. Le facteur des pratiques antiérosives P.....	57
V. LES LIMITES DE L'USLE	57
1. Les limites topographiques.....	57
2. Les limites spatiales.....	57
3. Les limites par rapport au mécanisme d'érosion	58
VI. L'UTILISATION DES NOUVELLES TECHNOLOGIES DANS LA MODELISATION.....	58
V. CONCLUSION.....	59
 PARTIE II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	61
I. INTRODUCTION.....	61
II. CADRE GEOGRAPHIQUE.....	61
III. CADRE CLIMATIQUE.....	63
1. Les précipitations.....	64
2. Les températures.....	65
3. Les vents.....	66
2. L'évapotranspiration.....	67
IV. CADRE HYDROLOGIQUE.....	67
V. CADRE GEOLOGIQUE.....	70
A. APPROCHE REGIONALE.....	70
1. Le domaine interne.....	71
1.1. Les nappes paléozoïques.....	71
a- Les Sebides.....	72
b. Les Ghomarides.....	72

1.2. Les terrains méso-cénozoïques	72
<i>a. La Dorsale Calcaire</i>	72
<i>b. Le Prédorsalien</i>	72
2. Les zones externes.....	73
2.1. Les zones intrarifaines.....	73
2.2. La zone mésorifaine.....	73
2.3. La zone prérifaine.....	73
3. Les terrains allochtones ou nappes de glissement.....	74
3.1. Les nappes des flyschs.....	74
3.2. Les nappes rifaines et la nappe d'Ouezzane.....	74
<i>a- Les nappes rifaines</i>	74
<i>b- La nappe d'Ouezzane</i>	74
B. APPROCHE ZONALE.....	75
VI. CADRE GEOMORPHOLOGIQUE.....	78
VII. LE RELIEF.....	80
VIII. LE SOL	81
IX. L'OCCUPATION DU SOL	82
X. CADRE SOCIO-ECONOMIQUE.....	85
1. Le territoire et population.....	86
2. L'agriculture	87
3. L'industrie	88
4. Le tourisme.....	88
5. L'énergie.....	89
XI. CONCLUSION.....	89
 PARTIE III. METHODOLOGIE ET APPLICATION	 91
Chapitre I : Approche méthodologique.....	91

I. INTRODUCTION.....	91
II. CHOIX DE L'USLE.....	92
II. LES DONNEES ET TECHNIQUES UTILISEES DANS LE CADRE DE CETTE ETUDE.....	92
1. Les données et documents utilisées.....	92
2. Les techniques utilisées.....	93
<i>a. La télédétection.....</i>	<i>93</i>
<i>b. Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG)</i>	<i>94</i>
<i>c. Les analyses aux laboratoires.....</i>	<i>94</i>
III. LE MODELE QUALITATIF	94
III. LE MODELE QUANTITATIF	95
IV. CONCLUSION.....	97
Chapitre II : Application.....	98
I. LE MODELE QUALITATIF	98
1. Les paramètres du Modèle.....	98
<i>a. La carte de friabilité des sols.....</i>	<i>98</i>
<i>b. La carte du couvert végétal</i>	<i>100</i>
<i>c. La carte des classes de pentes</i>	<i>100</i>
2. L'application du modèle.....	102
II. LE MODELE QUANTITATIF.....	105
1. Le facteur d'érosivité de la pluie (R).....	105
2. Le facteur d'érodibilité du sol K.....	105
2.1. L'élaboration de la carte des unités homogènes	106
<i>a. La Carte géologique.....</i>	<i>106</i>
<i>b. La carte physiographique.....</i>	<i>108</i>
<i>c. La carte du couvert végétal</i>	<i>111</i>
<i>d. L'élaboration de la carte des unités homogènes</i>	<i>113</i>

2.2. Le positionnement des points de prélèvement et échantillonnage	113
2.3. Les analyses aux laboratoires.....	117
<i>a. La préparation des échantillons</i>	117
<i>b. Les analyses chimiques</i>	118
<i>c. Les analyses physiques</i>	118
3. Le facteur Topographique (LS).....	119
4. Le facteur du couvert végétal (C).....	119
5. Facteur des pratiques antiérosives (P).....	121
III. CONCLUSION.....	121
 PARTIE IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	123
Chapitre I. Sensibilité des sols à l'érosion.....	123
I. CARTE DE SENSIBILITE DES SOLS A L'EROSION.....	123
II. DISCUSSION	123
 Chapitre II : Modélisation de l'aléa d'érosion - Approche par bassin.....	126
I. BASSIN VERSANT DU BARRAGE SMIR.....	126
1. Cartographie thématique des facteurs de l'érosion	126
2. Carte d'aléa d'érosion	128
II. BASSIN VERSANT DU BARRAGE RAOUZ	132
1. Cartographie thématique des facteurs de l'érosion	132
2. Carte de risque potentiel d'érosion	135
III. BASSIN VERSANT DE L'OUED MGAZ ES-SEBT.....	137
1. Cartographie thématique des facteurs de l'érosion.....	137
2. Carte de risque potentiel d'érosion	139
IV. BASSIN VERSANT DU BARRAGE IBN BATOUTA	142
1. Cartographie thématique des facteurs de l'érosion.....	142
2. Carte des pertes en sol.....	143

V. BASSIN VERSANT DE L'OUED ALIANE.....	147
1. Cartographie thématique des facteurs de l'érosion.....	147
2. Carte des pertes en sol.....	150
VI. BASSIN VERSANT DU BARRAGE AJRAS.....	153
1. Cartographie thématique des facteurs de l'érosion.....	153
2. Carte des pertes en sol.....	155
VII. CONCLUSION.....	158
CONCLUSION GENERALE.....	161
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	166
ANNEXES.....	189

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

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 ruissellement (Lowdermilk, 1953). On pourrait donc se demander s'il reste encore quelque chose à découvrir pour la recherche... et quelque chose à écrire qui n'ait pas encore été dite !

Roose, 1994

Le sol est un des biens les plus précieux pour l'humanité puisqu'il représente le support des cultures et de l'agriculture que grâce à elles les civilisations du monde ont été développées. Cependant, un tel développement est accompagné toujours par un usage excessif et un gaspillage des ressources en sol. C'est surtout pendant ces derniers siècles, et encore plus ces dernières décennies, lorsque la densité de population a atteint des taux très élevés que s'est apparu les premiers symptômes de la dégradation de la fertilité des sols et que le phénomène de l'érosion s'est beaucoup accéléré. En effet, si la dégradation d'un sol est un phénomène qui peut être rapide, sa régénération est généralement très longue.

Dans la plupart des pays du monde, les processus de bétonisation et d'urbanisation se développent d'une manière exponentielle, ce qui limite considérablement l'utilisation productive des sols. Cette urbanisation est systématiquement accompagnée d'une demande de plus en plus excessive en produits de la terre, chose qui se traduit par une perte de fertilité des sols, une diminution de la productivité et surtout une réduction des fonctions du sol comme habitat biologique et réserve génétique.

Le problème de dégradation, se présentant comme un épuisement de la capacité des terres agricoles et qui constitue un phénomène dynamique répandu à l'échelle de la planète, apparaît sous l'influence combinée de conditions climatiques particulières et de mauvaises gestions du sol (Coote *et al.*, 1982; Taibi *et al.*, 1990 ; Wicherek et Laverdière, 1993). Il en résulte de sérieux problèmes tels que la réduction des terres arables, la diminution de la production agricole, la pollution des ressources en eau, l'envasement des barrages, ... etc.

Durant le 20^{ème} siècle, l'érosion a dramatiquement augmenté partout dans le monde. Environ 85% des phénomènes de dégradation des terres sont associées à l'érosion des sols, dont la plupart se sont produits durant des dernières décennies, causant ainsi une réduction de 17%

dans la productivité des terres (Oldeman *et al.*, 1990 ; Angima *et al.*, 2003). Dans un aperçu sur l'érosion et la sédimentation mondiale, Pimental (1995) a déclaré que plus de 50% des pâturages et environ 80% des terres agricoles dans le monde souffrent d'une érosion significative. À l'échelle mondiale, près de deux milliards d'hectares sont affectés par la dégradation du sol provoquée par l'activité humaine (Organisation des Nations Unies, 2000). Chaque année, quelque 20 millions d'hectares supplémentaires atteignent un niveau de dégradation trop important pour permettre une production agricole ou sont victimes de l'expansion urbaine anarchique (AEE, 2002).

L'érosion et la détérioration des sols se poursuivront et connaîtront fort probablement une accélération si aucune mesure diligente et appropriée n'est prise. De même, l'utilisation et la gestion durable des ressources en sol continueront à constituer un défi majeur pour les utilisateurs et les décideurs politiques. Les exigences auxquelles seront soumises ces ressources et leurs relations avec le changement climatique, la biodiversité et les échanges commerciaux nécessiteront des mesures appropriées afin de garder intacte leur qualité et de permettre leur utilisation par les générations futures. Les politiques et législations actuelles et leurs mécanismes de mise en œuvre sont inadéquats en vue d'une gestion durable et une utilisation rationnelle à long terme des sols.

De ce fait, le phénomène de l'érosion hydrique est une thématique qui s'impose de jour en jour au niveau des politiques environnementales des pays, que ça soit ceux développés ou en cours de développement. Il est actuellement, suite à ses effets en site et hors site, considéré comme un risque naturel (Haoues, 2008).

L'érosion par la pluie est un phénomène très répandu dans les pays du pourtour méditerranéen (Bou Kheir *et al.*, 2001a ; CEC, 2002) et elle continue à prendre des proportions considérables du sol, en particulier sur les pentes, à cause de la nature torrentielle des pluies, de la forte vulnérabilité des terrains et de l'impact défavorable des activités humaines. Des études récentes sur la vulnérabilité aux changements climatiques dans les zones méditerranéennes ont montré une tendance à l'accroissement de l'aridité qui à son tour accélère l'érosion hydrique.

Au Maroc, à l'instar des pays du pourtour méditerranéen, l'érosion a atteint des valeurs dépassant de loin les normes et les capacités de pédogénèse. Les ressources du sol sont entrain de disparaître et de se dégrader irréversiblement à un rythme sans précédent en raison des demandes croissantes de la population. Le développement démographique et l'augmentation de la production agricole et industrielle ainsi que l'extension des infrastructures bâties, surtout dans les zones à attraction économique et touristique élevée, ont exercé une pression considérable sur les ressources du sol. Les pressions exercées résultent de la concentration des populations et des activités dans des espaces réduits, ainsi que des changements survenus en matière de climat et d'utilisation du sol. D'autre part, le caractère agressif du climat méditerranéen, l'existence d'une agriculture traditionnelle et d'une pression forte sur les terres, des sols peu évolués et pauvres en matière organique et un relief le plus souvent accentué font que le Maroc est un pays très sensible à l'érosion.

Les chiffres les plus avancés concernant l'érosion à l'échelle nationale au Maroc sont principalement basés sur l'envasement des barrages existants, les mesures de la turbidité des eaux de ruissellement et les indices de risque d'érosion (FAO, 1975 ; Arnoldus, 1977 ; Boutayeb, 1988).

Une étude de la FAO en 1977 a révélé l'ampleur du phénomène dans le pays en indiquant que 12,6 millions d'hectares de culture et de parcours étaient considérés comme menacés. Une douzaine d'années plus tard, une autre étude (FAO, 1990) a montré que 40% des terres au Maroc sont menacées par l'érosion hydrique.

Une étude de reconnaissance a montré que pour 22.7 millions d'hectares évalués, 8.2 millions d'hectares (36%) sont cultivés, dont 18% nécessite des mesures sévères de conservation des sols; 13.4 millions d'hectares (59%) devrait être renforcés par le pâturage et la forêt et 1.1 million d'hectares (5%) connaissent une érosion intense et devrait donc être conclu de tout développement agricole. Ainsi, 64% de la superficie totale des étangs ne devrait pas être cultivée (MINENV, 2001).

Une analyse par photo-interprétation de 280 hectares dans le Rif central, au Nord du Maroc, a montré que la forêt et les zones arbustives, régressent respectivement de 989 ha/an et de 2858 ha/an. A ce rythme actuel de déforestation dans cette région, et selon la situation socio-économique, la forêt et le matorral disparaîtront respectivement autour de l'année 2014 et 2019 (MINENV, 2001). Cette diminution drastique du couvert végétal a pour corollaire une intensification des pertes en sol.

Dans cette chaîne de montagne, la sensibilité à l'érosion, étant plus importante, résulte de l'interaction de plusieurs facteurs : des précipitations à caractère torrentiel, un relief accidenté et des terrains tendres, en plus des facteurs anthropiques aggravants (El Ouadini *et al.*, 2000). Ces montagnes qui ne couvrent que 6% de la superficie totale du Maroc, fournissent à elles seuls plus de 60% des sédiments mobilisés chaque année dans le pays (Heusch, 1970). L'érosion atteint parfois 30 à 60 T/ha/an dans certaines régions rifaines (Lahlou, 1997 ; Ait Fora, 1995) et la dégradation spécifique des terres y est très élevée, pouvant atteindre 2400 à 5000 T/km²/an, contribuant ainsi à un envasement précoce des retenues de barrages qui reçoivent chaque année environ 50 millions de tonnes de sédiments (Merzouki, 1992 ; Merzouk *et al.*, 1997) et par conséquent la réduction de leurs capacités de stockage d'eau qui a été évaluée à 0,5% par an (Tahiri *et al.*, 1993) ; cela se traduit par la perte de 10.000 ha de terres agricoles (Margat et Vallée, 2000).

Pour répondre à ces problématiques environnementales, touchant aussi bien les chercheurs et les ingénieurs que les gestionnaires du territoire, des cartes de sols sont souvent produites afin de servir de support pour la compréhension des phénomènes. En effet, la problématique concerne en général, un objet caractérisé par des variables spécifiques. Ainsi, s'il s'agit de quantifier les risques d'érosion hydrique d'un bassin versant, il sera nécessaire de prendre en compte les différents facteurs qui y interviennent.

L'évaluation et la quantification des processus d'érosion, sur une base objective, d'une manière spatialisée et comparative constitue une étape fondamentale en vue de proposer des méthodes

de gestion rationnelle des ressources naturelles (eau, sol, végétation), afin de réduire les effets négatifs des processus érosifs. L'entreprise de cartographie et mesure des processus d'érosion permettra sans nul doute l'évaluation objective et réelle de l'ampleur et des conséquences réelles de ce phénomène.

La cartographie des aléas d'érosion à l'échelle régionale sous les Systèmes d'Information Géographique (SIG) repose sur des modèles faisant appel à de nombreuses variables et composés de plusieurs phases.

En effet, les informations et données disponibles ne permettent pas une cartographie de la susceptibilité des sols à l'érosion à travers le Maroc. Cependant, une tentative de classer le risque d'érosion, basée sur une combinaison de trois facteurs (topographie, sol et du substrat, climat agressif), a distingué sept régions physiographiques, dont les montagnes du Rif sont les plus exposées à l'érosion.

Au Maroc, plusieurs chercheurs ont essayé des approches plus simples, fondées sur le modèle empirique américain de l'équation universelle de perte de sol (USLE) et sur l'évaluation d'indicateurs mesurables, pour la qualification du comportement hydrologique et de l'érodibilité des sols. Ils ont montré que la production de ruissellement d'un sol est fortement liée aux caractéristiques physiques de son état de surface et à sa couverture végétale (Ait Fora, 1995 ; Al Karkouri *et al.*, 2000 ; Anis *et al.*, 1994 ; Benmoussa *et al.*, 1993 ; El Garouani *et al.*, 2003, 2005, 2007 et 2008 ; Heusch, 1970 ; Rahhou, 1999 ; Sabir *et al.*, 2004 ; Sadiki *et al.*, 2004 ; Siteri *et al.*, 2003).

Par ailleurs, sur le plan technique, le manque de photos aériennes récentes, le manque des images satellitaires de bonne précision, la difficulté de l'éloignement et l'accès au site ont affecté la qualité du travail soit par un manque de précision (actualisation) au niveau de la description des processus érosifs soit en induisant un certain retard dans le processus de réalisation du travail (Aboulabbès *et al.*, 2005).

Puisque la plupart des modèles utilisent des paramètres qui peuvent être évalués à partir de documents cartographiques, les SIG sont suggérés pour assembler les informations spatiales qui décrivent l'environnement d'un bassin versant.

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).

S'il est possible de réduire considérablement l'érosion hydrique par le biais de techniques adaptées, il est d'abord nécessaire de cibler les secteurs de forte érosion nécessitant une intervention prioritaire car le phénomène revêt un caractère d'irréversibilité.

La péninsule de Tanger a été choisie comme zone d'étude en raison de la diversité de ses caractéristiques naturelles. Le bassin versant comprend un étagement des altitudes allant du niveau de la mer jusqu'à environ 1026 m d'altitude, représentant un large éventail de situations écologiques trouvés dans la façade méditerranéenne. Cette situation confère à la région une diversité de topographie, de sols, de végétation et d'usages des terres typiques de la zone. Tous les types de processus d'érosion y sont représentés de même que les différents types d'utilisation de terrain: terres de cultures irriguées, terres de cultures en bour, terres de parcours, forêts, arboriculture etc. Cette situation rare facilitera une intégration de l'élément humain à travers une approche participative aux différentes interventions qui seront ultérieurement entreprises. Il y aura notamment la possibilité de combiner une approche terroir avec une approche bassin versant.

La cartographie de l'érosion hydrique à l'aide d'une des méthodes de pertes de sol est une opération difficile et demande de lourds moyens, sans parler du manque de données détaillées sur les précipitations à cause de l'absence de stations climatiques dans le secteur d'étude et sur les sols à cause de l'absence d'une cartographie détaillée complète sur les sols au Maroc.

Il s'agit d'une approche systémique basée sur une méthode multicritères permettant de dresser des cartes indicielles numérisées. Ces cartes sont basées sur la relation entre les différents paramètres ayant une influence sur le phénomène d'érosion (lithologie, pluviométrie, topographie, couvert végétal...) et permettent d'exprimer le niveau de vulnérabilité des sols à l'érosion. Le résultat est un document qui constitue un outil d'aide à la décision en termes de gestion et de protection des ressources naturelles.

Le modèle développé, déjà appliqué avec succès pour la modélisation de l'érosion des sols à différentes échelles lorsque les données d'entrée détaillées ne sont pas disponibles (Bou Kheir *et al.*, 2001c ; Bou Kheir *et al.*, 2004 ; Bou Kheir *et al.*, 2006 ; Bou Kheir *et al.*, 2008 ; Cerdan *et al.*, 2002a et b ; Harris *et al.*, 1990 ; Le Bissonnais *et al.*, 2002 et 2004 ; André, 1971), utilise des règles de décision qualitatives et une organisation hiérarchique des données disponibles, représentés par différentes cartes thématiques établies à partir des données de base des différents paramètres environnementaux.

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'élaboration de la carte de sensibilité des sols à l'érosion ;
- L'application du modèle de pertes de sols au niveau de six bassins versants et établissement de la carte d'aléa d'érosion au niveau de chacun des bassins ;

- La quantification du taux d'érosion en tonnes par unité spatiale au niveau des sites étudiés.

Les différentes étapes de la réalisation de cette étude ainsi que les résultats obtenus et leurs discussions seront établies dans le présent rapport comme suit :

- La première partie correspondra à une revue bibliographique sur les généralités concernant la thématique étudiée ainsi qu'une synthèse des travaux antérieurs réalisés dans la zone. Cette partie comportera un chapitre sur les sols et ses caractéristiques, un chapitre sur le phénomène de l'érosion et un chapitre sur les méthodes et les modèles d'estimation et d'évaluation de l'érosion hydrique ;
- La deuxième partie 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 étudiée.
- La troisième partie est consacrée à la description détaillée de la méthodologie adoptée, tout en mettant la lumière sur le modèle adopté et les techniques utilisées ;
- La quatrième partie concerne l'évaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique dans la zone d'étude, où seront exposés les différents résultats obtenus, accompagnés de leurs discussions et interprétations ;
- Enfin, une conclusion générale qui résume l'essentiel des parties précédentes ainsi que des recommandations et perspectives à prendre en considérations dans une éventuelle étude.

PARTIE I
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

Le Sol

Parmi les divers domaines abordés par les politiques de l'environnement, le sol est probablement le plus négligé. Le sol, bien que souvent présenté comme un milieu vivant dans les introductions des divers documents officiels, n'est en réalité plus traité que comme un système physique et chimique dans lequel la diversité biologique n'est pas considérée comme une ressource renouvelable et ne fait l'objet d'aucune réglementation applicable localement. Comment, dans ces conditions, s'ajuster aux concepts de développement durable si souvent évoqués ?

CSRE, 2003.

I. INTRODUCTION

Le sol est la couche de terre meuble de l'écorce terrestre où peuvent pousser les plantes. Il est donc essentiel à la vie. Il provient en général de l'altération sur place de la roche mère sous-jacente, sous l'influence de facteurs physiques, chimiques et biologiques.

De par sa position d'interface, le sol constitue un compartiment clé (réservoir, source ou puits). Quels que soient les objectifs recherchés et les modèles utilisés pour son étude ou celle des variations qu'il subit, le sol est un point de passage obligé dont il convient de connaître ses propriétés et ses fonctions.

Les sols se forment en des milliers d'années à travers l'altération des roches. Cette évolution s'explique par les conditions climatiques, par l'apparition de la végétation ainsi que par l'activité des organismes vivant dans le sol et à sa surface (humains compris). Cependant, les principales propriétés des sols, comme la structure, la porosité, l'activité biologique et les teneurs en certains éléments nutritifs, peuvent évoluer très vite (Ruellan *et al.*, 2008).

L'Homme a besoin du sol pour satisfaire ses besoins vitaux, donc pour s'alimenter et se loger. Depuis que l'Homme existe, le sol l'accompagne et est présent au quotidien et partout. Les Hommes se sont sédentarisés à proximité de sols fertiles ; des civilisations se sont construites et détruites en fonction de l'évolution des sols résultant des activités humaines. Le sol constitue pour l'Homme le support de toutes ses activités et ses infrastructures et constitue aussi ses champs, sources son alimentation (Ruellan *et al.*, 2008).

II. LE SOL

La définition du sol adoptée dans ce rapport est vaste et englobe tous ses aspects pertinents. Le sol est un corps tridimensionnel qui remplit un large éventail de fonctions socio-économiques et écologiques. C'est un milieu complexe formé d'une matrice poreuse au sein de laquelle l'air, l'eau et les organismes vivants entrent en contact avec les flux de substances et les fluides qui se meuvent entre ces éléments. (AEE, 1999).

Diverses définitions du sol sont donc possibles en fonction de l'usage que l'on en fait et du rôle qu'on lui assigne, dans une perspective d'une meilleure compréhension des systèmes qui contrôlent notre planète. Selon les approches et les concepts, on peut attribuer au sol :

Une définition générale : "Le sol fait partie intégrante des écosystèmes terrestres et constitue l'interface entre la surface de la terre et le socle rocheux. Il se subdivise en couches horizontales successives aux caractéristiques physiques, chimiques et biologiques spécifiques. Il a également différentes fonctions. Du point de vue de l'histoire et de l'utilisation des sols ainsi que d'une perspective écologique et environnementale, le concept de sols embrasse également les roches poreuses sédimentaires, les autres matériaux perméables, en plus de l'eau qu'ils contiennent et des réserves d'eau souterraine" (Blum, 2001).

Une définition agronomique : support de la végétation et des cultures. Le sol est le support des plantes, cultivées ou non. C'est la zone exploitée par les racines. Il englobe le domaine de la rhizosphère (Hiltner, 1904), zone d'échanges d'ions, de compétition pour l'eau, l'oxygène (Lemanceau et Heulin, 1998) où l'activité microbienne est stimulée par la libération de composés organiques. Son potentiel de production se traduit par la notion de fertilité, variable en fonction de ses caractéristiques intrinsèques mais aussi des apports extérieurs (fertilisation, amendements minéraux ou organiques, traitements phytosanitaires), des améliorations foncières (drainage, irrigation, sous-solage) ou des techniques culturales appropriées aux modes de cultures envisagés.

Une définition pédologique : zone altéritique colonisée par la biosphère. Le sol est une zone mince formant la partie superficielle de l'écorce terrestre affectée par les différents processus de l'altération physique ou mécanique, (désagrégation) ou ceux de l'altération chimique (décomposition). Les premiers, gel, lumière, humidification, dessiccation, déterminent des dilatations, des contractions qui engendrent la fissuration des roches et à terme leur fragmentation. Les seconds, dissolution (lixiviation), hydratation, hydrolyse, oxydation, réduction, déterminent des changements de composition chimique, de structure, de porosité de couleurs et des entraînements (lessivage) susceptibles de transformer le substrat et de le différencier en horizons.

Une définition écologique : le sol est un milieu triphasique avec une phase solide, minérale et organique, comprenant les éléments constituant "l'architecture" ou structure du sol, une phase liquide avec éléments dissous constituant la solution du sol et en fin une phase gazeuse remplissant les pores non remplis par la phase précédente. Ce milieu, poreux, hautement réactif vis à vis de la phase liquide, intégrant des fractions présentant les propriétés des substances colloïdales est un lieu d'échanges fonctionnant comme un réacteur chimique.

Grâce au pouvoir adsorbant du sol et de ses capacités d'échanges le sol constitue le milieu nutritif essentiel des écosystèmes terrestres. Il demeure également le lieu privilégié des fonctions biotransformatrices des écosystèmes, au regard du stockage et de la dynamique des flux du carbone et de l'azote (Balesdent, 1998) mais aussi au regard de l'altération des minéraux donc des processus initiateurs de la pédogenèse, grâce à l'activité des microorganismes (Berthelin *et al.*, 1999).

III. LES FONCTIONS DU SOL

En reprenant et complétant la proposition de Blum et Santelises (1994) cités par Doran *et al.*, (1996), on peut définir six fonctions du sol groupées en trois ensembles : des fonctions écologiques, des fonctions technologiques et des fonctions socio-économiques (Calvet, 2003).

1. Les fonctions écologiques

1.1. La fonction de milieu biologique

Le sol est un milieu où croissent et se développent de très nombreux organismes vivants animaux et végétaux biologique. Cette fonction repose sur le fait que le sol constitue pour les organismes vivants qui s'y trouvent, un environnement physique, physico-chimique et biologique.

1.2. La fonction de déterminant de la qualité de l'environnement

Elle concerne le rôle du sol dans le déterminisme de la qualité des eaux de l'air et de la chaîne alimentaire. Les constituants des sols, leurs assemblages et les organismes vivants sont à l'origine de nombreux phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui déterminent la composition chimique des eaux qui circulent dans les nappes souterraines et dans les réseaux hydrographiques superficiels. Source de substances gazeuses à effet de serre, le sol intervient également dans le déterminisme de la qualité de l'air. Et enfin la qualité alimentaire des végétaux dépend parfois du sol et de la capacité à retenir des substances polluantes inorganiques ou organiques.

1.3. La fonction dans les cycles biogéochimiques

Le rôle du sol est d'une très grande importance dans les cycles du carbone, de l'azote, du soufre et du phosphore, tant du point de vue agronomique que du point de vue environnemental. Le sol participe au cycle du carbone en stockant et en rejetant le carbone dans l'atmosphère. Le flux d'azote vers l'atmosphère participent également aux transferts de matière au sein de l'écosystème terrestre (Ruellan *et al.*, 2008).

2. Les fonctions technologiques

2.1. La fonction du support mécanique

Elle s'exerce à l'égard des végétaux mais aussi des outils et machines utilisés pour le travail du sol. Elle peut aussi être invoquée pour les bâtiments et les infrastructures de transport.

2.2. La fonction source de matériaux

Le sol fournit les matériaux que l'homme utilise pour construire les routes et les bâtiments et pour ses activités industrielles, artisanales, et culturelles. Il fournit également les matériaux argilo-sableux pour la fabrication de briques et les matériaux consolidés, comme il fournit de des colorants utilisés pour la peinture (Ruellan *et al.*, 2008).

2.3. La fonction de réceptacle de déchets industriels et urbains

Le sol peut être un site réceptacle de déchets, c'est une réalité de nombreux sites industriels et urbains qui reçoivent des déchets de toute nature dans des conditions le plus souvent incontrôlées, ce qui pose le problème de leur décontamination et leur réhabilitation.

3. Les fonctions socio-économiques

De point de vue culturel, le sol est une source d'informations archéologiques intéressantes aussi bien pour sa propre connaissance et notamment pour celle de son évolution, que pour celle des communautés humaines qui l'ont utilisée.

Economiquement, les sols ont une valeur patrimoniale qui est de plus en plus prise en compte dans la gestion de toutes les valeurs attachées aux autres fonctions du sol. Le sol est le lieu de la production agricole et sylvicole et sert de support aux constructions humaines : bâtiments, infrastructures de transports...

IV. LE SYSTEME SOL

Comme tout système, le sol comprend des éléments constitutifs, perceptibles à différents niveaux d'échelle, identifiables, susceptibles d'être isolés (particule minérale ou organique, agrégat, revêtement, pore...) et des organisations et assemblages résultats de l'action de processus spécifiques, mettant en jeu des mécanismes complexes et aboutissant à la création de structures.

Le sol est formé d'un ensemble d'éléments en interaction qui peuvent être répartis dans un nombre fini ou infini de classes-repères (Delattre, 1971.). Les interactions entre ces éléments se traduisent par des relations de type topologique, d'ordre et de transfert.

Le système sol n'est pas seulement physique ; mais il est également biologique dans la mesure où la biosphère participe de son évolution. Le sol est un système structuré et un milieu organisé à différentes échelles.

Le sol est une interface fragile ; il restera longtemps indispensable à la satisfaction des besoins nutritionnels croissants de l'Humanité. Mais, plus important encore, le sol est indispensable à la survie de la plupart des écosystèmes terrestres donc au maintien de la biodiversité. Certaines pratiques anthropiques entraînent des modifications irréversibles et à terme l'altération des fonctions, la disparition des sols ou leur stérilisation : l'érosion, l'altération quantitative et qualitative du niveau et du fonctionnement du réservoir en éléments

nutritifs, l'acidification, la salinisation sont autant de processus engendrés par les méthodes modernes d'exploitation de la ressource sol (Stengel et Gelin, 1998).

Le sol est un lieu d'échanges et de transferts (flux) ; il est un milieu triphasé, poreux, perméable, apte à transporter des liquides, des gaz et de la chaleur. La variété des phénomènes de transport y est très importante. Par ailleurs l'évapotranspiration des couverts végétaux conditionne en partie la circulation de l'eau à l'échelle de la micro ou de la méso-porosité du sol (Bruckler, 1998).

Le sol représente un potentiel multiple ; d'une part un potentiel de production lié à la richesse du sol en éléments (la fertilité) et la capacité du sol à exporter les éléments (étroitement dépendant en fait des pratiques humaines). D'autre part, un potentiel d'inertie ou résistance passive, qui réside des échanges de matières et d'énergie avec l'extérieur.

Le sol est l'expression d'un équilibre instable (concept de résilience) ; l'ensemble des contraintes extérieures au système, engendre des changements d'état, soit irréversibles ou passagers. Dans ce dernier cas, le sol revient au bout d'un certain temps à l'état stable ou métastable qu'il occupait avant la perturbation même s'il conserve quelques "déformations" de sa structure.

V. CONCLUSION

Le sol est généralement défini comme la couche supérieure de la croûte terrestre. Il est constitué de particules minérales, de matières organiques, d'eau, d'air et d'organismes vivants.

En premier lieu, le sol naît de la matière minérale, issue de la lithosphère, des roches et des produits de leur altération que l'on nomme "altérites". La pédogenèse, processus de formation et de différenciation des sols, est étroitement dépendante des processus physico-chimiques qui contrôlent cette altération (weathering), dont le moteur serait l'action des agents climatiques (altération météorique).

En deuxième lieu et parallèlement, les processus de la pédogenèse sont étroitement dépendants de l'action des êtres vivants, de leur combinaison avec l'environnement minéral (produisant le complexe organo-minéral d'altération) et des multiples fonctions qui en dépendent.

Chapitre II

La dégradation des sols – Erosion

L'érosion c'est un processus naturel qui certes, abaisse toutes les montagnes mais en même temps, elle engraisse les vallées, forme les riches plaines qui nourrissent une bonne partie de l'humanité. Il n'est donc pas forcément souhaitable d'arrêter toute érosion, mais de la réduire à un niveau acceptable et tolérable.

Roose, 1994.

I. INTRODUCTION

La dégradation des sols est un phénomène naturel inhérent aux processus physico-chimiques et biologiques qui dynamisent notre planète. Le devenir géologique des sols est compromis par l'existence de facteurs exogènes qui concourent tôt ou tard à leur destruction. Il s'agit d'un phénomène naturellement présent dans les cycles géologiques mais accéléré par les contraintes liées au mode de vie occidental et par l'émergence des processus de production intensifs. Ceci au nom de la satisfaction des besoins alimentaires de la planète.

On entend par dégradation des sols la perte de leur potentiel au regard de ce que l'on espérait qu'il soit. On ne peut donc évoquer ce concept de dégradation qu'au travers du filtre de l'Homme et des objectifs économiques qu'il s'est fixé.

Les études scientifiques sur l'érosion n'ont commencé qu'au début du 20^{ème} siècle; d'abord en Allemagne, puis 40 ans plus tard aux Etats Unis d'Amérique, à l'époque de la grande crise économique.

Il fallut encore attendre les années 1940 pour qu'un chercheur, confiné dans son laboratoire alors que les bombes pleuvaient sur l'Europe, découvre que l'énergie cinétique développée par la chute des gouttes de pluie était à l'origine de la dégradation de la surface du sol, du ruissellement et d'une bonne partie de l'érosion observée sur les terres cultivées (effet splash) (Ellison, 1944).

Le phénomène de l'érosion est une thématique qui s'impose aujourd'hui et son importance croît de jour en jour au niveau des politiques de l'aménagement et environnementales des pays. L'ampleur de ce fléau écologique et de ses impacts directs et indirects ont permis de le classer dans la case des risques naturels (Haoues, 2008).

II. LA NOTION DU RISQUE

1. Définition

Le risque caractérise le niveau des effets potentiels, en termes de dommages, d'un événement susceptible de survenir sur un site, en relation avec la vulnérabilité de ce site eu égard à ce type d'événement ; le niveau élevé ou faible de risque est lié à l'importance de l'événement d'une part, au degré de vulnérabilité du site d'autre part (Dautrebande et Colard, 2003a et ab).

En soi, le terme "risque", bien que polysémantique, inclut toujours une notion de danger outre une notion de probabilité d'occurrence (spatiale ou temporelle) et une notion d'intensité (Bernier *et al.*, 2000)

En termes de dommages possibles ou prévisibles, le risque se détermine par le croisement de l'aléa et de la vulnérabilité :

L'aléa est un phénomène naturel lié ou non aux activités humaines. Il correspond à la probabilité d'occurrence d'un phénomène donné. On parle toujours d'un aléa pour un phénomène et une durée donnée (aléa volcanique, aléa sismique, etc.).

La vulnérabilité caractérise le niveau des dommages prévisibles sur les enjeux. Ces derniers représentent les intérêts, de différentes natures (économique, environnemental, sanitaire, patrimoniale, ...), menacés par l'aléa et susceptibles de subir des préjudices. La vulnérabilité intrinsèque, autrement appelée sensibilité ou encore susceptibilité, caractérise le niveau de réactivité du milieu naturel eu égard aux aléas considérés (Dautrebande et Sohier, 2006 ; Dautrebande et Mokadem, 2006 ; Sohier et Dautrebande, 2005).

En l'occurrence, en ce qui concerne les problématiques du ruissellement et de l'érosion des bassins versants, la vulnérabilité naturelle pourra porter sur des paramètres du milieu, en interaction entre eux : les pentes, les sols, le drainage naturel des terres, la forme du bassin versant (succession plateau-versant abrupt, bassin versant en forme d'entonnoir, vallon sec, etc.), la dimension du bassin versant, etc.

2. La gestion du risque

Étant donné le coût et les dégâts importants que peuvent occasionner des catastrophes naturelles, les collectivités cherchent de plus en plus à mieux prévoir et prévenir ces catastrophes, et ce, par une bonne gestion des risques sur leurs territoires.

La gestion des risques passe par la réalisation de cartes d'aléas, généralement à l'échelle d'une commune ou d'un groupement de communes, et qui comprennent un zonage de l'aléa pour le phénomène étudié.

3. Le risque d'érosion

2.1. L'érosion

Le mot érosion vient du verbe latin "erodere" qui signifie "ronger". L'érosion ronge la terre et transporte le sol, d'où l'interprétation pessimiste de certains auteurs qui décrivent l'érosion

comme une lèpre qui ronge la terre jusqu'à ne laisser qu'un squelette blanchi. Les montagnes calcaires qui entourent la Méditerranée illustrent bien ce processus de décharnement des montagnes dès lors qu'on les défriche et que l'on brûle leur maigre végétation.

Selon Foucault et Raoult (1995), l'érosion se définit comme un ensemble des phénomènes externes qui, à la surface du sol ou à faible profondeur, enlèvent tout ou partie des terrains existants et modifient ainsi le relief

L'érosion des sols est un processus d'altération de la surface du sol impliquant successivement le détachement de particules de sol, leur transport et leur dépôt à une distance pouvant varier de moins d'un mètre à plusieurs milliers de kilomètres (Dautrebande et al., 2006). Elle est donc un phénomène dynamique qui contribue à transformer les reliefs des sommets ou encore des versants.

Cependant, une érosion en amont implique une sédimentation en aval. Une érosion n'a pas forcément toujours un effet négatif, car c'est en premier lieu un phénomène naturel, sauf qu'il faut la maîtriser pour qu'elle reste dans un niveau tolérable.

2.2. La tolérance en pertes de sol

Dans le domaine de l'érosion, la tolérance a d'abord été définie comme la perte en terre tolérée car elle est équilibrée avec la formation du sol par l'altération des roches. Elle varie de 1 à 12 t/ha/an en fonction du climat, du type de roche et de l'épaisseur des sols. On a donc tenté de définir la tolérance comme l'érosion qui ne provoquerait pas de baisse sensible de la productivité des terres.

2.3. La variabilité spatio-temporelle de l'érosion

a. La variabilité de l'érosion dans l'espace

L'érosion résulte de nombreux processus qui jouent au niveau de trois phases (le détachement de particules, leur transport et la sédimentation) quelle que soit l'échelle d'étude.

En montagne, lorsque la couverture végétale est détruite, le ravinement, les torrents et les glissements de terrain entraînent beaucoup de transferts solides qui causent d'énormes dégâts. Dans les piémonts, où les pentes sont encore fortes, les dégâts d'érosion proviennent du ravinement des torrents qui charrient une énorme charge solide et pour une moindre part, de la dégradation de la végétation par le surpâturage ou les feux et les cultures de "rapine". Enfin, dans les plaines, les problèmes concernent le plus souvent l'alluvionnement dans les canaux, les rivières et les ports, l'inondation des lits majeurs des rivières, le colluvionnement boueux de quartiers résidentiels et enfin la pollution des eaux.

b. La variabilité de l'érosion dans le temps

- **L'érosion normale ou géologique** (morphogénèse) qui façonne lentement les versants (0,1 à 1 t/ha/an) tout en permettant le développement d'une couverture pédologique issue de l'altération des roches en place et des apports alluviaux et colluviaux (pédogénèse) (Kilian et Bertrand, 1974 ; cités par Roose, 1994)). Dans les zones à soulèvement orogénique

paroxysmique, les débits solides des rivières peuvent atteindre 50 t/ha/an et jusqu'à 100 t/ha/an dans l'Himalaya qui se soulève à la vitesse de 1 cm par an.

- **L'érosion accélérée par l'homme**, suite à une exploitation imprudente du milieu, est 10 à 1.000 fois plus rapide que l'érosion normale. Il suffit d'une perte de 12 à 15 t/ha/an, soit 1 mm/an ou 1m/1.000 ans pour dépasser la vitesse de l'altération des roches (Roose, 1973).

III. LE DECLENCHEMENT DE L'EROSION HYDRIQUE

1. La définition de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique des sols intervient lorsque les eaux de ruissellement ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent le long de la parcelle et emportent avec elles des particules de terre. Le sol ne peut plus absorber les eaux en excédent si l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface de sol, c'est le ruissellement hortonien, ou bien si la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par la nappe, c'est le ruissellement par saturation (Le Bissonnais *et al.*, 2002).

Ce type d'érosion est accéléré par diverses pratiques de gestion agricole. Elle entraîne la perte ou le déplacement de la couche arable, qui s'accompagne généralement d'une diminution de la qualité et du rendement des cultures. De plus, si les sédiments sont transportés dans les cours d'eau, ils peuvent provoquer un accroissement de la turbidité et de la sédimentation. En outre, des éléments nutritifs, des pesticides et des bactéries peuvent être fixés aux particules de sol érodé, ce qui contribue à détériorer encore plus la qualité de l'eau.

2. Les processus de l'érosion hydrique

2.1. Le détachement

Il se produit lorsque les gouttes de pluie frappent le sol nu. Les gouttes de pluies ont l'effet de véritables petites bombes où chaque goutte qui tombe est érosive, sa force brise les agrégats et disperse les particules du sol, ce qu'on appelle l'effet "splash". La force érosive se diffère selon le diamètre des gouttes de pluie ; plus le diamètre est grand plus celles-ci sont érosives. Ainsi une faible pluie pendant une longue durée aura moins d'impact qu'une forte pluie de quelques instants.

2.2. Le transport

Suit au phénomène du détachement, il s'installe le processus du transport qu'il se fait par l'écoulement de l'eau à la surface du sol érodé.

2.3. Le dépôt

Appelé aussi sédimentation, il se produit lorsque le courant n'est plus capable de maintenir les particules en suspension. Il résulte d'un ralentissement de la vitesse d'écoulement.

3. Les différents types de l'érosion hydrique

Les grandes distinctions entre les différentes catégories de l'érosion hydrique se font selon le caractère diffus ou linéaire du ruissellement et l'agent d'arrachement des particules solides.

3.1. 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 apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'organise et creuse des formes de plus en plus profondes (Zaher, 2010).

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 linéaire peut prendre deux formes, en rigole ou ravine :

a. L'érosion en rigoles (*Rill erosion*)

L'érosion en rigoles est une forme d'érosion qui se produit lorsque la concentration des eaux de ruissellement morcelle ou creuse le sol de plus en plus en profondeur. Elle consiste en 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 al.*, 2006 ; Dautrebande et Sohier, 2006).

Les rigoles peuvent soit suivre les canaux formés par le matériel aratoire, soit former un motif dendritique qui ressemble aux branches d'un arbre. Elles n'atteignent que l'horizon supérieur de la couverture pédologique et peuvent être éliminées par les travaux aratoires.

b. L'érosion en ravine (*Gully erosion*)

C'est une érosion dite concentrée, de type volumique (Dautrebande et Sohier, 2006). On parle d'érosion en ravine lorsque le réseau fluvial devient intense sur des pentes suffisamment fortes (Derruan, 1988) où les ravines suivent les chemins de drainage naturel de paysage.

Contrairement à l'érosion en rigoles, l'érosion en ravines atteint les horizons profonds de la couverture pédologique ; la ravine est donc une rigole approfondie. Elles sont de largeur et de profondeur variables (Dautrebande *et al.*, 2006).

3.2. L'érosion en masse

Elle désigne un ensemble de déplacements, plus ou moins brutaux, du sol ou du sous sol, d'origine naturelle ou anthropique. Ces déplacements peuvent être lents ou très rapides

Sous l'expression générique "érosion en masse" sont regroupés plusieurs types de

phénomènes d'instabilité des terrains variables en fonction du mécanisme mis en jeu.

Les principaux types de phénomènes observés et dont l'apparition peut entraîner des effets dommageables graves, sont :

a. Le glissement de terrain

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. Il peut en résulter la mise en mouvement d'une masse terreuse qui se décolle suivant une niche de décollement de forme concave. 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 :

- **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 ;

b. Les 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.

3.3. L'érosion en nappes

a. Définition

L'érosion en nappes ou diffuse se produit sur des surfaces de terres planes sans relief suite à un ruissellement modéré (Dautrebande *et al.*, 2006). Elle consiste en un lessivage du sol sans

que ce processus provoque d'incisions (Derruau, 1988). Ce lessivage a comme effet d'enlever la matière organique et les éléments nutritifs des sols, diminuant leur fertilité et leur production (Beasley, 1972). Elle enlève les particules fines et superficielles du sol de façon lente et insidieuse. Elle est peu spectaculaire et difficile à mesurer.

L'érosion en nappes est essentiellement liée au domaine des faibles pentes et des pluies d'intensité modérée. Sa contribution à l'érosion totale est difficile à évaluer et encore mal connue, mais elle est nettement significative dans les zones de plateaux et à l'amont des bassins versants. Sa contribution la plus significative, d'un point de vue environnemental, est de nature qualitative (Cerdan, 2001).

b. Les formes et les symptômes de l'érosion en nappes

L'érosion en nappes, comme il a été indiqué précédemment, consiste surtout par l'effet du ruissellement à enlever la partie superficielle de terre, et donc la roche mère apparaît à la surface ; c'est un premier signe ou symptôme de l'érosion en nappes.

Le deuxième signe et le plus connu est la présence de plages de couleur claire aux endroits les plus décupés et les plus agressés des champs (haut de collines, et rupture de pentes).

La remontée des cailloux et de pierres en surface par les outils de travail du sol présente à son tour un autre symptôme de cette forme d'érosion. Il s'agit en fait d'une fusion de l'horizon humifère et d'un travail profond du sol qui remonte en surface ces cailloux (Roose, 1973 ; Govers et Poesen, 1988).

D'autres signes et effets physiques visibles de l'érosion en nappe peuvent être cités ci-dessous (Yacouba, 2004) :

- Les buttes de sol résiduel, où sont perchées des touffes d'herbes quand elles n'ont pas été créées par l'accumulation de détritiques foliacés et d'humus, ou par le fouissage des rongeurs.
- L'accumulation de terre au-dessus des arbres, des pierres et des palissades. et des haies sur terrains en pente.
- Les racines d'arbres et arbustes, exposées à l'air, ou mises à nu dans des cours d'eau, résultats d'une dispersion du sol ou d'un accroissement de ruissellement suite à la dégradation.
- Les modifications de la flore (par exemple des buissons se substituant à l'herbe), survenant après surpâturage, et accompagnés souvent d'érosion.

c. Les conséquences de l'érosion en nappes

L'érosion en nappes entraîne des conséquences tant en amont qu'en aval des bassins versants. Elle peut se traduire, en amont, par des pertes en terre ainsi qu'en matière organique et en éléments nutritifs notamment l'azote et le phosphore (Dautrebande, 2003 et 2004).

D'autres conséquences s'ajoutent à ceux cités ci dessus, à savoir :

- Le nivellement de la surface du sol par dégradation des mottes et remplissage des creux ;

- La squelettisation des horizons superficiels par perte sélective des matières organiques et des argiles ;
- Le décapage de l'horizon humifère en laissant des plages de couleur claire.

4. Les facteurs de l'érosion hydrique

Le phénomène d'érosion est le résultat d'un ensemble de critères élémentaires du milieu, d'origine naturelle ou anthropique, pouvant être regroupés en cinq catégories : le climat et l'hydrologie, le sol, la topographie, la végétation et l'Homme. Il s'agit des facteurs d'érosion les plus importants que Wischmeier et Smith (1978) ont utilisé pour élaborer l'équation universelle de perte de sol.

4.1. Le climat et l'hydrologie

Le climat est le premier facteur de génération de l'érosion hydrique et surtout de l'érosion en nappes. Il intervient dans les processus de l'érosion essentiellement par les précipitations qui sont en fait l'origine de cette forme d'érosion.

Le facteur climatique dépendra de la durée et de l'intensité des précipitations. Les régions présentant des pluies de fortes intensités (orages violents) et une quantité importante de précipitations tombant sous forme de neige, seront plus sujettes à l'érosion hydrique.

Pour que l'eau érode le sol, l'érosion hydrique nécessite l'énergie des gouttes des pluies qui déclenche le processus de destruction des agrégats du sol. Le ruissellement n'assure que le transport des particules détachées ; l'eau ruisselle lorsque la vitesse d'arrivée de l'eau sur le sol est supérieure à la vitesse d'infiltration et le volume d'eau en excès à la surface dépend de l'intensité (hauteur d'eau par rapport à une durée) de la pluie et du volume total précipité.

Bref, l'énergie des gouttes de pluie qui tombent sur le sol défait les agglomérats en surface du sol selon sa sensibilité au détachement. C'est ce qui nous amène à parler du facteur du sol.

4.2. Le sol

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 (Papy *et al.*, 1995) et la cohésion (Mériaux, 1961).

Selon plusieurs auteurs, le facteur du sol est étroitement lié à la structure et à la granulométrie du sol. Les sols limoneux ou limono-sableux sont très sensibles à l'érosion (Osborn *et al.*, 1976 ; Poesen, 1983), alors que les sols à texture plus grossière sont moins susceptibles au détachement par la pluie, mais les horizons sableux pauvres en matière organique se tassent et le ruissellement devient aussi fort que sur des sols argileux (Roose *et al.*, 1993). Par contre, les sols à texture plus fine sont moins sensibles que les sols limoneux car leur agrégats sont plus stables, mais cela varie selon le type d'érosion : sur des sols à texture grossière, le

ravinement est plus important, alors que sur des sols limoneux ou sableux, l'érosion en rigoles devient plus importante (Poesen *et al.*, 1996).

Par ailleurs, la pierrosité est une autre variable du facteur. En effet, les graviers d'un minimum de 5 millimètres ont la capacité de réduire l'érosion (Foster *et al.*, 2002) comme une couverture de protection du sol.

Dans les régions méditerranéennes, les sols sont souvent peu profonds sauf ceux qui se situent sur des formes géomorphologiques d'accumulation ou des sables, ce qui rend ces sols peu résistants à l'action de l'érosion hydrique (Ryan, 1982). Plus de 60% des sols méditerranéens comportent des fragments de roches dans l'horizon superficiel (Poesen, 1990). Ces fragments réduisent l'érodibilité des sols en diminuant l'impact des gouttes de pluies et la vitesse de ruissellement (Poesen *et al.*, 1994).

4.3. La topographie

La morphologie du terrain joue un rôle important dans l'érosivité de celui-ci. Trois aspects de la topographie sont à prendre en compte, à savoir l'inclinaison de la pente, la longueur de pente, et la présence de concavités (talweg) et convexités.

a. L'inclinaison de la pente

L'inclinaison de la pente constitue le paramètre de relief le plus important qui détermine l'intensité de l'érosion hydrique. Cette dernière se manifeste sur les parcelles pentues ainsi qu'aux endroits où les eaux de ruissellement se concentrent dans un grand bassin.

En effet, plus l'inclinaison d'un terrain est forte plus la vitesse d'écoulement de l'eau augmente et plus la force érosive de l'eau est grande.

b. La longueur de pente

La longueur de la pente est un facteur moins important que son inclinaison et sa forme (Roose, 1994 ; FAO, 1983). La vitesse étant proportionnelle à la distance parcourue, plus la longueur de la parcelle est grande, plus la vitesse augmente. Même si l'influence de la longueur de la pente est reconnue, il est très difficile de connaître précisément l'exposant qui relie l'érosion et la longueur de la pente. Il a souvent été remarqué que le ruissellement diminue le long d'un versant de l'amont vers l'aval, peut-être dû à des zones d'infiltration plus élevées le long de la trajectoire de l'écoulement de surface. Tout comme pour l'inclinaison de la pente, il faut prendre en compte le type d'érosion pour pouvoir déterminer quelle est l'influence de la longueur de la parcelle.

c. Les concavités, les talwegs et les convexités

Les concavités et talwegs sont des zones où peuvent souvent être observées des rigoles et ravines. Sur les pentes concaves, l'érosion est la moins intense (D'Souza et Morgan, 1976 ; FAO, 1976).

Les endroits de convexités, souvent aux sommets de versant, sont les premiers à être décapés et les premiers à révéler des affleurements de roche mère, même s'ils ne montrent pas forcément des signes d'érosion concentrée. Les pertes en terre sur les pentes convexes sont plus importantes que sur les pentes rectilignes (Roose, 1999).

d. L'exposition des pentes

L'exposition des versants peut avoir une grande importance, car dans l'hémisphère Nord par exemple, sur des pentes exposées au Sud, qui ont une faible couverture végétale, l'érosion est très élevée.

4.4. La végétation

L'érosion des sols est fortement contrôlée par la couverture végétale dont dépend la production de la biomasse. Donc, on ne peut parler du problème d'érosion que lorsque l'écosystème naturel est perturbé.

La végétation agit aussi comme toit qui protège le sol contre l'érosion. Elle agit également comme facteur d'infiltration de l'eau ce qui réduit le ruissellement et aide la structure du sol à mieux se protéger contre le détachement. Le facteur du couvert végétal fait varier le facteur climatique et celui du sol selon l'utilisation du sol et le mode de culture.

La relation entre la végétation et l'érosion dépend alors d'une part, de la densité du couvert végétal et d'autre part du type de végétation. La capacité de maîtriser l'érosion de tout couvert végétal dépend ainsi de la protection disponible à diverses périodes de l'année en relation avec la quantité de précipitation à caractère érosif durant ces périodes (Fox *et al.*, 2008).

La production de la matière organique est limitée dans les milieux méditerranéens arides, ce qui rend les terres très susceptibles à l'érosion hydrique (Thornes, 1995). Dans les régions méditerranéennes semi-arides, les sols sous forêts bien entretenues sont considérées comme non sensibles à l'érosion hydrique (Clauzon et Vaudour, 1969 ; Martin, 1975 ; Delhoume, 1981) car la litière et les végétations basses favorisent l'infiltration (Roose, 1994). Dans les forêts sur-pâturées, on observe l'apparition de nombreuses ravines qui proviennent des eaux de ruissellement non retenues. En effet, le sol soumis au pâturage intensif se tasse, devient plus compact, sa perméabilité diminue et le ruissellement de l'eau s'accroît ce qui entraîne des pertes de terre considérables. Ce fort ruissellement aboutit à la formation de profondes ravines lorsqu'il atteint des terres cultivées (Laouina *et al.*, 2000).

4.5. Les activités humaines

La tâche humaine sur l'aggravation et l'accélération du processus de l'érosion hydrique revient principalement à son effet sur la dégradation du couvert végétal (défrichement des forêts; incendie; surpâturage,) et à son mode d'exploitation et de travail des terres.

Aussi l'accroissement démographique présente l'origine de toute sorte d'occupation et de dégradation des terres (terres agricoles, parcours...), ce qui favorise le phénomène d'érosion.

En régions méditerranéennes, l'intensité de l'érosion hydrique des sols est fortement liée aux activités humaines qui augmentent ou diminuent les pertes en terre. Les incendies répétés et le déboisement détériorent les forêts existantes. Ceci favorise fortement le ruissellement et aboutit à une forte érosion par la suite (Benchabane, 1997). La mise en culture d'un sol le rend sensible à l'érosion car la probabilité s'accroît d'avoir un sol nu lors des fortes pluies, cela dépend de la nature de la plante cultivée et des techniques culturales (Bou Kheir et al., 2001a).

Dans les régions montagneuses, l'Homme construit des terrasses antiérosives (Bou Kheir *et al.*, 2000 ; Bou Kheir *et al.*, 2001b et c) dont les caractéristiques dépendent de la pente (Verheye et Osman, 1974 ; Saccardy, 1950 ; Lefay, 1986). Cependant, ces terrasses ne protègent le sol contre l'érosion que si elles sont bien entretenues.

5. Les paramètres de contrôle de ruissellement et de l'érosion

5.1. Les paramètres de contrôles

Dans l'élaboration d'une stratégie globale de contrôle pour l'érosion et le ruissellement, on peut définir différents paramètres :

- **Les caractéristiques de la pluie** : l'efficacité de la pluie dépend de son intensité, de son hauteur, de sa durée, mais aussi de l'histoire climatique des jours précédents et donc de l'état hydrique de la parcelle (Litzler, 1988) ;

- **L'état de surface de sol** : la formation de croûte de battance par la pluie va fermer la surface du sol et donc augmenter le ruissellement mais favoriser également la résistance à l'entraînement des particules réarrangées de manière plus compacte. Dans un deuxième temps, lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration, des flaques vont se former dans le microrelief et les particules sédimentent. Cette croûte sédimentaire accroît encore davantage l'imperméabilité (Macary et Berville, 2003).

- **L'état hydrique du sol** : si l'humidité est faible, le sol se comporte comme un solide et se fissure sous les forces de cisaillement. Lorsque la teneur en eau augmente, le sol devient plastique. Selon Boiffin, cité par Léonard (2003), la stabilité du sol augmente si le sol reste faiblement humide pendant plusieurs jours, et inversement, elle diminue si le sol est à proximité de la saturation.

- **Les caractéristiques du sol** : si un sol est stable, il sera moins sensible à la battance et résistera mieux au tassement et à l'arrachement. Cette stabilité dépend de la texture du sol, de la nature minéralogique des argiles (si les argiles sont orientées, ils vont avoir tendance à se gonfler avec l'eau, ils seront alors peu stables), de la teneur en matières organiques (la matière organique quant à elle facilite la formation du complexe argilo humique et augmente la résistance), de la teneur en calcium (le calcium favorise lui aussi la formation de l'humus). L'infiltrabilité du sol est également un paramètre important pour la genèse du ruissellement. Elle est influencée par l'état de compacité, la fissuration et l'activité biologique du sol.

- **Les paramètres topographiques** : l'augmentation de la pente accroît la capacité de ruissellement, qu'il soit diffus ou concentré. Si la pente est faible, les particules libérées par effet splash restent à côté et vont former des croûtes de battance ce qui tend à imperméabiliser le sol et l'infiltration est alors limitée. Roose (cité par Macary et Berville, 2003), dans ses travaux sur les fortes pentes, estime que le ruissellement diminue lorsque la pente s'accroît. L'influence de la longueur est aussi importante, mais seulement si le ruissellement a la possibilité de se concentrer. La forme intervient également, une rupture de pente concave favorise le dépôt et une convexe accroît la possibilité d'érosion (Litzler, 1988).

- **La végétation**: elle retarde l'apparition du ruissellement car l'infiltration est accrue du fait d'une porosité plus importante et la capacité hydrique du sol augmente par la présence de matière organique. Elle limite également les pertes en terre par diminution de l'effet "splash" et renforcement de la résistance au cisaillement par les racines (Litzler, 1988).

- **Le travail du sol**: il augmente la perméabilité du sol. Il ameublît les sols tassés et aère le sol. L'opération la plus efficace consiste à faire des mottes grossières (Van Dijck, 2000). Le travail d'un sol trop humide diminue la perméabilité par formation d'une zone de tassement et de lissage. La répétition de travaux superficiels provoque un affinement excessif des mottes de terre (diminution de la rugosité) et augmente le détachement des particules de terre.

Les techniques sans labour du fait d'un tassement superficiel du sol, réduisent la détachabilité des particules et limitent le départ de terre. Seules les fines partent. Le désherbage supprime la couche protectrice et le ruissellement peut se concentrer dans des traces de roues ou d'érosion.

- **Le compactage du sol**: la compaction de surface, au niveau des traces de roues, causées par le trafic de la machinerie agricole, tend à diminuer l'infiltration et la porosité (Macary et Berville, 2003) et la compaction de profondeur est causée le plus souvent par un poids à l'essieu dépassant les 5-7 tonnes/essieu sur un sol humide (Tsague, 2005).

- **L'apport de matériaux de surface**: la présence de sarments, paille, composts, écorces ou encore marc favorise la dissipation des gouttes de pluie ainsi que l'infiltration, et limite la vitesse ruissellement et le départ des particules de terre (Litzler, 1988).

5.2. L'hiérarchisation des différents paramètres

L'ensemble des paramètres cités ci dessus affecte le ruissellement et l'érosion. Toutefois, ils n'ont pas tous le même poids et peuvent être hiérarchisés.

Plusieurs études dont celle de Herbreteau (2003), suggèrent que le facteur déterminant dans l'érosion est la couverture végétale. S'en suivent la texture du sol et la pente avec des poids plus faibles.

Selon Herbreteau, 2003, la pente et la texture se combinent et caractérisent, pour chaque parcelle, un degré de sensibilité à l'érosion potentielle. L'agriculteur peut alors raisonner l'entretien de sa parcelle et le sens de plantation pour limiter l'ampleur de l'érosion sur la parcelle. Les pratiques culturales ont un rôle non négligeable dans le déclenchement de

l'érosion, en particulier le taux de couverture végétale va avoir un rôle fondamental sur l'intensité de l'érosion des sols en retardant ou en accélérant les phénomènes.

Herbreteau (2003) et de Herbreteau et al. (2003) confirment les observations de Le Bissonnais *et al.*, (2002) en affirmant que la couverture végétale est considérée comme le facteur principal de l'aléa d'érosion. La classification des autres facteurs est dans l'ordre, la sensibilité à la battance, la topographie, l'érodibilité des terrains, et enfin les précipitations.

La sensibilité potentielle des terrains est ensuite combinée avec les données climatiques. L'effet du climat augmente avec la sensibilité à l'érosion. Dans des cas de très faible sensibilité à l'érosion, par exemple des sols couverts en permanence sur de faibles pentes, le risque reste très faible quelque soit l'érosivité des pluies.

Nous retiendrons que l'érosion est un phénomène complexe qui ne saurait être appréhendé par l'un ou l'autre des facteurs étudiés précédemment. L'érosion résulte de l'interaction de différents processus élémentaires qui peuvent varier spatialement au sein d'un bassin versant et temporellement durant l'année.

IV. CONCLUSION

En conclusion, Il ressort que malgré l'apparence du choix des modèles afin de simuler le taux d'érosion, on ne peut affirmer à priori que tous les modèles différents ou si proches produisent les mêmes résultats. Cela dépend, non seulement des données d'entrée des modèles, mais aussi de leur formulation interne.

Le modèle le plus utilisé et le plus connu est celui d'USLE. Cependant, il reste toujours un modèle empirique expérimental et non applicable tel qu'il est sur le terrain. Tous les chercheurs qui ont menés des études pour évaluer l'érosion hydrique en utilisant cette équation ont essayé de l'adapter à leur propre base de données et aux conditions locales ou régionales de leur zone d'étude. De même, le développement des outils informatiques et des SIG ont permis de faciliter de loin l'application du modèle.

Chapitre III

La modélisation de l'érosion

L'étude des processus d'érosion se situe aux interfaces de domaines scientifiques variés et nécessite une approche multidisciplinaire. Les facteurs et processus appartenant à ces différents domaines interagissent non linéairement dans l'espace et le temps, rendant complexe la formalisation des processus élémentaires de l'érosion.... Il est nécessaire de recourir à la modélisation. Elle fournit un cadre cohérent à la connaissance et permet de mettre à jour les différents points de blocages au niveau de notre appréhension des processus érosifs.

Cerdan et al., 2006

I. L'HISTORIQUE DE LA MODELISATION DE PERTE DE SOL

La modélisation des phénomènes naturels a un pour objectif leur représentation abstraite et l'amélioration de leur compréhension. La représentation a pour fonction d'établir un constat a priori afin de mieux cerner les actions de recherche à entreprendre. Parallèlement, la recherche d'une modélisation plus précise aboutit inévitablement à une connaissance plus exacte des phénomènes modélisés. Compte tenu de l'extrême complexité du milieu naturel et des possibilités limitées de modélisation, l'élaboration d'un modèle d'érosion est toujours une simplification du processus correspondant. Il convient donc quel que soit le modèle utilisé de conserver une grande prudence quant à sa fidélité vis-à-vis de la réalité.

Depuis 7000 ans, l'Homme accumule les traces de luttes pour maîtriser les diverses formes de l'érosion et améliorer la gestion de l'eau et de la fertilité des sols, ainsi que leur protection.

Les recherches sur l'origine et les facteurs de l'érosion en parcelles expérimentales n'ont commencé qu'en 1890 en Allemagne, dans les années 1935 aux USA, et 1954 en Afrique francophone.

Les effets de prédiction mathématique de l'érosion hydrique ont commencé il ya plus d'un demi-siècle. 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 a déterminé trois facteurs principaux : la susceptibilité du sol à l'érosion, l'érosivité potentielle des pluies et du ruissellement et la protection du sol par le couvert végétal.

Quelques années plus tard, Zingg (1940) publia la première équation pour calculer l'érosion du sol dans un champ. Cette équation décrivit mathématiquement les effets de la longueur de pente et de son degré sur l'érosion. Smith (1941) ajouta à l'équation des facteurs pour systèmes culturels et les pratiques culturales. Il ajouta également le concept d'une limite de tolérance des pertes en sol annuelles et utilisa l'équation résultante pour développer une méthode graphique pour la sélection des techniques de conservation dans certaines conditions des sols au centre des Etats Unis.

Le progrès sur les méthodes de prédiction de l'érosion ont continué durant la deuxième guerre mondiale, mais les publications des résultats furent reportées jusqu'après celles-ci.

Browning et ses associés (1947) ajoutèrent l'érodabilité des sols et le facteur des pratiques antiérosives à l'équation de Smith et établirent des tables de valeurs relatives à différents types de sol, systèmes de cultures et aux longueurs de pente. Smith et Whitt (1947) présentèrent une méthode pour estimer la perte en terre sur sol argileux. Des quotients de perte en terre à différentes pentes furent calculés pour les cultures en bande et en terrasse.

Smith et Whitt (1948) présentèrent une équation rationnelle d'estimation de l'érosion hydrique de la forme : « $A = C * S * L * K * P$ » où, « A » représente la moyenne annuelle de perte en terre mesurée sur sol argileux en cuvette, de longueur et de degré de pente déterminés, suivant un système de rotation et de direction des lignes de travail du sol bien spécifiques. « S » représente le degré de pente, « L » la longueur de pente, « K » l'érodabilité du sol et « P » représente le facteur des pratiques culturales. Les facteurs étaient sans dimension, ils représentaient des multiplicateurs utilisés pour ajuster la valeur du facteur C à d'autres conditions.

Smith et Whitt reconnurent le besoin du facteur traduisant l'agressivité de pluies pour une application plus large de leur équation.

En 1947, l'équation de Musgrave fût développée en se basant sur la méthode des pentes pour l'estimation de l'érosion dans les plaines du maïs de Wisconsin. Cette équation incluait en plus des facteurs des précipitations, les caractéristiques du ruissellement de surface, de la longueur et du degré de la pente, des propriétés du sol et l'effet du couvert végétal. Van Doren et Bartelli (1956) proposèrent ensuite une équation de pertes en terre spécifique aux sols et aux techniques culturales de l'Illinois qui estimait la perte en terre en fonction des neuf facteurs dont l'un exprimait l'érosion mesurée sur parcelle expérimentale. La perte en terre était ajustée aux autres conditions par plusieurs facteurs utilisés précédemment dans les modes d'aménagement.

Wischmeier (1955) établit la première équation utilisable dans la quasi-totalité des USA en se basant sur l'analyse des données de plus de 10.000 parcelles/ans dans 50 régions de 24 états américains. Ces analyses ont été traduites sous forme de droites de régressions qui ont donné des coefficients de corrélation hautement significatifs. Cette équation était constituée de sept facteurs qui sont, les systèmes de culture, les aménagements, le degré et la longueur de la pente, les pratiques de conservation, l'érodabilité des sols et le taux d'érosion antérieur. Plus

tard, des études ont combiné les facteurs d'aménagement et celui de rotation des cultures en un seul facteur, celui des pratiques culturales en l'occurrence (Wischmeier et Smith, 1958).

En 1965, Wischmeier et Smith développèrent la première équation universelle de perte en terre (USLE). Le but de cette dernière était de permettre une prévision chiffrée des risques d'érosion à l'échelle du champ dans le but d'intervenir pour garder l'érosion en dessous d'un seuil tolérable (1 à 12 t/ha/an).

En effet, une bonne revue de modèles disponible a été faite par Nafu (2000) et qu'on l'a complété avec d'autres qu'on a jugé nécessaires de nommer. On parle des modèles d'érosion et de transports de nutriments. Ces modèles ont différentes formes et selon différentes approches, on trouve, parmi d'autres, des modèles à base physique et ceux à base empirique.

II. LES DIFFERENTS TYPES DE MODELES D'EROSION

1. Les modèles à base physique

Ce sont des modèles hydrologiques fondés sur des aspects physiques de l'érosion. Ils utilisent des équations mathématiques pour reproduire le processus d'érosion hydrique en formulant leurs différentes étapes physiques (Company-Redmond, 1996).

Le grand atout de ce genre de modèles est qu'ils représentent une synthèse de tous les processus physiques en relation avec l'érosion, y inclus les interactions complexes entre différents facteurs et leur variation spatiale et temporelle.

Les modèles à base physique permettent la simulation événementielle basée sur des paramètres physiques mesurables et par conséquent une application aisée à des situations diverses. Par contre, ils considèrent un grand nombre de paramètres et donc des campagnes de mesure coûteuses, une bonne connaissance des phénomènes physiques et un calage du modèle. L'établissement de modèles à base physique s'avère difficile, car les paramètres décrivant le sol sont influencés par son histoire et varient au cours du temps (Sinniger *et al.*, 1996).

Il existe plusieurs modèles récemment développés et basés sur les aspects physiques du processus d'érosion, à savoir :

- Le modèle ANSWERS (Areal Non point Source Watershed Environment) de Beasley *et al.*, (1980) est conçu pour simuler les processus d'écoulement, d'érosion et de transport des sédiments dans un bassin versant agricole ;
- Le modèle EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) (Williams *et al.*, 1984) a été développé pour évaluer l'influence de l'érosion sur la productivité du sol à long terme. Le logiciel est adapté à la simulation de petits bassins versants qui sont homogènes (paramètres uniques) ;

- Le modèle CREAMS (Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural) de Knisel (1980) a été développé aux Etats-Unis pour des études à l'échelle de la parcelle ; a les mêmes objectifs que ANSWERS, mais il permet une simulation à long terme ;
- Le modèle SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Williams et al, 1985) est une adaptation du modèle CREAMS pour permettre la simulation de grands bassins versants complexes (paramètres distribués) ;
- Le modèle GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems) (Leonard et al. 1987) est une variante du logiciel CREAMS qui évalue également l'interaction des matières délavés des champs avec l'eau souterraine ;
- Le Modèle WEPP (Water Erosion Prediction Project) de Foster et Lane (1987) est un autre grand projet développé aux Etats-Unis désigné pour remplacer l'USLE ;
- Le modèle SEMMED (Soil Erosion Model for Mediterranean Areas) de Morgan (1995) a été conçu du côté européen. Ce modèle a été associé aux SIG et à la télédétection.

2. Les modèles à base empirique

Ce sont des modèles hydrologiques fondés sur des lois mathématiques appliquées et des expériences aux laboratoires ou sur 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 le plus simple et le plus connu, qui relie la perte de sédiments soit aux précipitations soit au ruissellement (Morgan, 1995), est l'USLE (Universal Soil Loss Equation) mené par Wischmeier et Smith (1958).

Une autre version de l'USLE, nommée MUSLE (Modified Universal Loss Equation) a été créée par Williams (1975) pour estimer les transports solides de chaque averse. Elle ne tient plus compte de l'érosivité de la pluie mais elle prend en considération le volume ruisselé.

Avec d'autres recherches, d'autres expériences, d'autres données et d'autres ressources qui sont disponibles, les chercheurs ont continué à améliorer USLE, ce qui a conduit au développement de la nouvelle équation universelle de perte de sol (RUSLE : Revised Universal Soil Loss Equation) qui reprend les termes de l'USLE en corrigeant certaines inexactitudes (Renard *et al.*, 1991) et en disposant plusieurs améliorations dans la détermination de facteurs.

En voie de développement, RUSLE de même a connu des améliorations aboutissant à l'élaboration des autres modèles empiriques RUSLE 1 et RUSLE 2. RUSLE 1 conserve la structure de base de l'USLE et se base sur la science et le jugement. Alors que RUSLE 2 est un autre progrès majeur sur RUSLE 1 qui a été développé principalement pour guider la planification de la conservation, l'inventaire et l'estimation de taux d'érosion des sédiments. RUSLE 2 est également fondée sur l'analyse et les connaissances supplémentaires qui ne sont pas disponibles au moment où RUSLE 1 a été développé.

3. Les avantages et les inconvénients de la modélisation de l'érosion

La nécessité de la modélisation s'avère dans le fait qu'elle donne une évaluation rapide du rythme de l'érosion dans une région et à différentes échelles ainsi qu'elle permet d'établir une hiérarchisation des intensités des différents processus et facteurs afin de cibler les zones prioritaires, tous cela en permettant une mise à jour continue et facile de la base de données.

Cependant, ces modèles sont établis par des chercheurs différents, basés sur des paramètres différents et selon des modèles différents, donnent comme résultat des cartes différentes pour une même région. Il en reste alors dans ce cas le choix humain du modèle à utiliser, selon la vision du chercheur, mais avant tout, selon les facteurs d'entrée du modèle, donc selon les données disponibles pour alimenter le modèle.

En tous cas, il faut bien prendre en considération, lors de l'utilisation d'un modèle, la cohérence et la précision des données, et s'assurer des marges d'erreurs des différentes couches établies lors de la cartographie des différents facteurs.

III. L'EQUATION UNIVERSELLE DE PERTES DE SOLS : USLE

L'équation universelle de pertes de sols, USLE (Universal Soil Loss Equation), établie par les américains Wischmeier et Smith (1958, 1960, 1965, 1978), est l'équation la plus utilisée pour une estimation globale des pertes dues au processus de l'érosion de surface. Elle a été établie à partir d'un nombre considérable de données rassemblées sur ce fléau afin de prédire l'érosion hydrique à l'échelle du champ cultivé pour permettre aux techniciens de la lutte anti-érosive de choisir le type d'aménagement nécessaire pour garder l'érosion en dessous d'une valeur limite tolérable.

L'USLE est un modèle empirique simple, basé sur des analyses de régression de taux de perte en sol et demande le moins de données-sources. Bien que l'équation ait beaucoup de défauts et de limites, elle est très utilisée, à cause de sa relative simplicité et sa fiabilité. Elle représente aussi une approche standardisée.

En effet, l'USLE ne prend pas compte des interactions entre les différents facteurs. Elle se présente sous la forme d'un produit et ne fait donc pas intervenir les liaisons causales qui peuvent exister entre les différents facteurs. Or, dans les régions peu accidentées, à climat peu agressif, les relations entre les facteurs peuvent être plus déterminantes que les facteurs eux-mêmes (Auzet, 1987 cité par Macary et Berville, 2003).

D'après le résumé de Meyer (1984), l'équation USLE a connu plusieurs étapes qui sont décrites comme suit :

- De 1890 à 1940 : une période de compréhension et de description de manière qualitative de la majorité des facteurs impliqués dans les processus de l'érosion. Cette période a connu aussi des études sur la pluie ;

- De 1940 à 1954 : une estimation des pertes en sol en considérant l'influence de la longueur et de l'inclinaison de la pente (Zingg, 1940), des pratiques de la conservation (Smith, 1941, Smith et Whitt, 1947) et des pratiques culturales (Browning *et al.*, 1947) ;
- De 1954 à 1978 : l'USLE a été développé par le département américain de l'agriculture (USDA). Des études sur des petites parcelles sous pluies naturelles ou simulées sont à l'origine de la base de données de l'USLE (Smith. et Wischmeier, 1957 ; Wischmeier, 1959 ; Wischmeier et Smith, 1958 ; Wischmeier et Smith, 1960 ; Wischmeier et Smith, 1965) ;
- En 1978, des résultats expérimentaux ont fourni des données supplémentaires pour, finalement, donner la forme finale de l'USLE (Wischmeier et Smith, 1978) :

$$A = R * K * LS * C * P$$

Avec : A = pertes de sol en t/ ha/an
 R = le facteur d'érosivité de la pluie en MJ/.mm/ha.H.an
 K = le facteur d'érodibilité du sol en t.ha.H/ha.MJ.mm
 L = le facteur de l'érosivité relative à la longueur de la pente en m
 S = le facteur de l'érosivité relative à l'inclinaison de la pente en %
 C = le facteur du couvert végétal ou de l'occupation du sol
 P = le facteur des pratiques antiérosives

Il s'agit donc d'une fonction multiplicative composée de cinq facteurs qui permettent d'obtenir une estimation de l'érosion (A) en tonnes/hectares/année.

1. Le facteur d'érosivité de la pluie R

L'érosivité des pluies est un indicateur de l'agressivité des précipitations. Au cours d'une pluie, l'énergie cinétique ainsi que la quantité du mouvement dissipée lors de l'impact des gouttes permettent le détachement des particules et leur déplacement par rejaillissement (Ellison, 1944 ; Hudson, 1963 ; Bolline, 1982 ; cités par Rejeb, 1996).

Le facteur d'érosivité de la pluie, appelé aussi le facteur pluie, a été défini, selon Wischmeier & Smith (1978), comme le produit de l'énergie cinétique de la pluie par son intensité maximum durant 30 minutes :

$$R = K * E_c * I_{30}$$

K étant un coefficient dépendant du système d'unités de mesure.

C'est un facteur climatique présentant l'indicateur de l'agressivité des pluies sur le sol. Il considère les différences régionales du climat selon le type, l'intensité et la fréquence des précipitations.

Wischmeier et Smith ont éliminé les pluies les plus faibles c'est à dire celles dont la hauteur est inférieure à 12,7 mm et qui sont séparées par plus de 6 heures avec la condition que pas plus de 6,3 mm ne tombe en 15 minutes.

Vu la non disponibilité des données des pluies instantanées dans certains cas, l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO : Food and Agriculture Organisation) (Arnoldus, 1977) a proposé l'indice d'érosivité moyen annuel (R) qui ne prend en considération que les précipitations moyennes mensuelles (p_i) et les précipitations moyennes annuelles (p) :

$$R = \sum p_i^2/p$$

2. Le facteur d'érodibilité du sol K

Il s'agit d'un facteur du sol qui se définit comme la susceptibilité du sol à l'érosion. Il explique l'influence de la propriété des sols sur les pertes en sol pendant les événements pluvieux (Renard et al., 1997). Il dépend de la granularité, de la quantité de la matière organique, de la texture, de la perméabilité et de la structure du sol (Roose, 1994).

A partir des observations et des expériences de Wischmeier et Smith, (1978), Foster et al., (1981) ont calculé l'indice K par la méthode du normographe (Fig.1) dont la formule algébrique est donnée par :

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

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

a : le pourcentage de matière organique,

b : le code de la perméabilité,

c : le code de la structure.

De nombreux auteurs ont essayé d'estimer l'érosion des sols en fonction de leurs propriétés. Des index ont été créés tenant compte de la granulométrie ou de la stabilité des agrégats (Anderson, 1954 ; Bennett, 1926, et Schwing, 1978, cités par Viguié, 1993). Ils ne considèrent qu'un nombre limité de facteur et ne sont pas représentatifs de l'érosion en conditions naturelles.

Dans un autre ordre d'idées, le facteur K évolue également dans le temps. En effet, les premières années d'une évolution régressive d'un sol (1 à 3 ans) les valeurs de K sont généralement faibles. Malheureusement, la sensibilité croît à mesure que le réseau racinaire primitif (antérieur) et les matières organiques se dégradent (25 à 50 % du carbone organique sont généralement perdus en 2 ans en régions tropicales). Vers la troisième ou quatrième année, dépendamment des conditions initiales d'évolution des matières organiques du sol, l'indice d'érosivité grimpe jusqu'à la valeur maximale et oscille. Ensuite, après cinq à six années, l'indice d'érodibilité diminue parce que l'horizon humifère a été décapé ou bien mélangé au sous-sol plus graveleux ou enrichi en argile, en fer ou en calcaire (Roose et Sarraïlh, 1989).

3. Le facteur topographique LS

Il concerne un facteur sans dimension qui représente l'inclinaison (S) et la longueur de pente (L). Dans la pratique, les deux facteurs L et S sont combinés en un seul facteur topographique qui permet d'évaluer globalement l'influence de la pente sur la vitesse de l'érosion.

La formule du facteur LS établie par Wischmeier et Smith (1960) est la suivante :

$$LS = \lambda 0.5 (0.0076 + 0.0053 \cdot \alpha + 0.00076 \cdot \alpha^2)$$

Avec λ : la longueur de la parcelle en pieds ; α : la pente en %.

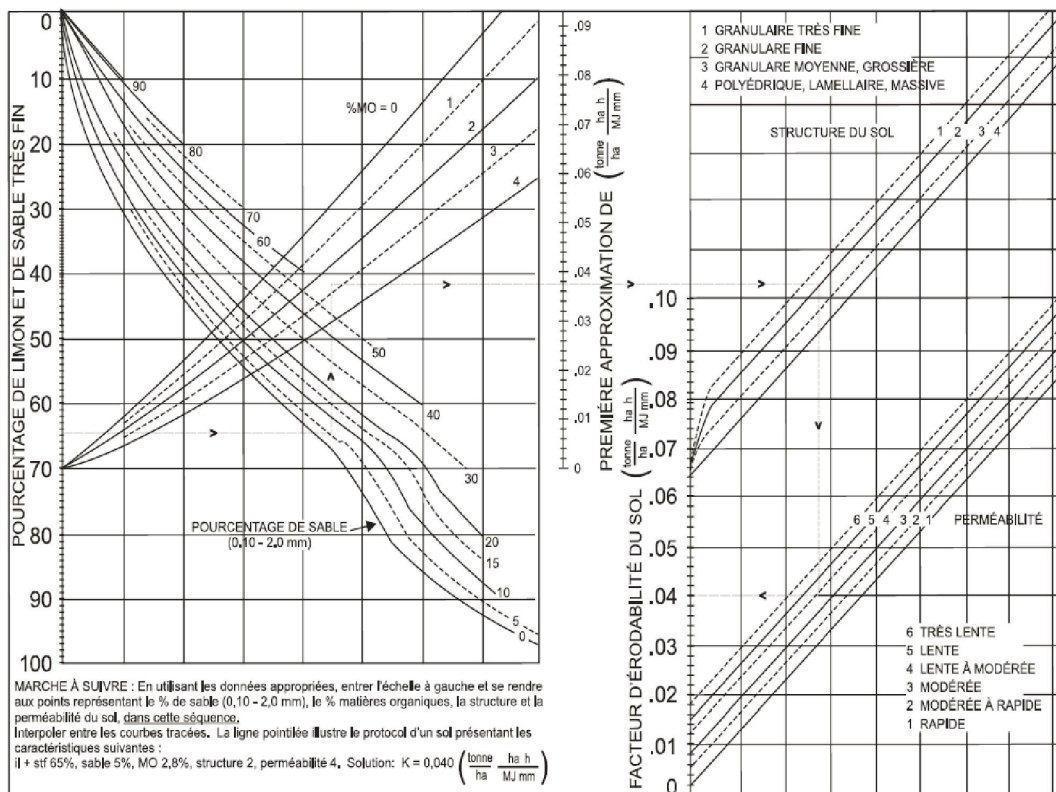


Figure 1 : Normographe de l'érodibilité du sol (Foster et al., 1981).

4. Le facteur du couvert végétal C

Le facteur de couvert végétal est défini dans l'USLE comme le rapport entre l'érosion mesurée sur une parcelle de référence (jachère nue) et une parcelle test sous une culture bien précise.

Il représente l'effet de la couverture végétale présent dans le bassin versant qui dépend de plusieurs variables : la couverture des feuilles et des branches qui interceptent les gouttes de pluie et dissipent une partie de leur force érosive; la couverture végétale au sol composée de résidus de culture et de végétation vivante à la surface du sol; la biomasse du sol qui améliore l'écoulement de l'eau dans le sol ainsi que la capacité de rétention et le type et la fréquence de travail du sol qui influent sur la porosité, la rugosité de surface et la compaction du sol. Chacune de ces variables est traitée comme un sous facteur et C est le produit de ceux ci.

Le facteur C sert à déterminer l'efficacité relative des systèmes de gestion et des cultures en

termes de prévention des pertes de terre. Sa valeur varie de 0 à 1 selon les différents types de couverture de la surface (Adeji et al., 2010 ; Kalman, 1967, Shi et al., 2002).

5. Le facteur des pratiques antiérosives P

Ce facteur explique l'intervention de l'Homme en créant des pratiques qui préservent le sol et diminuent la dégradation des terres. Il tient en compte toutes les techniques culturales antiérosives. Parmi ces techniques, on trouve le labour en courbes de niveau, le paillage naturel ou artificiel ou la pose de plante de couverture, etc.

Le facteur des pratiques anti-érosives permet d'évaluer les actions visant à modifier la vitesse, le profil, la pente ou la direction de l'écoulement en surface et à réduire ainsi l'érosion. Par exemple, la culture en pente transversale, la culture en courbes de niveau, la culture en bandes alternées, l'aménagement de terrasses, la présence de bandes enherbées ou encore l'enherbement des rangs dans le sens de la pente sont des types d'actions anti-érosives.

Ce facteur varie de 1 sur un sol non cultivé et sans aucune pratique antiérosive à $1/10^{\text{ème}}$ sur sol lorsque on pratique le billonnage.

V. LES LIMITES DE L'USLE

Étant donné que l'USLE a été utilisée à maintes reprises, ses limites sont bien déterminées dans la littérature. Elles se définissent comme suit :

1. Les limites topographiques

L'application de l'USLE sur des pentes de plus de 18% et d'une longueur de plus de 100 m peut fausser les résultats (Wischmeier, 1976). L'extrapolation de ces formules sur des pentes qui excèdent ces dimensions ne seront qu'une simple spéculation. RUSLE (Revised Universal Soil loss Equation ; Renard et al., 1994) qui est une version révisée de l'USLE permet d'estimer les pertes de sols sur des pentes de plus de 20 %. Par contre, nous nous en tiendrons aux limites topographiques de l'USLE.

2. Les limites spatiales

Dion (1989) définit la perte de sol comme étant la quantité de sédiments mis en disponibilité par l'érosion du sol et évacués hors d'une unité physiographique homogène. Ainsi, pour estimer correctement la perte de sol, il importe de respecter l'unité élémentaire qui est le champ. À l'échelle d'un bassin versant ou d'un sous bassin, il devient difficile d'analyser les conditions de chaque champ. Ceci oblige donc à généraliser fortement. Les moyens classiques utilisés sur des parcelles ne permettent pas une modélisation sur de vastes étendues, toutefois maintes recherches ont tenté de modéliser les pertes de sols à des échelles régionales et même à l'échelle nationale. Des études à l'échelle du continent effectuant la cartographie des pertes de sols témoignent de ces difficultés (Lal, 1988). Les résultats qu'on y retrouve sont généralisés et diffèrent considérablement d'une étude à l'autre. En conséquence, la perte de sol

devient un simple indice de l'intensité de l'érosion hydrique que subit chaque unité homogène qui compose la région, le pays ou même le continent.

3. Les limites par rapport au mécanisme d'érosion

Les limitations de ce modèle se situent également au niveau du mécanisme d'érosion. Premièrement, le résultat de pertes de sol obtenu correspond au taux d'arrachement et ne tient pas compte du phénomène de transport et de sédimentation. De plus, l'érosion concentrée et l'érosion diffuse restent encore regroupées. L'USLE exclut généralement l'érosion en ravins (Wishmeier, 1976). En bref, cet outil de gestion des sols est simple à appliquer sur des terrains uniformes, mais l'utilisation de l'USLE devient complexe à l'échelle d'un vaste bassin versant comportant diverses inclinaisons et longueurs de pente, divers types de sols et d'utilisation du sol, il devient difficile à appliquer l'USLE

D'autres limites d'application de l'USLE ont été prises en compte, à savoir :

- L'USLE ne s'applique qu'à l'érosion en nappes (Roose, 1994) ;
- L'USLE ne s'applique que pour des données moyennes sur 20 ans. Elles ne sont donc pas valables à l'échelle de l'averse (Roose, 1994) ;
- Les données qui ont servi à établir ce modèle concernaient des petites parcelles ou des petits bassins versants (Roose, 1994) ;
- Les interactions entre les paramètres ne sont pas prises en compte (Roose, 1994) ;
- Le résultat de pertes de sol obtenu par USLE correspond au taux d'arrachement et ne tient pas compte du phénomène de transport et de sédimentation (Wishmeier, 1976) ;
- L'USLE a été introduit au Maroc avec des résultats très encourageants mais n'a pas été bien confirmé à cause de manque d'information pour l'estimation correcte des paramètres.

C'est pour cette raison, que les scientifiques et les chercheurs ont eu recours à développer des versions modifiées ou révisées de cette équation pour l'adapter aux conditions locales des zones étudiées et aux bases de données existantes.

VI. L'UTILISATION DES NOUVELLES TECHNOLOGIES DANS LA MODELISATION

L'application des Systèmes d'Information Géographique aux problèmes de modélisation, permet d'approfondir la notion d'étude spatialisée. Elle, seule, peut être à l'origine de décisions régionales de prévention et d'un développement progressif des connaissances des processus au niveau local.

Les SIG deviennent des outils communs et indispensables dès qu'il s'agit de conserver les notions d'espace et de topologie. Plusieurs analogies entre ces systèmes et les modèles hydrologiques permettant d'imaginer qu'un couplage est envisageable. Les premiers modèles des années 60 contenaient d'ailleurs déjà les concepts propres au SIG (Brilly *et al.*, 1993).

Quatre niveaux d'utilisation des SIG dans le cadre de la modélisation hydrologique, peuvent être distingués (Maidment, 1992, 1993a, 1993b ; Cluis, 1993), par ordre croissant de complexité :

- La simple visualisation des résultats, sous forme de carte ;
- L'évaluation de nouveaux paramètres spatialisés d'entrée au modèle, à partir de paramètres déjà connus ;
- L'existence d'une interface entre le SIG et le modèle, qui permet au modèle d'utiliser certaines fonctionnalités du SIG ;
- La modélisation intégrée au SIG, par couplage des modules avec les fonctions d'analyse du SIG.

L'intérêt donc d'utilisation de cette technologie des SIG dans la modélisation se situe à la fois au niveau de l'outil de « base de données spatiales » intégrant des données de sources très hétérogènes et à la fois, comme outil de traitement interne offrant la possibilité d'une modélisation intégrée à partir des opérations d'analyses de bases (Cluis, 1993).

En ce qui concerne l'apport de la télédétection dans la modélisation, il se situe au niveau de l'acquisition d'information sur les états de surfaces en offrant une vision globale sur la nature du sol et son occupation. Les propriétés spatiales et temporelles des données satellitaires sont des atouts très appréciés pour les études régionales sur l'érosion hydrique. L'utilisation de la télédétection est reconnue comme un des outils les mieux adaptés aux études régionales dans le domaine de l'érosion, son apport à l'étude des phénomènes de surface n'est plus à démontrer (Anys, 1991 ; Fabbri, 1991 ; Vogt et Gomer, 1992 ; Chackroun, 1993 ; Bonn *et al.*, 1994 ; Hill *et al.*, 1994 ; De Jong, 1996).

Le modèle de pertes de sol le plus souvent associé à la télédétection et intégré aux SIG est le modèle empirique USLE. L'utilisation des données satellitaires pour la détermination du facteur lié à la couverture végétale a été démontrée à quelques reprises (Anys, 1991, Chakroun, 1993). L'USLE couplée à ces outils, permet d'effectuer la cartographie, sur de grandes étendues, des zones homogènes de pertes en sol. Néanmoins, il faut demeurer prudent, l'utilisation de l'USLE sur de grandes étendues peut délivrer des résultats de pertes de sols abusifs (Company-Redmond, 1996).

V. CONCLUSION

En termes de conclusion, on porte à signaler que ce chapitre fournit, à travers une synthèse bibliographique, un point des connaissances actuelles sur le phénomène d'érosion, leur processus et leur action en termes de granulométrie des fragments de terre mobilisés. Les différents agents érosifs sont évoqués et l'ensemble des processus et facteur érosifs qui prennent place de l'érosion hydrique ainsi que ses différents types sont présentés.

PARTIE II

PRESENTATION DE LA

ZONE D'ETUDE

I. INTRODUCTION

La zone d'étude, choisie dans le cadre de cette étude, correspond à la péninsule de Tanger ; la partie la plus septentrionale du Maroc. Vu le manque de certaines données géologiques et pédologiques, la zone d'étude a été redéfinie et rétrécie.

Outre l'ampleur du phénomène d'érosion dans la chaîne rifaine à laquelle appartient la zone d'étude et le fait que cette région est généralement moins étudiée par rapport aux autres zones du pourtour méditerranéen, le choix de la zone s'est basé essentiellement sur l'intérêt que porte les aménageurs et les décideurs dans la région sur les études de risque, y compris le risque d'érosion et de ses effets, le plus souvent néfastes, en et hors site.

II. CADRE GEOGRAPHIQUE

Le Maroc, d'une superficie de 710.850 km², se situe entre le 21^{ème} et le 37^{ème} degré de latitude nord et les 1^{er} et 17^{ème} degrés de longitude ouest. Cette situation le positionne à l'extrême nord-ouest du continent africain et lui confère une position géographique et stratégique de premier ordre (Bzioui, 2004).

Située à la jonction des deux mers et dans l'extrême Nord-Ouest du Royaume du Maroc, la zone d'étude correspond à la péninsule Tingitane (Fig. 2), située à l'extrême Nord Ouest du Maroc entre 35°28'33'' et 35°55'19'' de latitude Nord et entre 05°05'34'' et 06°01'58'' de longitude Ouest. Elle s'étend sur une superficie de 2348,74 km², soit 0,33 % de la superficie totale du Pays. Elle est limitée au Nord par le Détroit de Gibraltar, à l'Est par la mer Méditerranée, au Sud par la province de Larache et le bassin versant du Loukkous et à l'Ouest par l'Océan Atlantique.

De point de vue administratif, la zone d'étude appartient aux provinces de Tanger - Assilah représentée par 7 communes (communes de Tanger, Boukhalef, Briech, Lkhaloua, Al Manzla, Dar Chaoui, et Azzinate), la province de Tétouan avec 11 communes (communes de Tétouan, Martil, Mallalienne, Saddina, Souk Kdim, Ain Lahsen, Bni Harchan, Sahtriyine, Zaitoune, Azla et Zaouiat Sidi Kacem), la province de Fahs-Anjra avec 8 communes (communes de Laaouama, Al Bahraouyine, Ksar Sghir, Melloussa, Jouamaa, Anjra, Ksar Al Majaz et Taghramt) et finalement la province de M'diq-Fnideq avec 2 communes (communes de M'diq, et Fnideq) (Fig. 3).



Figure 2 : Situation géographique de la zone d'étude.

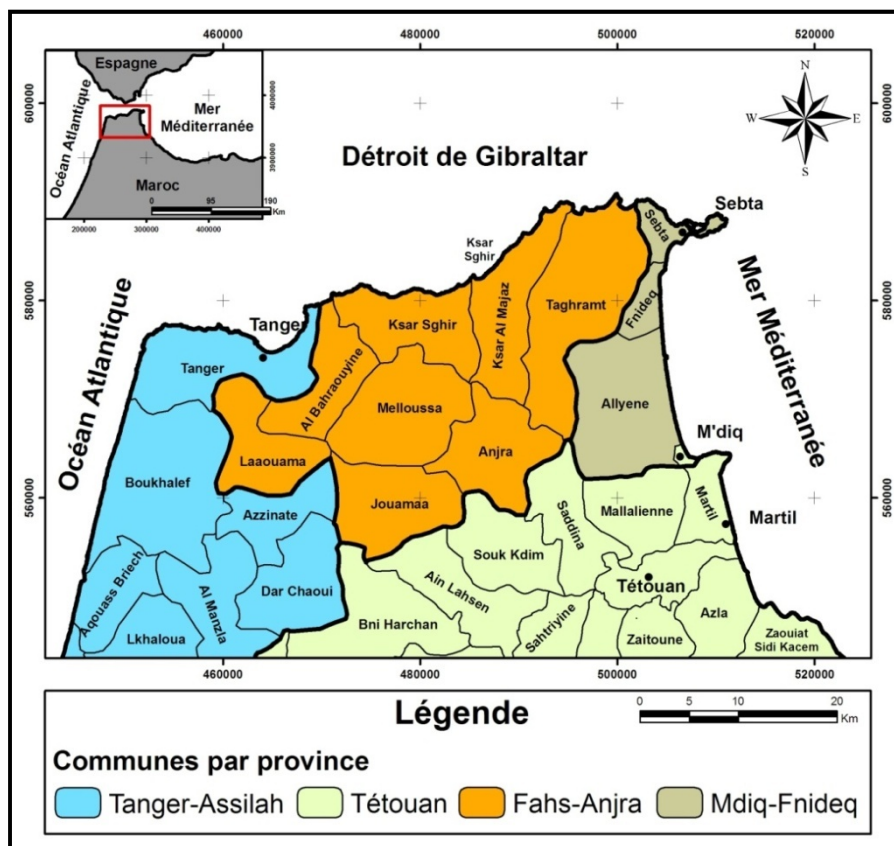


Figure 3 : Découpage administrative de la zone d'étude.

III. CADRE CLIMATIQUE

Le climat local de la Péninsule de Tanger présente un grand contraste comparé aux autres zones climatiques du Maroc. Le climat est fondamentalement marqué par la situation géographique à des latitudes relativement plus élevées entre 35° et 36°N, l'influence océanique (Atlantique) et maritime (Méditerranée), la présence de reliefs accusés ainsi que des effets de la puissante masse continentale du Sud.

A partir du climagramme d'Embert (Fig. 4), le climat dans notre site peut être classé dans l'Humide à Subhumide.

L'actualisation des traits caractéristiques du climat de la région à être effectuée en analysant les données climatologiques recueillies aux stations météoriques de Tanger et Tétouan.

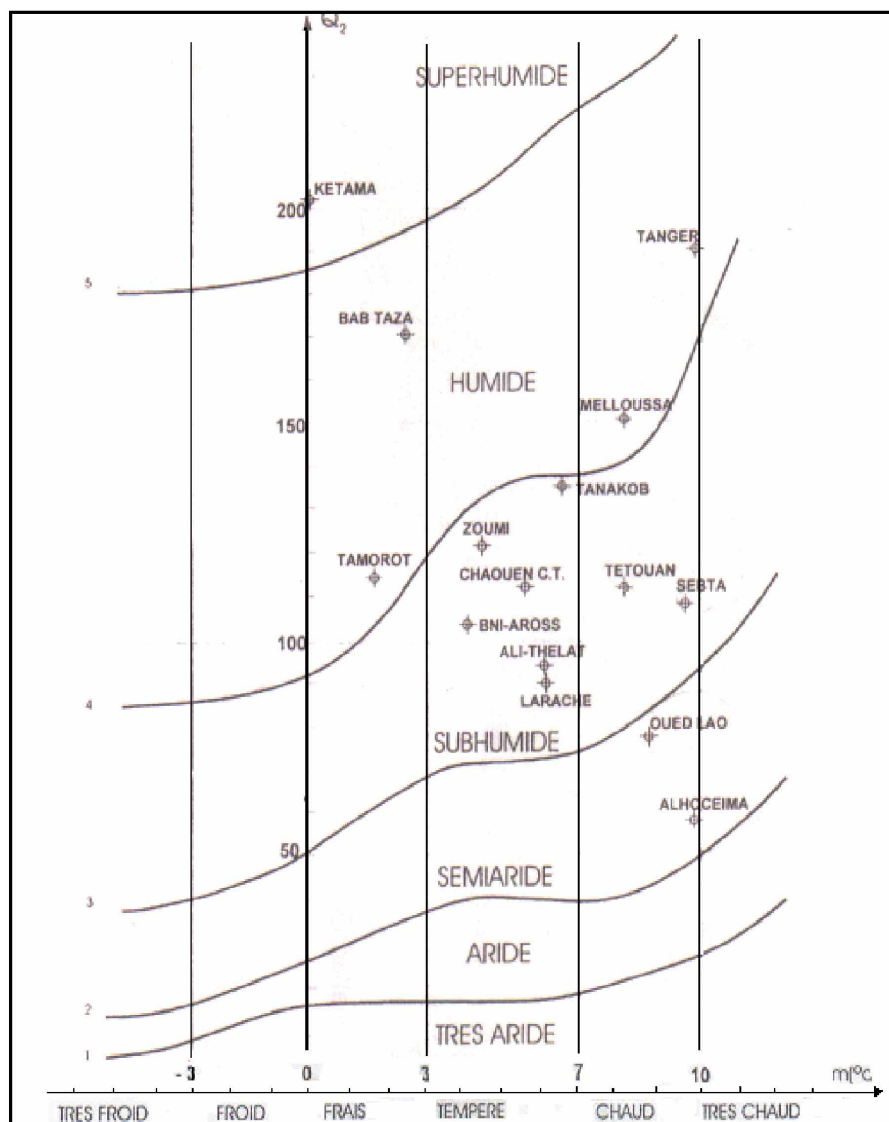


Figure 4 : Report des stations météorologiques du Nord du Maroc dans le climagramme d'Emberger.

1. Les précipitations

Les variations des précipitations dans la zone d'étude sont marquées par une augmentation du volume des pluies avec l'altitude et l'exposition des versants, ce qui montre de nombreuses irrégularités locales, généralement imposées par l'orientation des crêtes.

Les zones les plus arrosées correspondent au Tangérois et aux sommets du Rif occidental et central. Le littoral, généralement plus sec que les reliefs qui le surplombent, s'assèche progressivement du Nord-Ouest vers le Sud-Est, selon le gradient d'éloignement de l'Atlantique ; mais dans le Rif oriental et la zone plus à l'Est, l'aridité gagne en altitude, notamment en raison de l'ouverture de ces zones sur les perturbations chaudes venues du Sud et de l'Est (Daki, 2004).

Toutefois, la zone côtière se trouve également sous l'influence de perturbations froides venues du Nord, qui y maintiennent les précipitations généralement au-dessus de 300 mm.

Le tableau 1 montre que les précipitations moyennes mensuelles sur Tanger varient de 1 mm en Juillet à 136 mm en Décembre (Fig. 5) avec une précipitation moyenne annuelle de 800 mm. Sur Tétouan (Tableau 2 ; Fig. 6), les précipitations moyennes mensuelles échelonnent entre 0,8 mm en Juillet et 103,9 en Janvier (Tableau 2) avec une précipitation moyenne annuelle de 630 mm.

Tableau 1 : Précipitations moyennes mensuelles (en mm) pour la période 1921-2001 (Station météorologique Tanger-Aéroport).

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août
Précipitations moyennes à Tanger (mm)	19.7	83.5	127.7	136.6	113.8	102.9	92.1	70.6	37.9	12.2	1	2.1

Tableau 2 : Précipitations moyennes mensuelles (en mm) pour la période 1968-2005 (Station météorologique D'Amsa).

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août
Précipitations moyennes à Tétouan (mm)	26.6	60.0	76.3	100	103.9	87.5	72.2	57.6	31.2	8.2	0.8	6.0

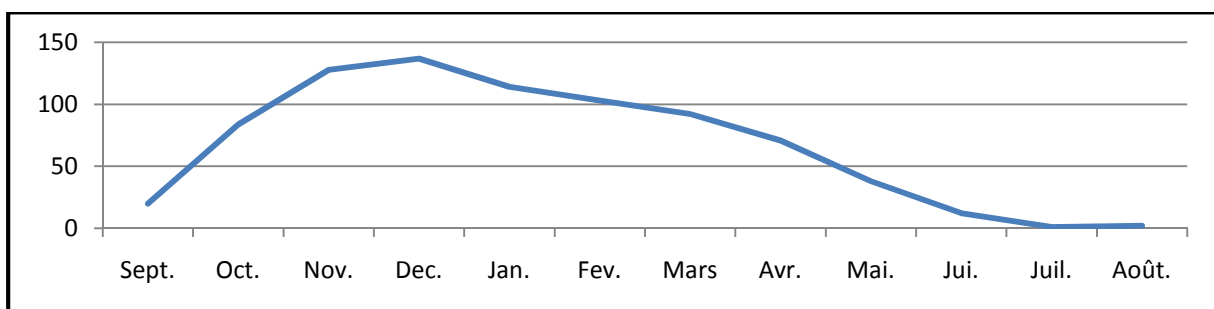


Figure 5 : Courbe des précipitations moyennes mensuelles à Tanger pour l'année 1921-2001.

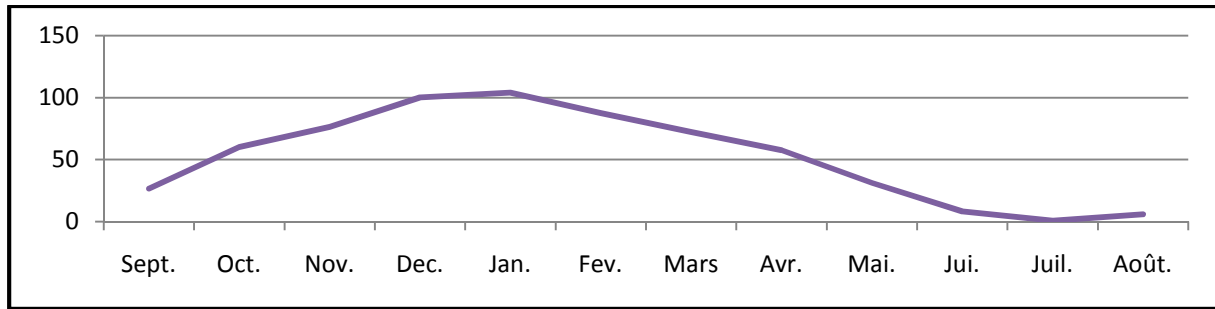


Figure 6 : Courbe des précipitations moyennes mensuelles à Tétouan pour l'année 1968-2005.

Généralement, la saison sèche dure quatre mois (Juin à Septembre) sur le relief, cinq mois (mi-Mai à mi-October) sur la côte atlantique et six ou sept mois, selon l'altitude dans le Rif oriental. La neige tombe chaque année sur les hauts sommets du Rif et peut s'y maintenir jusqu'au mois d'avril. Les intensités minimales se situent entre Juin et Août et les intensités maximales entre Novembre et Janvier.

2. Les températures

Les températures moyennes traduisent, surtout à basse altitude, un climat assez doux. L'écart de température sur une journée est en moyenne de 7 à 9°C selon les saisons. A basse altitude, les températures minimales peuvent descendre fréquemment en dessous de 4°C, mais beaucoup plus rarement en dessous de 0°C.

A la station de Tanger-Aéroport (Tableau 3 et Fig. 7), les températures sont assez modérées. Les moyennes mensuelles varient de 11.1 °C à 25.4 °C. Le mois le plus froid est Janvier avec une température moyenne de 12.4 °C et le mois le plus chaud correspond à Août avec 24.4°C comme moyenne mensuelle.

Tableau 3 : Températures moyennes mensuelles 1990-2001 en °C (Station météorologique Tanger-Aéroport).

T	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Aou.
T min	20.2	17.8	14.9	12.8	11.1	11.2	14.2	14.3	17.1	19	22.5	22.2
T max	24.2	21.8	18.4	15.4	14.4	15.3	16.7	18.6	19.8	23	25.3	25.4

Les mesures enregistrées à la station de Ben Karriche à Tétouan (Tableau 4, Fig. 8) montrent que durant la période 1990- 2004. Les températures moyennes mensuelles varient de 12.5 °C à 24.6 °C. La température maximale est de 27.3°C, enregistrée en Août, celle minimale est de l'ordre de 9.9°C enregistrée en Janvier.

Tableau 4 : Températures moyennes mensuelles °C (Station météorologique Tétouan-Benkarriche).

T	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Aou.
T min	18.0	10.1	10.9	11.0	10.1	9.9	12.1	13.3	15.8	17.2	19.2	20,4
T max	24.7	20.0	16.8	15.7	13.8	14.5	16.6	17.2	20.1	24.9	25.6	27.3

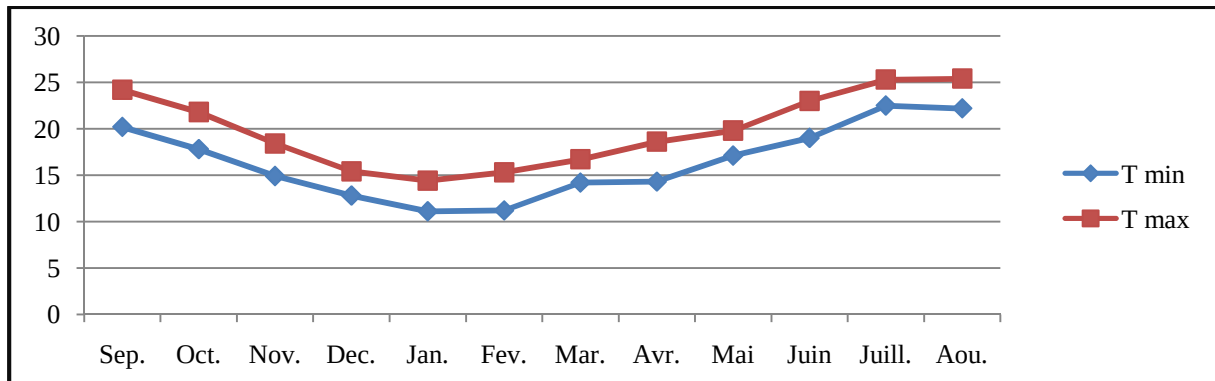


Figure 7 : Températures moyennes mensuelles 1990-2001 (°C) – Station météorologique Tanger-Aéroport).

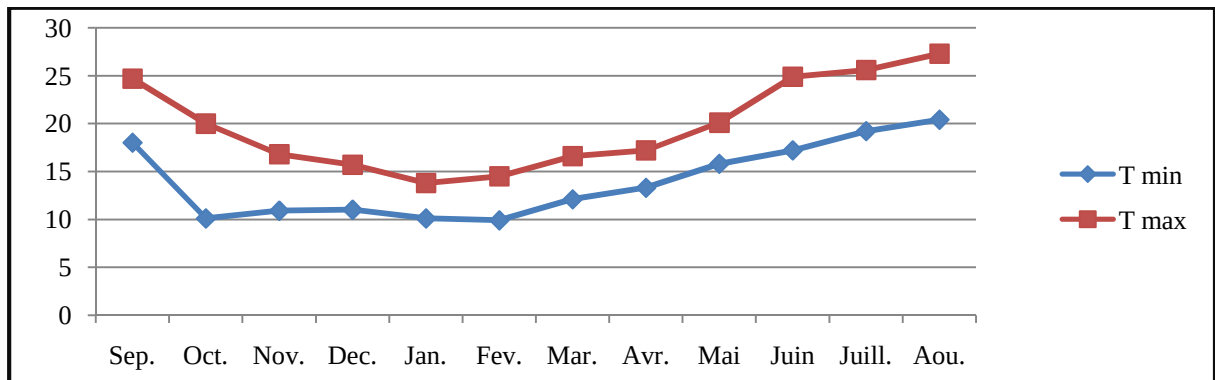


Figure 8 : Températures moyennes mensuelles 1990-2004 en °C (Station météorologique Tétouan-Ben Karriche).

3. Les vents

La zone d'étude est caractérisée par plusieurs types de vents qui sont liés aux courants perturbants traversant le détroit. Ces vents peuvent souffler généralement de la Méditerranée vers l'atlantique (Charqui) ou l'inverse (Gharbi), mais aussi des montagnes vers la mer ou l'inverse. Ils augmentent sensiblement l'humidité du littoral et atténuent leur température estivale, tout en provoquant parfois des tempêtes dont les effets sont manifestes aussi bien en mer qu'au niveau du continent. Mais les vents d'Est, chauds et secs, sont fréquents le long du littoral méditerranéen et participent grandement au maintien des conditions d'aridité de celui-ci (Daki, 2004).

Sur la base de 30 ans de données d'observations, à la station météorologique aéroportuaire de Tanger, les études relatives au vent ont montré que le climat dans cette région est assez venteux. En effet, les observations des vents au sol, proches de celles présentes au niveau de la mer, varient entre 3.9 et 7.1m/s. Des vents violents instantanés (supérieurs à 16m/s) sont observés, en moyenne, 85 jours par an et plus souvent au printemps avec une vitesse pouvant atteindre 54 à 62m/s.

Cependant, entre Janvier 1969 et Mai 1972, la vitesse du vent a dépassé 9 fois les 100 Km/h et a même atteint 147 Km/h.

Pour Tanger-Aéroport, les directions des vents dominants sont de secteur Est ou Ouest. En hiver et en automne, les vents de secteur Ouest sont les plus remarquables, et au printemps, les vents de secteur Est sont les plus fréquents.

Les mesures effectuées au niveau de l'Aéroport de Tétouan, montrent que ce dernier, du fait qu'il se situe dans le prolongement de la cluse de Tétouan est plus exposé aux vents d'Ouest que de l'Est. Les vitesses maximales enregistrées sont faibles, inférieur à 35 km/h. La moyenne des vitesses mensuelles varie entre 13 km/h et 23km/h, les maxima régnant de Février à Juillet.

Enfin certaines situations topographiques de couloir, comme à Tétouan se traduisent par des directions uniformes, Ouest-Est et réciproquement, en toute saison.

4. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration annuelle calculée pour la station de Tétouan (Tableau 5) suivant la formule de Penman est de l'ordre de 820 mm avec un maximum de 139 en Juillet et un minimum de 29 mm en Janvier. Le tableau 4 présente l'évapotranspiration calculée pour chaque mois.

Tableau 5 : Valeurs mensuelles d'ETP (mm) dans la Station de Tétouan.

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Total
ETP	73	54	34	28	32	38	47	59	83	114	139	119	820

(Source : INRA-Rabat).

IV. CADRE HYDROLOGIQUE

Le régime hydrologique des cours d'eau (Fig. 9) dans la région dépend fortement des précipitations et leur distribution. L'alternance de séquences de forte hydraulité et de séquences de sécheresse d'intensité et de durée variables est un trait dominant des régimes hydrologiques.

Les cours d'eau permanents ou temporaires de la péninsule tingitane dessinent une trame extrêmement dense dont l'hydrologie est davantage conditionnée par les précipitations. Ces cours d'eau ont un régime principalement torrentiel saisonnier. Durant la période humide, il

n'est pas rare d'enregistrer des débits spécifiques importants dus aux crues. Ce régime torrentiel se trouve accentué par les fortes pentes du relief et par des précipitations concentrées dans le temps produisant un débit d'écoulement fort. En revanche, durant la saison sèche, les débits d'étiage sont souvent faibles à nuls. Ces oueds drainent des eaux de surface.

Bien que peu hiérarchisé, le réseau hydrographique est densément implanté sur tout le versant nord du Rif. Il est souvent intermittent et ne fonctionne qu'à la suite de pluies abondantes et continues, mais aussi après les averses. La plupart des oueds possèdent des bassins versants de faible superficie, ce qui explique en partie leur faible débit pendant toute la saison estivale (Daki, 2004), cas du bassin versant de l'oued Khmiss, dont le débit à l'exutoire, en dehors des périodes humides, est relativement faible à cause du régime souvent temporaire de la plupart de ses affluents et à cause de l'installation du barrage Raouz en amont.

Le réseau hydrographique est composé de plus d'une dizaine de cours d'eau principaux, comme d'autres moins importants, présentent les caractères d'écoulement atlantiques dans le Tangérois (Tahadart, Boukhalef, Boukaddou) et le méditerranéen (Negro, Smir, Martil, Amsa) (Fig.9).

L'analyse des matières en suspensions dans la région montre une grande variation qui est due à plusieurs facteurs, à savoir ; la superficie du bassin, les caractéristiques physiques (pentes, type et granulométrie des sédiments), et la dynamique fluviale du réseau hydrographique des bassins versants (Tayaa, 1997).

La perte des volumes de stockage des barrages évolue à un rythme important : près de 5% de capacité de stockage sont perdues annuellement, soit environ 65 millions de m³, ou l'équivalent d'un volume de retenue d'un grand barrage (Bzioui, 2004).

En ce qui concerne les barrages, le premier barrage moderne implanté dans la région date de 1969. Il s'agit du barrage Ajras, un petit barrage d'un volume de 3 millions de m³, réalisé sur Oued Ajras (Fig.9).

D'autre part, depuis 1979, d'autres barrages ont été construits sur les différents Oueds, à savoir : barrage Ibn Batouta, Boukhalef, Smir, 9 Avril, Raouz, et celui de R'mel (Tableau 6).

Le barrage R'mel, construit sur Oued R'mel, est de capacité de 25 millions de m³. Il est destiné à l'alimentation en eau potable du complexe portuaire Tanger-Méditerranée et sa protection contre les inondations (Bzioui, 2004).

La région a connu aussi le lancement, en 2007, des travaux de construction du barrage Martil (Tétouan) sur l'Oued Mhajrate. Ce barrage ayant une capacité de retenue de 100 millions de m³ est destiné à renforcer l'alimentation en eau potable de la ville de Tétouan et de la zone côtière, au développement de la zone de Tanger-Méditerranée, à la protection de la ville de Tétouan contre les inondations et à l'irrigation d'un périmètre de 3 000 ha (Bzioui, 2004).

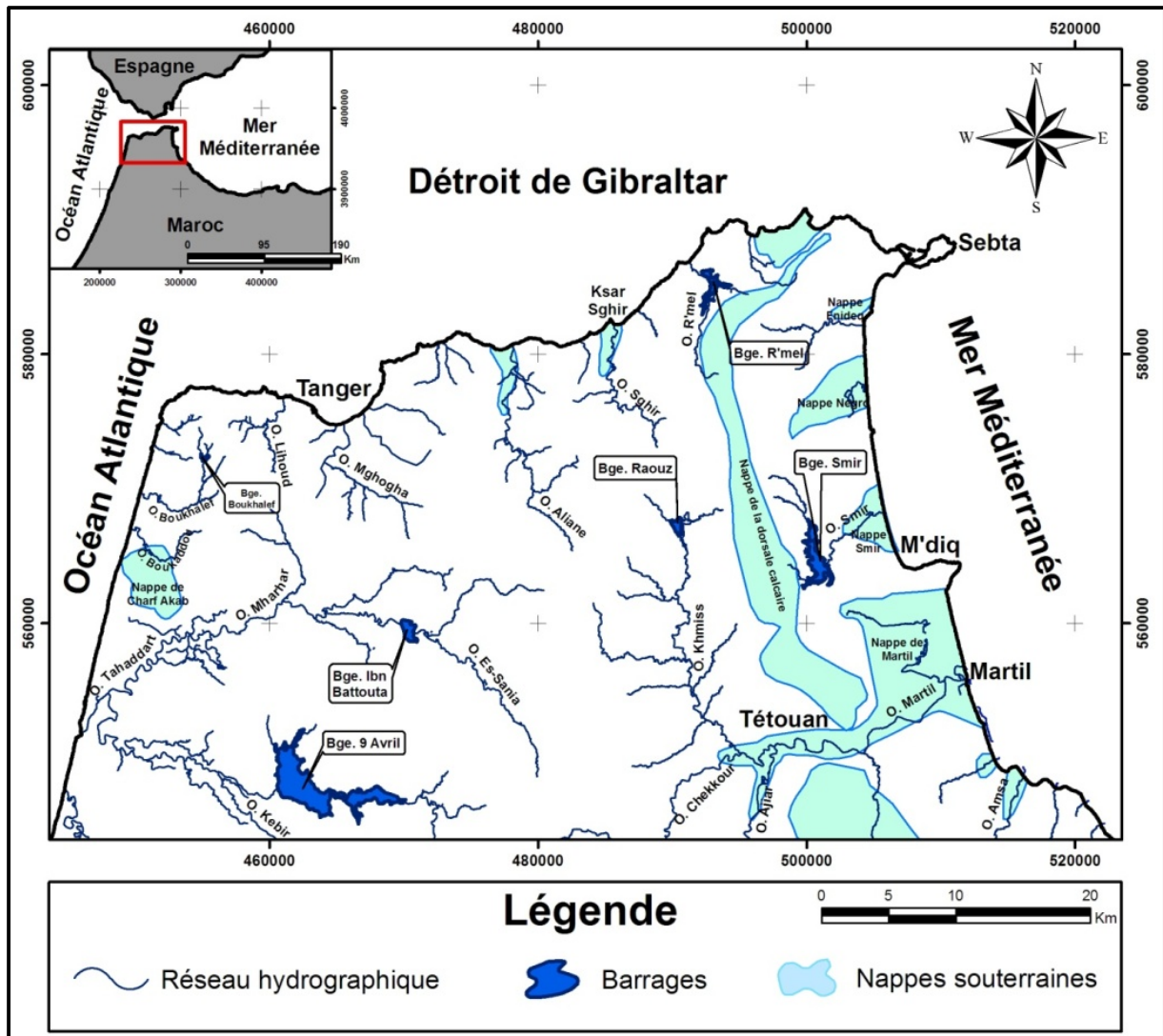


Figure 9 : Carte hydrologique de la péninsule Tingitane (Source : ABHL, Modifiée).

Tableau 6 : Présentation générale des barrages implantés dans la région d'étude.

Nom du barrage	Date de construction	Localisation		Fonction	Volume normal 10^6 m^3
		Oued	Ville		
Ajras	1969	Ajras	Tétouan	I	3
Ibn Batouta	1979	Mharhar	Tanger	I.EP.EI	35
Boukhalef	1989	M'saber	Tanger	I	1,1
Smir	1991	Smir	Tétouan	EP.EI	43
9 Avril 1947	1995	Hachef	Tanger	I.EP.EI	300,9
Raouz	2002	Smir	Tétouan	I.EP	11,3
R'mel	2005	R'mel	Tanger	I.EP	25

I : Irrigation, EP : Eau Potable, EI : Eau Industrielle

Source : Annuaire Statistique du Maroc 2007, In : HCP-DRTT, 2008

Les eaux souterraines constituent une part importante du patrimoine hydraulique national. Etant donnée que la majeure partie de la zone étudiée est constituée de faciès argilo-schisteux, les seules ressources en eaux souterraines sont des petites nappes phréatiques situées sur les vallées fluviales et sur les parties altérées des schistes (petites nappes perchées) (CREOCEAN, 2010).

Les principales nappes souterraines exploitées dans la zone d'étude sont la nappe de Martil, Charf El Akab, Haouz (dorsale calcaire), Sghir, R'mel, Smir, Negro, Fnideq et Amsa (Fig. 9). L'exploitation de ces nappes s'élève à près de 80 millions de m³.

La nappe de Charf El Akab, située à 17 km au Sud-Ouest de la ville de Tanger, est la nappe phréatique d'approvisionnement de Tanger et d'Azilah. Elle a une superficie approximative de 15 km². Il s'agit d'un bassin absolument fermé qui n'est alimenté que par les précipitations, aucun cours d'eau n'y pénètre.

La nappe de la dorsale calcaire constitue une principale ressource en eau de la zone d'étude et effectue ses recharges au travers de fractures dans les roches calcaires, tandis que sur les flyschs à dominance gréseuse (la nappe numidienne et l'unité de Beni Ider) des aquifères discontinus sont constitués.

La nappe d'oued Sghir se situe sur la zone hydrologique des bassins côtiers méditerranéens. Cette nappe d'une importance limitée au niveau régional, mais le haut est sub-affleurant, et se situe en période de sécheresse, à moins de 5 m de profondeur au fond de la vallée. Elle est affleurante au pied de certains versants (CREOCEAN, 2010).

Localement, des nappes perchées peuvent être présentes : les grès constituant un bon aquifère tandis que les niveaux de pélites forment un horizon imperméable. Quant à ces ressources en eaux, présentes sous formes de petites nappes perchées, la nappe la plus importante dans la région correspond à la nappe Numidinene.

V. CADRE GEOLOGIQUE

A. APPROCHE REGIONALE

Le Rif est une chaîne de montagne faisant partie des chaînes alpines de la Méditerranée, sa partie occidentale et septentrionale constitue avec les cordillères Bétiques occidentales et méridionales l'arc de Gibraltar. Sa structure est dominée par des charriages importants à déversement du Nord Est vers le Sud Ouest.

Le Rif a fait l'objet de plusieurs recherches géologiques dont certaines ont été à la base de la nomenclature et du découpage classique adopté par la plupart des auteurs (Andrieux, 1971 ; Durand Delga *et al.*, 1960, 1962; Leblanc, 1975; Mattauer, 1963; Suter, 1980;), certains auteurs ont adopté, pour mettre en relief des aspects structuraux ou paléogéographiques d'autres découpages (Assebry, 1984 ; Frizon De Lamotte, 1985; Vidal, 1977).

D'après les travaux de Durand Delga *et al.* (1960), le Rif a été divisé en trois grands domaines structuraux : domaine interne, domaine des Nappes des Flysch et le domaine externe, dont

chacun se subdivisant lui-même en plusieurs unités charriées les unes sur les autres (Fig. 10).

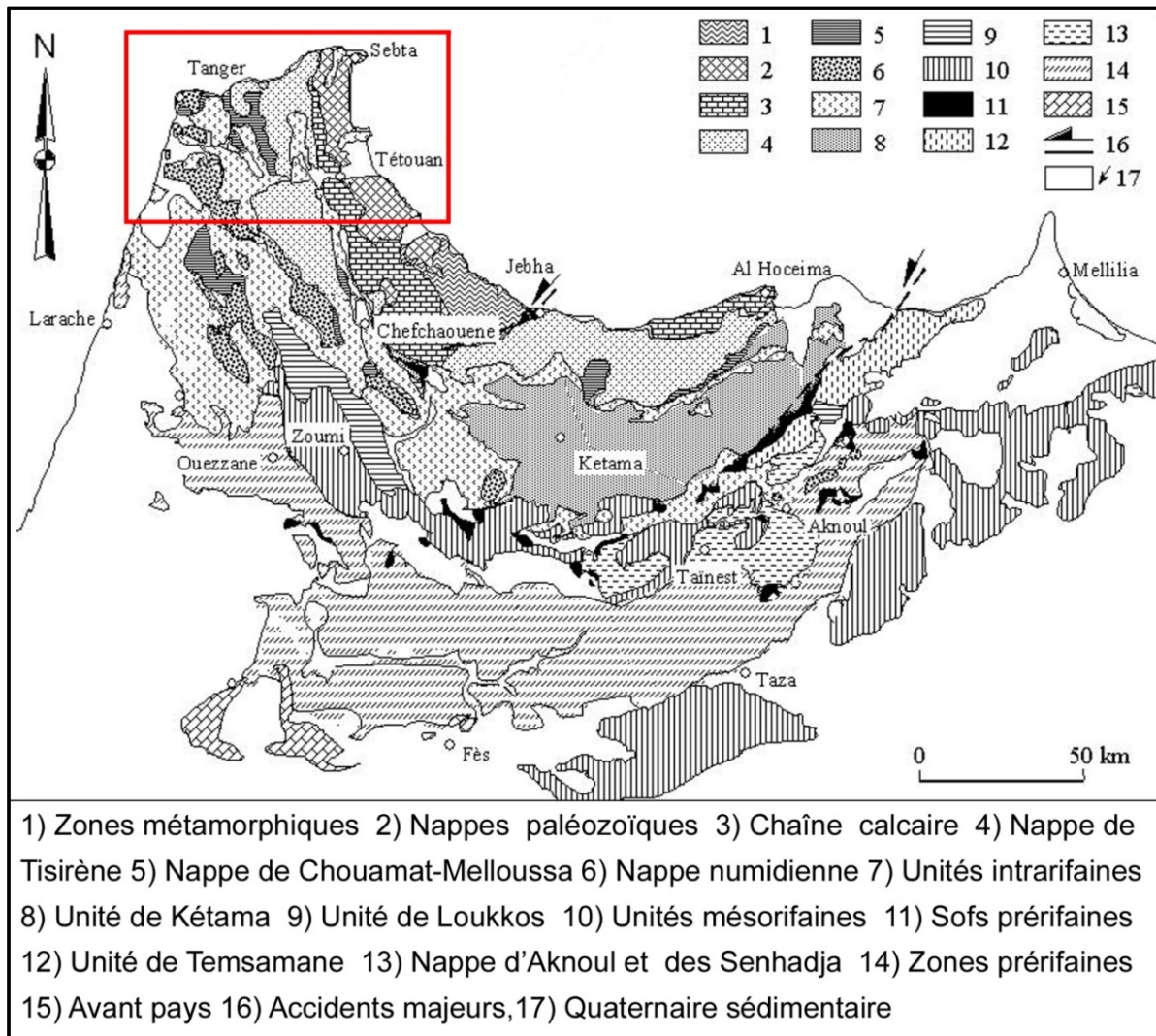


Figure 10: Carte structurale de la chaîne rifaine (Suter, 1980).

1. Le domaine interne

Il Affleure en bordure du littoral méditerranéen, entre Sebta et Jebha, et dans le massif de Bokkoya à l'ouest d'El Hoceima. On y différencie deux grands ensembles : les nappes à matériel essentiellement paléozoïque, et leurs couvertures méso et cénozoïques. Les différents ensembles qui constituent cette zone montrent, sauf en quelques rares exceptions, une polarité vers les zones externes.

1.1. Les nappes paléozoïques

Elles sont divisées en deux groupes de nappes :

a. Les Sebtides (Durand Delga et Kornprobst, 1963) comportent:

- Des unités inférieures représentées par un socle ancien de nature mantellique (Kornprobst, 1962, 1974; Michard *et al.*, 1983 ; Milliard, 1959; Saddiqui, 1988 ; Van Der Bosch, 1974) qui

se serait mis en place à partir du manteau supérieur pendant l'orogénèse alpine. Il est recouvert d'une auréole de kinzigites à faciès granulites de haute pression. Ils sont surmontés à leur tour par des gneiss et des micaschistes;

- Des unités supérieures de Federico (Didon *et al.*, 1973; Kornprobst, 1962, 1971, 1974). Elles sont formées de trois écailles épi-métamorphiques (faciès de schistes verts) comportant des terrains schisteux, quartzeux et localement des calcaires et dolomies, dont l'âge est Carbonifère? À Trias supérieur.

b. Les Ghomarides (Chalouan, 1986; Kornprobst, 1974).

Ils sont formés de trois nappes charriées structurellement sur l'ensemble des Septides. Elles comportent des terrains faiblement métamorphiques surmontés par des restes d'une couverture d'âge triasique ou peut être plus récente (Oligo-Miocène) et sont affectées par une déformation hercynienne métamorphique.

1.2. Les terrains méso-cénozoïques

a. La Dorsale Calcaire

Elle constitue le trait typique de la côte méditerranéenne où elle affleure d'une manière continue dans trois secteurs :

- Entre Sebta et Tétouan, elle forme le chaînon du Haouz de direction N-S (Ben Yaich, 1981, 1991 ; El Hatimi, 1991, El Hatimi *et al.*, 1991 ; Durand Delga et Villiaumey, 1963; Kornprobst, 1966 ; Leikine, 1969; Raoult, 1966);

- Entre Tétouan et Jebha, on peut différencier entre deux tronçons de directions différentes : NW-SSE entre Tétouan et Chaouen et E-W entre Chaouen et Jebha (Fallot, 1937; Griffon, 1966; Gutnic, 1969; Nold *et al.*, 1981; Olivier, 1978);

- Enfin, les Bokkoyas, de direction E-W, affleurent à l'Ouest d'El Hoceima (Andrieux, 1971; Megard, 1969; Mourier, 1982; Mouhssine, 1991).

Ces terrains dont l'âge est comprise entre le Trias et le Miocène, où prédominent surtout les séries carbonatées d'âge triasico-liasique, sont regroupés en trois ensembles d'écailles: Dorsale interne, Dorsale médiane ou intermédiaire et Dorsale externe (Didon *et al.*, 1973).

b. Le Prédorsalien

La zone prédorsalienne, nommée par Didon *et al.* (1973), correspond à la bordure de la dorsale calcaire. Elle a été également désignée sous les appellations: unité de Belliounes (Durand Delga, 1972), semelle tertiaire (Andrieux, 1971), unité de Béni Derkoul (Wildi *et al.*, 1977), unité chaotique à klippe sédimentaires et Néonumidien (Bourgois, 1978).

2. Les zones externes

Elles sont découpées en zones transversales isopiques et isotectoniques qui épousent le contour de la chaîne. Ces zones sont de l'intérieur vers l'extérieur de la chaîne: l'Intrarif, le Mésorif et le Prérif.

2.1. Les zones intrarifaines

- L'unité de Kétama qui affleure dans le Rif central en une épaisse série, constituée essentiellement d'un flysch albo-aptien (Andrieux, 1971; Gubeli, 1982; Gubeli *et al.*, 1984, Frizon De Lamotte, 1985). Cette unité est affectée par deux phases de schistosité et un épi-métamorphisme (Andrieux, 1967, 1971; Frizon De Lamotte et Leikine, 1985; Monie *et al.*, 1984).

- L'unité de Tanger: affleure dans la partie nord occidentale du Rif externe. Elle est constituée des terrains marneux d'âge s'étalant du Crétacé supérieur jusqu'au Miocène inférieur (Lepinasse, 1975). Les terrains paléocènes, éocènes et miocènes inférieur-moyen sont bien représentés dans le front occidental de cette unité par une sédimentation détritique (Suter et Feichter, 1966 ; Suter, 1986 ; Tejera De Leon, 1993). L'unité de Tanger a été interprétée comme la couverture plus ou moins décollée de l'unité de Kétama, du fait de la complémentarité de leurs séries stratigraphiques (Durand Delga et Mattauer, 1959a et b ; Durand Delga, 1961; Andrieux, 1971).

- L'unité du Loukkos: elle affleure dans le Rif occidental, et est considérée comme une zone d'écaillés frontales de l'unité de Tanger. Les terrains qui la constituent sont d'âge albo-aptien à éocène, et ils sont représentés surtout par des marnes et marno-calcaires de l'Albo-Cénomanién et du Sénonien (Lepinasse, 1975).

2.2. La zone mésorifaine

Appelée aussi zone de "fenêtres" de Marçais (1937). Elle est formée de terrains d'âge liasique à miocène moyen (Durand Delga *et al.*, 1962; Suter, 1965) dont les plus caractéristiques sont les niveaux grés-pélicites turbiditiques du Callovo-Oxfordien ("ferrysch" de Wildi, 1981 et 1983). Le Crétacé y est également bien développé et représenté par des marnes et des marno-calcaires. L'Eocène, peu développé, est recouvert par un Miocène transgressif sur tous les termes inférieurs.

2.3. La zone prérifaine

Cette zone est caractérisée par des faciès essentiellement marneux qui prédominent dès le Crétacé (Durand Delga *et al.*, 1962; Leblanc, 1979). Ce complexe prérifain repose sur l'avant pays atlasique par un contact considéré comme stratigraphique par certains auteurs (Vidal, 1971, 1977; Frizon De Lamotte, 1987, De Luca, 1984) et de chevauchement par d'autres (Leblanc et Vidal, 1970; Suter, 1965 et 1980; Leblanc, 1975, 1977 et 1986).

On distingue dans le Prérif deux zones du Nord au Sud:

- Le Prérif interne: constitué d'écaillés enracinées sous le Mésorif et dont les séries débutent au Lias. L'élément le plus caractéristique de cette zone est la ligne des "sofs" ;
- Le Prérif externe: connu sous les noms de "nappe prérfaine", ou "Olistostrome prérfain". Il correspond à une épaisse série marneuse, d'âge miocène supérieur, renfermant des éléments de tailles, de natures et d'âges différents, qui proviennent de la désagrégation des fronts des nappes au cours de leurs déplacements vers l'extérieur de la chaîne.

3. Les terrains allochtones ou nappes de glissement

3.1. Les nappes des flyschs

Elles occupent une portion charnière entre le domaine interne et le domaine externe, mais elles peuvent se présenter également en superstructure sur le domaine interne (flysch numidien du Jbel Zem-Zem). On peut distinguer trois types de nappes de flyschs:

- Les flyschs maurétaniens: constitués par la nappe de Tisirène et de Béni Ider. La première, affleurant entre El Hoceima et l'accident de Jebha est formée par des calcaires et radiolarites jurassiques surmontées par une épaisse série détritique d'âge Berriasien à Barrémien (Crétacé inférieur). La deuxième, affleurant depuis le Nord de Chaouen jusqu'au détroit de Gibraltar ;
- Les flyschs massyliens: constitués par la nappe de Jbel Chouamat (Andrieux et Mattauer, 1962; Andrieux, 1971) et la nappe de Melloussa (Durand Delga, 1965);
- La nappe numidienne : affleure dans la péninsule tingitane (Durand Delga et Mattauer, 1959c ; Andrieux, 1971).

3.2. Les nappes rifaines et la nappe d'Ouezzane

a- Les nappes rifaines

Ce sont des unités complètement déracinées dont la patrie est à rechercher dans les zones intrarifaines ou mésorifaines, ou dans les structures qui les relient actuellement ou encore dans les zones situées au delà du domaine d'Alboran. Ces unités affleurent uniquement dans le Rif central et oriental où elles sont largement étalées sur l'unité de Kétama, sur la zone mésorifaine ou sur le Prérif interne. Wildi (1983) différencie dans ces unités:

- Les nappes rifaines supérieures qui ont des affinités intrarifaines, constituées par la nappe de Senhadja et d'Aknoul (Leblanc, 1979; Frizon De Lamotte, 1985);
- Les nappes rifaines inférieures, à affinités mésorifaines, correspondant à la nappe de Bou Haddoud, possèdent de grandes affinités mésorifaines, et sont considérées comme partie intégrante des unités enracinées.

b- La nappe d'Ouezzane

Cette nappe regroupe, selon Suter (1980) et Wildi (1983), la nappe d'Ouezzane "sens strict", la nappe de Tsoul (Leblanc, 1975) et la nappe du Habt (Suter et Feichter, 1966). Ce sont des nappes de glissements constituées des terrains d'âge crétacé supérieur à miocène moyen.

Morley (1988) a remarqué que la distinction entre les nappes de Hapt et rifaines porte essentiellement sur les différences de faciès qui les constituent.

B. APPROCHE ZONALE

La zone d'étude présente les différentes unités structurales de la chaîne rifaine (Fig. 11 et 12). De l'Est vers l'Ouest, on trouve l'affleurement de formations appartenant au domaine interne, au domaine de flyschs et au domaine externe.

La façade atlantique, à l'exception de la partie la plus septentrionale où les crêtes gréseuses du Numidien dominant, est caractérisée par de vastes plaines alluviales et de larges plages et haut de plages bien développées, avec des dunes littorales bien marquées. La géologie de surface est représentée essentiellement par les terrasses fluvio-marines quaternaires et les dépôts détritiques du Miocène. Vers l'intérieur, affleurent les formations grésopélitiques de la nappe numidienne et les flyschs de Melloussa reposant sur l'unité de Tanger essentiellement argileuse.

Sur le littoral du détroit de Gibraltar, on rencontre les différentes nappes de flyschs, essentiellement la nappe numidienne à l'Ouest de Tanger et la nappe de Bni Ider à l'Est de Tanger jusqu'à le port Tanger Med. A l'Est de celui-ci, affleurent les dolomies et les formations carbonatées de la dorsale calcaire d'âge mésozoïque et cénozoïque, puis les dépôts paléozoïques du domaine interne.

La baie de Tétouan, constituée de petites plaines alluviales qui s'intercalent entre les reliefs rifains côtiers et la ligne de côte ; seule la plaine de Martil est très vaste. Les roches qui constituent cette zone sont de trois grandes unités : les Sebtides et les Ghomarides, formant généralement les plaines côtières, et la Dorsale calcaire constituant les reliefs montagneux ; les deux premières appartiennent au Paléozoïque en partie métamorphique, alors que la Dorsale est d'âge Secondaire et Tertiaire.

Au centre, on note généralement la présence des formations des flysch grésopélitiques en grande superficie, représentées essentiellement par les nappes de Bni Ider, de Tisirène et de Melloussa, qui reposent sur l'unité de Tanger. Cette dernière est constituée essentiellement par des formations essentiellement argileuses d'âge allant du Crétacé supérieur au Miocène.

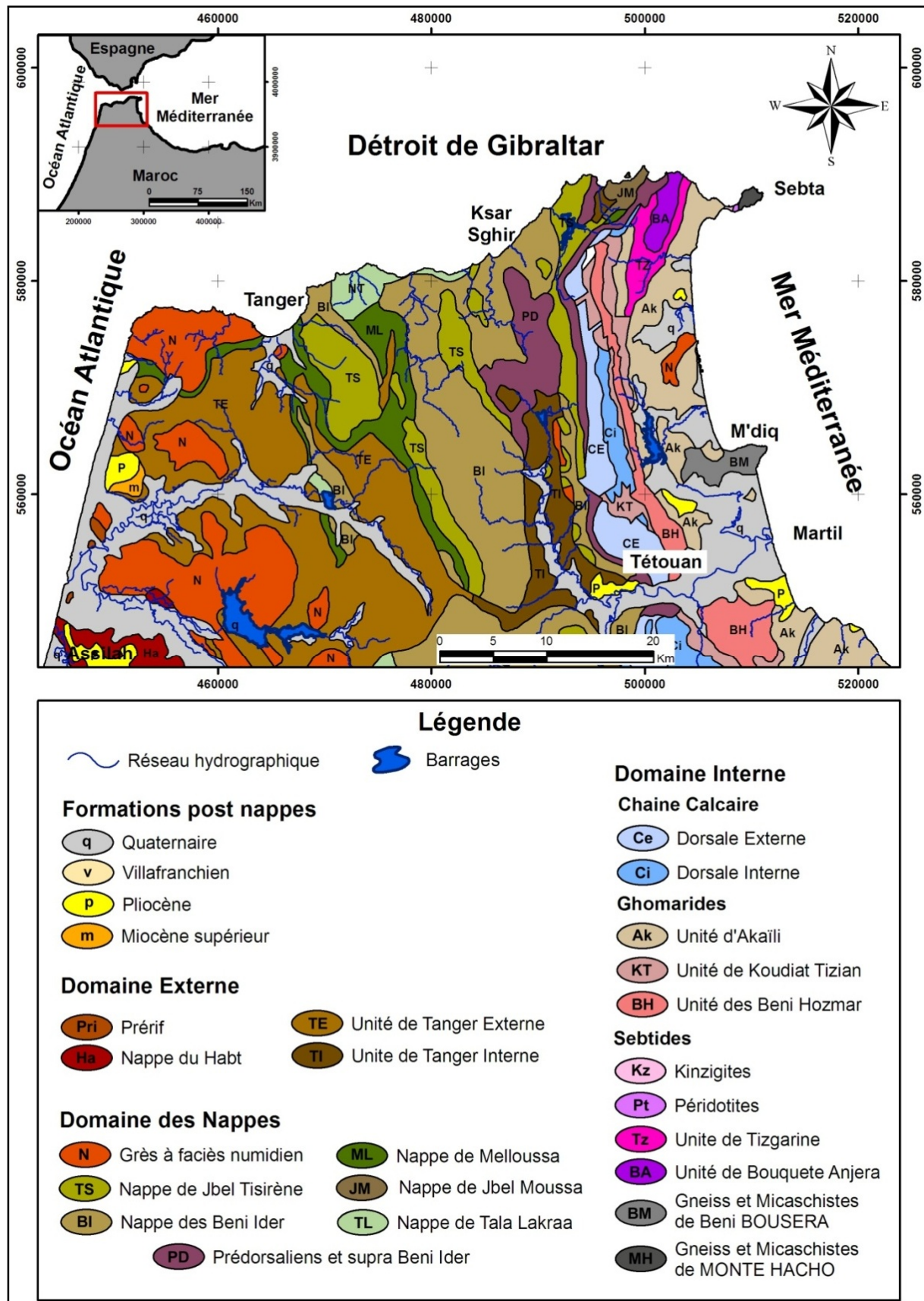


Figure 11 : Schéma structural de la péninsule Tingitane (modifié).

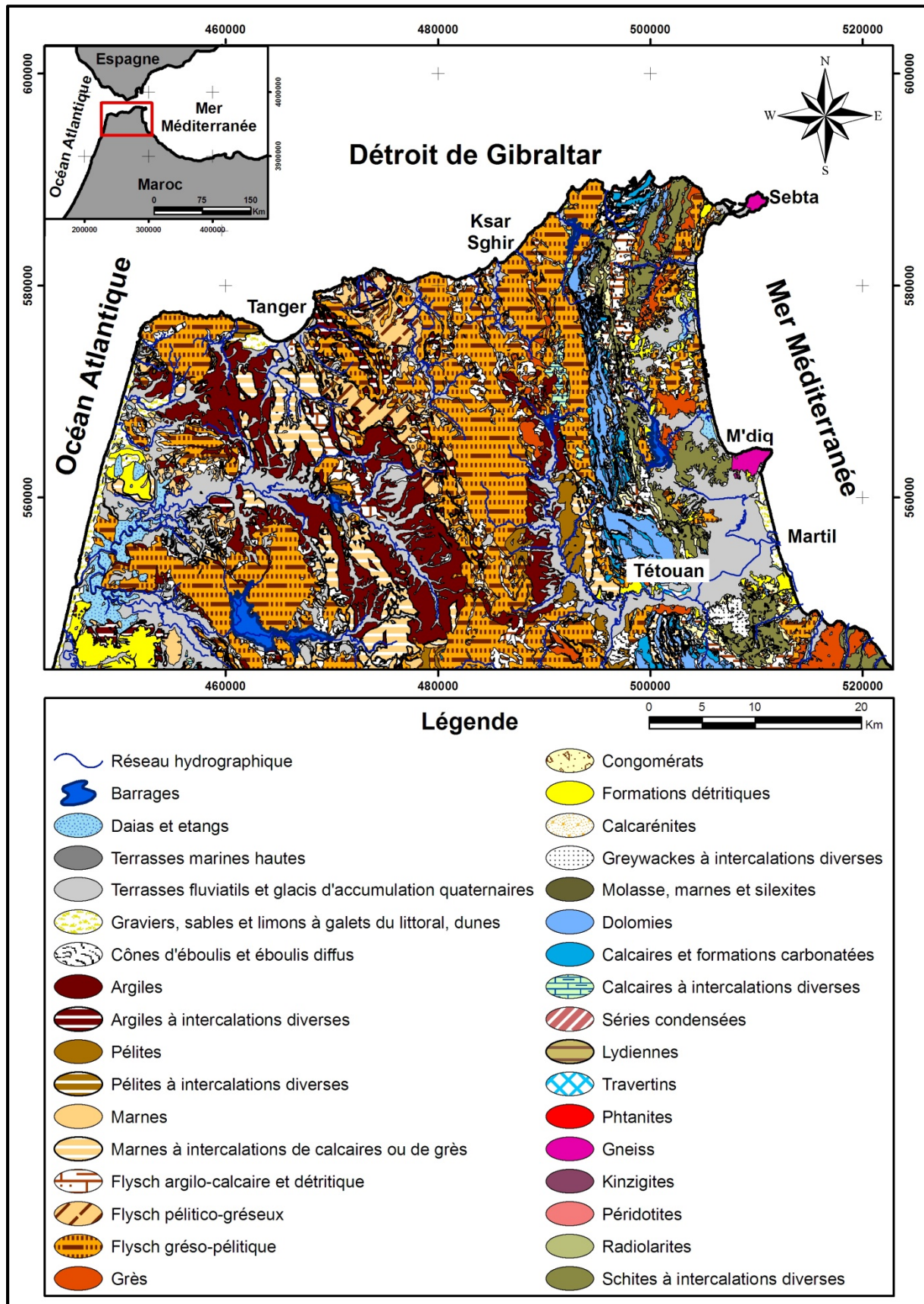


Figure 12 : Carte géologique de la péninsule Tingitane (modifiée).

VI. CADRE GEOMORPHOLOGIQUE

La péninsule de Tanger est une zone très fortement charriée et dans la quelle le "danger sismique " est permanent. De ce fait, les reliefs structuraux y sont parfaitement dégagés et imposants. Mais les subdivisions géologiques classiques (Fallot, 1937) ou récentes (Durant Delga *et al.*, 1962, Didon *et al.*, 1973) s'avérant peu commodes pour rendre compte de la variété et de la richesse des reliefs. Une autre classification, basée principalement sur les données lithologiques et tectoniques, serait plus appropriée pour différencier les grandes unités morpho-structurales.

Par ailleurs, les seules formations récentes sont à rapporter au pliocène, au Villafranchien et au quaternaire (El Gharbaoui, 1981).

Dans la partie occidentale, les terrains limitrophes du littoral tangérois appartiennent aux nappes de Melloussa et de Bni Ider, qui reposent sur les terrains argileux de l'unité de Tanger. Ils peuvent être répartis en trois grandes unités morphologiques :

- A l'Ouest, le massif gréseux montagneux et côtier (Jbel El Kebir), parallèle au détroit de Gibraltar et à morphologie de plateau. L'altitude moyenne y est de 150 à 200m.
- Au centre, la plaine vallonnée du Fahs débouchant dans le détroit de Gibraltar par la baie de Tanger. Les collines qui la parsèment ont une altitude moyenne de 100 m et dominent un ensemble de larges vallées aboutissant soit à l'océan (oueds Hachef, Boukhalef, Bougadou, M'Harhar) soit dans le détroit de Gibraltar (oueds Lihoud, Souani, Mghogha, Mellaleh).
- A l'Est, le massif d'Anjera, éperon Nord occidental de la chaîne du Rif, se terminant sur le littoral au Cap Malabata. Les reliefs y sont accusés et séparés par de profondes vallées. Les sommets ont des altitudes variant de 194 m au jbel Sersour à 376 m au jbel Dehar-Oulika.

Le secteur Est de la zone d'étude, sur la façade méditerranéenne, est caractérisée par une zone nord (Tétouan-Sebta) correspondant à peu près à une partie de la zone axiale du Rif. Elle est caractérisée par un massif montagneux et la plaine Martil :

- Le massif montagneux caractérisé au niveau de son sommet par une chaîne calcaire qui a un contact en général sub-vertical avec les flyshs externes (alternance de grés micacés calcaireux et de pélites d'oligocène) ;
- Le Jbel Zem-zem se trouve à mi-chemin entre Tétouan et Sebta et forme un synclinal perché de grés numidien ;
- La plaine de Martil est constituée par le quaternaire (Rharbien et actuel) et correspond à des dépôts dunaires et des alluvions. On trouve aussi des pélites vers l'Ouest de Tétouan.

La façade atlantique est caractérisée essentiellement par des formations quaternaires qui se présentent sous forme de terrasses et glacis d'accumulations marines et fluviales. Le relief relativement très bas est traduit par la présence de grandes surfaces occupées par des marais, daïas et Merjas (Fig. 13).

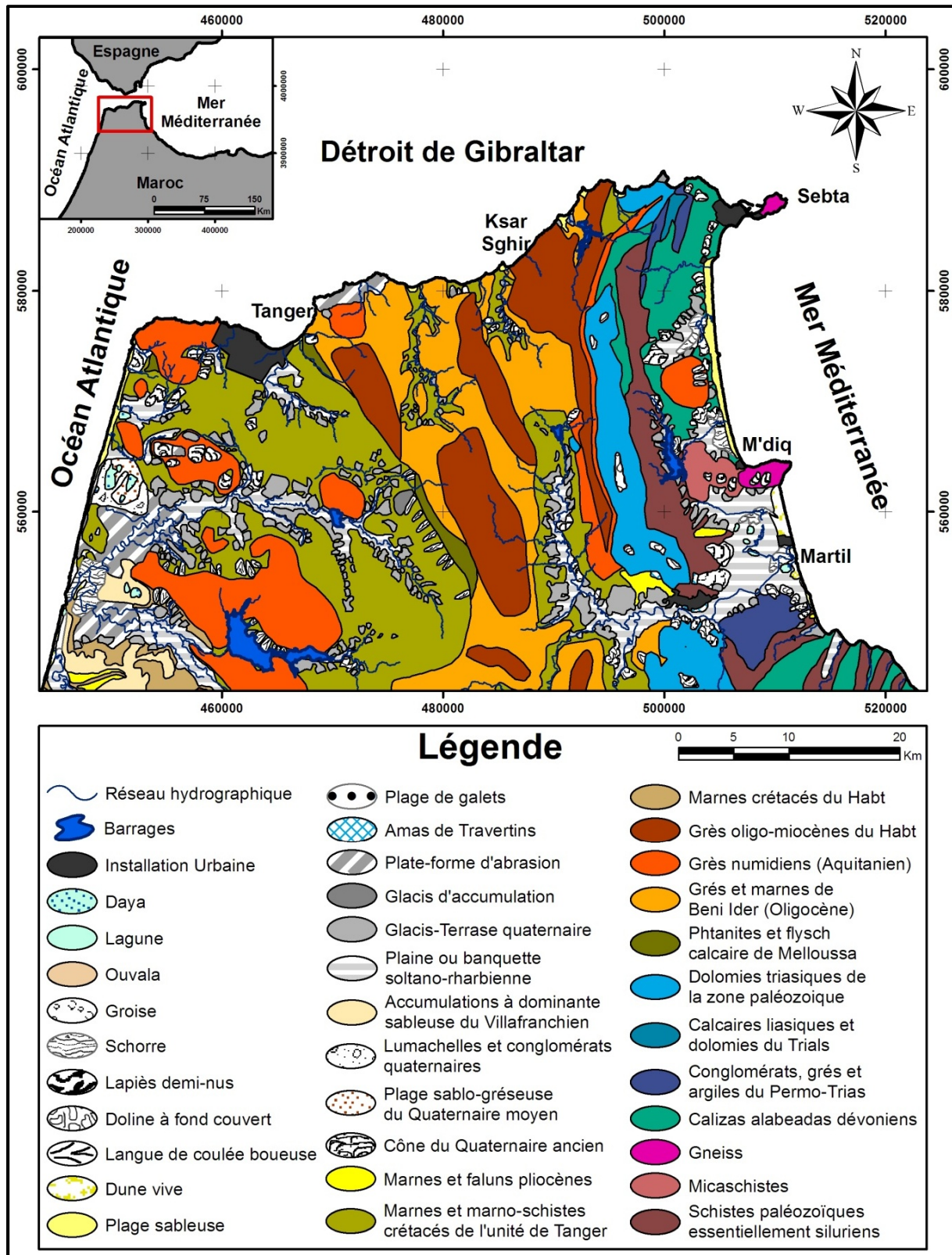


Figure 13 : Carte géomorphologique de la péninsule Tingitane (El Gharbaoui, 1981 ; Modifiée).

VII. LE RELIEF

La topographie de la péninsule est relativement articulée, endommagée et caractérisée par des pentes raides (Fig. 14). Le cours des oueds dans la zone est généralement limité par des affleurements dont l'élévation varie de -6 pour les zones atlantiques et peu méditerranéennes à 1026 m en allant vers le centre de la zone d'étude.

En se basant sur la nature du relief et son nivellement, on peut subdiviser la zone d'étude en quatre parties :

- La côte atlantique, généralement très basse et représentée essentiellement par des zones littorales et des plaines alluviales très vastes dont le plus important est celui de l'oued Tahaddart. Ce relief très bas est à l'origine de plusieurs Merja et marais intérieurs dans cette zone. L'arrière pays est généralement bas et représenté généralement, à l'exception de quelques crêtes du Numidien, par les basses collines de l'unité de Tanger ;

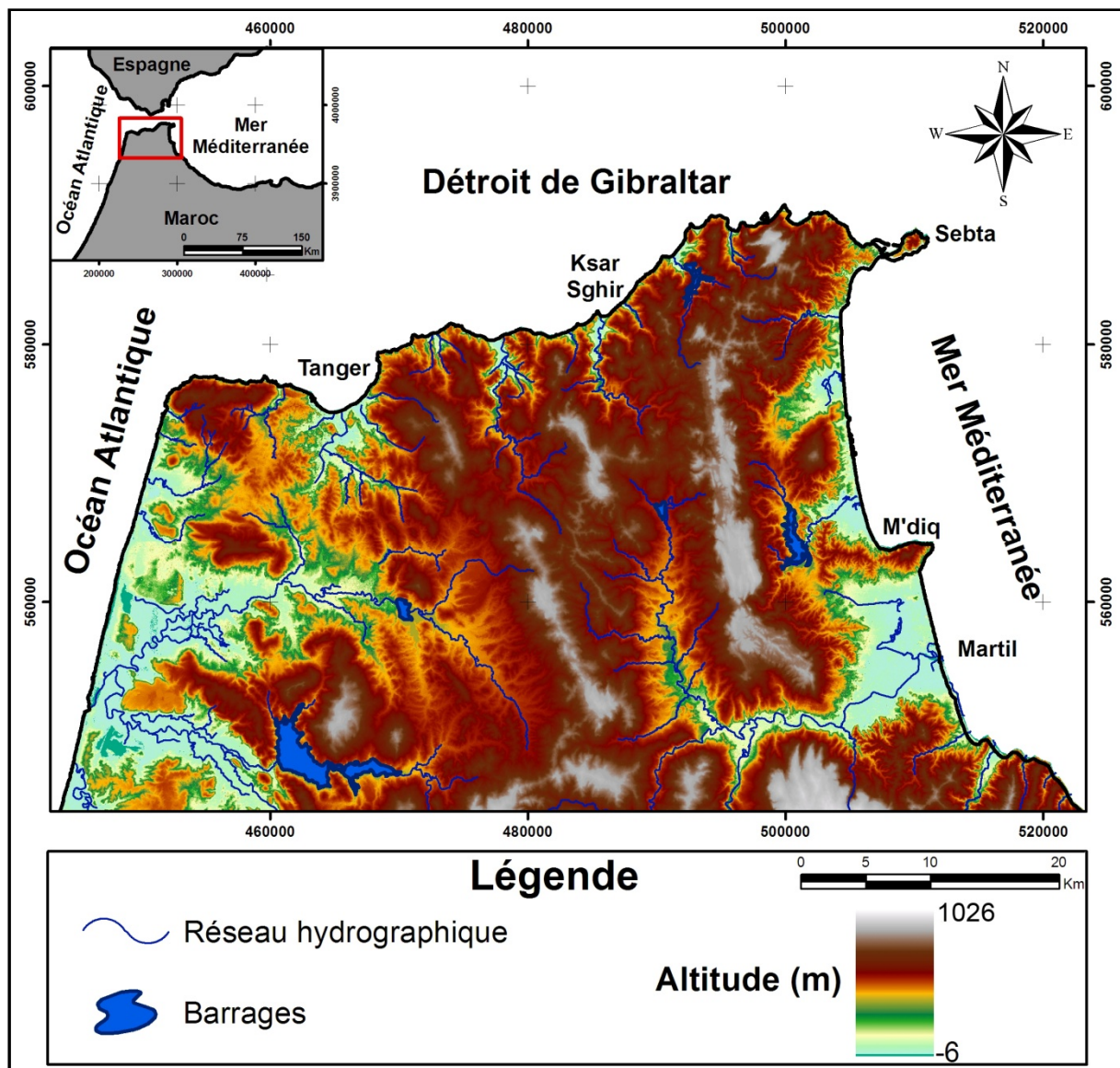


Figure 14 : Carte d'Altitude de la péninsule Tingitane.

- La façade du Détroit, caractérisée par une succession de côtes rocheuses, de falaises et de petites plages sous forme de baies ou d'anses. Les oueds qui débouchent dans cette zone sont de petite ampleur, creusent leur lit entre les montagnes d'altitudes importantes, augmentant de plus en plus vers l'Est où culmine le Jbel Moussa à 841 m ;
- La façade méditerranéenne, peut être décrite comme un mélange des deux, avec des reliefs très élevés en arrière pays, dépassant les 1000 m aux alentours de Ben Karrich (entre Tétouan et Chefchaouène), et des basses et vastes vallées, dont celle de Martil est la plus importante. De même, il y a présence de quelques lagunes littorales et de marais intérieurs, résultant des inondations des oueds sur les zones très basses ;
- Entre les montagnes de la dorsale calcaire à l'Est et les côtes basses atlantiques, le relief des zones internes est présenté essentiellement dans la partie orientale par les formations grésopélitiques des nappes de flyschs avec des altitudes importantes (jusqu'à 851 m) et vers le secteur occidental, par les collines du domaine externe essentiellement pélitico-gréseux, plus basses, dont les altitudes ne dépassent que très rarement les 600 m.

VIII. LE SOL

La qualité des sols de la province de Tanger est très variable et il a été souvent difficile de distinguer des catégories des sols rigoureusement homogènes du point de vue agronomique.

Il a été constaté parfois une variabilité à l'intérieur de la même unité. De plus, la prospection a été réalisée à différentes périodes par différents pédologues et avec des objectifs différents. Il en résulte une hétérogénéité des données ou leur insuffisance et par là les difficultés d'interprétations.

Le classement des sols a pour objet de mettre en évidence un certain nombre de contraintes. Ceux-ci peuvent être dues à la topographie ou relief, à l'eau ou intrinsèques au sol. La hiérarchie des facteurs limitant permet de classer des sols et par là de choisir les aménagements ou les interventions à préconiser. Le classement proposé correspondant à un classement actuel avant aménagement, résultants des interprétations des différents documents dressés et de l'analyse de différents facteurs agrologiques (Alami et Watteux, s.d).

La province de Tanger représente une mosaïque extraordinaire des sols allant des sols minéraux bruts aux sols les plus évolués (sols brunifiées et podzolisés). Le nombre d'unités inventoriées jusqu'au niveau de sous groupe s'élève à 67 dont 8 associations est complexe.

Les différentes données recueillies dans le cadre de la cartographie des sols permettant difficilement de distinguer des catégories des sols rigoureusement homogènes du point de vue agronomique. Il en résulte que les cartes extraites, notamment celles de classement des sols et d'aménagements fonciers sont entachés parfois d'imprécisions et d'incertitudes inhérentes à l'échelle de l'étude ou à l'appréciation de certaines données.

Les sols acides sont largement répandus dans le Tangérois à cause de la nature des matériaux (grès numidien, sables acides du villafranchien) et de la pluviométrie abondante. Ils sont moyennement pourvus en K_2O assimilable et en fer tant libre que total.

Les meilleurs sols de la province de trouvent sur les pentes douces et dans les plaines alluviales mais leur texture lourde en valeur (engorgement, bas fonds, salinité). Les sols du R'mel recouvrant les argiles imposent des traitements spécifiques (Alami et Watteux, s.d).

L'analyse de la toposéquence de la zone cartographiée (Sanousi Manzo, 2011), a permis de comprendre la distribution des sols dans le paysage de la région de Tétouan dont les principales classes de sol sont :

- Les sols minéraux bruts représentés par des affleurements rocheux occupant surtout la dorsale calcaire et certains reliefs sommitaux et versants à fortes pentes (15 à 30% et >30%). Cette classe est constituée essentiellement des affleurements de calcaires et de grès. Mais aussi des schistes faiblement altérés.
- Les sols à sesquioxydes de fer et de manganèse se trouvent au niveau des régions de haute altitude avec de fortes pentes (hauts sommets des montagnes et versants à pente forte).
- Les sols brunifiés caractérisés par un humus à forte activité biologique, en principe de type mull mais souvent aussi de type Moder aux limites de la classe. Ils se trouvent indépendamment de la classe de pente ou altitude. Ces sols se localisent un peu partout dans la zone au niveau des forêts et sur des flyschs ou des schistes.
- Les sols peu évolués occupent les zones cultivées et se développent sur des substrats durs ou tendres et certains sont souvent soumis par leur position en pente forte à une érosion hydrique intense. Ils sont souvent caillouteux en surface avec localement des affleurements rocheux. On les retrouve partout dans la zone et sur tous les types des roches mères.
- Les sols calcimagnésiques rencontrés au niveau des bas versants et des replats des sommets de montagne (pente moyenne), et sur des roches mères contenant des calcaires. Ces sols dont les caractères morphologiques des horizons supérieurs sont déterminés par la présence d'ion alcalinoterreux mais dans lesquels la partie inférieure du solum, quand elle existe, ne montre ni les caractères vertisol ni ceux des sols isohumiques.
- Les sols hydromorphes localisés le long des oueds dans la zone d'étude. Ils se développent sur des alluvions quaternaires récentes de texture équilibrée fine, sur des marnes et argiles et sur des schistes. Ce sont des sols dont les caractères sont dus à une évolution dominée par l'effet d'un excès d'eau en raison d'un engorgement temporaire ou permanent d'une partie ou de la totalité du profil.
- Les unités complexes ne correspondant pas à des unités de classification, mais permettent de rendre compte de certains aspects de la distribution des sols. Elles peuvent être une juxtaposition de sols ou une séquence de sols.

IX. L'OCCUPATION DU SOL

La région de Tanger-Tétouan présente des diversités géomorphologiques et climatiques appréciables, ayant permis de développer les différentes formations réparties en forêts,

matorrals, cultures, plans d'eau et habitats (Fig. 15).

Les forêts naturelles couvrent une superficie de 219 897 ha, à laquelle il faut ajouter presque 30 358 ha reboisées jusqu'à la campagne 2004-2005, ce qui représente 22% du territoire régional. Cependant, en dépit des efforts déployés, les forêts reboisées ne représentent que 5 % de la superficie forestière régionale (Tableau 7).

Tableau 7 : Superficie (ha) des forêts naturelles et reboisées, région Tanger-Tétouan.

Provinces	Forêts reboisées (1)	Forêts naturelles				
		Résineuses Naturelles	Feuillues Naturelles	Essences Secondaires	Matorral (2)	Total
Tanger-Assilah + Fahs-Anjra	16.014	10.101	17.337	17.562	11.579	56.579
Tétouan + M'diq-Fnideq	14.344	10.604	19.779	74.617	58.318	163.318
Région	30.358	20.705	37.116	92.179	69.897	219.897
Maroc	592.869	1.029.577	2.672.983	4.437.232	407.406	8.547.198
Région/Maroc (%)	5	2	1	2	17	3
(1) Reboisements existants à l'issue de la campagne 2004-2005 - (2) Statistiques de l'inventaire Forester National de 1999						

Sources : Services Provinciaux des Eaux et Forêts.

Les forêts naturelles sont dominées par les essences secondaires (42%) et le matorral (32%). Les essences résineuses naturelles qui représentent 9 % des forêts naturelles sont constituées essentiellement de pins (72%), de thuya (12%), de cèdre (10%) et de sapins (7%). Quant aux essences feuillues naturelles qui représentent 17%, elles sont composées du chêne vert (4,5%), chêne liège (67%), chêne zène (13%), eucalyptus (10,5%) et acacia (5%) (HCP-DRTT, 2008).

Le long du littoral du détroit de Gibraltar, soumis au bioclimat sub-humide ou semi-aride, le couvert végétal a été fortement morcelé et réduit à des herbes et maquis de végétation arbustive (cistes, lentisque, phyllaires, calycotome, etc.). Le défrichement a été moins prononcé aux deux extrémités du détroit, où deux montagnes humides surplombant la côte (Cap Spartel, Jbel Moussa ...) ont conservé quelques formations intéressantes (chêne liège, chêne kermès, chêne nain ...), parmi lesquelles se trouvent plusieurs espèces remarquables (notamment des endémiques betico-rifaines). (Daki, 2004)

Dans la baie de Tétouan, les versants sont moins humides (bioclimat subhumide ou semi-aride supérieur), vu leur orientation vers le Nord-Est et le peuplement humain est relativement dense. La végétation naturelle n'est visible à proximité du littoral qu'au Sud-Est de Tétouan, où elle est généralement sous forme de bosquets ou matorrals à base d'Oléastre et de Lentisque, avec quelques tâches de chêne kermès et des reboisements en Pin d'Alep (Ras Mazari à Ras Aâkaili) (Daki, 2004).

Par rapport à la totalité de région, les zones forestières occupent 752,65 ha, soit 12,6% de la superficie totale. Leur répartition est détaillée dans le tableau 8.

En ce qui concerne le secteur agricole, la partie Ouest et centrale de la région présente des conditions climatiques favorables pour l'agriculture qui est estimée à une superficie de 2911,23 ha soit une superficie de 48,9% de la superficie totale de la zone d'étude (Tableau 8). A l'Est, à caractère montagneux, se présente des sols squelettiques de qualité médiocre, et dont la plupart demeure favorable aux forêts et végétations sclérophylles (Fig. 15).

La superficie de zones à végétation naturelle, à l'exception des forêts arbustives, est évaluée à 668,93 ha (11,2 % de la superficie globale de la zone). Ce type d'occupation est dispersé sur toute la zone d'étude.

Tableau 8 : Répartition de différentes unités d'occupation du sol dans la région Tanger-Tétouan.

Type d'occupation du sol		Surface en Ha	% superficie	
Forêts	Forêts de conifères	272,84	4,6	12,6%
	Forêts de feuillus	255,76	4,3	
	Forêts mélangées	49,89	0,8	
	Forêts et végétation arbustive en mutation	174,16	2,9	
Végétations	Landes et broussailles	46,33	0,8	11,2%
	Pelouses et pâturages naturels	196,55	3,3	
	Végétation clairsemée	97,81	1,6	
	végétations sclérophylles	328,23	5,5	
Agriculture	Périmètres irrigués en permanence	688,84	11,6	48,9%
	Systèmes culturaux et parcellaires complexes	109,63	1,8	
	Cultures annuelles associées aux cultures permanentes	199,20	3,3	
	Terres arables hors périmètres d'irrigation	1546,11	26,0	
	Territoires principalement occupés par l'agriculture	351,77	5,9	
	Vergers et petits fruits	15,68	0,3	
Superficie totale de la région Tanger Tétouan		5951,91	100%	100%

Sources : Services Provinciaux des Eaux et Forêts.

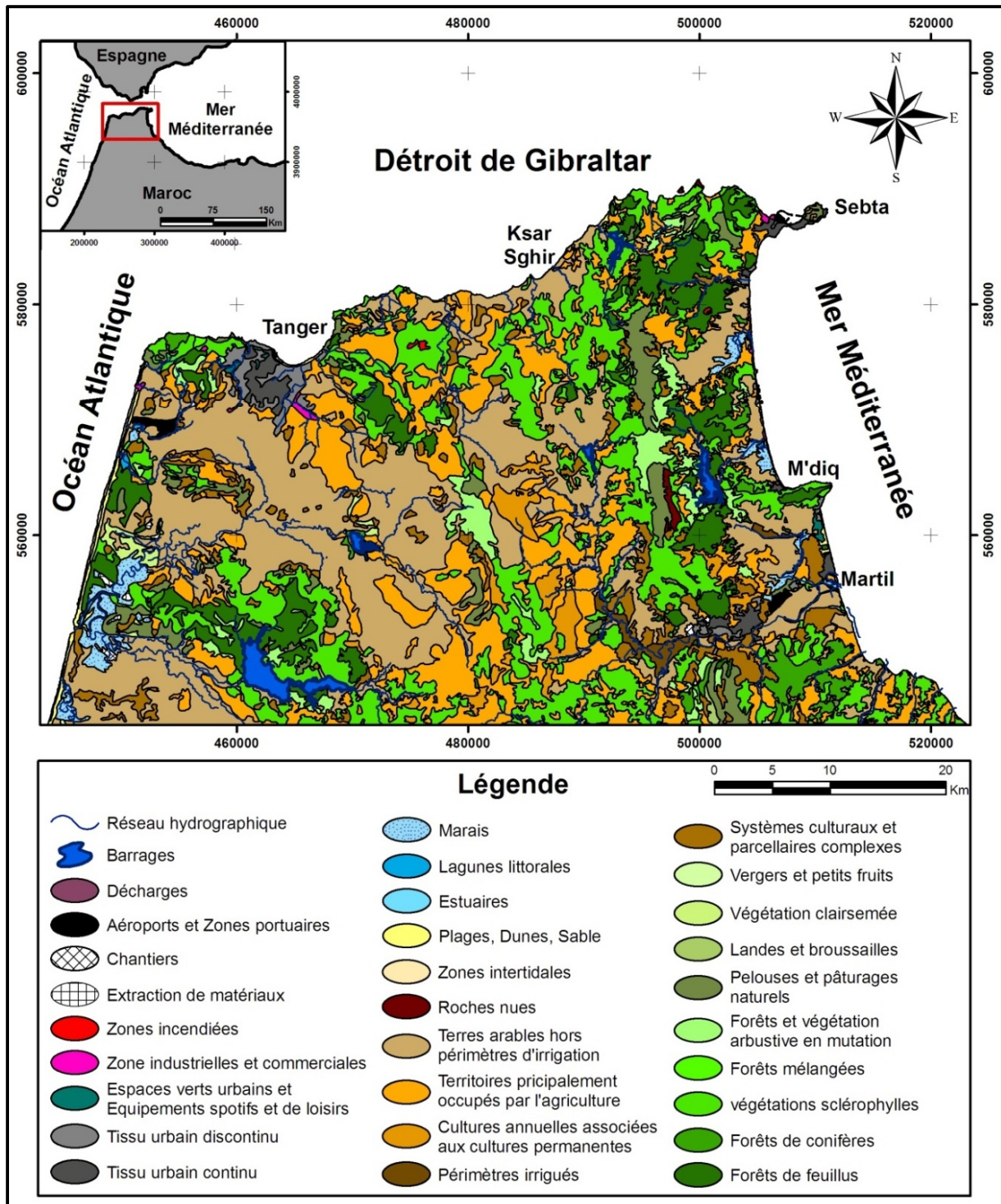


Figure 15 : Carte d'occupation du sol de la péninsule Tingitane (Ministère de l'environnement, 2004).

X. CADRE SOCIO-ECONOMIE

La région Tanger-Tétouan, deuxième force économique au niveau du Royaume, est marquée par un dynamisme soutenu sur les plans économique et démographique. Cette réalité va se renforcer dans les années à venir grâce aux chantiers majeurs et structurants en cours de réalisation au niveau de la région.

La région de Tanger-Tétouan, vu la conscience de son rôle important dans le développement de l'économie nationale grâce à sa position à l'extrême nord du Maroc, connaît ces dernières années un changement radical positif touchant presque tous les domaines. Les nouvelles zones industrielles, le port Tanger-Med, les grandes agglomérations urbaines implantées, les complexes touristiques, et le réseau routier constituent les grands chantiers de la région.

Compte tenu de la répartition de la population et des ressources qui servent de base à ses activités, l'approche des aspects socio-économiques dans la zone d'étude a été abordée par province administrative (Daki, 2004).

1. Le territoire et population

Eu égard à la superficie de la zone (2348,74 Km²), il ressort que la RTT est considérée comme l'une des régions les plus peuplées du Maroc avec un taux d'accroissement démographique annuel de 2% (contre 1,4% au niveau du Maroc). On note aussi, que le PIB régional est de l'ordre de 20.314 MAD/habitant.

La province de Tanger Assilah est composée d'un seul cercle qui encadre 7 communes. L'exode rural a donné une population à forte dominance urbaine : les recensements récents donnent 778.000 habitants, dont 50.000 seulement occupent le milieu rural. Le taux d'activité de cette population est de 45,3% et le taux de chômage avoisine les 13%.

La province de Fahs Anjra est à caractère plus rural avec deux cercles encadrant 8 communes toutes rurales. Le nombre de population est estimé en 2008 à 105.000. Cette zone possède des spécificités géo-économiques favorables, notamment sa proximité de l'Europe ; elle a été équipée d'une infrastructure appropriée (routes, ports, aéroport, réseau ferroviaire, zone franche, zones industrielles ...), afin d'en faire un pôle d'attraction aux investissements. Ses potentialités économiques résident principalement dans trois secteurs : l'agriculture, la pêche et l'industrie.

Au niveau de la province de Tétouan, qui compte deux cercles avec 11 communes, compte en 2008 une population de l'ordre de 552.000 dont 140.000 de la population rurale.

Concernant la province de M'diq - Fnideq, les subdivisions administratives de cet ensemble sont issues de l'ancienne province de Tétouan. Cette province nouvellement créée, est composée de deux cercles à 2 communes. Le nombre de population est estimé à 103.000 dont seulement 3.000 de population rurale.

2. L'agriculture

Au niveau de l'économie de la région Tanger-Tétouan, le secteur agricole occupe une place importante, aussi bien par les emplois offerts (78,7% de la population rurale active occupée en 2006) que par les effets induits sur la création d'unités agro-industrielles.

La céréaliculture occupe, au niveau de la région, une superficie annuelle d'environ 188.300 ha, soit 42,2% de la Surface Agricole Utile (SAU) régionale, assurant ainsi une production de l'ordre de 2,6 millions de quintaux en 2005-2006. Par rapport à l'ensemble du pays, la superficie consacrée aux céréales et la production correspondante représentent respectivement 3,4% et 2,9% du niveau national. Le rendement moyen au niveau de la région représente 85% de celui obtenu à l'échelle nationale, soit respectivement 14,1 qx/ha et 16,5 qx/ha.

Le blé dur est l'espèce dominante avec une superficie de 61.400 ha, soit 33% de la superficie céréalière, et un rendement de 14,6 qx/ha. La production s'élève à 896.100 qx environ représentant ainsi 4,3% de la production de cette variété au niveau national.

Dans la région Tanger-Tétouan, les légumineuses sont cultivées sur une superficie de l'ordre de 18.700 ha (4,2% de la SAU). La production avoisine 124.600 qx. Par province, nous relevons que Tétouan s'accapare 43% de la superficie réservée aux légumineuses. Le pois-chiche est l'espèce dominante sur une superficie de 4.800 ha et une production de 26.000 quintaux. Cette culture intervient respectivement pour 6,4% et 3,9% dans la superficie et la production de la même variété réalisée au niveau national.

Concernant la Préfecture de Tanger Assilah, lieux du futur projet de l'abattoir de volailles, sa superficie est de l'ordre de 96.000 ha. Les SAU, d'une superficie de 54.778 ha (57% de la superficie totale) se répartissent comme suit :

- Irriguée : 1.396 ha ;
- Forêts : 19.895 ha ;
- Parcs et inculte : 21.027 ha.

Le relief présente des plaines basses le long de la côte atlantique ayant de grandes potentialités de production, la partie centrale est montagneuse (Bassins versants d'Oued El Hachef et Mharhar) à vocation forestière pastorale. Enfin la zone Est s'étend au contrefort du Rif occidental.

- L'activité agricole est surtout orientée vers l'élevage et la céréaliculture ;
- Le Préfectorat de Tanger et l'une des régions les plus arrosées du Maroc (la moyenne des précipitations annuelles des huit dernières années est de 734 mm) ;
- Dans la partie sud (Sidi Yamani, Had Gharbia), les sols sont légers et sableux recouvrant des argiles lourdes à bonne capacité de rétention constituant un bon potentiel pour la culture d'Arachide en particulier, la partie qui constitue les bassins versant des Oueds Mharhar et El Hachef .
- Dar Chaoui, El Manzla et Azzinate sont dominés par des sols bruns pierreux, fortement lessivés à vocation parcs et forêts.

Les productions végétales de la Préfecture Tanger-Assilah durant la campagne 2007-2008 sont présentées dans les graphes suivants (Fig. 7).

3. L'industrie

Sur le plan économique, la proximité logistique de la Région Tanger-Tétouan est en passe de devenir un atout capital pour le développement local (Fig. 18). La mise à niveau des infrastructures de transport (port, autoroutes, liaison ferroviaires...) témoigne de la prise en considération essentielle de ce point dans la définition de la compétitivité régionale et internationale.

Grâce à la création de zones industrielles aménagées aux standards internationaux, offrant une logistique performante et un accès facile aux marchés intérieurs et européens, la région de Tanger - Tétouan est classée deuxième pôle industriel du Royaume. Elle représente :

- 10% des établissements industriels avec plus de 800 unités structurées ;
- 16% des emplois permanents, soient 80.000 postes ;
- 15 % du volume des exportations nationales ;
- 15,17 milliards comme chiffre d'affaires : 3ème place en termes de production industrielle après les régions de Casablanca et de Doukkala-Abda ;

La population active occupée s'élève à 760.000 dont 35% dans le secteur tertiaire, 26% dans le secteur secondaire (industrie et bâtiment) et 39% dans le secteur primaire (agriculture et forêt). Le taux de chômage en 2007 était de 8,6% (Moyenne nationale : 9,8%). La participation de la femme au secteur du travail est soutenue par plusieurs structures d'appui et formations.

4. Le tourisme

Le secteur du tourisme bénéficie de la situation privilégiée de la région Tanger-Tétouan à proximité de l'Europe, ses deux façades maritimes donnant sur l'Atlantique et la Méditerranée. Son enracinement dans l'histoire et sa diversité tant culturelle que naturelle constituent des atouts majeurs pour le développement des activités touristique.

La région de Tanger Assilah dispose du plus grand nombre de structures d'accueil, dont un grand nombre de structures classées, et de lits, environ 7000 selon les statistiques de la délégation provinciale du tourisme (HCP-DRTT, 2008).

Dans cette zone, outre les plages et les zones naturelles dont elle dispose, le secteur du tourisme bénéficie de l'attraction qu'exerce la ville de Tanger par ses différentes activités, surtout en période estivale.

A Tétouan, le tourisme repose principalement sur les espaces balnéaires ; la montagne et la forêt sont faiblement exploitées par ce secteur, bien qu'elles offrent des potentialités exceptionnelles. La Province ne dispose cependant que de 25 hôtels classés et de 6880 lits. Ce secteur, dominé par le tourisme national, génère une activité commerciale qui occupe une

place importante dans l'emploi, du moins durant la saison estivale où la fréquentation touristique atteint son apogée.

5. L'énergie

En termes d'énergie électrique, la région Tanger-Tétouan dispose d'un système varié d'approvisionnement composé de trois usines hydrauliques, trois centrales thermiques et un parc éolien implanté sur son territoire. Tous ces éléments développent ensemble une puissance de 666,4 MW, soit l'équivalent de 12,7% de la puissance installée au Maroc par l'Office National d'Electricité.

Concernant l'activité pétrolière, elle se limite dans la région à l'emplissage du Gaz de pétrole liquéfié, assuré par deux unités, à Tétouan et à Fahs Anjra.

XI. CONCLUSION

Les caractéristiques climatiques, géomorphologiques, géologiques et d'occupation du sol dans la zone d'étude constituent les facteurs qui vont influencer, à des degrés variables, le phénomène de l'érosion hydrique dans la zone d'étude. La répartition spatiale et l'importance de chaque facteur ainsi que l'attribution de chacun de ces facteurs dans un espace donnée déterminent le degré de l'érosion.

PARTIE III

METHODOLOGIE ET

APPLICATION

Chapitre I

Approche méthodologique

I. INTRODUCTION

La cartographie de l'érosion des sols est fonction, outre des modèles opérationnels qui sont capables de la décrire et d'évaluer son intensité, de l'existence des données spatialisées décrivant les différents facteurs de l'érosion et alimentant la base de données du modèle.

En vue d'une modélisation cartographique de l'aléa d'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 oblige à chercher un autre paramètre, comme les moyennes mensuelles et annuelles de précipitations.

D'une manière générale, la caractérisation d'un paramètre ou d'un autre est le résultat d'un choix de l'opérateur, tout en prenant en considération l'importance d'un paramètre par rapport à l'autre et son influence vis-à-vis du phénomène érosif. Cela nous amène également à faire appel aux données de la littérature et de la nature du milieu, car le plus souvent, des conditions locales peuvent influencer beaucoup la réponse d'un sol à l'action érosive. Le plus souvent, le choix d'un paramètre se fait à cause de la rareté ou l'absence des informations concernant un autre paramètre. Il faut également souligner que le choix du modèle à utiliser doit être effectué en tenant compte de la disponibilité des données nécessaires.

Dans le cadre de ce travail, la cartographie de l'érosion sera effectuée de deux étapes :

- Une cartographie de la sensibilité des terres à l'érosion, qui est une information qualitative, qui informe sur le degré de sensibilité des terrains à l'action érosive en fonction de trois paramètres à savoir la lithologie, le degré de pente et l'occupation des sols ;
- L'application du modèle empirique "USLE", adapté selon les conditions marocaines et intégré sous un système d'information géographique, nous permettra une modélisation et une cartographie exhaustive du phénomène érosive. Il s'agit d'une information, cette fois quantitative, qui informe sur la quantité des terres érodées par unité spatiale en T/ha/an.

La méthodologie du travail, comme il a été indiqué, consiste en l'intégration et la représentation des informations cartographiques et descriptives des différents facteurs et paramètres de l'érosion dans une plate forme des systèmes d'information géographiques. Une

base de données à références spatiales contenant toutes les informations qualitatives et quantitatives concernant la zone d'étude a été créée.

II. CHOIX DE L'USLE

À travers ce grand nombre de modèles disponibles, il fallait choisir lequel serait le plus approprié. Dans un premier temps, le choix du modèle a précédé les travaux de terrains. Il fallait choisir avec pertinence un modèle en fonction de son adéquation avec la problématique, de l'échelle de grandeur de l'étude, de la praticabilité, des moyens dont on dispose, etc. (DESPA, 2005).

Dans le cadre de notre étude, on a fait le choix de maintenir le modèle USLE pour les raisons suivantes :

- Le travail entourant l'élaboration de l'USLE s'est effectué sur plus de 10 000 parcelles expérimentales dans 24 états à travers les États Unis, donc les limites de ce modèle sont bien identifiées dans la littérature ;
- L'USLE permet de réaliser des inventaires et peut être utilisé comme outil de prédiction aidant ainsi à planifier les aménagements suite à l'évaluation des effets de certaines activités sur le sol (Nearing *et al.*, 1994) ;
- L'USLE peut aider les gestionnaires à cibler les endroits où les efforts doivent concentrer pour réduire l'érosion du sol (Nearing *et al.*, 1994) ;
- L'USLE est le modèle le plus répandu et connu pour l'érosion de surface (Ouzizi, 2000) ;
- L'USLE est le modèle de base de plusieurs recherches de modélisation du détachement des particules (Company Redmond, 1996) ;
- L'USLE est facilement adaptable aux données multi ressources ;
- L'USLE a été appliqué à des petites échelles en utilisant les SIG et la télédétection ;
- Chaque facteur de l'USLE peut représenter une couche d'information dans le SIG et permette une cartographie de pertes en sols (Dion, 1989 ; Anys, 1991 ; Fabbri, 1991 ; Chackroun, 1993).

II. LES DONNEES ET TECHNIQUES UTILISEES DANS LE CADRE DE CETTE ETUDE

1. Les données et les documents utilisés

La modélisation de l'érosion nécessite toute une variété de données pour alimenter le modèle et pouvoir ressortir l'information adéquate pour l'analyse des différents facteurs et/ou paramètres qui interviennent dans le processus érosif.

Pour se faire, on a utilisé les documents suivants :

- Les données et les documents cartographiques, scannées et géoréférenciées sous Projection Conique Conforme de Lambert, zone 1, Nord-Maroc :
 - Les cartes topographiques au 1/50.000, feuilles de Tanger, de Ksar Sghir, de Sebta, d'Al Manzla, de Melloussa et de Tétouan Ras Mazari ;
 - Les cartes géologiques au 1/50.000, feuilles de Tanger-AlManzla, de Ksar Sghir, de Sebta, de Melloussa et de Tétouan Ras Mazari ;
 - La carte d'occupation des terres de la Région de Tanger Tétouan (Département de l'Environnement, 2004) ;
 - Les données pédologiques de la région de Tanger issues d'un rapport de l'INRA (Alami et Watteux, s.d) et d'un mémoire de fin d'études de l'IAV sur la région de Tétouan (Sanouzi Manzo, 2011) ;
 - La carte pédologique du Tangérois au 1/100.000.
- Les données pluviométriques de 25 stations situées dans la région de Tanger Tétouan, ont été obtenues auprès de l'Agence du Bassin Hydraulique du Loukkous (ABHL) et l'Institut National de la Recherche Agronomique de Rabat (INRA) ;
- Une image Landsat TM5 de 30 m de résolution, acquise le 07/06/2010 ;
- Un MNT de résolution 28 m, issue d'une image ASTER dans le cadre d'un projet effectuée sur la péninsule de Tanger (Projet et Rapports inédits) ;
- Résultats des analyses effectuées sur les échantillons de sols prélevés sur le terrain ;
- Prospections et observations réalisées sur le terrain.

2. Les techniques utilisées

a. La télédétection

L'évolution qu'a connue le domaine de la télédétection spatiale et de la micro-informatique ces dernières décennies a rendu cette « spécialité » ou technique un moyen très efficace et économique pour collecter et analyser les informations concernant des phénomènes diversifiées.

Le but de l'analyse et de l'interprétation d'une image satellitaire est d'identifier, mesurer et analyser les objets contenus dans l'image afin de pouvoir extraire l'information utile.

L'interprétation visuelle et la classification de l'image satellitaire utilisée dans ce travail ont été assistées par les cartes existantes et par les observations sur terrain. Cette interprétation passe par l'analyse et la reconnaissance puis par la classification.

b. Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG)

Les SIG permettent de rassembler, d'organiser, d'analyser, de combiner, d'élaborer et de présenter des informations à référence spatiales de diverses sources et de différents types. Ils sont devenus actuellement la base de plusieurs études dans plusieurs domaines et constituent un outil d'aide à la décision d'importance évoluant de jour en jour.

Les données introduites dans la base de données SIG sont d'abord spatialement référencées selon le système de projection locale (Conique Conforme de Lambert, Nord-Maroc, Zone 1). Cette étape de géoréférencement permet d'effectuer des superpositions et des combinaisons entre différentes couches hétérogènes. Elle permet également d'offrir des documents cartographiques selon le système de projection adopté par les différents utilisateurs de la région.

Dans cette étude, toutes les données récoltées ont été introduites sous forme de tables ou de couches d'information dans la plate forme SIG.

Les SIG sont également utilisés pour créer ou intégrer des modèles de simulation ou d'évaluation. Ces modèles peuvent être couplés aux différentes couches d'informations dans la base de données SIG en facilitant ainsi l'identification des indicateurs environnementaux et leurs interactions.

c. Les analyses aux laboratoires

L'élaboration de la couche d'information concernant la friabilité des roches, un des paramètres déterminant de l'érosion hydrique dans plusieurs modèles, nécessite le prélèvement des échantillons sur terrain sur lesquels sont effectuées des analyses physiques (analyses granulométriques) et chimiques (matière organique et conductivité), réalisées aux laboratoires de chimie et de physique du sol de l'Unité de Recherches sur l'Environnement et la Conservation des Ressources Naturelles au Centre Régional des Recherches Agronomiques de Rabat (INRA) et au Laboratoire d'Environnement, d'Océanologie et de Ressources Naturelles à la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger (FSTT). Les résultats de ces analyses sont par la suite traités et introduits dans la base de données SIG sous forme de données ponctuelles, puis calculés selon les formules adoptées. A partir de ces résultats on a construit la carte de friabilité des sols.

III. LE MODELE QUALITATIF

La modélisation d'un phénomène naturel, dont les causes et les conséquences pouvant être changés dans l'espace et dans le temps, est un travail difficile et nécessite beaucoup de moyens. Il en est de même en ce qui concerne les données et les informations nécessaires pour alimenter le modèle à utiliser, ce qui nous ramène une seconde fois à la notion du « choix du modèle adéquat », selon les données disponibles.

Ainsi, ce type d'étude devient de plus en plus difficile, long et coûteux dans le cas de grandes surfaces comme pour des études à l'échelle territoriale, régionale ou à l'échelle des grands bassins versants. Pour les aménageurs et les décideurs, le « coût » est le paramètre le plus déterminant de l'équation.

Dans ce sens, pour minimiser les coûts et le temps tout en couvrant la plus grande superficie possible, plusieurs études se sont intéressées à la cartographie de la sensibilité à l'érosion au lieu d'une modélisation quantitative. La première pourra être d'une grande utilité pour la prise de décision pour cibler les zones prioritaires pour des actions préventives ou encore pour des études plus profondes.

Dans le cadre de cette étude, on a choisi le modèle qualitative proposée par Le Bissonais, 2002 et modifiée par Abaoui *et al.*, (2005). Selon ces auteurs, la sensibilité des terres à l'érosion est calculée à partir de la somme des indices attribués aux classes de trois paramètres. Il s'agit de l'occupation des sols, la lithologie et le degré de pente. Chaque facteur est multiplié par son pourcentage de contribution, attribué à partir des connaissances actuelles sur les formations et les conditions de terrain.

$$Pe = (IVe * A) + (IFr * B) + (IPt * C)$$

Avec : Pe : Potentiel érosif ;

IVe : Indice de densité du couvert végétal ;

IFr : Indice de friabilité ;

IPt : Indice de degré de pente ;

A, B et C : Pourcentages de contribution.

Le modèle est représentable sous la forme d'une arborescence logique (Fig. 16) où chaque addition de facteurs entraîne plusieurs réponses possibles. Le résultat final, qui est la somme de toutes ces possibilités, est une carte thématique appelée carte du potentiel d'érosion.

Il s'agit d'un modèle d'érosion cognitif qui représente un fonctionnement d'une façon simplifiée et logique et en utilisant des règles qualitatives et des évaluations et hiérarchisations de paramètres, basées sur les données de littérature et nos connaissances sur les conditions du milieu. De tels types de modèles ont été largement utilisées par les chercheurs lorsqu'il s'agit d'une cartographie à l'échelle régionale (Bachaoui *et al.*, 2007 ; Bou Kheir *et al.*, 2004, 2006 ; Harris *et al.*, 1990 ; Le Bissonais *et al.*, 1998, 2000, 2005).

IV. LE MODELE QUANTITATIF

Le modèle de modélisation quantitatif de l'érosion appliqué dans ce travail s'intéresse essentiellement à l'érosion hydrique. C'est un modèle d'érosion à base empirique qui permet de fournir une estimation de pertes des quantités du sol par unité de surface, qui correspond dans le cas d'utilisation de superposition cartographique sous SIG, au pixel de base de MNT.

Ce modèle s'appuie sur l'application de l'Equation Universelle de Pertes en Sols (USLE : Universal Soil Loss Equation) établie par Wischmeier et Smith (1978), puis modifiée et adaptée selon les conditions marocaines (Arnoldus, 1977 ; Merzouk, 1985).

Le choix de ce modèle dépend de la variabilité des conditions du milieu, de la surface de la zone, de la raideur des pentes, des limitations matérielles et du non disponibilité des données ponctuelles et des données de précipitations (Bonn, 1998). Compte tenu des ces derniers, nous avons opté pour l'utilisation de l'USLE, un modèle simple, prenant en considération pour la caractérisation quantitative, cinq principales caractéristiques qui sont : l'érosivité des pluies, l'érodibilité des sols, la topographie, le couvert végétal et les pratiques antiérosives. La superposition des couches d'information correspondant à ces facteurs donne comme résultat une carte quantitative d'aléa d'érosion exprimée en T/ha/an.

La figure 17 présente l'organigramme méthodologique de la modélisation quantitative de l'érosion, en décrivant, en général, les différentes étapes à suivre pour réaliser la carte du risque potentiel d'érosion.

L'application du modèle, en plus de la collecte et/ou la numérisation des données sur l'occupation du sol, la géologie, la topographie, se repose également sur la récolte des données climatiques et sur des observations et des campagnes de prélèvement sur terrain, ainsi que des analyses chimiques et physiques aux laboratoires.

La dernière étape est une phase synthétique, rassemble les résultats pré finaux et la mise au point du modèle pour la réalisation de la carte quantitative d'aléa d'érosion.

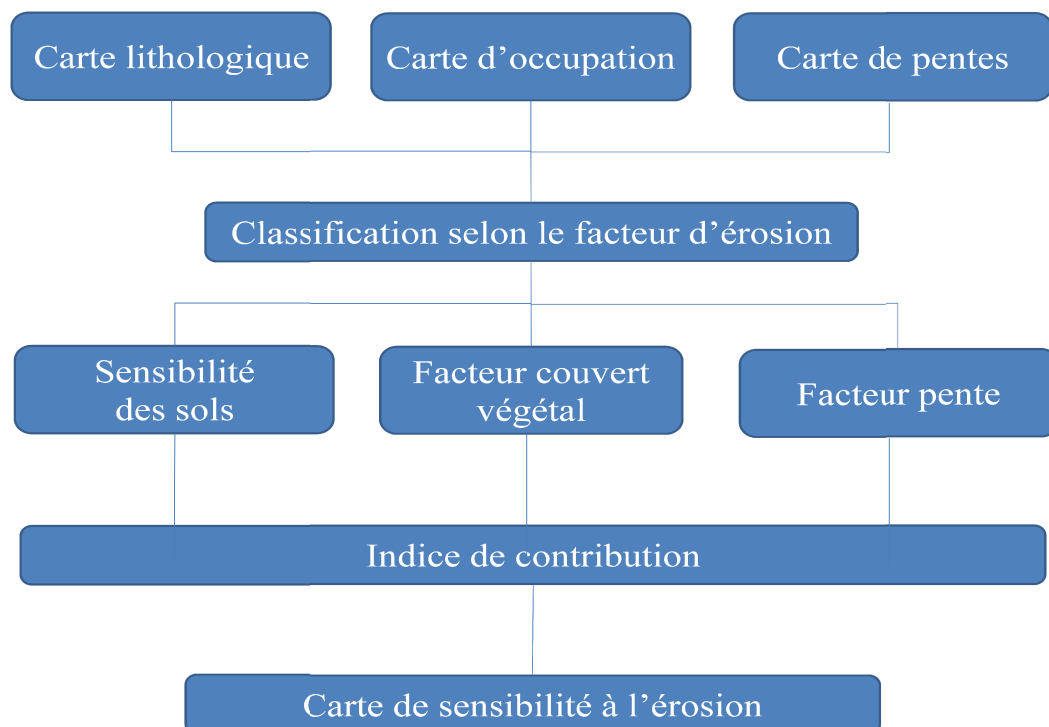


Figure 16 : Organigramme méthodologique du modèle qualitatif.

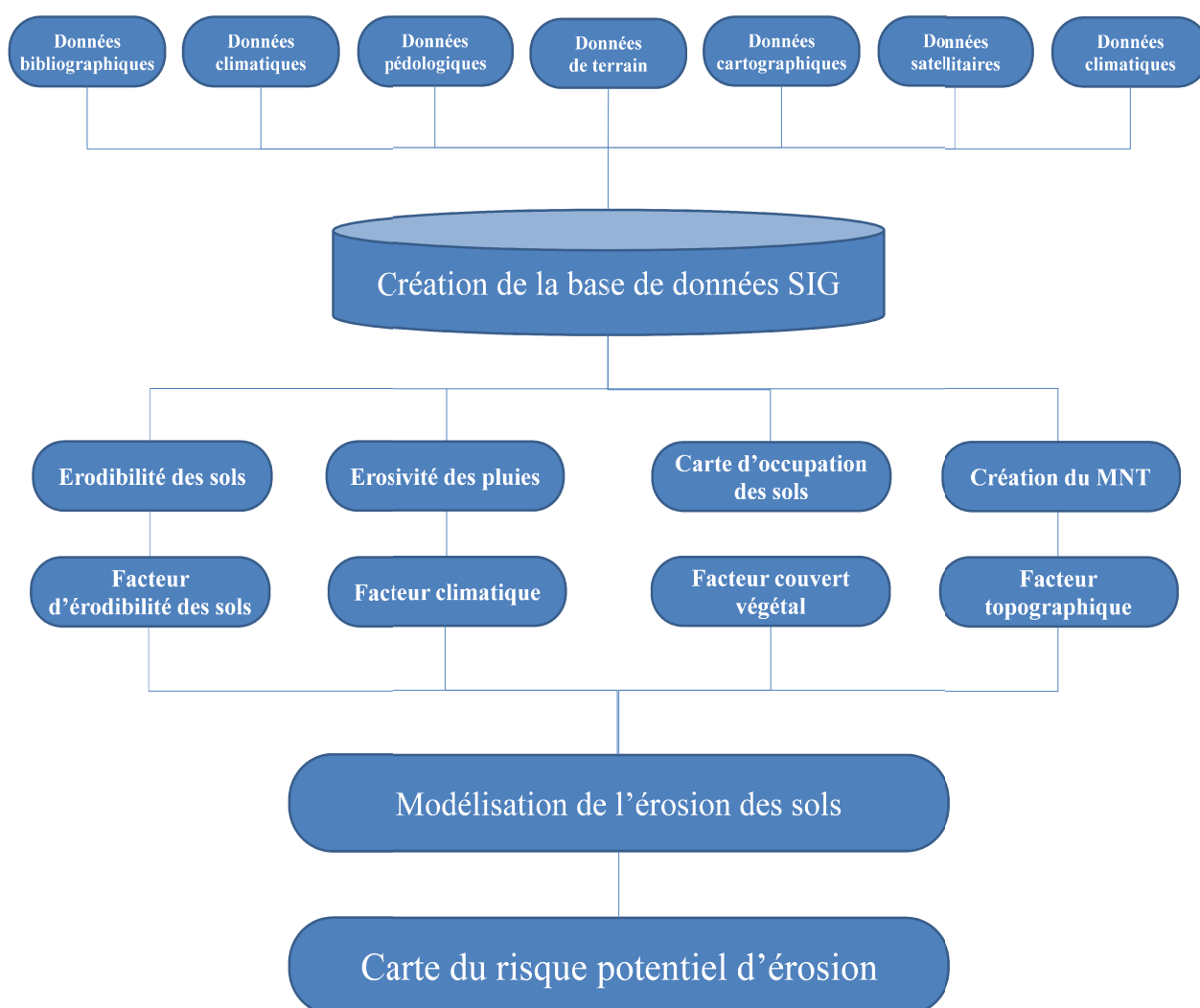


Figure 17 : Organigramme méthodologique de la modélisation quantitative de l'érosion.

IV. CONCLUSION

Les systèmes d'Information Géographiques et la Télédétection constituent des outils de traitement des différents types des données utilisées pour la sensibilité et la modélisation des pertes en sol dans la zone d'étude.

La cartographie de sensibilité des sols à l'érosion a été réalisée suivant le modèle qualitatif prenant en considération les trois facteurs de l'érosion avec leurs pourcentages de contribution à savoir la lithologie, le couvert végétal et le degré de la pente. Et la cartographie d'aléa d'érosion dans les différents bassins versants de la zone, a été réalisée en appliquant l'équation universelle de perte en sol (USLE) adaptée selon les condition marocaine et calculée a partir des cinq facteurs d'érosion qui sont les même facteurs de l'équation empirique.

Chapitre II

Application

I. LE MODELE QUALITATIF

1. Les paramètres du modèle

Comme ça été abordé dans la description méthodologique au chapitre précédent, la sensibilité des sols à l'érosion est fonction de la friabilité des terres, le couvert végétal et les pentes.

Chaque facteur a été reclassée selon un code de sensibilité attribué pour chaque classe. Ce code ou facteur de sensibilité, variant de 1 à 5, correspond aux différents degrés de sensibilité : très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée. La valeur 0 est une sensibilité nulle, correspondant en fait aux zones de « NoData », zones exclues de l'étude, comme les plans d'eau et les zones urbaines.

a. La carte de friabilité des sols

La friabilité correspond au degré de sensibilité d'une formation lithologique à l'érosion. Selon la littérature, on a attribué pour chaque classe de lithologie un code ou un facteur de sensibilité correspondant (Tableau 9, Fig. 18).

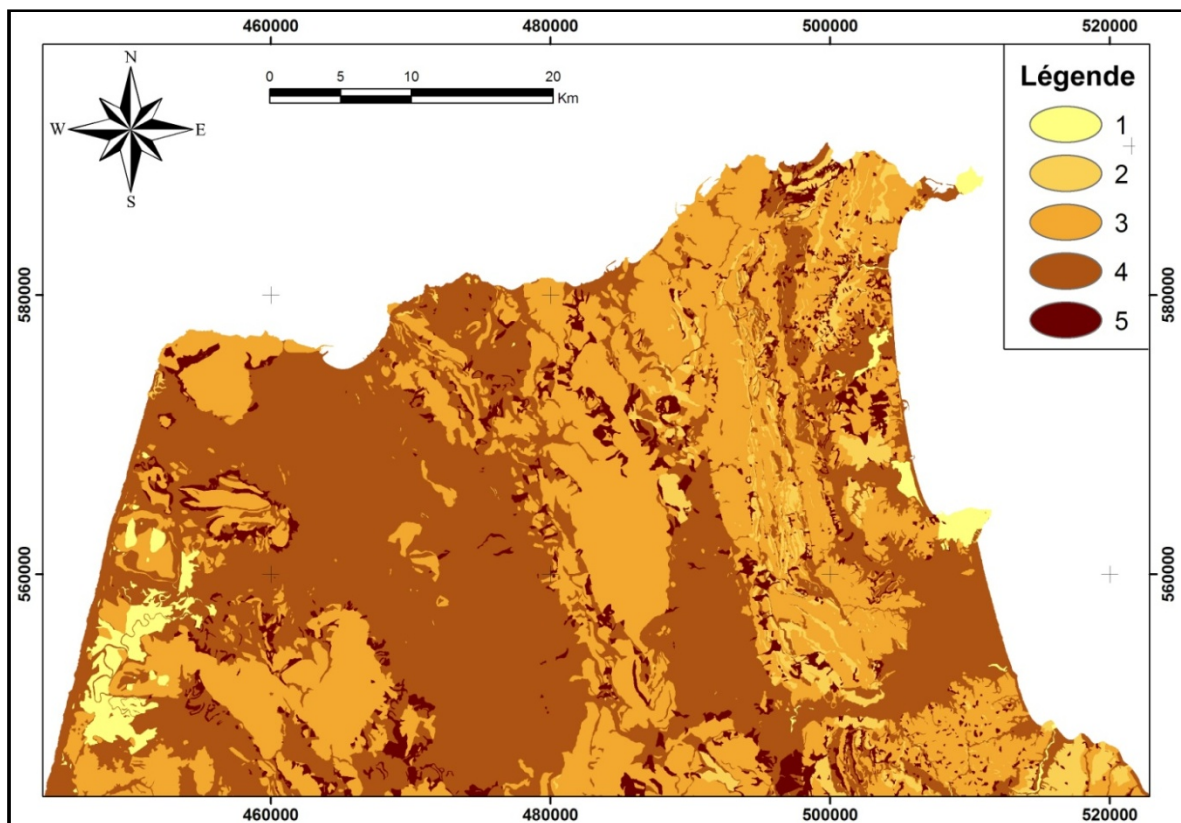


Figure 18 : Carte lithologique de la péninsule Tingitane en fonction du code de sensibilité.

Tableau 9 : Classes de lithologie en fonction de l'indice de sensibilité attribué.

Classes de Lithologie	Superficie (ha)	% Superficie	Code de sensibilité
Argiles	23877,93	10,17	4
Argiles à intercalations diverses	4807,45	2,05	4
Calcaires à intercalations diverses	1598,67	0,68	3
Calcaires et formations carbonatées	3248,21	1,38	2
Calcarénites	7,63	0,003	3
Cônes d'éboulis et éboulis diffus	14417,24	6,14	5
Conglomérats	2916,81	1,24	3
Daias et etangs	4418,32	1,88	1
Dolomies	6651,95	2,83	3
Flyschs argilo-calcaires et détritique	6634,11	2,82	4
Flyschs grés-pélitiques	62683,21	26,69	3
Flyschs pélitico-gréseux	8131,65	3,46	4
Formations détritiques	5806,53	2,47	3
Gneiss	922,40	0,39	1
Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	4716,64	2,01	4
Grès	5942,88	2,53	2
Greywackes à intercalations diverses	1436,06	0,61	3
Lydiennes	255,60	0,11	2
Marnes	1654,09	0,70	3
Marnes à intercalations de calcaires ou de grès	14053,74	5,98	4
Molasse, marnes et silexites	12,99	0,01	3
Pélites	3600,84	1,53	4
Pélites à intercalations diverses	1485,04	0,63	4
Péridotites	2,14	0,001	1
Phtanites	16,25	0,01	2
Radiolarites	9,42	0,004	2
Schistes à intercalations diverses	9725,98	4,14	3
Séries condensées	57,50	0,02	3
Terrasses fluviatils et glaciaires d'accumulation quaternaires	45120,19	19,21	4
Terrasses marines hautes	100,34	0,04	2
Travertins	562,33	0,24	2
Total	234874,14	100 %	

b. La carte du couvert végétal

Comme le cas de la carte de friabilité des sols, on a attribué pour chaque classe de végétation un indice de sensibilité correspondant (Kalman, 1967 ; Shi *et al.*, 2002 ; Adidiji *et al.*, 2010) (Tableau 10, Fig. 19).

La carte du couvert végétal a été obtenue par traitement et classification, sous ENVI 4.2, de l'image satellitaire Landsat TM5 (voire II. Modèle quantitatif ; 4. Facteur du couvert végétal C).

Tableau 10 : Classes de végétation en fonction de l'indice de sensibilité attribué.

Classes de végétation	Superficie (ha)	% Superficie	Code de sensibilité
Cours et plans d'eau	3049,81	1,30	0
Forêt de feuillus	23320,18	9,93	1
Forêt de feuillus dégradée	4855,87	2,07	2
Forêt et végétation arbustive en mutation	2546,70	1,08	3
Marais	3736,09	1,59	0
Pelouses et pâturages naturels	8452,97	3,60	3
Plages, sables, dunes	1238,36	0,53	4
Sols nus	2649,57	1,13	5
Systèmes cultureux et parcellaires complexes	51919,07	22,11	4
Terres arables hors périmètres d'irrigation	10613,14	4,52	3
Territoires principalement occupés par l'agriculture	57531,08	24,49	4
Végétations clairsemées	320,80	0,14	3
Végétations sclérophylles	25235,33	10,74	2
Végétation sclérophylles dégradées	9315,29	3,97	3
Zones fortement à totalement dégradées	9943,06	4,23	5
Zones fortement à totalement urbanisées	11848,86	5,04	0
Zones périurbaines ou moyennement urbanisées	3681,08	1,57	0
Zones rurales ou faiblement urbanisées	4616,90	1,97	3
Total	234874,14	100%	

c. La carte des classes de pente

La carte de pente, extraite du Modèle Numérique de Terrain (MNT), a été classée en cinq classes (classification selon l'utilisation agronomiques) puis on a attribué pour chacune un facteur de sensibilité à l'érosion correspondant (Fig. 20, Tableau 11).

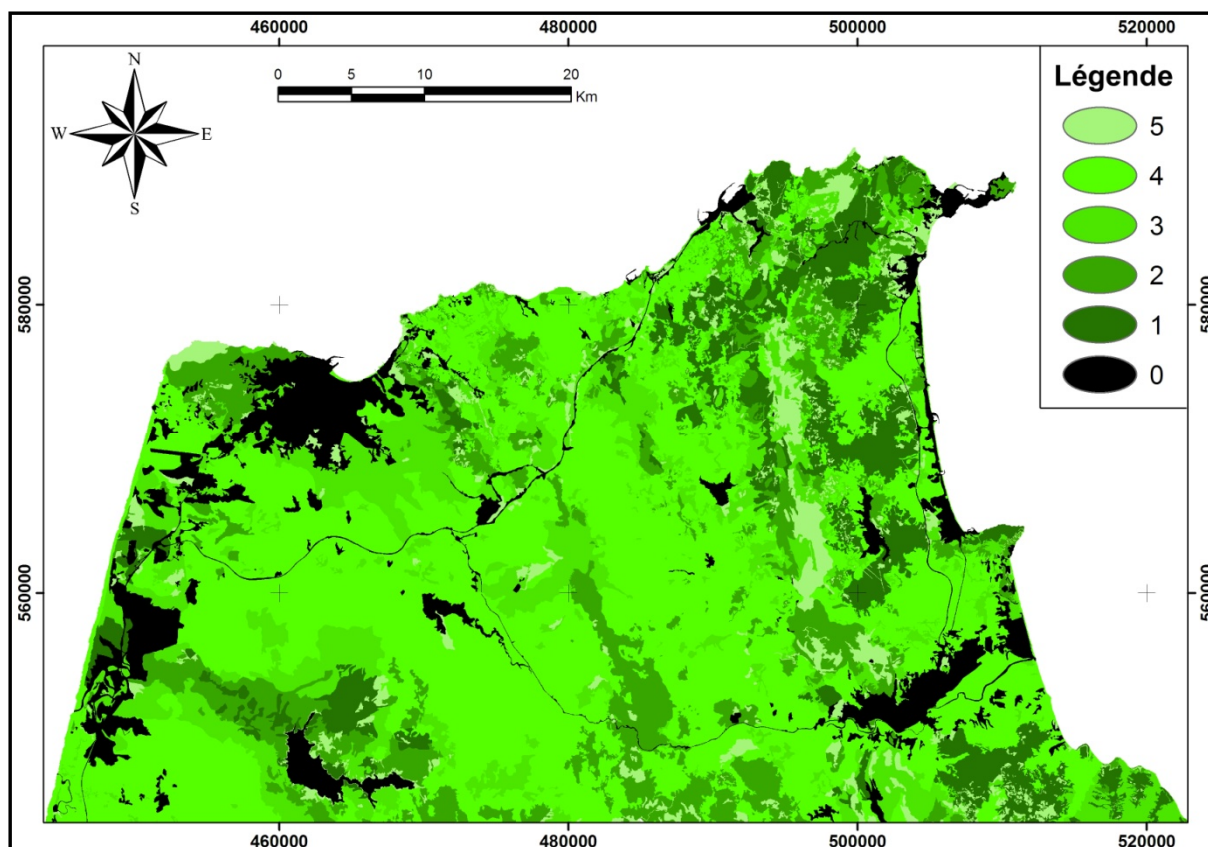


Figure 19 : Carte de végétation de la péninsule Tingitane en fonction du code de sensibilité.

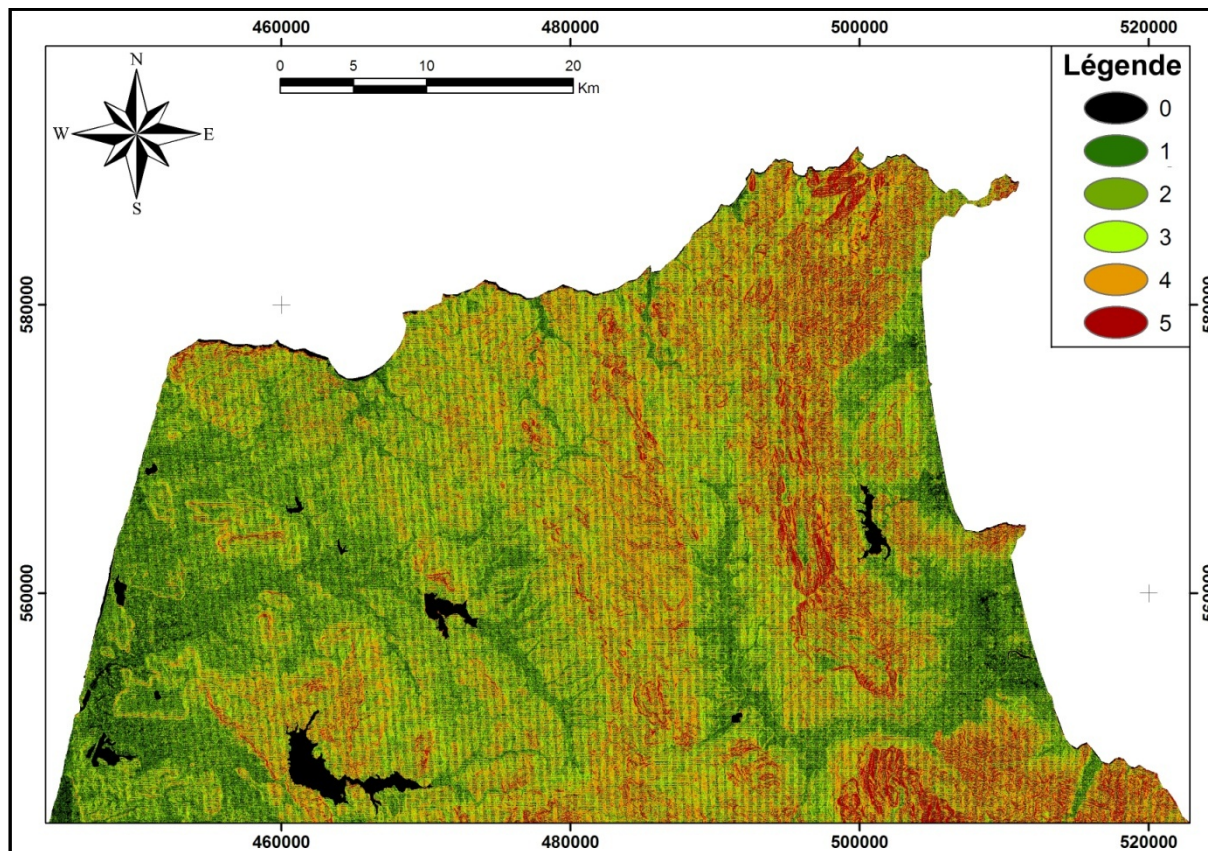


Figure 20 : Carte de pente de la péninsule Tingitane en fonction du code de sensibilité.

Tableau 11 : Classes de pente en fonction de l'indice de sensibilité attribué.

Classes de pente	Superficie (ha)	% Superficie	Code de sensibilité
0 - 2	16711,41	7,12	1
2 - 5	6367,58	2,71	2
5 - 15	72973,67	31,07	3
15 - 30	84792,95	36,10	4
>30	54028,54	23,00	5
Total	234874,14	100 %	

2. L'application du modèle

L'application de la méthodologie décrite ci-dessus a été basée surtout sur la pondération des facteurs de l'érosion. Chaque facteur a été classé selon ses différentes formations puis, il a été attribué pour chaque classe un code de sensibilité à l'érosion correspondant. La pondération de ces facteurs a été faite d'une manière à prendre en considération toutes les conditions du milieu.

Suite à la grandeur de la superficie, il y a plusieurs conditions de milieu, de ce fait, il aura plusieurs réponses à l'action érosive. Neufs cas d'application (Fig. 21) donnant lieu à des résultats différents ont été réalisés pour avoir finalement une seule carte regroupant et respectant toutes les conditions (Fig. 22).

Le calcul potentiel de l'érosion a été établi sous logiciel ArcGis, 9.3 dans « Raster calculator » en rassemblant les trois rasters correspondant aux facteurs de l'érosion multipliés chacun d'eux par son pourcentage de contribution dans le processus érosif, selon la formule décrite précédemment.

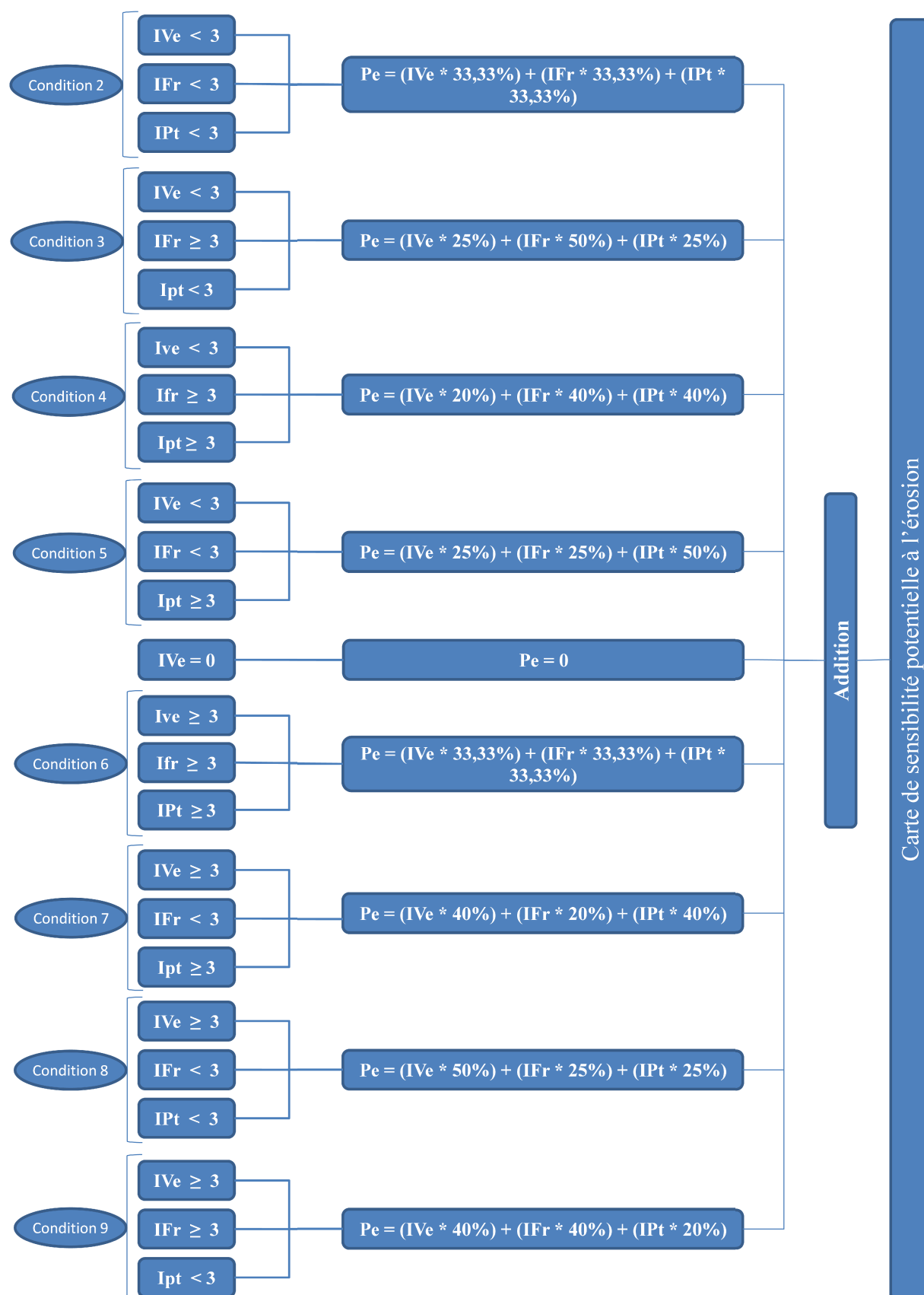


Figure 21: Schéma explicatif de la combinaison des différentes conditions prises en compte dans la réalisation de la carte de sensibilité à l'érosion.

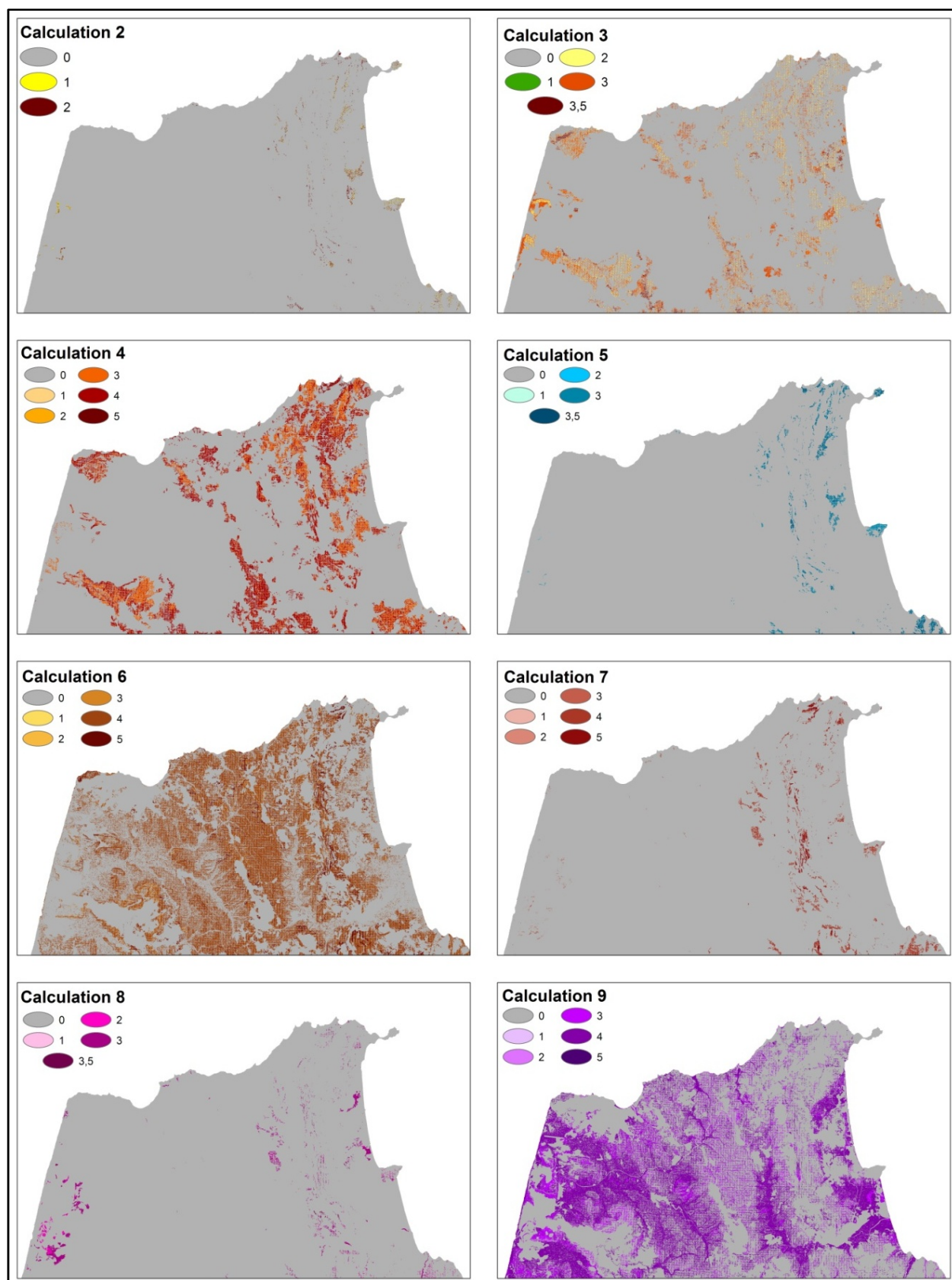


Figure 22 : Cartes des résultats intermédiaires des différentes conditions prises en compte dans la démarche suivie.

II. LE MODELE QUANTITATIF

La modélisation de l'érosion hydrique, dans le cadre de l'étude, a été effectuée par l'utilisation de l'équation universelle de pertes de sols (USLE) en prenant ses cinq facteurs relatifs à l'agressivité érosive de la pluie, la sensibilité érosive du sol, les caractéristiques de longueur et le degré de la pente, l'effet de la végétation et les pratiques antiérosives.

1. Le facteur d'érosivité de la pluie (R)

Le facteur R s'estime, normalement, selon la formule de Wischmeier et Smith (1978) à partir des énergies cinétiques et de l'intensité moyenne sur 30 min de pluie de chaque averse.

Puisque les seules données disponibles concernant les précipitations dans les stations qui se trouvent dans notre site ou à sa proximité sont les moyennes mensuelles et annuelles, on a calculé cet indice à partir de la formule d'Arnoldus (1977) ; C'est la formule la plus adaptée pour les conditions marocaines et qui ne prend en considération que les précipitations moyennes mensuelles et annuelles. Son expression se présente comme suit :

$$R = \Sigma_1^{12} (MR_i) / AR$$

où MR : Précipitations moyennes mensuelles ;

AR : Précipitations moyennes annuelles.

25 stations climatologiques utilisées dans le cadre de ladite étude pour l'application de cette formule et le calcul du facteur d'érosivité de la pluie R. Ces stations sont réparties dans la région de manière à donner des résultats plus représentatifs et plus précis.

Le facteur d'érosivité de la pluie a été calculé, sous ArcGis, à partir des valeurs mensuelles et annuelles des précipitations, pour chaque station à part, puis on a interpolé les résultats selon la limite du bassin versant étudié.

2. Le facteur d'érodibilité du sol K

Le facteur d'érodibilité du sol K a été calculé, dans différentes régions, par plusieurs formules. La formule originale de Wischmeier et Smith prend en considération certains paramètres caractérisant les sols comme la texture, la structure et la perméabilité. Le Bissonais et al. (2002) ont intégré également la battance comme un paramètre dans leur étude.

Dans notre cas, en raison de l'absence de ce type de données, on a opté à utiliser une formule établie par Merzouk (1985) qui s'adapte aux conditions marocaines et qui est en fonction de la granulométrie et la conductivité électrique.

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

Avec SG% : pourcentage du sable grossier ;

S% : pourcentage du sable total ;

EC : conductivité électrique.

Une campagne d'échantillonnage a été effectuée dans différents bassins versants de la région

d'étude pour prélever les sédiments de surface du sol. L'échantillonnage se fait en fonction des unités homogènes réalisées par la méthode de pédopaysages (Sanoussi Manzo, 2011).

2.1. L'élaboration de la carte des unités homogènes

Une unité homogène se définit comme unité cartographique qui regroupe, en même temps, les informations concernant plusieurs paramètres ou facteurs. Dans notre cas, et en relation avec les sols et les facteurs interagissant dans le processus de sa dégradation, la carte des unités homogènes résulte de l'intersection des couches d'information concernant la lithologie, la végétation et la physiographie, qui résulte elle-même de l'intersection entre le degré de la pente et l'altitude (Fig. 23).

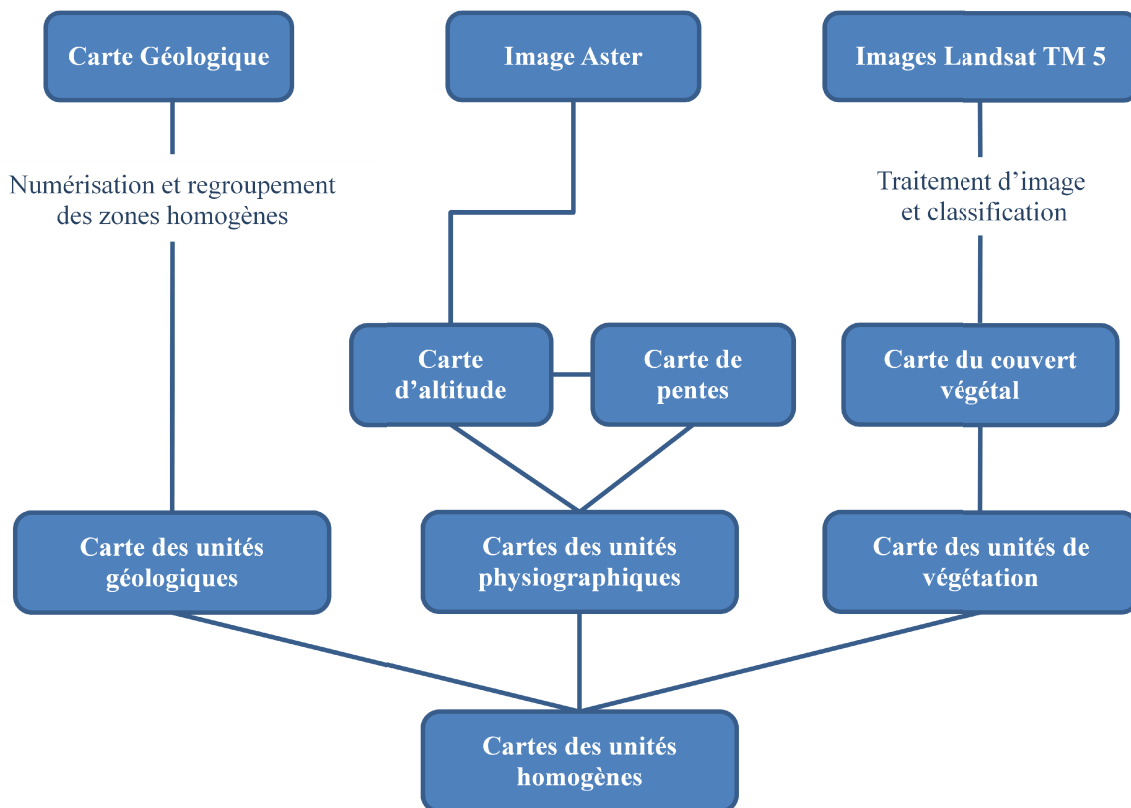


Figure 23 : Organigramme des étapes de l'élaboration d'une carte des unités homogènes.

a. La carte géologique

La carte géologique a été réalisée à partir de la digitalisation des différentes cartes géologiques au 1/50.000 qui couvrent la zone d'étude préalablement scannées et géoréférencées. Les documents cartographiques utilisés pour élaborer la carte géologique de la zone d'étude sont les cartes géologiques de Tanger Al Manzla (Durand Delga et Didon, 1985), Ksar Sghir (Durand Delga et Didon, 1984), Melloussa (Durand Delga et Didon, 1984), Sebta (Kornprobst et Durand Delga, 1985) et de Tétouan-Ras El-Mazari (Kornprobst et Durand Delga, 1985).

Ces cartes ont subi différentes étapes de traitement et d'analyse pour synthétiser les unités cartographiques géologiques. Elles ont été numérisées en introduisant pour chaque entité

digitalisée une information lithologique correspondante, puis classées selon leurs lithologies afin d'établir une légende synthétique.

La carte géologique obtenue de la zone d'étude (Fig.24) comprend 14 Unités Cartographiques des Matériaux (UCM) (Tableau 12). Les unités des Flysch occupent la plus grande superficie par rapport aux restes (32,98%), suivie par les terrasses quaternaires (19,25%) et les argiles et pélites (14,39%).

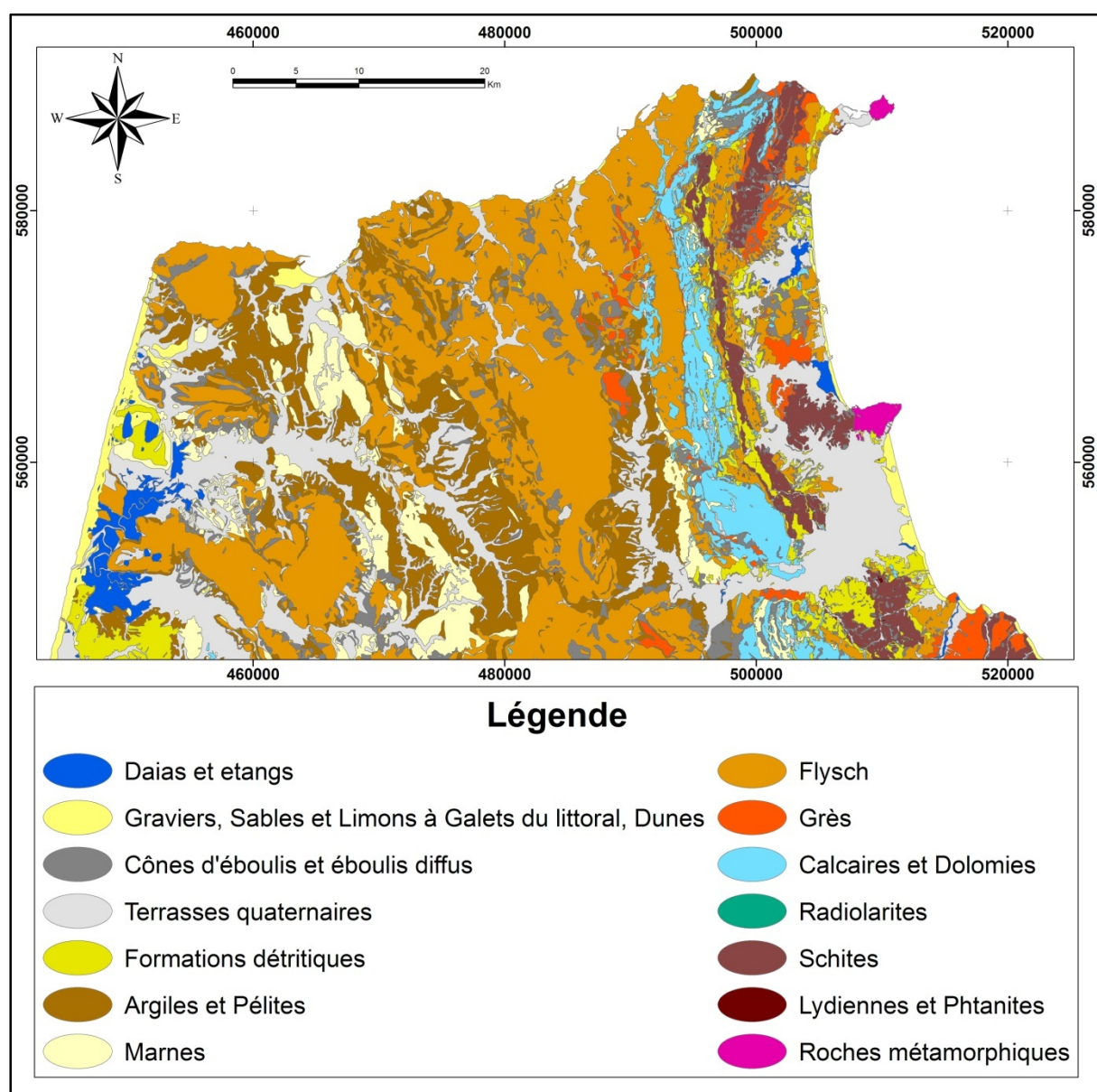


Figure 24 : Carte des Unités Cartographiques des Matériaux de la zone d'étude.

Tableau 12 : Unités Cartographiques des Matériaux de la zone d'étude (UCM).

UCM	superficie (ha)	% Superficie
Argiles et Pérites	33796,21	14,39
Cônes d'éboulis et éboulis diffus	14397,96	6,13
Calcaires et Dolomies	12086,11	5,15
Daias et etangs	4399,05	1,87
Flysch	77459,18	32,98
Formations détritiques	10291,94	4,38
Graviers, Sables et Limons et Galets du littoral, Dunes	4697,37	2
Grès	5923,61	2,52
Jaspes	267,32	0,11
Marnes	15703,29	6,69
Radiolarites	24,15	0,01
Roches métamorphiques	905,27	0,39
Schistes	9706,71	4,13
Terrasses quaternaires	45216,00	19,25
Total	234874,14	100 %

b. La carte physiographique

À l'origine, le terme « physiographie » signifie « étude des phénomènes naturels ». Plus tard, l'usage limite son application à la géographie physique en particulier et, plus récemment, au relief lui-même. La régionalisation physiographique est définie ici comme la manière dont sont délimitées les régions ayant une géographie physique relativement homogène.

La structure géologique, le relief, la répartition du pergélisol continu (qui permet de mesurer les effets atmosphériques et hydrologiques à grande échelle) et la position de la limite forestière (importante frontière végétale) sont les critères utilisés généralement dans la régionalisation physiographique.

Nous nous sommes intéressés seulement au relief pour construire une couche physiographique, puisque le couvert végétal et la géologie constituent chacune à part une couche d'information propre. L'unité physiographique résulte donc de l'intersection de l'unité des classes de pente et celle des classes d'altitude. La combinaison de ces deux critères forme les principales régions physiographiques de la zone d'étude.

Les deux cartes de pente et d'altitude ont été établies à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) qui, à son tour, a été généré à partir d'une image ASTER de 28m de résolution.

Les classes d'altitudes, variables selon l'intervalle des altitudes dans la zone étudiée, sont obtenues après reclassification du MNT selon la méthode d'écart type sous le logiciel ArcGis

(Fig. 25) en cinq classes (Tableau 13). Quand à la carte de pente, elle a été classifiée en se basant sur l'utilisation agronomique qui regroupe les degrés de pente en cinq classes (Fig. 26, Tableau 14).

La carte physiographique résultante de la superposition de ces deux cartes présente 19 Unités Cartographiques Physiographiques (UCPh) (Fig. 27. Tableau 15).

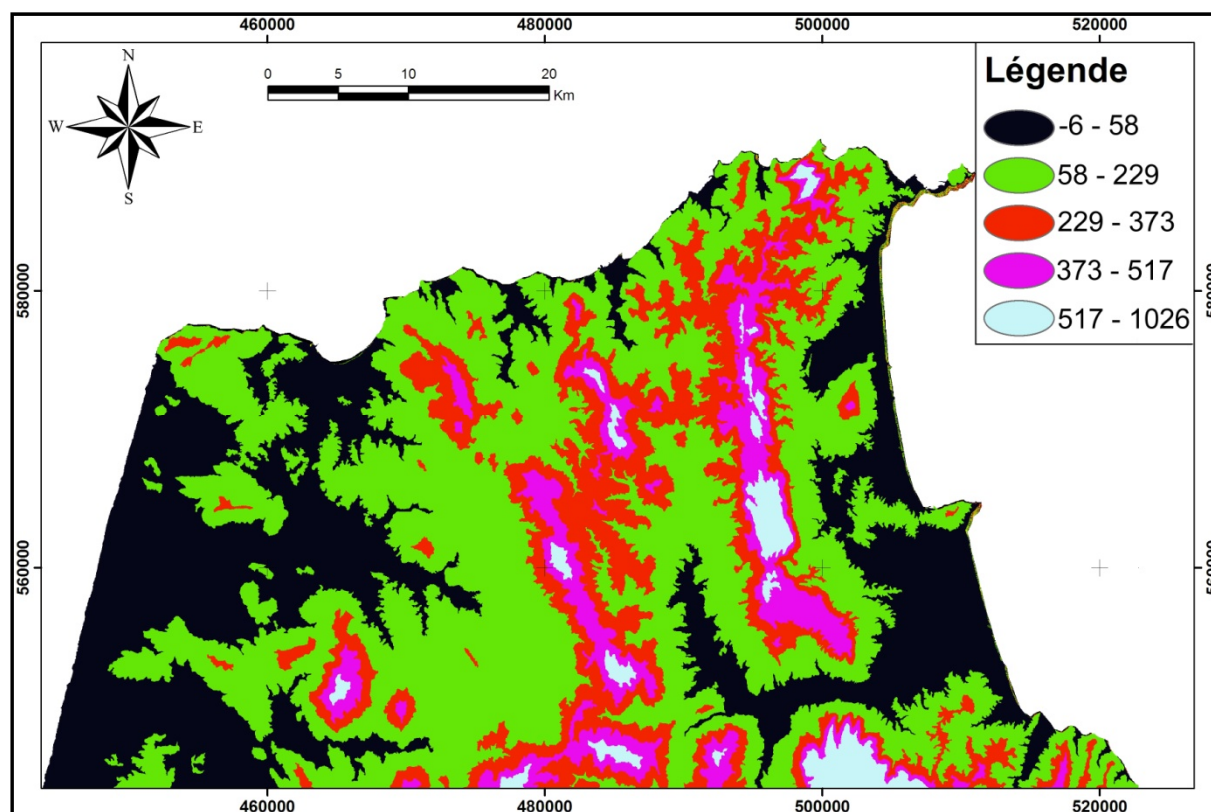


Figure 25 : Carte du MNT reclassée.

Tableau 13 : Unités Cartographiques d'Altitude reclassées (UCA).

UCA (m)	Superficie (ha)	% Superficie
-6 - 58	70465,10	30
58 - 229	105036,44	44,72
229 - 373	38312,72	16,31
373 - 517	15270,32	6,50
517 - 1026	5789,56	2,46
Total	234874,14	100%

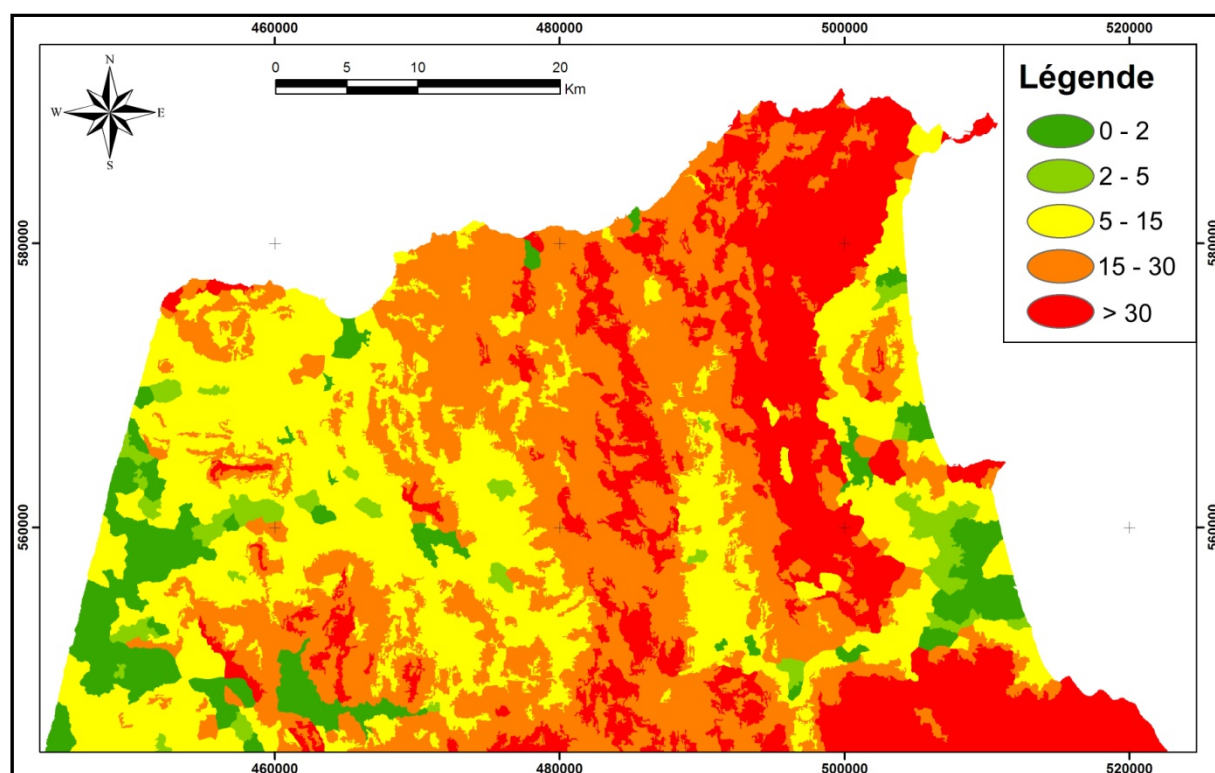


Figure 26 : Carte de la pente reclassée.

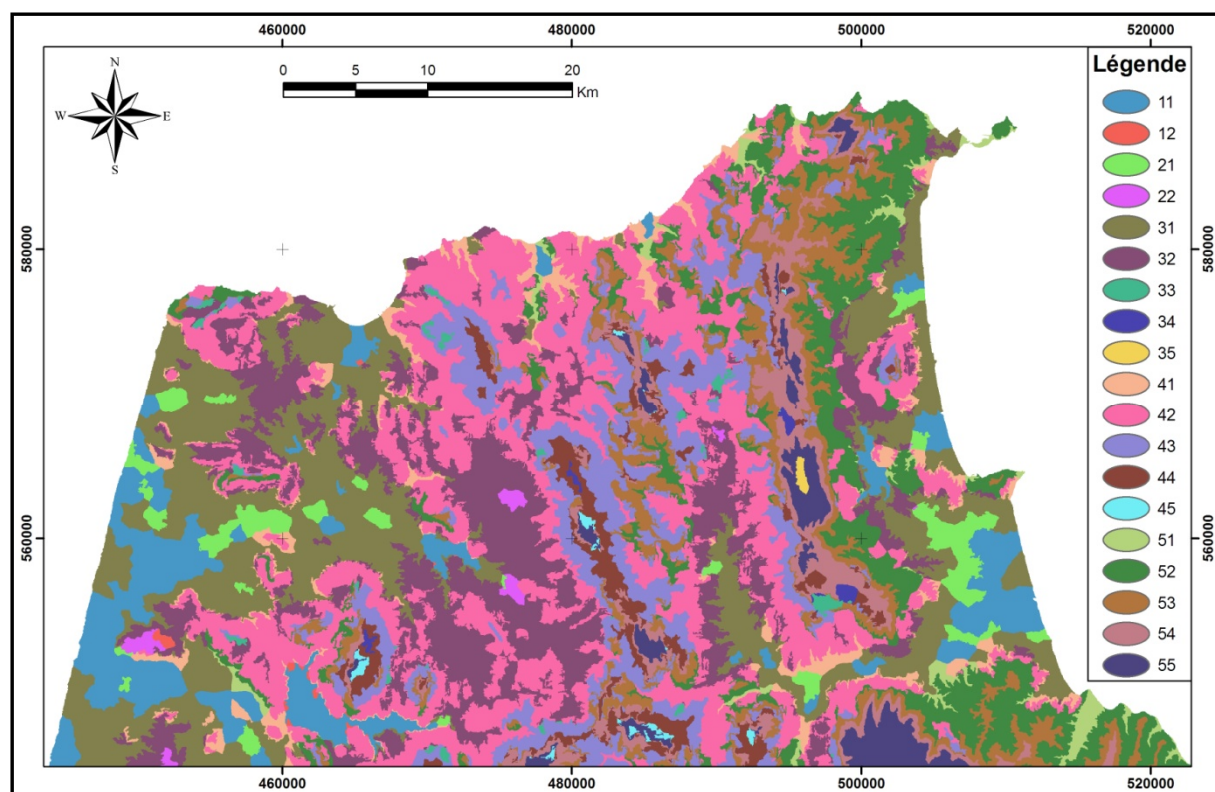


Figure 27 : Carte physiographique de la zone d'étude.

Tableau 14 : Unités Cartographiques de Pente reclassées (UCP).

UCP (%)	Superficie (ha)	% Superficie
0 - 2	16711,41	7,12
2 - 5	6367,58	2,71
5 - 15	72973,67	31,07
15 - 30	84792,95	36,10
>30	54028,54	23
Total	234874,14	100%

Tableau 15 : Unités Cartographiques Physiographiques de la zone d'étude (UCPh).

UCPh	UCP	UCA	Superficie (ha)	% superficie
11	0 - 2	-6 - 58	16301,69	6,94
12	0 - 2	58 - 229	323,09	0,14
21	2 - 5	-6 - 58	5383,02	2,29
22	2 - 5	58 - 229	896,09	0,38
31	5 - 15	-6 - 58	39312,50	16,74
32	5 - 15	58 - 229	31963,42	13,61
33	5 - 15	229 - 373	1071,12	0,46
34	5 - 15	373 - 517	480,99	0,20
35	5 - 15	517 - 1026	197,80	0,08
41	15 - 30	-6 - 58	6861,82	2,92
42	15 - 30	58 - 229	50826,03	21,64
43	15 - 30	229 - 373	20607,58	8,77
44	15 - 30	373 - 517	6052,35	2,58
45	15 - 30	517 - 1026	503,36	0,21
51	> 30	-6 - 58	2653,64	1,13
52	> 30	58 - 229	21092,99	8,98
53	> 30	229 - 373	16595,03	7,07
54	> 30	373 - 517	8700,68	3,70
55	> 30	517 - 1026	5050,95	2,15
Total			234874,14	100%

c. La carte du couvert végétal

La carte des classes de végétation a été élaborée par la classification d'une image satellitaire Landsat TM5 sous Logiciel ENVI 4.2 suivie d'une validation par Google Earth et sur terrain (voir paragraphe 4. Facteur du couvert végétal C). Comme pour la carte lithologique, cette carte a été regroupée en classes pour enfin présenter 12 Unités Cartographiques de Végétation (UCV), avec la dominance de la classe des zones agricoles en occupant presque la moitié de la superficie totale de la zone (46,62%) (Tableau 16).

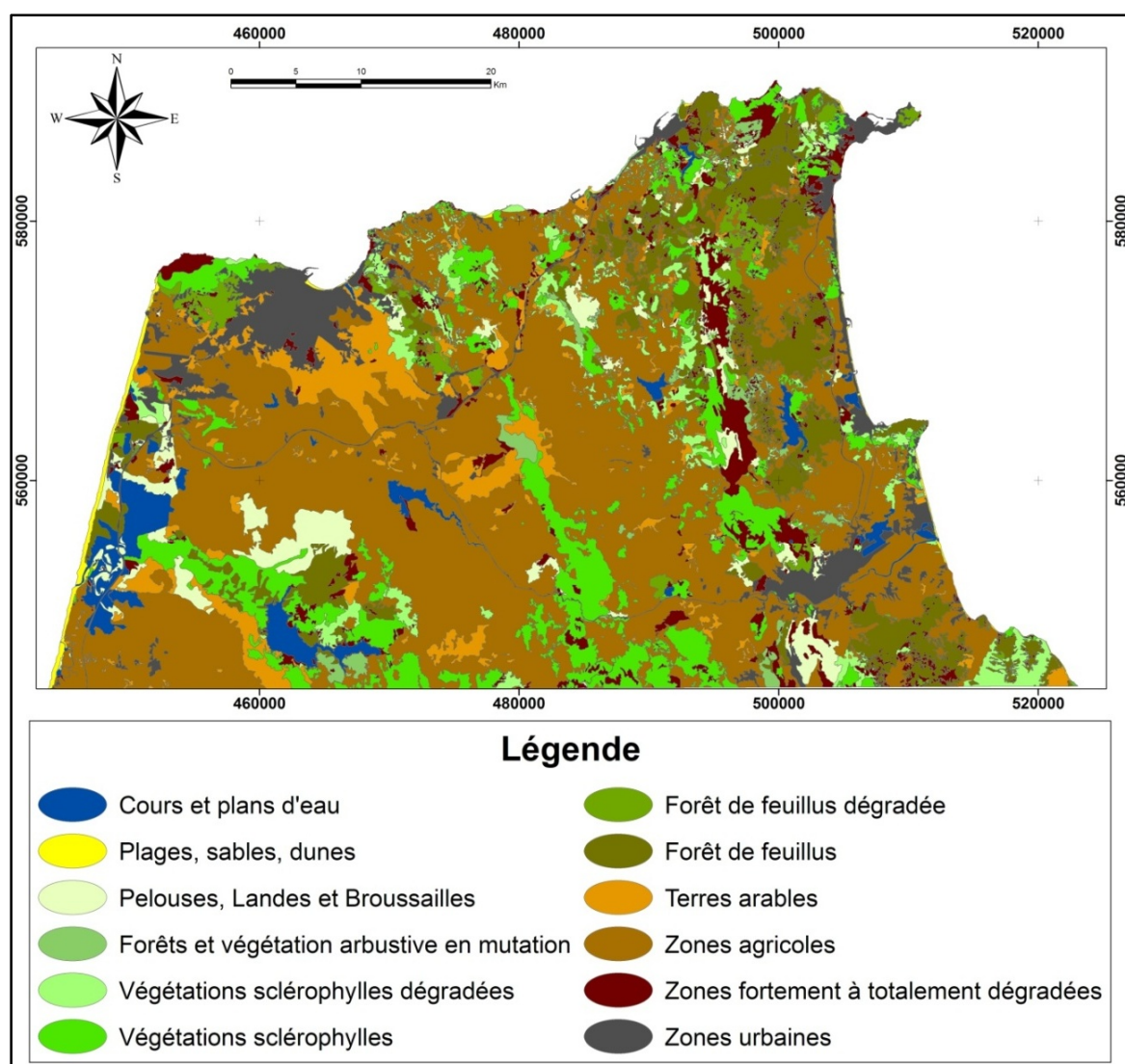


Figure 28 : Carte du couvert végétal de la zone d'étude.

Tableau 16 : Unités Cartographiques de Végétation de la zone d'étude (UCV).

UCV	Superficie (ha)	% Superficie
Cours et plans d'eau	6833,06	2,91
Forêt de feuillus	23273,03	9,91
Forêt de feuillus dégradée	4808,72	2,05
Forêts et végétation arbustive en mutation	2499,55	1,06
Pelouses, Landes et Broussailles	8820,92	3,76
Plages, sables, dunes	1191,21	0,51
Terres arables	15277,19	6,50
Végétations sclérophylles	25188,18	10,72
Végétations sclérophylles dégradées	9268,14	3,95
Zones agricoles	109497,30	46,62
Zones fortement ou totalement dégradées	12639,78	5,38
Zones urbaines	15577,10	6,63
Total	234874,14	100 %

d. L'élaboration de la carte des unités homogènes

Il s'agit de l'action de superposition des trois cartes mono factorielles ci-dessus citées : carte géologique, physiographique et de couvert végétal. Un filtrage des unités homogènes est nécessaire par la suite pour améliorer la qualité de la carte. Le filtrage des unités homogènes préconise la norme de $1/4$ de cm^2 comme la plus petite surface cartographiée représentable. Cette loi correspond à un seuil de lisibilité ou encore de détectabilité cartographique (Mulders, 1987 ; Gaddas, 2001).

La carte plurifactorielle obtenue présente 407 unités homogènes et qui sont réparties sur 1828 unités cartographiques (entités polygonales), avec une superficie moyenne de 128,5 ha (Annexe I).

2.2. Le positionnement des points de prélèvement et échantillonnage

Entre le lot initial et l'échantillon destiné à l'analyse, il existe une série d'erreurs. Il est donc primordial d'opérer l'étape d'échantillonnage avec plus grand soin et une bonne précision.

L'emplacement des points de prélèvement devrait être déterminé d'une manière à couvrir toutes les unités homogènes dans un bassin versant et en essayant de bien les répartir sur toute la surface cartographiée.

Normalement, et suite à l'objectif de la réalisation d'une carte d'unités homogènes, le nombre des points de prélèvement devrait être égal à celui des unités homogènes, c'est-à-dire 407 échantillons. Cependant, nous avons procédé à une approche zonale par bassin versant. De ce fait, un prélèvement par unité homogène a été réalisé ; soit un total de 157 points échantillonnés et analysés.

La figure 29 présente les six sous bassins versants qui feront l'objet de la deuxième application, et qui sont :

- **Le bassin versant du barrage Smir**, avec une superficie de 6.639,79 ha, se situe dans la partie orientale de la péninsule sur la façade méditerranéenne entre $35^{\circ}45'6,454''$ et $35^{\circ}37'40,708''$ de latitude nord et entre $5^{\circ}27'12,91''$ et $5^{\circ}21'57,171''$ de longitude ouest. Il présente 44 unités homogènes en totalité (Fig. 30). En éliminant l'unité homogène qui correspond aux cours et plans d'eau, il en reste 43 unités, ce qui donne 43 points à prélever.

- **Le bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt**, s'étendant sur une superficie de 3.765,46 ha, se situe au Nord Ouest du Maroc, entre $35^{\circ}41'36,925''$ et $35^{\circ}35'57,26''$ de latitude nord et entre $5^{\circ}36'45,751''$ et $5^{\circ}29'45,042''$ de longitude ouest et entre. Il correspond à la partie septentrionale du bassin versant de l'oued Martil. Le bassin regroupe 24 unités homogènes (Fig. 31), c'est à dire 24 points à prélever. En fait, 16 points correspondent aux mêmes unités homogènes présentes dans le bassin versant du barrage Smir dont on a déjà fait l'échantillonnage. Alors, il en reste 18 points à prélever dans ce bassin.

- **Le bassin versant du barrage Raouz**, d'une superficie de 4.602 ha, se situe dans la partie orientale de la péninsule Tingitane et occidentale de la chaîne Rifaine, entre $35^{\circ}44'48,152''$ et $35^{\circ}41'18,884''$ de latitude nord et entre $5^{\circ}34'5,52''$ et $5^{\circ}26'26,913''$ de longitude ouest. Il

présente 39 unités homogènes (Fig. 32). En éliminant les deux unités homogènes correspondant aux cours et plan d'eau, il reste 37 unités homogènes, donc 37 points à prélever. Cependant, suite à la présence de 15 unités homogènes homologues à celles appartenant aux deux bassins versants précédents, les points de prélèvements correspondant seront éliminés et remplacés par ceux déjà échantillonnés. Alors, le nombre final de prélèvement dans ce bassin est de 22 échantillons.

- **Le bassin versant du barrage Ibn Batouta**, d'une superficie de 17.824,63 ha, se situe entre 35° 41'38,252" et 35°30'45,01" de latitude nord et entre 5°44'15,927" et 5°33'32,953" de longitude ouest, dans la partie interne de la péninsule Tingitane. Il regroupe 62 unités homogènes (Fig. 33) dont trois unités correspondent aux cours et plans d'eau et aux zones urbaines. En plus de ces trois unités, s'ajoutent 23 unités homogènes qui ont été déjà échantillonnées dans les bassins versants précédents, donc seulement 36 points restants doivent être prélevés dans ce bassin.

- **Le bassin versant de l'oued Aliane**, drainant une superficie de 12.139,06 ha, se situe dans la partie centre nord de la péninsule Tingitane, sur la rive sud du Détroit de Gibraltar, entre 35°49'48,438" et 35°40'469" de latitude nord et entre 5°41'35,088" et 5°21'57,171" de longitude ouest. Ce bassin présente 52 unités homogènes (Fig. 34). Si on fait une soustraction des unités exclus de cette étude qui sont en nombre de quatre ainsi que les 31 unités semblables à celles présentes dans les bassins versants précédemment échantillonnées, on obtient 21 points de prélèvements à effectuer.

- **Le bassin versant du barrage Ajras** couvre une superficie de 3.787,73 ha. Il se situe dans la partie sud est de la péninsule, entre 35°34'26,717" et 35°30'58,206" de latitude nord et entre 5°35'58,389" et 5°29'14,461" de longitude ouest. Le bassin versant présente 27 unités homogènes en total (Fig. 35). Après élimination des unités homogènes non prises en compte (une unité) et ceux déjà incluses dans les cinq bassins versants précédents (17 unités), il n'en reste que 17 points à prélever.

Le positionnement des points d'échantillonnage, sur terrain, a été fait à l'aide d'un GPS.

Le prélèvement des échantillons de sol a été réalisé à l'aide d'une tarière manuelle en enfonçant manuellement la tarière dans le sol par un mouvement de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre. Généralement, deux ou trois révolutions permettent d'enfoncer la tarière d'environ 10 cm. Une fois la tarière enfoncée sur toute sa longueur (20 à 25 cm de profondeur), elle est retirée du sol et l'échantillon est recueilli en renversant la tarière. L'échantillon ainsi prélevé est collecté dans des sachets en plastiques portant le code et l'information sur le site correspondant (l'altitude, la longitude, la latitude, le lieu et la date de prélèvement, observations sur le lieu, ...).

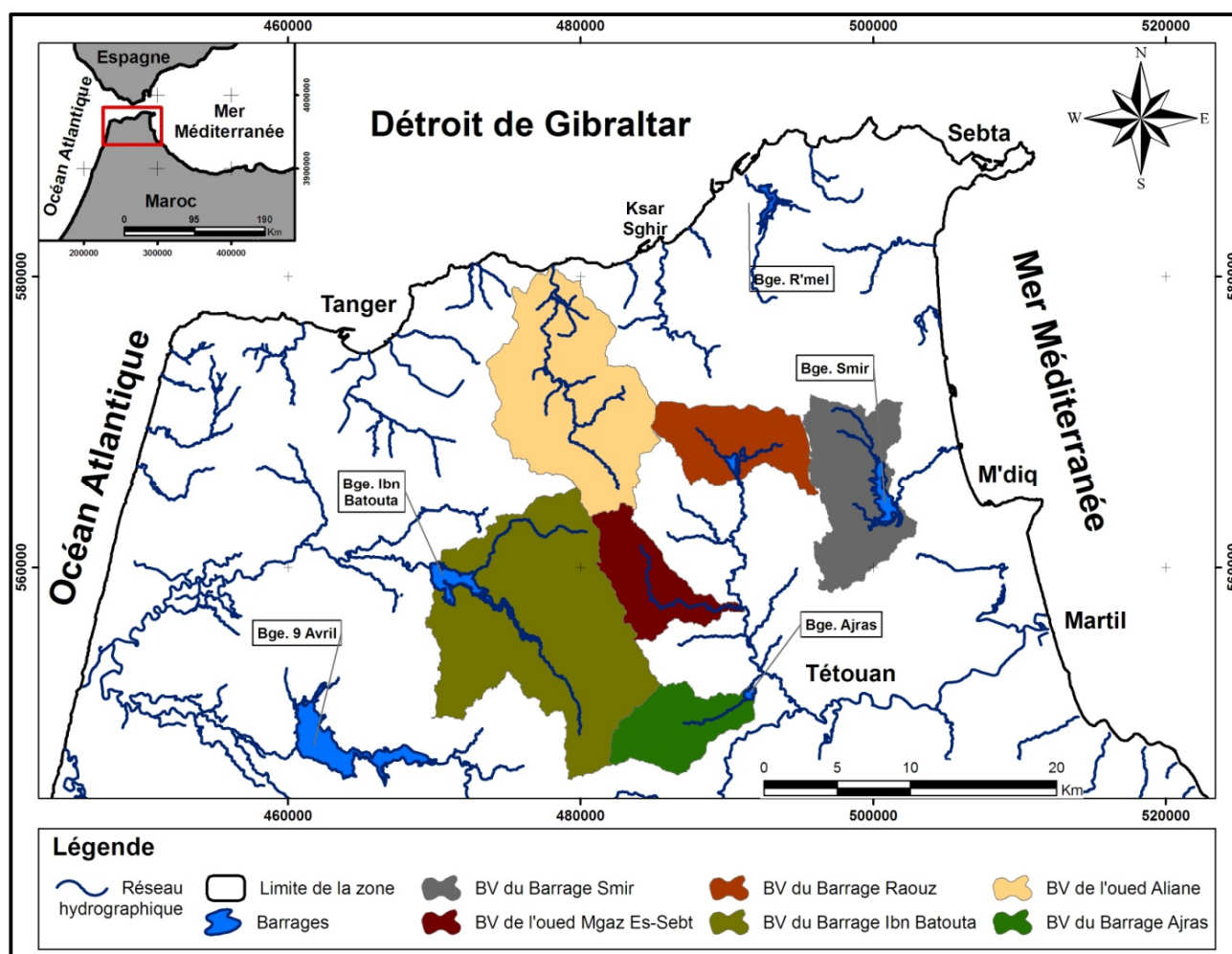


Figure 29 : Carte de position géographique des bassins versants étudiés.

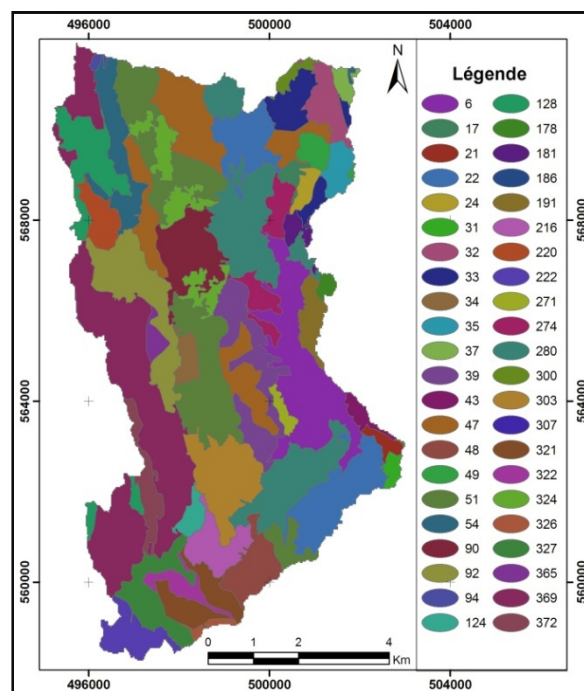


Figure 30: Carte des unités homogènes du bassin versant du barrage Smir.

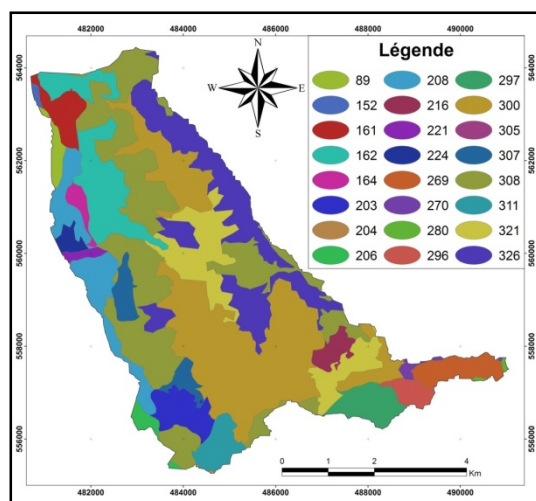


Figure 31: Carte des unités homogènes du bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt.

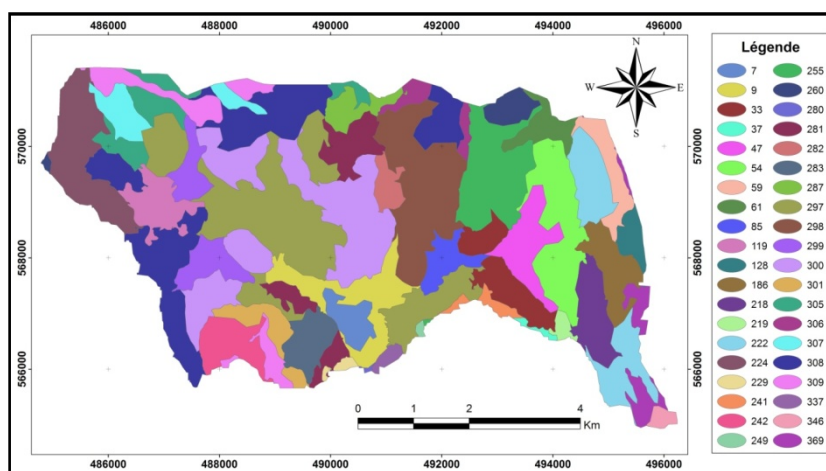


Figure 32: Carte des unités homogènes du bassin versant du barrage Raouz.

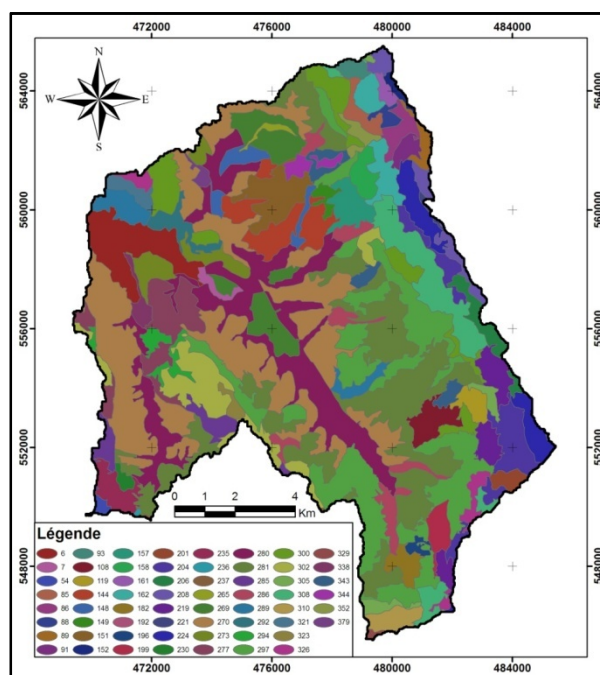


Figure 33: Carte des unités homogènes du bassin versant du barrage Ibn Batouta.

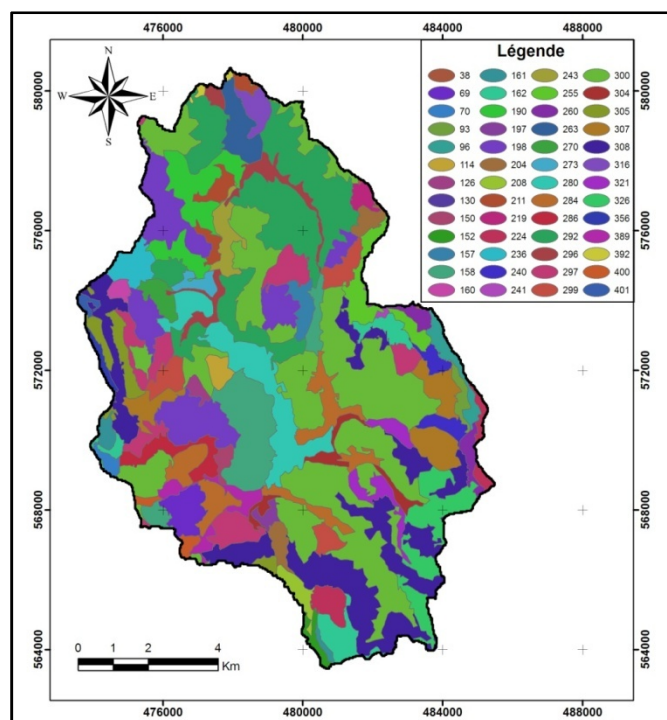


Figure 34: Carte des unités homogènes du bassin versant de l'oued Aliane.

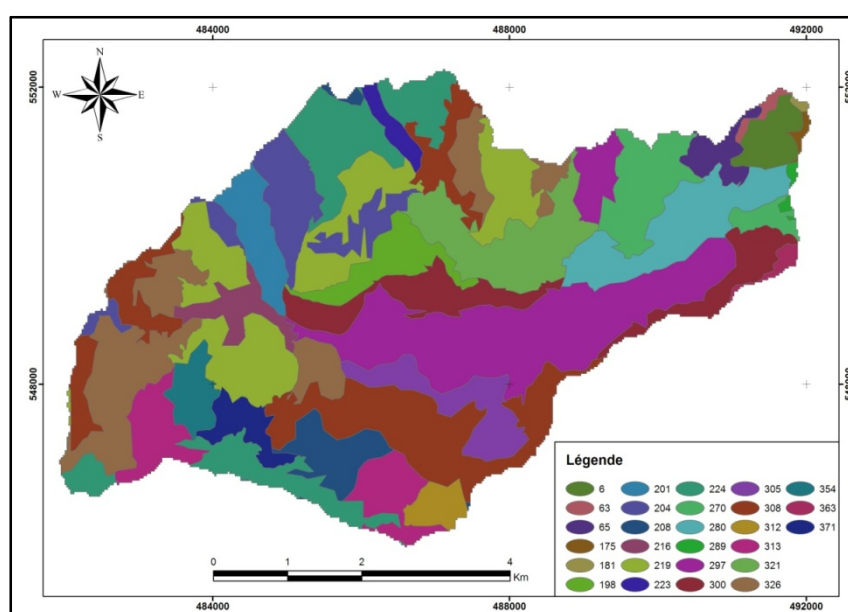


Figure 35: Carte des unités homogènes du bassin versant du barrage Ajras.

2.3. Les analyses aux laboratoires

a. La préparation des échantillons

Les échantillons ont été séchés à l'air, puis passés au tamisage à 2 mm pour séparer la terre fine des cailloux. Ils ont suivi après un ensemble des analyses physico-chimiques.

b. Les analyses chimiques

▪ La matière organique

L'analyse de la matière organique est nécessaire pour éliminer cette fraction du pourcentage total du poids avant l'analyse granulométrique.

La matière organique a été calculée selon la méthode WALKEY ET BLACK, par dosage de la teneur en carbone organique. Une prise à essai a été prise, broyée et tamisée à 2mm de diamètre. Le carbone de la matière organique présent dans l'échantillon de sol est oxydé par mélange de bichromate de potassium en milieu sulfurique jusqu'au dégagement de CO₂.

Le taux de matière organique est calculé en multipliant la teneur en carbone par un coefficient stable dans les sols cultivés régionaux, fixé à 1,72 (MO = C x 1,72) (Annexe II : Analyses chimiques : Matière Organique).

▪ La conductivité électrique

La conductivité électrique qui traduit la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique est directement proportionnelle à la quantité des sels minéraux dissous dans l'eau. Plus la concentration en solides dissous est importante, plus la conductivité est élevée. L'unité de mesure communément utilisée est le Siemens (S/cm) exprimé souvent en microsiemens par cm (µs/cm) ou millisiemens par cm (mS/cm).

La conductivité électrique a été mesurée au laboratoire sur l'extrait de la pate saturée à l'aide d'un conductimètre de laboratoire de marque ORION. La mesure se fait en plongeant la cellule de mesure dans l'eau de l'extrait dans lequel on fait passer un courant alternatif de très basse tension entre deux électrodes (Annexe II : Analyses chimiques : Conductivité électrique).

c. Les analyses physiques

L'analyse physique effectuée correspond à l'analyse granulométrique. Cette dernière permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle permet de classer les éléments du sol en fonction de leur diamètre (Tableau 17).

Tableau 17 : Echelle granulométrique de la texture du sol.

Terre fine					Terre grossière	
Argiles	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers	Graviers	Cailloux
< 2µm	2µm à 20µm	20µm à 50µm	50µm à 200µm	200µm à 2mm	2mm à 20mm	>20mm

L'analyse granulométrique a été réalisée suivant la méthode normalisée O.R.S.T.O.M (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, 1937) (Annexe II : La granulométrie).

La méthode consiste d'abord en un attaque de la matière organique et élimination des cations adsorbants (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, NH₄⁺, H⁺) par l'eau oxygénée (H₂O₂) puis une attaque de la fraction

carbonatée par l'acide chlorhydrique (HCl). A la fin de cette étape, on doit éliminer l'excès de l'HCl par siphonage à plusieurs reprises jusqu'à disparition totale.

On fait une attaque de l'échantillon par le Chlorure de Potassium KCl pour séparer les cations H^+ et les autres ions adsorbants fixés sur les particules argileuses.

Une fois ces étapes accomplies, l'échantillon est prêt pour la granulométrie proprement dite. On ajoute du Pyrophosphate de Sodium ($5Na_4P_2O_7$) à l'échantillon puis on passe à la détermination des fractions argiles et limons par sédimentation selon la loi de Stokes à l'aide d'un densimètre (type Bouyoucos) et des fractions argileuses par tamisage.

3. Le facteur topographique (LS)

La détermination du facteur topographique LS dans la zone d'étude se base sur l'usage du Modèle Numérique de Terrain et de ses cartes dérivées.

La formule originale de Wischmeier et Smith nécessitait une caractérisation des degrés de pente et de leur longueur en fonction d'un paramètre (m) qui varie selon le degré de pente.

Actuellement, avec le développement des outils informatiques et de SIG, le calcul est devenu plus facile à l'aide des logiciels et ainsi, plusieurs formules adaptées aux langages et aux interfaces des différents logiciels se sont apparues.

Après une recherche élargie sur les différentes méthodes utilisées, on a choisi une formule simple et adaptable à notre base de données. Il s'agit de la formule de Mitasova et al.,(s.d.).

Cette formule permet, sous un outil de calcul intégré sous ArcGis, de calculer le facteur LS à partir du MNT et des cartes dérivées, à savoir la carte des classes de pente et la carte des accumulations des flux, elle-même dérivée à partir de la carte des directions des flux.

La formule s'inscrit :

$$\text{Facteur Topographique LS} = \left(\frac{\sin(\text{pente})}{0,0896} \right)^{0,4} * \left(\frac{\sin(\text{pente})}{0,0896} \right)^{1,4} * 1,4$$

4. Le facteur du couvert végétal (C)

Le facteur du couvert végétal a été cartographié en utilisant une image satellitaire multi spectrales Landsat TM5, d'une résolution de 30 m, acquise le 07/06/2010.

Avant de commencer le traitement de l'image, une visite de terrain et une visualisation de l'imagerie haute résolution sur Google Earth a été effectuée pour pouvoir définir les différentes classes (couleurs) et déterminer la connectivité des différentes unités cartographiques afin d'avoir une idée sur leur distribution spatiale.

L'image multi-bandes a été traitée et classifiée sous logiciel ENVI 4.2. Les canaux utilisés sont ceux du visible (V), infra rouge (IR) et du proche infra rouge (PIR). Le traitement de l'image a permis de réaliser la carte du couvert végétal montrant la localisation et la nature de différentes classes observées dans cette date.

Dans les paragraphes qui suivent, une description des différentes étapes du traitement et de la classification de l'image pour l'obtention de la carte du couvert végétal est détaillée. La figure 33 représente un organigramme de la démarche suivie pour sa réalisation.

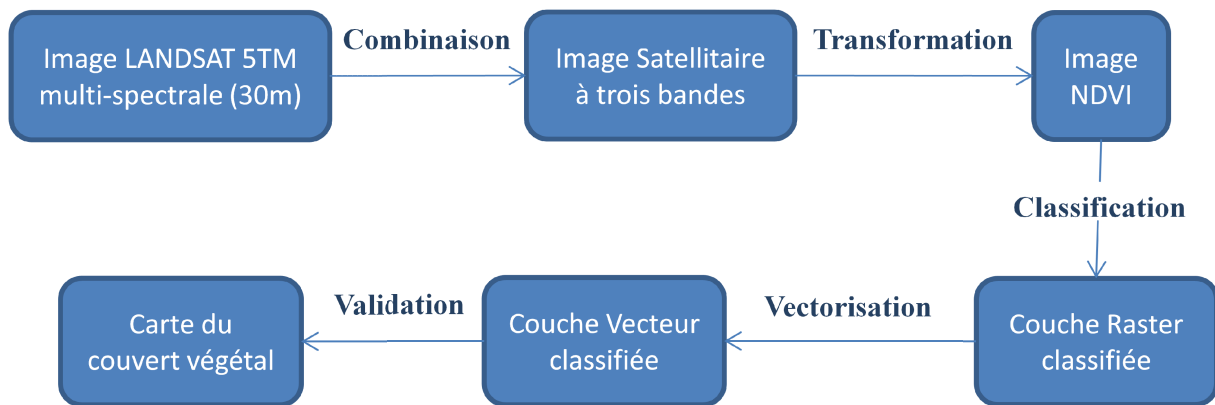


Figure 36 : Etapes du traitement de l'image satellitaire sous Logiciel ENVI.

- **La combinaison**

Il s'agit de la combinaison des trois premières bandes : la bande du proche infrarouge (PIR) TM4 qui renseigne sur la structure interne de la feuille, la bande du moyen infrarouge (IR) TM3 qui correspond aux bandes d'absorption de l'eau et la bande du visible TM2 qui représente la réponse spectrale de la composition pigmentaire des feuilles.

- **La création d'une image NDVI**

C'est une transformation des données multi spectrales dans une image à une seule bande représentant la distribution de la végétation. Les NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) indiquent la quantité de végétation verte dans chaque pixel, les valeurs de NDVI les plus élevées indiquent une végétation plus verte.

L'outil NDVI de ENVI utilise l'algorithme standard :

$$NDVI = \frac{(PIR - Rouge)}{(PIR + Rouge)}$$

- **La classification non supervisée**

La classification non supervisée permet de classer l'image en différentes unités selon les couleurs visibles sur l'image de manière à définir toutes les classes de végétation disponibles dans la région.

Cette classification est effectuée par la méthode d'ISODATA de l'outil « Unsupervised Classification » du Logiciel Envi.

Selon cette méthode, l'outil calcule les moyennes des classes uniformément distribuées dans l'espace de données puis il groupe itérativement les pixels restants selon la technique de distance minimum.

Pendant chaque itération, l'outil recalcule les moyennes et reclasse les pixels en se basant sur les nouvelles moyennes.

La coupure, la fusion ou la suppression des classes se fait sur la base du seuil du paramètre d'entrée.

Tous les pixels sont classés suite à la classe la plus proche à moins qu'un écart-type ou un seuil de distance soit spécifiée. Dans ce cas, certains pixels peuvent être non classés s'ils ne répondent pas aux critères sélectionnés.

Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le nombre de pixels, dans chaque classe, varie de moins que le seuil de changement du pixel sélectionné ou que le nombre maximum d'itérations soit atteint.

- **La vectorisation**

Il s'agit de transformation de l'image Raster classifiée en une image de format vecteur. Cette dernière est exportée vers la plate forme ArcGis pour faire entrer les informations attributaires pour chaque entité cartographique (polygone). Elle subit également certaines corrections ou modifications selon le besoin.

- **La validation**

Il s'agit de l'étape la plus importante de tout le processus de réalisation de la carte du couvert végétal. C'est une sorte de « vérification », de rectification puis d' « approbation » de l'information contenue dans la carte pour la rendre valide et conforme à la réalité de terrain.

D'abord, on superpose la couche « vecteur » sur l'imagerie Google pour vérifier l'exactitude de l'information cartographique et attributaire de chaque entité, puis une vérification sur terrain est obligatoire.

5. Facteur des pratiques antiérosives (P)

Dans la zone d'étude, il n'existe pas vraiment de vraies pratiques pour contrer l'érosion hydrique. En absence de ces pratiques anti-érosives dans la zone d'étude, on attribué au facteur P la valeur 1.

III. CONCLUSION

L'application de l'approche qualitative a été faite sur toute la zone d'étude, la péninsule Tingitane, suivant la formule adaptée. Cette dernière est la somme des indices attribuée aux classes de trois paramètres de l'érosion dont chaque paramètre est multiplié par son pourcentage de contribution. La carte de sensibilité de terre à l'érosion est le résultat de l'addition de tous les cas d'application correspondant aux différentes conditions possibles.

L'approche quantitative a été réalisée sur les six sous bassin versants, appartenant à la péninsule, approche par bassin versant. Cette approche nécessite pour son application une étape d'échantillonnage sur terrain et des analyses aux laboratoires pour pouvoir calculer l'un des facteurs de l'USLE. Après la cartographie de chaque facteur de l'érosion, leur superposition a donné des cartes d'aléa d'érosion de chaque bassin versant.

PARTIE IV

RESULTATS ET

DISCUSSIONS

Chapitre I

Sensibilité des sols à l'érosion

I. CARTE DE SENSIBILITE DES SOLS A L'EROSION

L'étude qualitative de l'érosion effectuée dans la zone d'étude a permis d'obtenir une carte de sensibilité des terres à l'action érosive des pluies. Cette évaluation ne prend pas en considération l'impact du ruissellement proprement dit mais reflète l'influence des changements ou des variations qui peuvent se présenter pour les autres facteurs sur la sensibilité des terres vis-à-vis l'action érosive des pluies.

Cette information cartographique est le résultat d'une superposition de trois facteurs essentiels et déterminants dans le processus de l'érosion, à savoir la lithologie, le couvert végétal et le relief. Chacune des classes de ces facteurs est classée selon un code d'érosivité ou une classe de sensibilité à l'érosion, qui lui est attribuée en se basant sur les travaux antérieurs et nos connaissances sur le site d'étude.

Chaque facteur est multiplié par un pourcentage de contribution qui varie d'une zone à l'autre selon les conditions du milieu. Par exemple, dans une zone montagneuse, la pente aura un poids plus grand par rapport aux autres facteurs, par contre dans les zones forestières par exemple, le couvert végétal est le facteur principal. C'est pour cela qu'on a opté de faire une « zonation » de notre région d'étude selon les différentes conditions du milieu. Ainsi, une classe donnée d'un des trois facteurs, dans une zone déterminée, aura un pourcentage de contribution différent que dans une autre zone où il y a un changement dans l'un des conditions naturelles du milieu (augmentation de la pente, dégradation de végétation ou changement de lithologie).

L'addition des résultats des différentes « combinaisons » possibles nous donne une carte de sensibilité à l'érosion classée en 5 classes : très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée. Les zones urbaines et les plans d'eau ont été exclues de notre étude et par suite on les a attribuées une valeur égale à 0 (No Data) (Fig. 37).

II. DISCUSSION

La carte montre que les zones à sensibilité très faible à faible sont très limitées dans la région, couvrant respectivement 0,12% et 1,3% (Tableau 18). Elles se localisent essentiellement dans la plaine de Tahaddart sur la façade atlantique et dans les basses plaines du bassin de Smir à l'Est sur la façade méditerranéenne. Dans le premier secteur, le relief très bas et les pentes très faibles sous une couverture végétale représentée par une forêt mélangée (Forêt Diplomatique)

sont des conditions qui diminuent la sensibilité envers l'érosion. Dans le second cas, même s'il est caractérisé par des altitudes relativement élevées et des pentes plus fortes, le développement d'une forêt de feuillus sur des formations lithologiques assez résistantes rendent ces terres moins sensibles à l'érosion.

On rencontre aussi une sensibilité à l'érosion très faible dans les secteurs caractérisés par des formations résistantes comme les roches métamorphiques, les calcaires et les dolomies. Cette sensibilité à l'érosion diminue de plus en plus si le facteur végétal vient ajouter sa protection de la surface des sols, comme c'est le cas des forêts qui couvrent les montagnes de la dorsale calcaire surplombant la façade méditerranéenne et la partie orientale de la côte du Détroit. C'est le cas aussi de la forêt de Cap Spartel au Nord Ouest de la zone d'étude (à l'Ouest de la ville de Tanger), où s'est développée une forêt de feuillus et de végétations sclérophylles.

On remarque une large répartition des classes de sensibilité moyennes à fortes dans la région, chose qui est normale à cause de plusieurs raisons. D'une part, et en se référant à la carte des formations lithologiques de la région, on aperçoit qu'une grande superficie de la zone d'étude est formée de terrains argileux ou de type flysch, ou encore des terrasses fluviatiles. Ces formations sont moyennement, voire fortement, sensibles à l'érosion. D'autre part, la plus part de ces formations se localisent sur des zones à relief relativement accidenté avec des altitudes modérément élevés et des pentes moyennes à raides. A ces deux facteurs favorables à l'augmentation de la sensibilité des terres à l'érosion, s'ajoute le facteur humain, qui se traduit par une dégradation de la végétation naturelle contre une invasion de l'agriculture et d'autres activités humaines. Dans ces secteurs, on rencontre dans la plus part des cas une activité agricole traditionnelle ou bien des systèmes cultureux complexes dans le cas des altitudes basses et de reliefs plats, comme le cas de la plaine de Tahaddart et de Martil.

Quant aux zones hautement sensibles à l'érosion (Fig. 37), elles sont également très limitées dans le secteur d'étude et couvrent seulement 1,8% de la superficie totale (Tableau 18). Une comparaison avec les cartes des trois facteurs influençant la sensibilité des terres à l'érosion, on remarque que cette classe de sensibilité très forte coïncide avec des formations résistantes comme les formations calcaréo-dolomitiques de la chaîne calcaire. Cette sensibilité élevée pourrait être expliquée par sa présence sur des zones fortement, voire totalement, dépourvues du couvert végétal et des pentes très raides.

Tableau 18: Répartition des classes de sensibilité des sols à l'érosion dans la zone d'étude.

Classes de sensibilité	Superficie (ha)	Superficie %
0 (No Data)	22409,73	9,54
Très faible	282,69	0,12
Faible	3046,49	1,30
Moyenne	54516,18	23,21
Elevée	150403,91	64,04
Très élevée	4215,14	1,79
Total	234874,14	100%

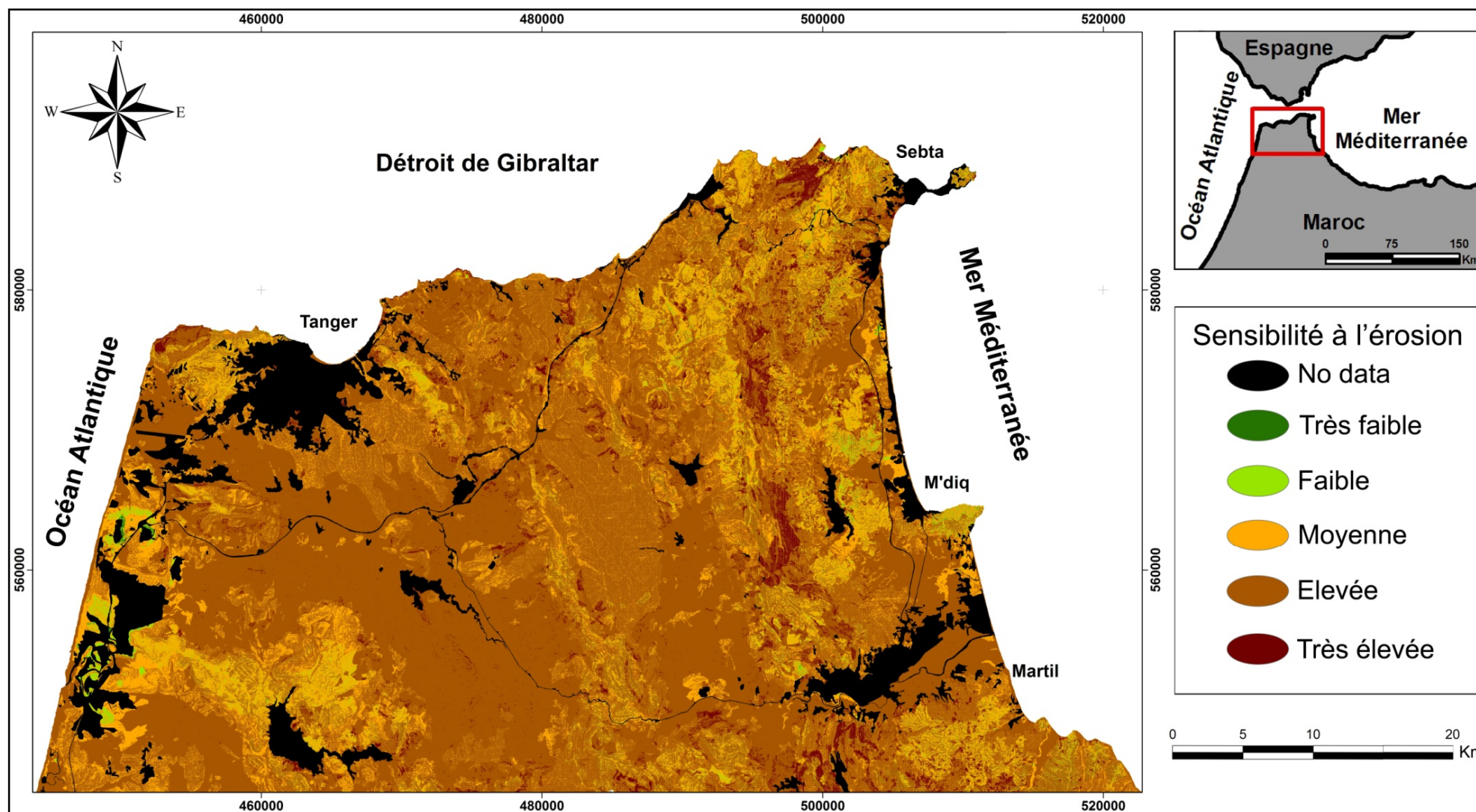


Figure 37 : Carte de sensibilité des sols à l'érosion de la péninsule tingitane.

Chapitre II

Modélisation de l'aléa d'érosion. Approche par bassin versant

I. BASSIN VERSANT DU BARRAGE SMIR

1. Cartographie thématique des facteurs de l'érosion

a. Facteur d'érosivité de la pluie (R)

Les valeurs du facteur climatique R dans le bassin versant du barrage Smir varient entre 98 et 108. Ils comptent parmi les valeurs les plus élevées dans la région, ce qui reflète clairement l'influence de sa situation en surplombe sur la façade méditerranéenne et englobée par les hautes montagnes de la dorsale calcaire.

Cette influence méditerranéenne apparaît bien dans la carte de répartition du facteur R dans le bassin (Fig. 35) qui montre une diminution de sa valeur en s'éloignant vers l'Ouest et les limites Nord et Sud du bassin.

b. Facteur d'érodibilité des sols (K)

La carte du facteur d'érodibilité des sols (Fig. 36) a été élaborée sur la base d'une rasterisation de la carte des unités homogènes en fonction des valeurs de k calculées.

Les valeurs varient entre 0,43 et 0,82 (Tableau 19). 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 suite à la grande friabilité de ce type de roches à cause de sa composition en alternances pélitico-gréseuses.

Tableau 19 : Répartition des valeurs du facteur K dans le bassin versant du barrage Smir

Classes du facteur K	Superficie (ha)	% Superficie
0	418,91	6,31
0,43 - 0,48	1551,35	23,36
0,48 - 0,53	359,68	5,42
0,53 - 0,58	421,55	6,35
0,58 - 0,63	408,49	6,15
0,63 - 0,68	467,16	7,04
0,68 - 0,73	1141,64	17,19
0,73 - 0,78	142,17	2,14
0,78 - 0,82	1728,84	26,04
Total	6639,79	100%

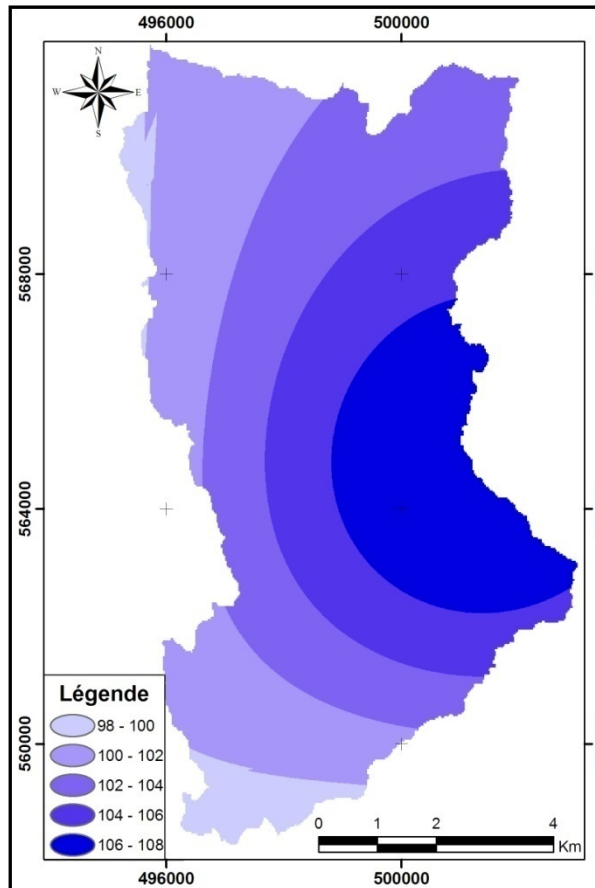


Figure 38 : Carte de répartition du facteur R dans le bassin versant du barrage Smir

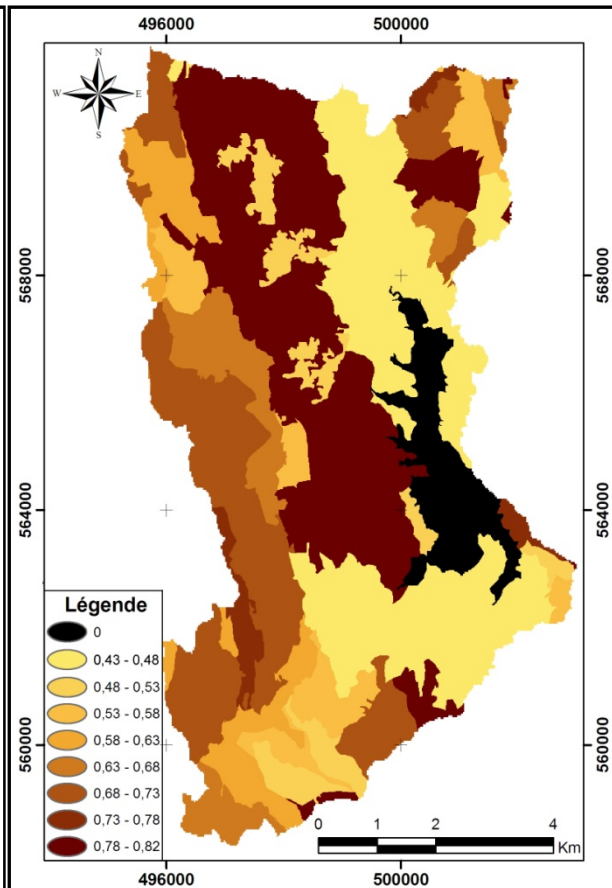


Figure 39 : Carte de répartition du facteur K dans le bassin versant du barrage Smir

c. Facteur topographique (LS)

Le facteur topographique LS est classé selon des valeurs variant entre 0 et supérieures à 80. Une lecture de la carte de LS (Fig. 37) reflète clairement la topographie du terrain. Ainsi, dans les zones du secteur Est, qui correspondent à la zone aval du bassin versant, on trouve des valeurs minimales ne dépassant que rarement 20. Dans la zone du barrage et de son entourage, on trouve généralement des valeurs très faibles de 0 à 5, à l'exception de certaines zones très limitées sur les bords immédiats du barrage ou des affluents, où la valeur augmente suite à l'augmentation du paramètre pente.

Dans le secteur Ouest et les limites externes septentrionales et méridionales du bassin versant, le relief est élevé et les pentes sont fortes voire très fortes. Cela se traduit par des valeurs de LS assez fortes dépassant les 55 ou même 80 dans certaines zones. Ces valeurs peuvent être également expliquées par des pentes fortes suite à une homogénéité de la surface des versants.

Selon le tableau de répartition des classes (Tableau 20), la classe minimale (0-3) occupe plus que la moitié de la superficie totale du bassin, suivie par des valeurs faibles à moyennes, de 10 à 35. Les valeurs fortes à très fortes (à partir de 35) ne couvrent que 11,26 % de la superficie totale.

Tableau 20 : Répartition des classes du facteur LS dans le bassin versant de Smir

Classes du facteur LS	Superficie (ha)	% Superficie
0 - 3	3555,06	53,54
3 - 5	268,32	4,04
5 - 10	610,56	9,20
10 - 20	811,05	12,22
20 - 35	646,44	9,74
35 - 55	372,23	5,61
55 - 80	182,83	2,75
> 80	193,30	2,91
Total	6639,79	100%

d. Facteur du couvert végétal (C)

Dans le bassin de Smir, on observe la dominance de deux classes d'occupations, une activité agricole qui domine les entourages du barrage et les secteurs sud du bassin généralement à relief bas, couvrant une superficie de 28,9 ha, et une forêt de feuillus assez dense, se localisant essentiellement dans les montagnes qui délimitent le bassin au Nord et au sud est et qui couvre une superficie de 27,39 ha. Dans la partie occidentale, on rencontre une grande surface dégradée couvrant une superficie de 17,58 (Tableau 21 et figure 38).

Tableau 21 : Répartition des classes du facteur C dans le bassin versant du barrage Smir

Classes de végétation	Superficie (ha)	% Superficie	Facteur C
Cours et plans d'eau	414,17	6,24	0
Forêt de feuillus	1818,39	27,39	0,001
Forêt de feuillus dégradée	91,85	1,38	0,02
Forêts et végétation arbustive en mutation	510,62	7,69	0,014
Pelouses, Landes et Broussailles	238,72	3,60	0,11
Terres arables	43,32	0,65	0,14
Végétations sclérophylles	403,22	6,07	0,01
Végétations sclérophylles dégradées	33,44	0,50	0,05
Zones agricoles	1918,93	28,90	0,16
Zones fortement à totalement dégradées	1167,13	17,58	0,99
Total	6639,79	100%	

2. Carte d'aléa d'érosion

Selon la carte obtenu à travers de la superposition des différents facteurs précédemment calculées et cartographiés (Fig. 42) et le tableau des répartitions des différentes classes (Tableau 22), l'érosion dans le bassin versant du barrage Smir est généralement forte avec une perte moyenne générale de 45,45 T/ha/an.

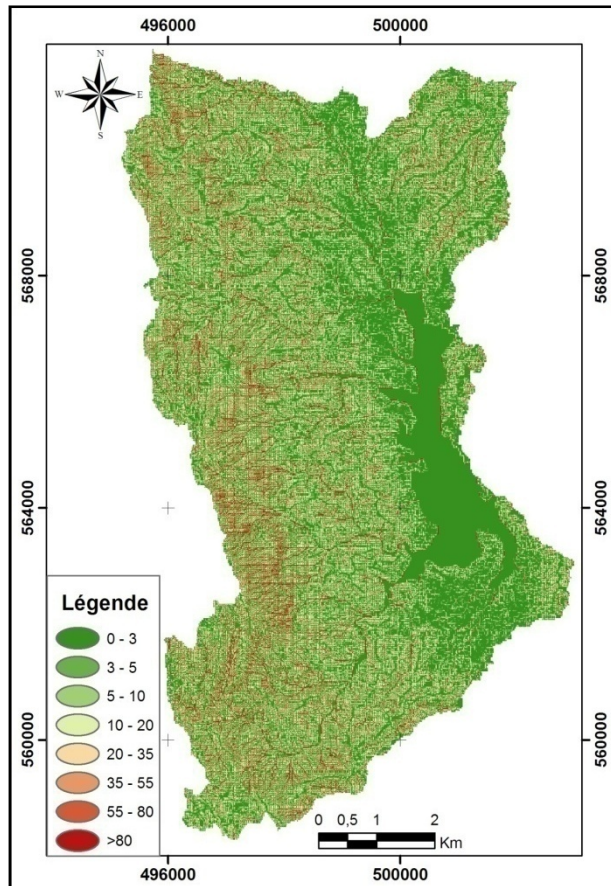


Figure 40 : Carte de répartition du facteur LS dans le bassin versant du barrage Smir

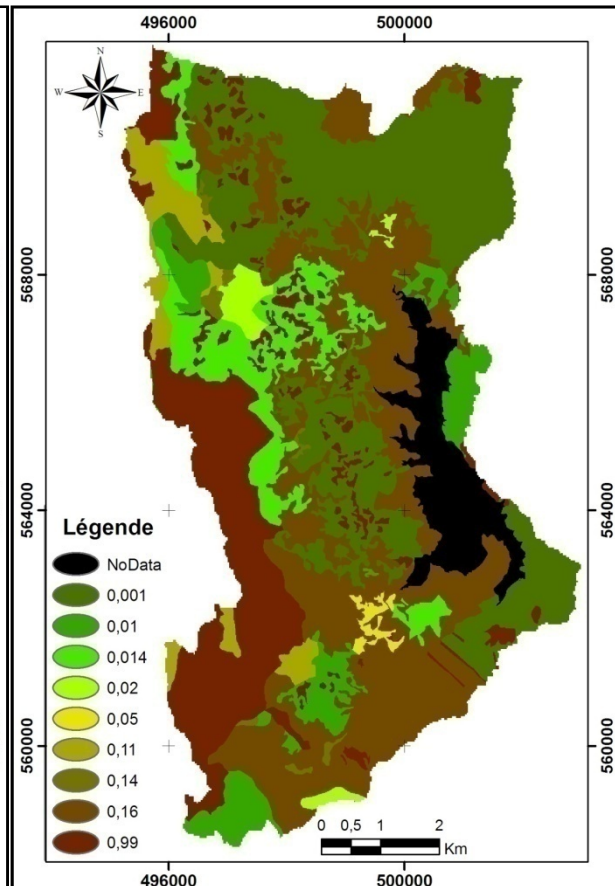


Figure 41 : Carte de répartition du facteur C dans le bassin versant du barrage Smir

Les classes d'aléa très élevée d'érosion, dépassant les 60 T/ha/an, se localisent dans la partie occidentale et occupent 38,1% de la superficie totale du bassin. Dans cette partie du bassin, même si elle est formée par des formations généralement dures (calcaires et dolomies, Fig. 40C), est caractérisée par un relief haut (Fig. 40A) et accidenté (Fig. 40 B) et montre dans une grande partie de son terrain des sols nus ou fortement dégradés (Fig. 40D).

Les classes d'aléa moyen à fort (de 12 à 60) couvrent des surfaces réduites avec un totale de 14,03%. Elles se localisent dans la partie centrale du bassin, coïncidant parfaitement avec des altitudes et des pentes moyennes à fortes, où se développe une activité agricole sur des terrains de flysch ou argilo-pélitiques.

Dans le même secteur au centre, on observe une zone distinguée qui présente un aléa faible à très faible, correspondant à une zone à forêt de feuillus qui joue le rôle de protecteur des sols contre l'effet érosive des pluies.

Les classes d'aléa très faible et faible (de 0 à 12 t/ha/an), couvrent 40,23 % de la superficie du bassin même si la valeur de la moyenne générale est élevée. Cela est dû à la grande superficie affectée par des valeurs d'érosion élevées. Ces classes d'aléa faibles à très faibles se concentrent dans la partie est du bassin. Par superposition aux cartes de la figure **, ces zones, malgré leur composition lithologique sensible à l'érosion, présentent un couvert

végétal dense (Forêt de feuillus), ce qui nous permet de déduire l'importance du couvert végétal dans la préservation des sols contre l'érosion.

Tableau 22 : Classes des pertes en sol (en T/ha/an) dans le bassin versant du barrage Smir.

Pertes en sol (T/ha/an)	Superficie (ha)	% Superficie
0	507,40	7,64%
0 - 3	1969,02	29,65%
3 - 6	359,70	5,42%
6 - 12	342,54	5,16%
12 - 20	276,66	4,17%
20 - 30	240,38	3,62%
30 - 45	242,10	3,65%
45 - 60	172,29	2,59%
60 - 90	245,64	3,70%
90 - 120	175,87	2,65%
120 - 150	132,30	1,99%
150 - 200	168,36	2,54%
>200	1807,54	27,22%
Total	6639,79	100%

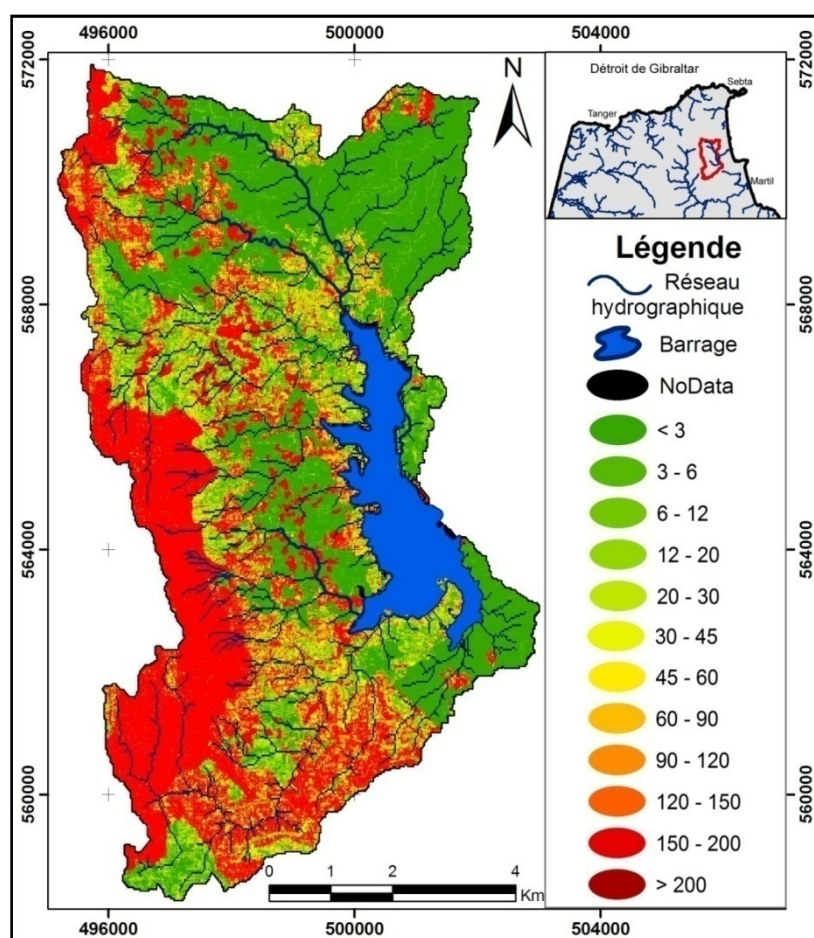


Figure 42 : Carte d'aléa d'érosion en t/ha/an dans le bassin versant du barrage Smir.

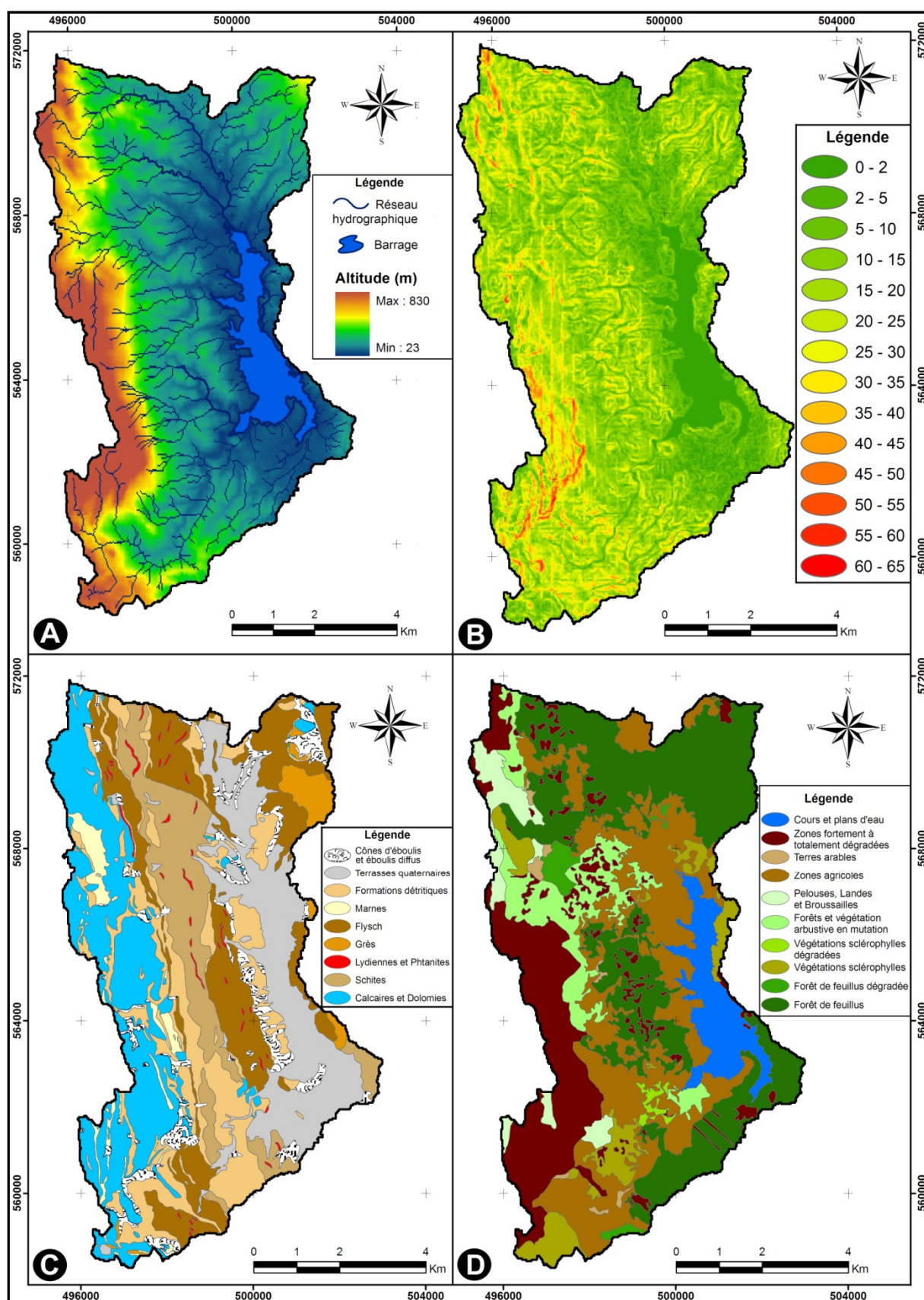


Figure 43 : Cartes des paramètres physiques du bassin versant du barrage Smir (A : Altitudes ; B : Pentas ; C : Lithologie et D : Végétation)

II. BASSIN VERSANT DU BARRAGE RAOUZ

1. Cartographie thématique des facteurs de l'érosion

a. Facteur d'érosivité de la pluie (R)

La figure 44 représente la carte de répartition du facteur R dans le sous bassin du barrage Raouz. Elle montre une augmentation nette depuis le centre (Sud) vers les extrémités du bassin, surtout vers les hautes altitudes à l'Est et au Nord Ouest.

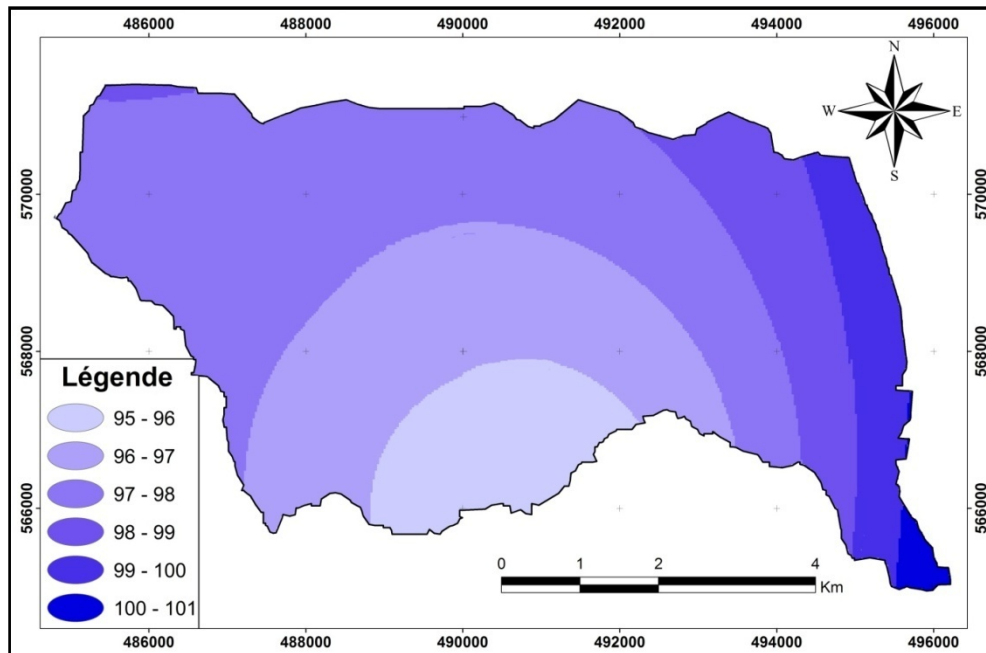


Figure 44: Carte de répartition du facteur d'érosivité de la pluie (R).

b. Facteur d'érodibilité des sols (K)

La figure 45 résulte de la rasterisation de la carte des unités homogènes du bassin selon le facteur d'érodibilité K, calculé pour chaque échantillon. Elle présente la répartition spatiale des différentes classes du facteur K dans le bassin. Les valeurs obtenues sont comprises entre 0,47 et 0,79 avec la prédominance de la classe 0,47-0,57 qui couvre 48% de la superficie suivie par la classe 0,57 - 0,62 qui occupe 27% de la surface (Tableau 23, Fig. 41).

Tableau 23 : Répartition des classes du facteur K dans le bassin versant du barrage Raouz.

Classes du facteur K	Superficie (ha)	% Superficie
0	255	6
0,47 - 0,52	920	20
0,52 - 0,57	1276	28
0,57 - 0,62	1248	27
0,62 - 0,67	6	0,1
0,67 - 0,72	343	7
0,72 - 0,79	554	12
Total	4602	100%

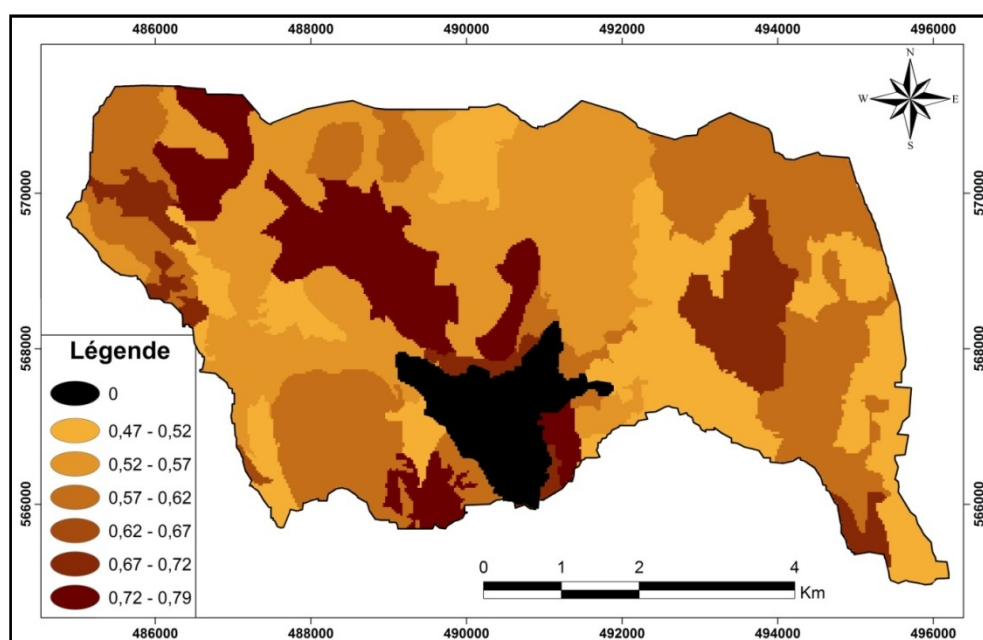


Figure 45 : Carte de répartition du facteur d'érodibilité des sols (K).

c. Facteur topographique (LS)

Le facteur LS varie généralement de 0 à 80. Les différentes unités de la carte ont été regroupées en 8 classes (Fig. 46).

Les valeurs inférieures à 5 occupent la moitié de la superficie totale du bassin, suivies par les classes moyennes comprise entre 5 et 20 qui couvrent 37,31% de la surface. Les valeurs les plus élevées, celles supérieures à 55 occupent des zones très limitées ne dépassant pas 1% de la surface (Tableau 24).

Tableau 24 : Répartition des classes du facteur LS dans le bassin versant du barrage Raouz.

Classes du facteur LS	Superficie (ha)	% Superficie
0 - 3	1980,76	43,06
3 - 5	365,13	7,94
5 - 10	863,40	18,75
10 - 20	853,67	18,56
20 - 35	386,44	8,40
35 - 55	115,80	2,50
55 - 80	28,04	0,61
>80	8,76	0,18
Total général	4602	100%

d. Facteur du couvert végétal (C)

La carte de répartition du facteur du couvert végétal C du barrage Raouz présente 11 classes (Fig. 47) dont on a attribué selon la littérature une valeur de C pour chaque type de végétation (Tableau 25).

Le facteur C varie entre 0,001 pour les forêts de feuillus et 0,99 sur les zones fortement à totalement dégradées. La valeur 0 est attribuée aux zones urbaines et plans d'eau.

La valeur 0,16 attribuée aux zones agricoles couvre presque la moitié de la superficie du bassin. Les zones à forêts (0,001) et à végétations sclérophylles (0,01) couvrent respectivement 11,1 et 12,56%.

Tableau 25 : Répartition des classes du facteur C dans le bassin versant du barrage Raouz.

Classes de végétation	Superficie (ha)	% Superficie	Facteur C
Cours et plans d'eau	209,56	4,55	0
Forêt de feuillus	510,91	11,10	0,001
Forêt de feuillus dégradée	17,84	0,39	0,002
Forêts et végétation arbustive en mutation	91,52	1,99	0,014
Pelouses, Landes et Broussailles	156,83	3,41	0,11
Terres arables	202,42	4,40	0,14
Végétations sclérophylles	578,12	12,56	0,01
Végétations sclérophylles dégradées	452,94	9,84	0,05
Zones agricoles	2167,49	47,10	0,16
Zones fortement à totalement dégradées	202,82	4,41	0,99
Zones urbaines	11,76	0,26	0
Total	4602	100 %	

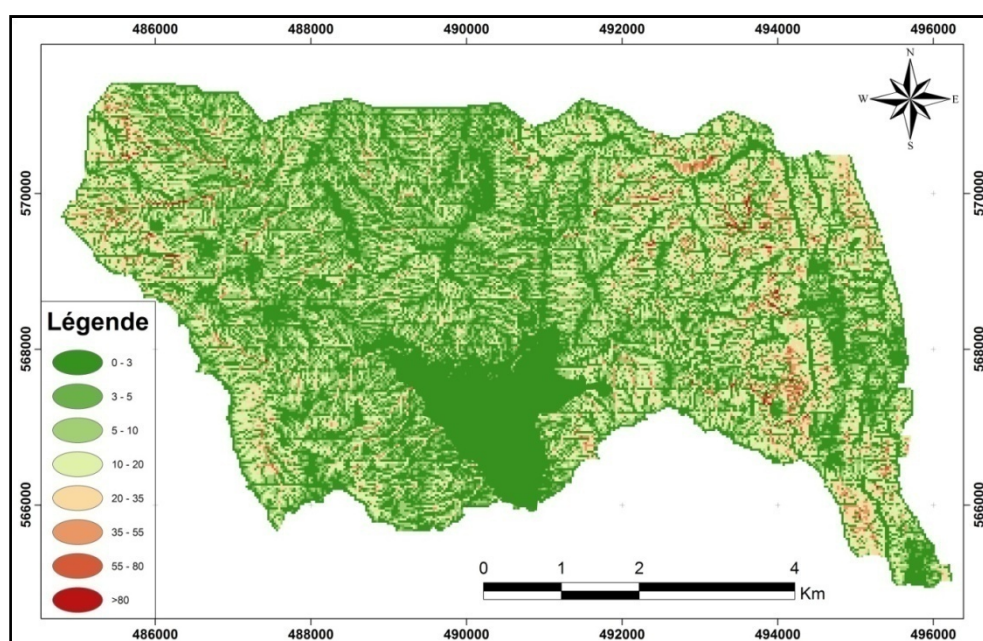


Figure 46 : Carte de répartition du facteur topographique (LS).

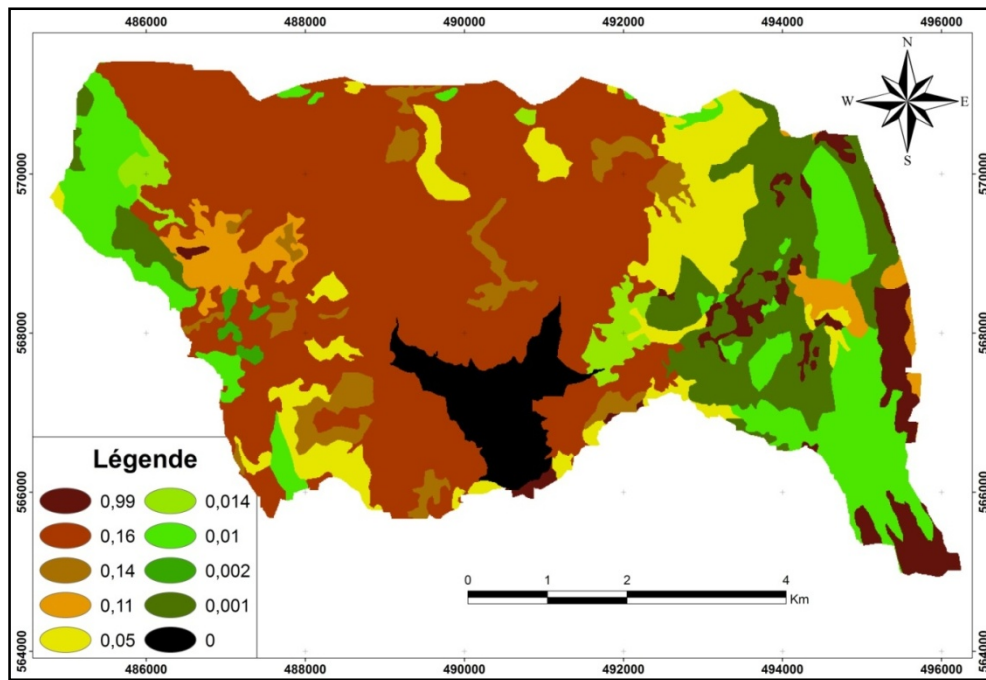


Figure 47 : Carte de répartition du facteur de couvert végétal (C).

2. Carte de risque potentiel d'érosion

La carte de risque d'érosion a été classée en 12 classes pour mieux visualiser les résultats et différencier spatialement les degrés de risque (Fig. 48). Elle montre que l'érosion dans le bassin versant varie entre des valeurs proches de 0 à plus de 200 T/ha/an, avec une perte moyenne de 35 T/ha/an.

D'après le tableau de répartition des différentes classes (Tableau 26), on déduit que le bassin versant est occupé généralement par des zones à risque d'érosion très faible (< 3 t/ha/an) qui occupent environ 22% de la superficie totale du bassin versant, suivies par celles dont le risque est faible avec des taux d'érosion entre 3 et 12 t/ha/an couvrant 13% de la superficie. La classe de risque d'érosion moyen, de 12 à 30 t/ha/an, occupe 19% de la superficie totale du bassin. Les zones à risque d'érosion fort, de 30 à 60 t/ha/an, couvrent 20% et celles à érosion très forte, de 60 à 120 t/ha/an, occupent 12% de la superficie totale du bassin. Le reste de la zone (8% de la superficie) est occupé par une érosion énorme dépassant même les normes (>120 t/ha/an).

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.

Une lecture générale de la carte d'aléa d'érosion obtenue et les cartes des différents facteurs du milieu naturel dans le bassin (Fig. 49) montre que les zones détectées à risque d'érosion très faible (< 3 t/ha/an), présentes à l'Est du barrage et à l'Ouest du bassin, même s'elles se trouvent sur des moyens à fortes pentes et des formations essentiellement de type flysch, elles sont caractérisées par une couverture végétale importante, constituée par des zones à feuillus, des végétations sclérophylles ou encore des pelouses et broussailles naturelles.

Tableau 26 : Répartition des classes d'érosion dans le bassin versant du barrage Raouz.

Pertes en sol (t/ha/an)	Superficie (ha)	% de superficie
0 (barrage)	255	6%
0 - 3	989	22%
3 - 6	227	5%
6 - 12	378	8%
12 - 20	387	8%
20 - 30	513	11%
30 - 45	571	12%
45 - 60	371	8%
60 - 90	363	8%
90 - 120	167	4%
120 - 150	93	2%
150 - 200	65	1%
>200	223	5%
Total	4602	100%

Dans la partie sud orientale du bassin, une bande de direction nord-sud est le siège des valeurs les plus élevées de l'érosion dans tout le bassin, malgré qu'elle est formée par des formations lithologiques résistantes (calcaires et dolomies, Fig. 49C). En plus des altitudes élevées (Fig. 49 A) et les pentes moyennes à fortes (Fig. 49B), la carte d'occupation des sols (Fig. 49 D) montre une couverture végétale fortement à totalement dégradée dans ce secteur ce qui vient argumenter encore plus l'importance de la couverture végétale dans le processus de l'érosion.

Dans la partie centrale du bassin, à l'entourage et au Nord du barrage, on observe une érosion moyenne à forte, voire localement très forte. Dans ce secteur, le relief bas et peu accidenté et l'existence de terres arables ont favorisé une intensification de l'activité agricole, ce qui a augmenté par la suite la vulnérabilité des sols à l'érosion.

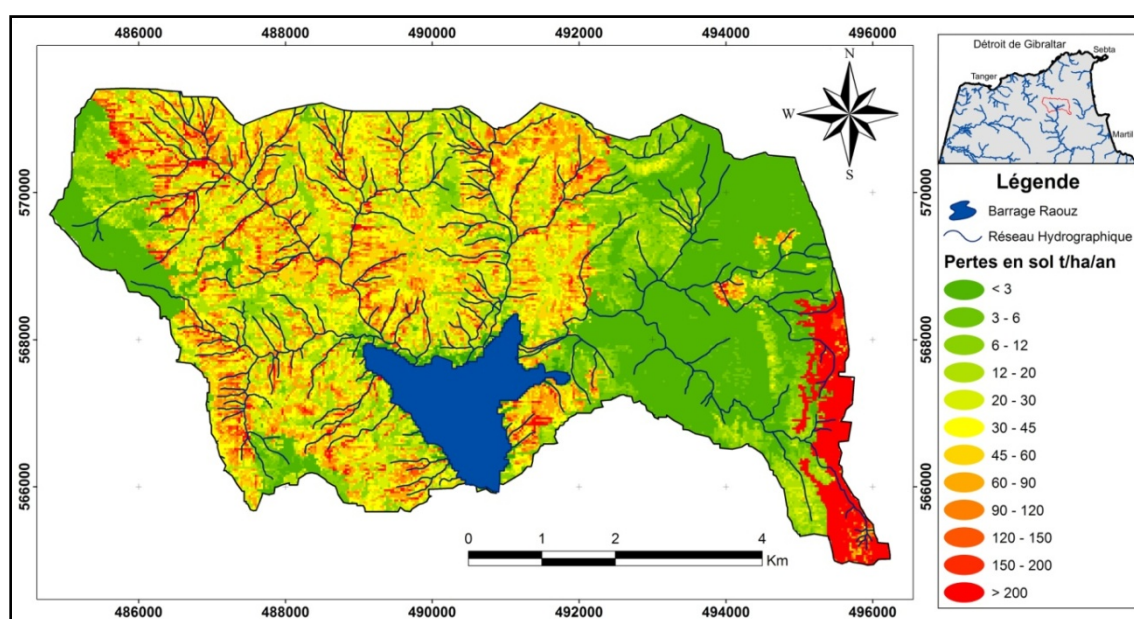


Figure 48 : Carte d'aléa d'érosion en t/ha/an du bassin Raouz.

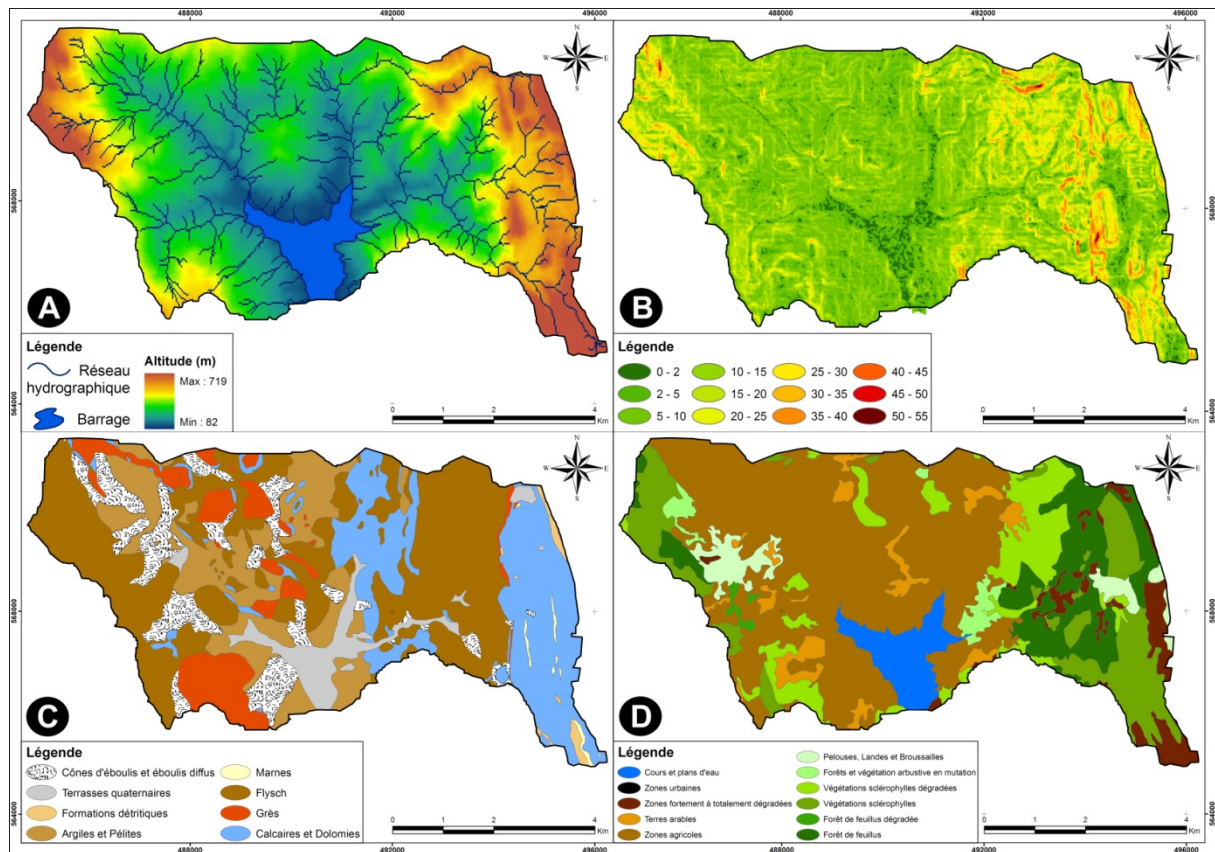


Figure 49 : Cartes des paramètres physiques du bassin versant du barrage Raouz (A : Altitudes ; B : Pentas ; C : Lithologie et D : Végétation)

III. BASSIN VERSANT DE L'OUED MGAZ ES-SEBT

1. Cartographie thématique des facteurs de l'érosion

a. Facteur d'érosivité de la pluie (R)

La carte du facteur R (Fig. 50) montre des valeurs qui échelonnent entre 98 et 103, avec une augmentation des valeurs du Sud vers le Nord du bassin.

b. Facteur d'érodibilité des sols (K)

L'érodibilité des sols dans le bassin de Mgaz Es-Sebt présente des valeurs qui varient de 0,43 à 0,79 (Tableau 27).

La classe 0,48 – 0,53 occupe plus que la moitié de la superficie totale du bassin (56,8%). Le reste de la superficie est répartie essentiellement entre les classes 0,53-0,63 et 0,73-0,79, occupant successivement 22,52 % et 14,45. Cette dernière se limite dans le secteur Est du bassin (Fig. 51).

Tableau 27 : Répartition du facteur K dans le bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt

Classes du facteur K	Superficie (ha)	% Superficie
0,43 – 0,48	110,70	2,94
0,48 – 0,53	2130,61	56,58
0,53 – 0,58	380,00	10,09
0,58 – 0,63	467,96	12,43
0,63 – 0,68	30,43	0,81
0,68 – 0,73	98,33	2,61
0,73 – 0,79	547,42	14,54
Total	3765,46	100%

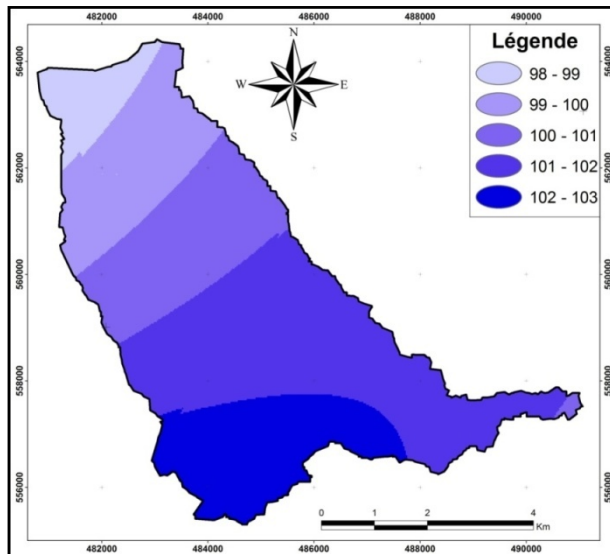


Figure 50 : Carte d'érosivité climatique dans le bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt.

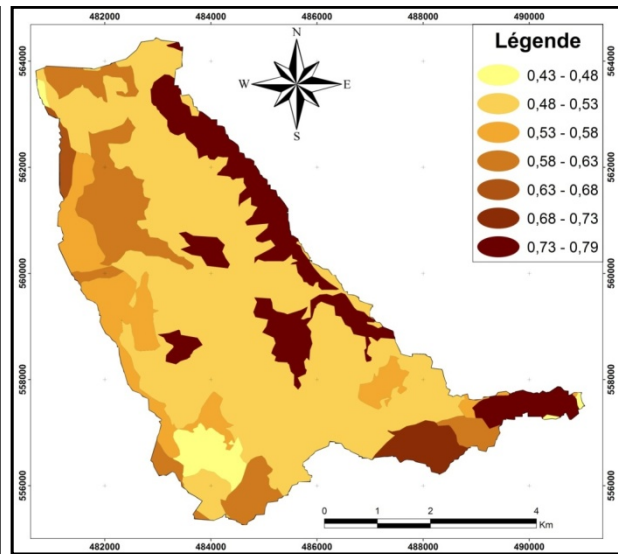


Figure 51 : Carte d'érodibilité des sols dans le bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt.

c. Facteur topographique (LS)

Le facteur LS varie généralement de 0 à plus de 80. Ces différentes unités ont été regroupées en 8 classes (Fig. 52).

Les valeurs inférieures à 5 occupent presque la moitié de la superficie du bassin, 42,84 %, suivies par la classe comprise entre 10 et 20 qui couvrent 24,45% de la surface et celle comprise entre 5 et 10 représentant 20,14 %. Les valeurs moyennes à élevées, celles supérieures à 20, n'occupent que des zones très limitées ne dépassant pas 13% de la surface (Tableau 28).

d. Facteur du couvert végétal (C)

Le bassin versant de Mzaz Es Sebt présente seulement quatre unités d'occupation du sol. Les zones agricoles, correspondant à une valeur de C de 0,16, dominent les trois quarts de la superficie totale du bassin. Les zones à végétations sclérophylles couvrent 12,83% de la superficie du bassin. Les forêts et zones arbustives en mutation ne présentent que 0,98 %. Le reste de la superficie (10,38%) correspondent à des terres arables (Tableau 29, Fig. 53).

Tableau 28 : Répartition du facteur LS dans le bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt.

Classes du facteur LS	Superficie (ha)	% Superficie
0 - 3	1436,24	38,14
3 - 5	176,83	4,70
5 - 10	758,52	20,14
10 - 20	920,63	24,45
20 - 35	349,76	9,29
35 - 55	95,93	2,55
55 - 80	21,97	0,58
> 80	5,57	0,15
Total	3765,46	100,00%

Tableau 29 : Répartition du facteur C dans le bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt

Classes de végétation	Superficie (ha)	% superficie	Facteur C
Forêts et végétation arbustive en mutation	36,80	0,98	0,014
Terres arables	390,77	10,38	0,14
Végétations sclérophylles	483,11	12,83	0,01
Zones agricoles	2854,77	75,81	0,16
Total	3765,46	100%	

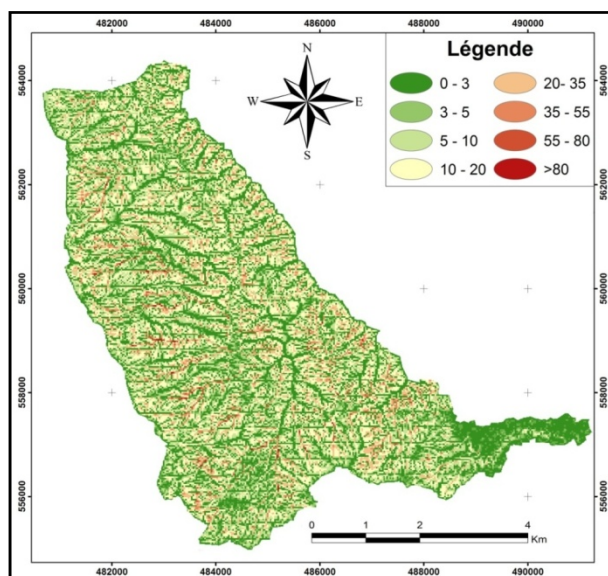


Figure 52 : Carte du facteur topographique LS dans le bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt.

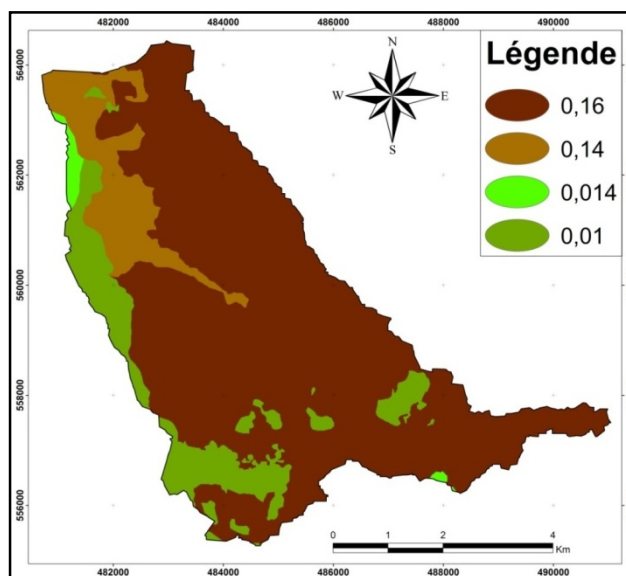


Figure 53 : Carte du facteur C dans le bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt.

2. Carte de risque potentiel d'érosion

La carte de risque d'érosion dans le bassin de l'oued Mgaz Es-Sebt (Figure 54) montre que l'érosion varie entre des valeurs proches de 3 à plus de 200 T/ha/an, avec une perte moyenne de 48 t/ha/an, qui est considérée comme relativement élevée.

D'après le tableau de répartition des différentes classes de pertes en sols (Tableau 30), la classe d'érosion faible à moyenne (< 3, 3-6 et 6-12, T/ha/an) couvre 10% seulement de la superficie totale du bassin. Elle se localise dans trois secteurs limités du bassin dont les caractéristiques sont différentes :

- Au Sud Est, au niveau de la zone aval de l'oued, on rencontre des terrains formés essentiellement par dépôts de terrasses fluviales (Fig. 55C) occupés généralement des activités agricoles (Fig. 55D). Cependant, le relief très bas (Fig.55A) et les pentes très faibles (Fig. 55B) réduisent l'érosion ;
- Au Sud et à l'Ouest du bassin, et contrairement au cas précédent, les altitudes et les pentes dans ces deux secteurs sont élevées à très élevées et les terrains sont constituées essentiellement de formations de type flysch. Ceci s'explique par l'existence d'une couverture végétale importante qui protège les sols contre l'érosion (Fig. 55D).

Les zones qui présentent des classes d'érosion fortes à très fortes (30-60 et 60-150 T/ha/an) et qui couvrent plus que la moitié de la superficie totale du bassin (68%) sont celles qui présentent des formations lithologiques constituées essentiellement par des flysch et occupées principalement par des activités agricoles, et dont le relief est généralement moyennement à fortement accidenté (Fig. 55).

Les valeurs d'érosion les plus élevées (>150 t/ha/an), occupant 8% de la superficie totale du bassin, se limitent dans le secteur Sud Est, là où domine l'effet du facteur topographique avec des pentes les plus abruptes dans tout le bassin (Fig. 55B).

Tableau 30 : Répartition des classes d'érosion dans le bassin versant de l'oued Mzaz Es-Sebt.

Pertes en sol (t/ha/an)	Superficie (ha)	% de superficie
<3	92	2%
3 - 6	116	3%
6 - 12	187	5%
12 - 20	195	5%
20 - 30	355	9%
30 - 45	707	19%
45 - 60	574	16%
60 - 90	704	19%
90 - 120	333	9%
120 - 150	174	5%
150 - 200	153	4%
>200	164	4%
Total général	3756	100%

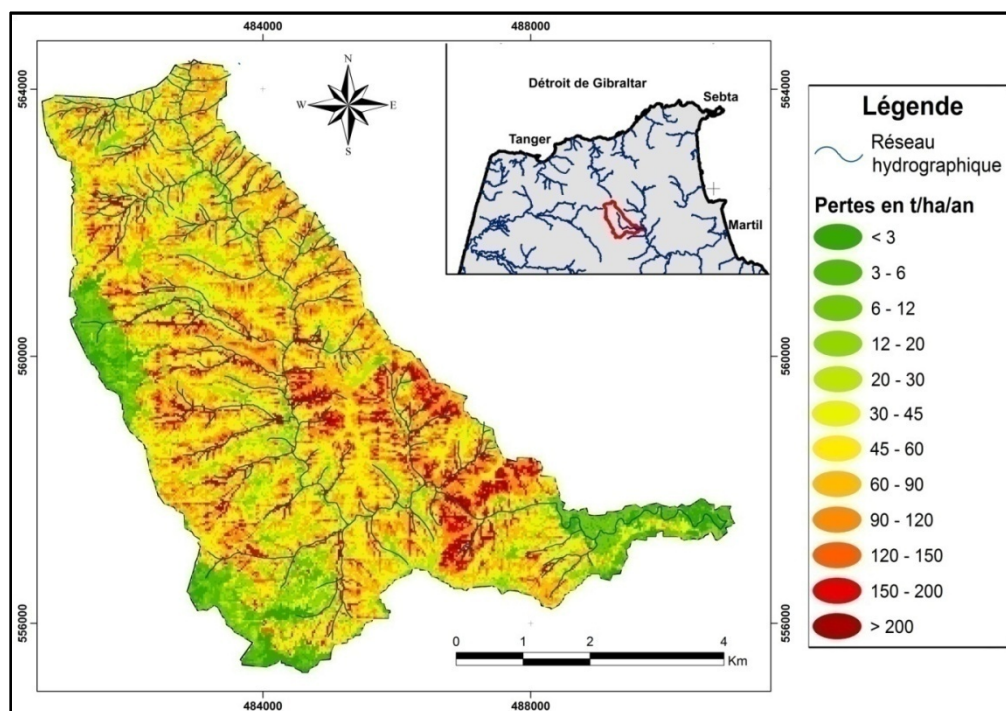


Figure 54 : Carte d'aléa d'érosion en t/ha/an du bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt.

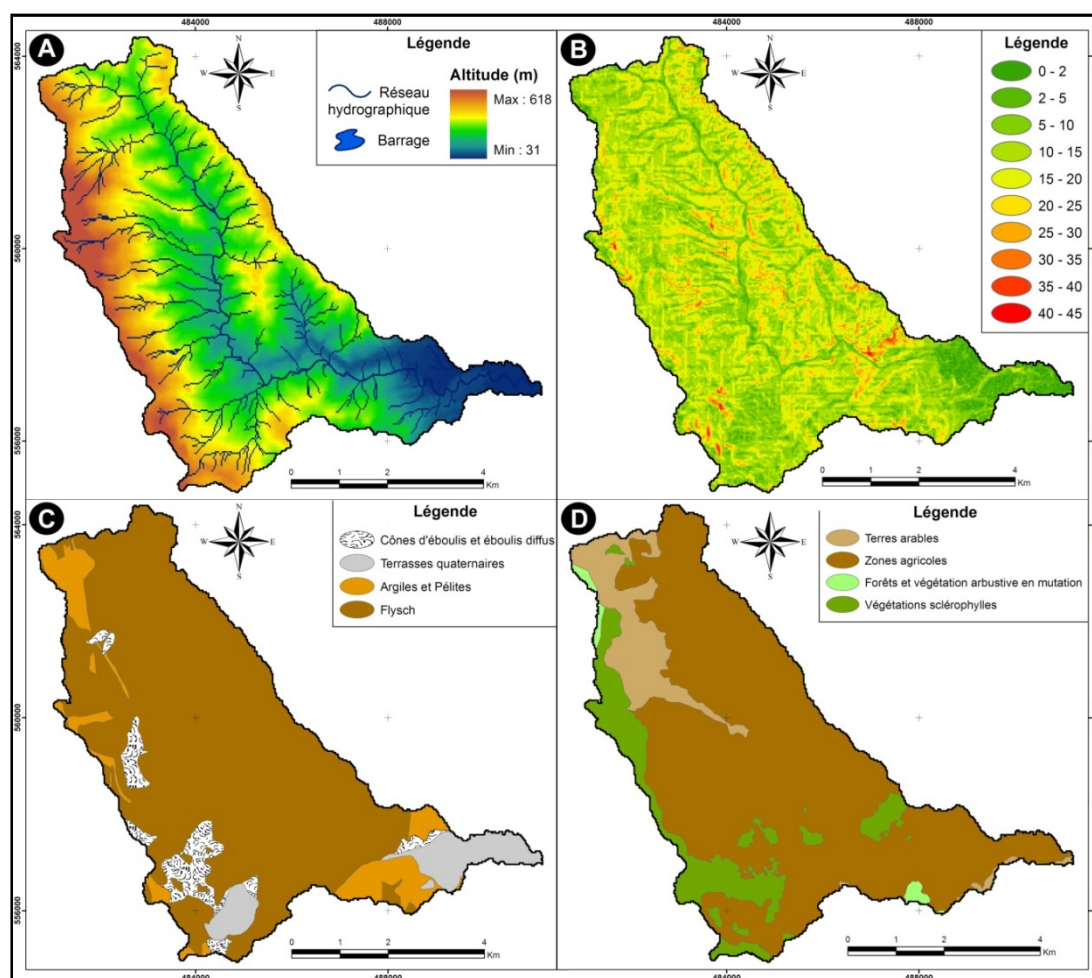


Figure 55 : Cartes des paramètres physiques du bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt (A : Altitudes ; B : Pentures ; C : Lithologie et D : Végétation)

IV. BASSIN VERSANT DU BARRAGE IBN BATOUTA

1. Cartographie thématique des facteurs de l'érosion

a. Facteur d'érosivité de la pluie (R)

Le facteur d'érosivité de pluies dans le bassin versant du barrage Ibn Battouta varie de 94 à 118,2, avec une diminution progressive du Sud du bassin vers le Nord Ouest, ce qui coïncide généralement avec la diminution de l'altitude en suivant le même axe (Fig. 56).

b. Facteur d'érodibilité du sol (K)

Les valeurs de l'érodibilité des terres varient de 0,38 à 0,85. On remarque une prédominance de la classe 0,54 – 0,6, couvrant 44,18% de la superficie totale du bassin et bien répartie spatialement, suivie par les classes 0,6 – 0,66, 0,66 – 0,72 et 0,48 – 0,54 qui couvrent respectivement 15,43%, 11,42% et 11,33% de la superficie du bassin (Tableau 31 ; Fig. 57).

Tableau 31 : Répartition des classes du facteur K dans le bassin versant du Barrage Ibn Batouta

Classes du facteur K	Superficie (ha)	%Superficie
0	485,71	2,72
0,38 - 0,42	390,13	2,19
0,42 - 0,48	1622,58	9,10
0,48 - 0,54	2019,53	11,33
0,54 - 0,60	7874,82	44,18
0,60 - 0,66	2750,72	15,43
0,66 - 0,72	2035,11	11,42
0,72 - 0,78	507,64	2,85
0,78 - 0,85	138,38	0,78
Total	17824,63	100 %

c. Facteur topographique (LS)

Le facteur topographique LS est généralement faible dans ce bassin versant par rapport aux autres bassins étudiés. Il y a une dominance des valeurs très faibles (0 – 5) qui couvrent plus des deux tiers de la superficie totale du bassin, suivie par les valeurs faibles de 5 à 20 qui couvrent environ 22% de la superficie totale. Le reste de la superficie est représenté par des valeurs supérieures à 20 (Tableau 32, Fig. 58).

Ces valeurs de LS ainsi que leur répartition reflètent clairement le relief et la topographie du bassin, qui montre clairement des altitudes basses et un relief légèrement accidenté et des pentes faibles couvrant de grandes superficies, représentées essentiellement par les plaines alluviales et les bords des affluents principaux du barrage. Les zones à relief accidenté et haut sont limitées dans la bande qui borne le bassin de l'Est et du Sud-Est.

Tableau 32 : Répartition des classes du facteur LS dans le bassin versant du Barrage Ibn Batouta

Classes du facteur LS	Superficie (ha)	% Superficie
0 - 3	11013,26	61,79
3 - 5	1185,49	6,65
5 - 10	2070,19	11,61
10 - 20	1827,97	10,26
> 20	1727,72	9,69
Total	17824,63	100%

d. Facteur du couvert végétal (C)

L'existence de plaines alluviales basses et planes couvrant de grandes superficies, rendent les terrains de ce bassin favorables à l'activité d'agriculture. Cette dernière occupe plus de 70% de la superficie totale des terres. La végétation naturelle d'importance plus ou moins notable est représenté par des végétations sclérophylles, qui couvrent 9,28% de la superficie et sont présents dans la bande Est et Sud-est du bassin, coïncidant ainsi avec les zones à relief haut (Tableau 33, Fig. 59).

Tableau 33 : Répartition des classes du facteur C dans le bassin versant du Barrage Ibn Batouta

Unités de végétation	Superficie (ha)	% Superficie	Facteur C
Cours et plans d'eau	585,11	3,28	0
Forêt de feuillus	17,58	0,10	0,001
Forêts et végétation arbustive en mutation	458,19	2,57	0,014
Pelouses, Landes et Broussailles	211,13	1,18	0,11
Terres arables	1551,72	8,71	0,14
Végétations sclérophylles	1653,94	9,28	0,01
Végétations sclérophylles dégradées	176,80	0,99	0,05
Zones agricoles	12620,75	70,81	0,16
Zones fortement à totalement dégradées	417,25	2,34	0,99
Zones urbaines	132,16	0,74	0
Total	17824,63	100%	

2. Carte des pertes en sol

La figure 61 représente la carte d'aléa d'érosion dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta. Elle montre des classes d'érosion allant de moins de 3 à plus de 200 T/ha/an avec une perte moyenne de l'ordre de 39,6 T/ha/an.

La première remarque observée sur cette carte est une légère prédominance des classes d'aléa très élevé, supérieur à 60 T/ha/an, qui affecte 32,29% des terres dans le bassin, suivies par les zones à risque moyen (de 12 à 30 T/ha/an) occupant 24,24 % du bassin. Les zones à aléa fort (de 30 à 60 T/ha/an) et très faible (<6 T/ha/an) couvrent respectivement 14,47% et 13,22% de

la superficie totale du bassin. Les zones à aléa faible, de 6 à 12 T/ha/an, couvrent 10,28% de la superficie totale du bassin (Tableau 34).

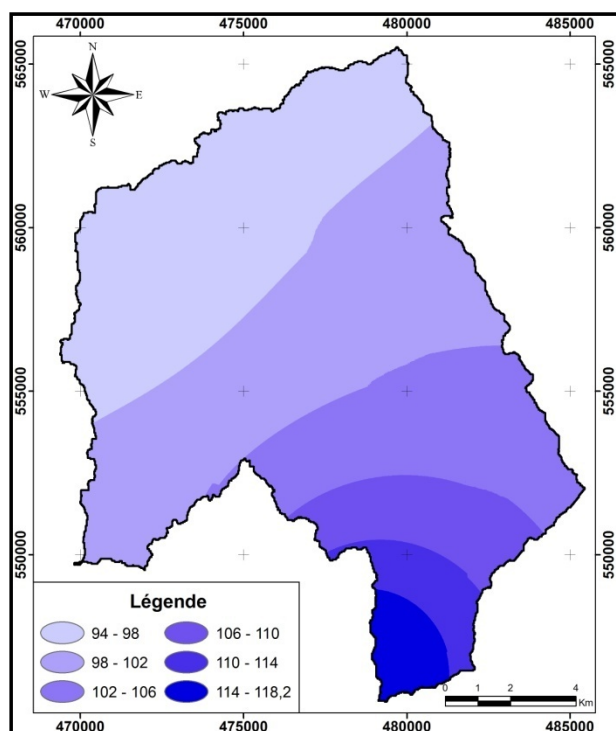


Figure 56 : Carte de répartition du facteur R dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta.

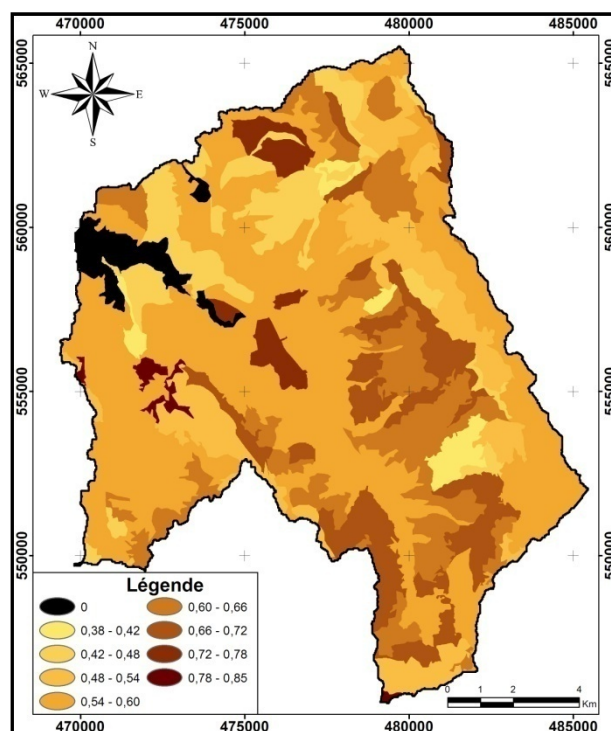


Figure 57 : Carte de répartition du facteur K dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta.

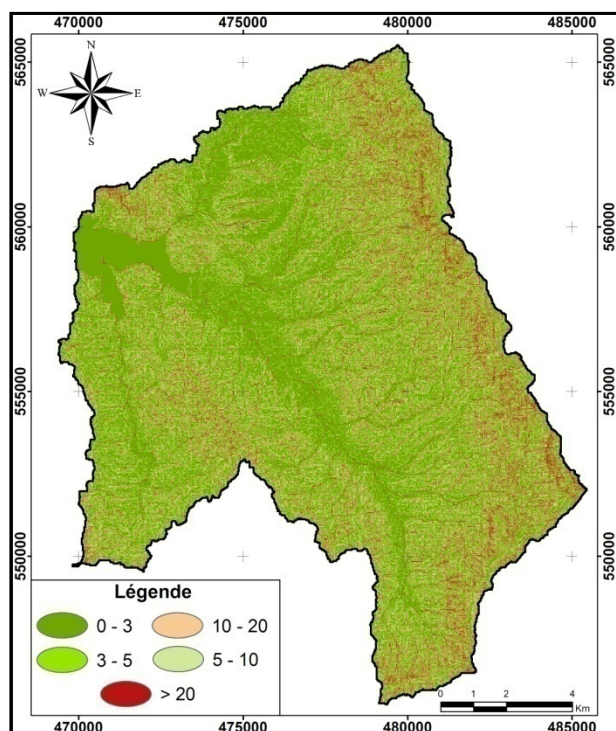


Figure 58 : Carte de répartition du facteur LS dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta.

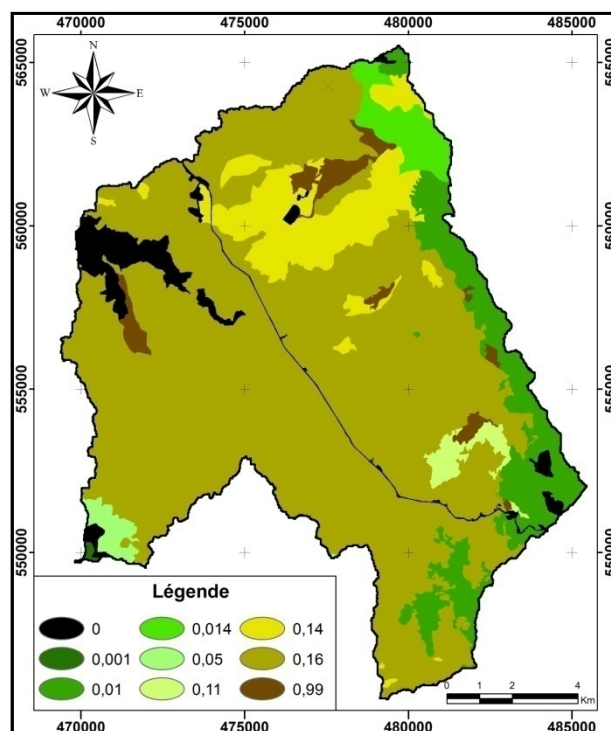


Figure 59 : Carte de répartition du facteur C dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta.

Tableau 34 : Répartition des classes de pertes en sols (en T/ha/an) dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta

Pertes en sol (t/ha/an)	Superficie (ha)	% Superficie
0	979,35	5,49
< 3	863,45	4,84
3 - 6	1494,42	8,38
6 - 12	1832,63	10,28
12 - 20	2957,33	16,59
20 - 30	1363,36	7,65
30 - 45	1497,04	8,40
45 - 60	1081,14	6,07
60 - 90	1422,58	7,98
90 - 120	923,42	5,18
120 - 150	609,73	3,42
150 - 200	640,58	3,59
> 200	2159,59	12,12
Total	17824,63	100%

Par référence aux cartes des différents facteurs de l'érosion, une concordance nette existe entre la répartition des différentes classes d'aléa d'érosion et la répartition des classes de valeurs des différents facteurs (Figures 56, 57, 58 et 59) et les cartes des paramètres d'entrée de l'érosion, à savoir l'altitude, la pente, le couvert végétal et la lithologie (Fig. 60) à quelques exceptions discutables.

Les zones où les valeurs d'érosion sont supérieures à 150 T/ha/an se trouvent exactement sur des terres essentiellement argilo-péltiques (Fig. 60C), nues ou à couvert végétal fortement dégradé (Fig. 60D) avec des altitudes et des pentes moyennes (Fig. 60 A et B).

Au centre du bassin, on remarque une dispersion des classes d'érosion faibles dans les plaines à moyennes en s'éloignant vers les extrémités, localement à risque fort, se développant sur un relief bas à très bas et non accidenté, qui s'accroît vers les bords du bassin (Fig. 60 A et B). Les terrains sont formés essentiellement par des terrasses fluviales et des argiles et pélites, sur lesquelles se développe une activité agricole intense. Dans ce secteur, se montre bien l'influence du facteur topographique dans la réduction du risque d'érosion même si les autres conditions sont favorables.

Dans la bordure orientale et sud-orientale du bassin, on observe des valeurs d'aléa les plus faibles sur des secteurs à érodibilité des terres moyenne à relativement forte (formation de type flysch, Fig. 60 C) et un facteur topographique fort à très fort, correspondant à des altitudes élevées (Fig. 60 A) et des pentes raides (Fig. 60B). Cette exception, voire cette contradiction à l'explication donnée pour l'exemple ci-dessus, est due à l'existence d'un facteur C faible, représenté essentiellement par une dominance de végétations sclérophylles, ce qui montre le rôle que peut jouer la couverture végétale naturelle pour contrer l'érosion hydrique.

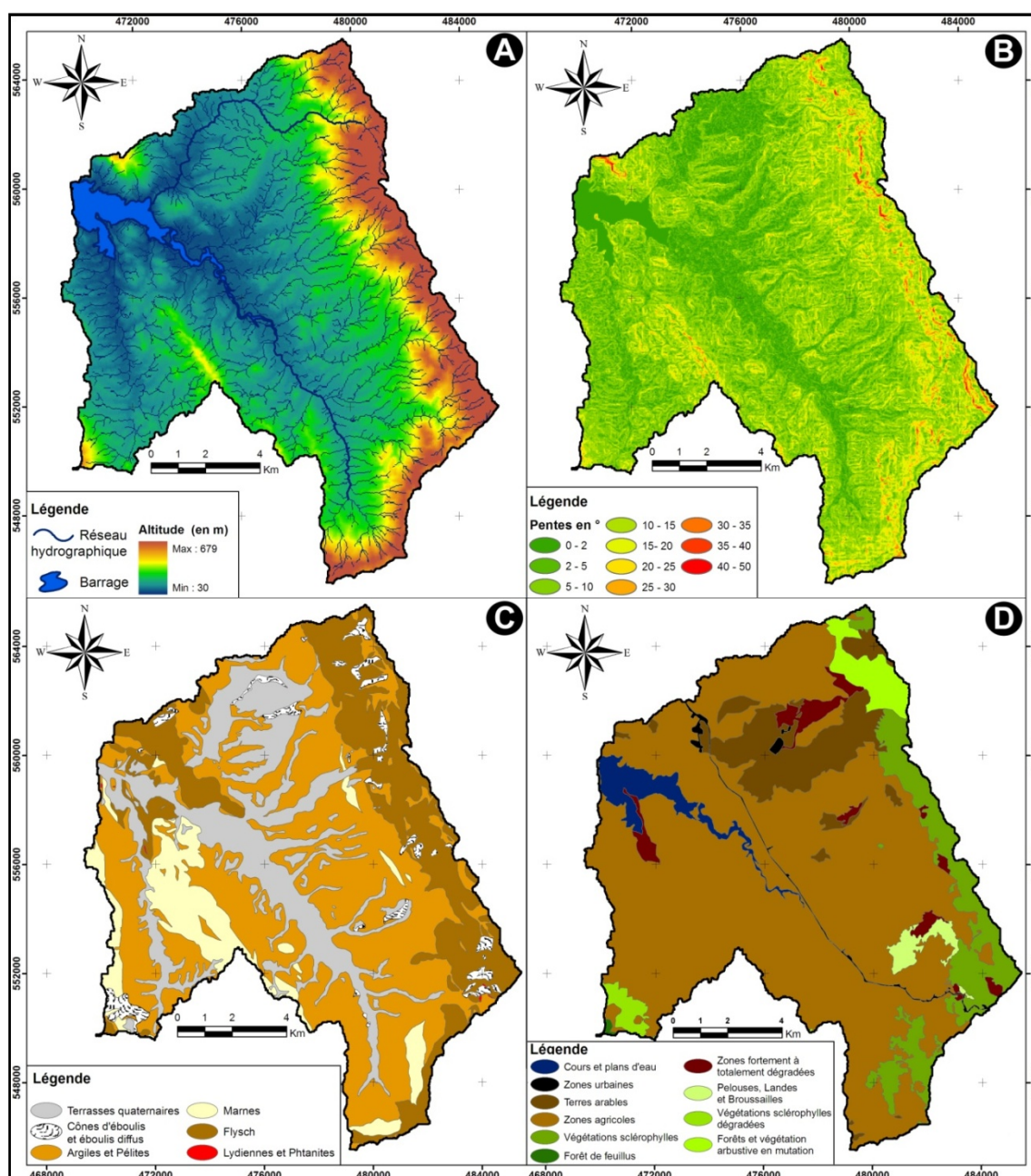


Figure 60 : Cartes des paramètres physiques du bassin versant du barrage Ibn Batouta (A : Altitudes ; B : Pentes ; C : Lithologie et D : Végétation)

Deux autres exceptions locales se distinguent dans ce bassin versant. Au Sud du bassin, l'existence d'une formation marneuse sur un terrain élevé et à pente forte rend les terrains très vulnérables à l'érosion hydrique, ce qui n'est pas le cas. La présence d'une végétation sclérophylle dense a constitué une protection contre l'action érosive des pluies.

La répartition de l'érosion dans le bassin versant coïncide généralement avec la répartition des classes de sensibilité des sols à l'érosion (Fig. 61).

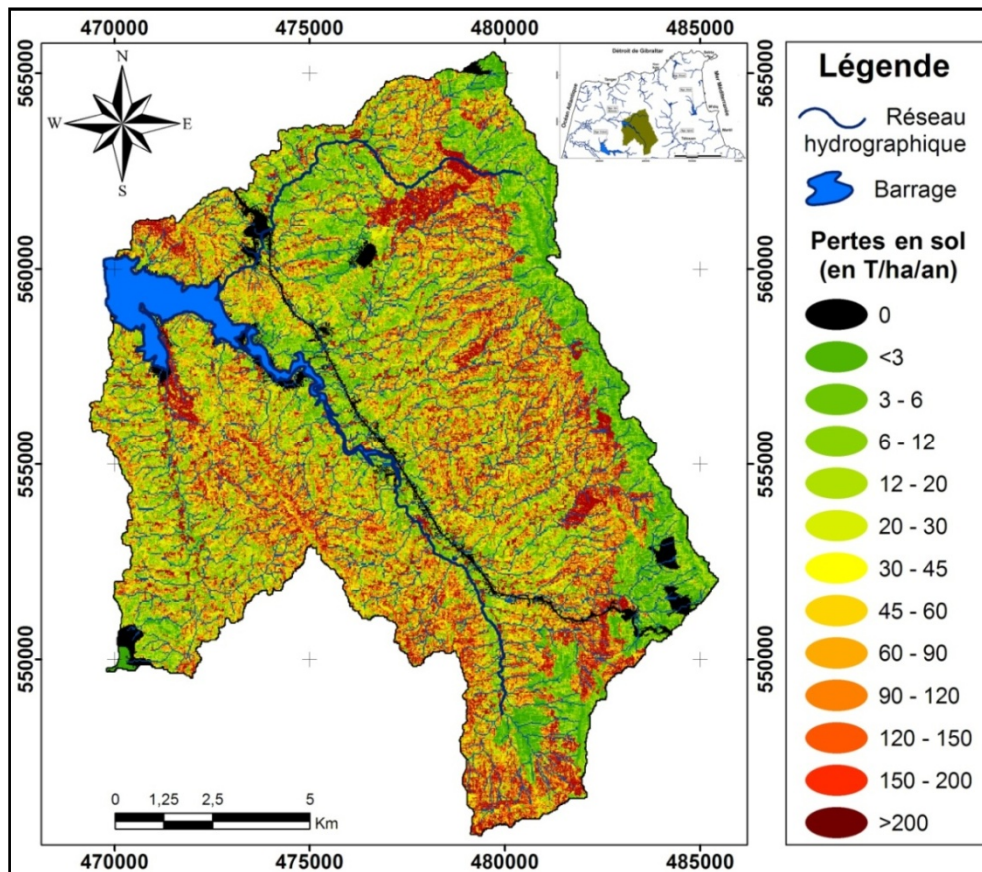


Figure 61 : Pertes en sols (en T/ha/an) dans le bassin versant du barrage Ibn Batouta.

V. BASSIN VERSANT DE L'OUED ALIANE

1. Cartographie thématique des facteurs de l'érosion

a. Facteur d'érosivité de pluie (R)

Les valeurs du facteur R du bassin versant varient de 94,8 à 98,4 (Fig.62). La carte montre généralement une augmentation de ces valeurs depuis le Nord vers le Sud Est du bassin. Les valeurs maximales correspondent aux hautes altitudes.

b. Facteur d'érodibilité d sol (K)

La carte du facteur K, obtenue de la même manière que les précédentes, est classée en 8 unités cartographiques. Les valeurs varient de 0,37 à 0,78 avec la prédominance de la classe 0,72-0,78 en occupant 27,88% de la superficie total du bassin, suivie par la classe 0,42 -0,52 et celle de 0,52-0,57 couvrant successivement 24,31% et 22,31% de la superficie. Les autres classes se repartent sur le reste du bassin, chacun avec son pourcentage par rapport à la totalité du bassin (Tableau 35). Une lecture générale des différentes cartes entrant dans la réalisation de la carte du facteur K montre que le bassin se caractérise par les formations des flysch qui occupent la plus grande superficie, ce qui rend ces zones plus susceptibles à être érodées surtout qu'elles sont couvertes généralement par les zones agricoles, et donc la présence des différentes classes du facteur K revient aux différentes classes d'altitudes et de pente réparties dans la zone (Fig. 63).

Tableau 35 : Répartition des classes du facteur K dans le bassin versant de l'oued Aliane.

Classes du facteur K	Superficie (ha)	% Superficie
0	197,70	1,63
0.37 - 0.42	1179,43	9,72
0.42 - 0.47	570,65	4,70
0.47 - 0.52	2951,44	24,31
0.52 - 0.57	2673,85	22,03
0.57 - 0.62	737,43	6,07
0.62 - 0.67	171,67	1,41
0.67 - 0.72	273,06	2,25
0.72 - 0.78	3383,82	27,88
Total	12139,06	100%

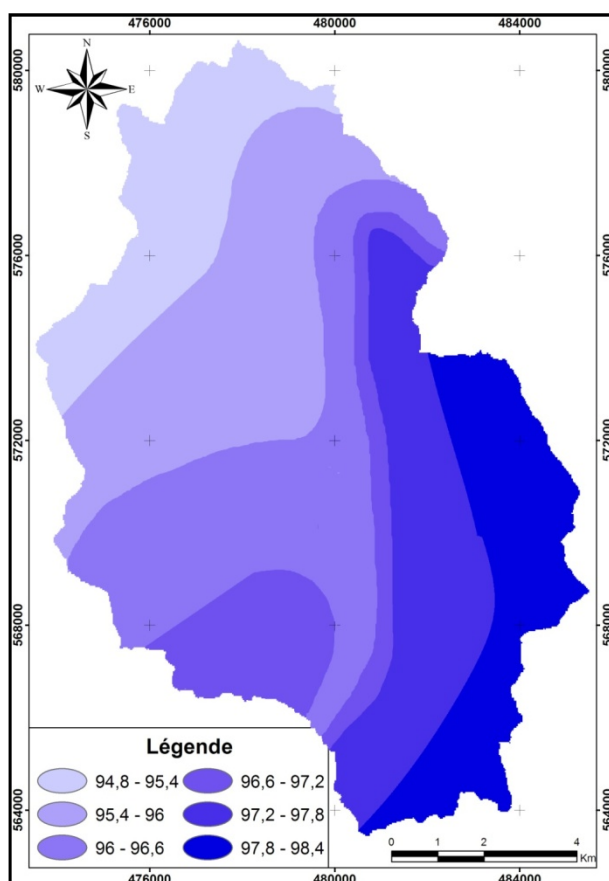


Figure 62 : Carte du facteur climatique R dans le bassin versant de l'oued Aliane.

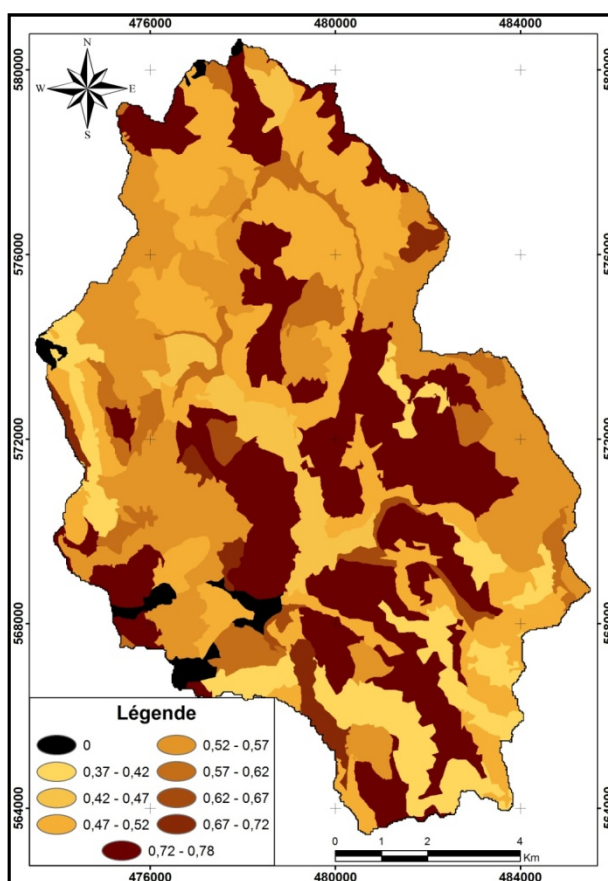


Figure 63 : Carte du facteur d'érodibilité des sols dans le bassin versant de l'oued Aliane.

c. Facteur topographique (LS)

La carte du facteur LS présente des valeurs variant de 0 à plus que 80 (Fig. 64). La classe la plus faible est celle la plus dominante et couvre plus que la moitié de la superficie (Tableau 36). Les classes faibles et moyennes (5-10 ; 10-20) occupent presque les mêmes superficies.

Les valeurs maximales sont très limitées et ne couvrent que 3,13%. Les zones présentant des valeurs minimales, dites très faibles, correspondent surtout aux bords des oueds et cours d'eau ainsi qu'aux pentes et altitudes faibles. Les autres secteurs présentent généralement des valeurs proportionnelles aux celles présentées dans les deux cartes d'altitude et de pente.

Tableau 36 : Répartition des classes du facteur LS dans le bassin versant de l'oued Aliane.

Classes du facteur LS	Superficie (ha)	% Superficie
0 - 3	6245,28	51,45
3 - 5	796,88	6,56
5 - 10	1583,48	13,04
10 - 20	1662,24	13,69
20 - 35	1007,12	8,30
35 - 55	463,69	3,82
55 - 80	200,86	1,65
>80	179,52	1,48
Total	12139,06	100%

d. Facteur du couvert végétal (C)

La figure ci-dessous (Fig. 65) présente 11 classes du facteur C qui varient entre 0 sur les zones urbaines, plages, sables et dunes et 0,99 sur les zones fortement à totalement dégradées. La valeur 0,16 correspond à la classe la plus dominante couvrant plus que la moitié de la superficie (62,59%), suivie par la valeur 0,01 attribuée aux végétations sclérophylles avec une superficie de 11,46% par rapport à la totalité du bassin (Tableau 37). Les autres valeurs, chacune correspond à sa formation de végétation appropriée.

Tableau 37 : Répartition des classes du facteur C dans le bassin versant de l'oued Aliane.

Unité de Végétation	Superficie (ha)	% Superficie	Facteur C
Forêt de feuillus	72,41	0,60	0,001
Forêt de feuillus dégradée	152,32	1,25	0,02
Forêts et végétation arbustive en mutation	152,52	1,26	0,014
Pelouses, Landes et Broussailles	162,22	1,34	0,11
Plages, sables, dunes	4,39	0,04	0
Terres arables	1214,06	10,00	0,14
Végétations sclérophylles	1391,57	11,46	0,01
Végétations sclérophylles dégradées	798,66	6,58	0,05
Zones agricoles	7597,61	62,59	0,16
Zones fortement ou totalement dégradées	346,30	2,85	0,99
Zones urbaines	247,00	2,03	0
Total	12139,06	100%	

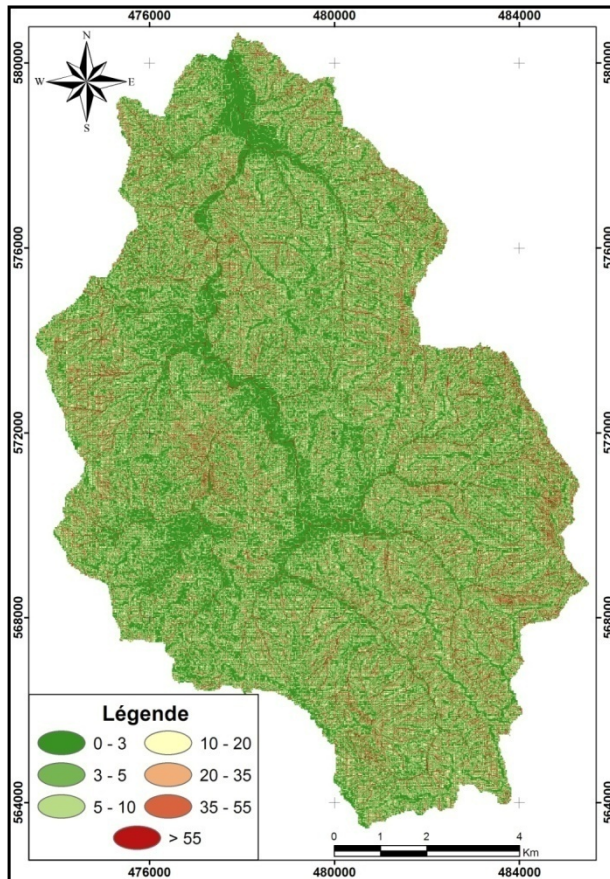


Figure 64 : Carte du facteur topographique LS dans le bassin versant de l'oued Aliane.

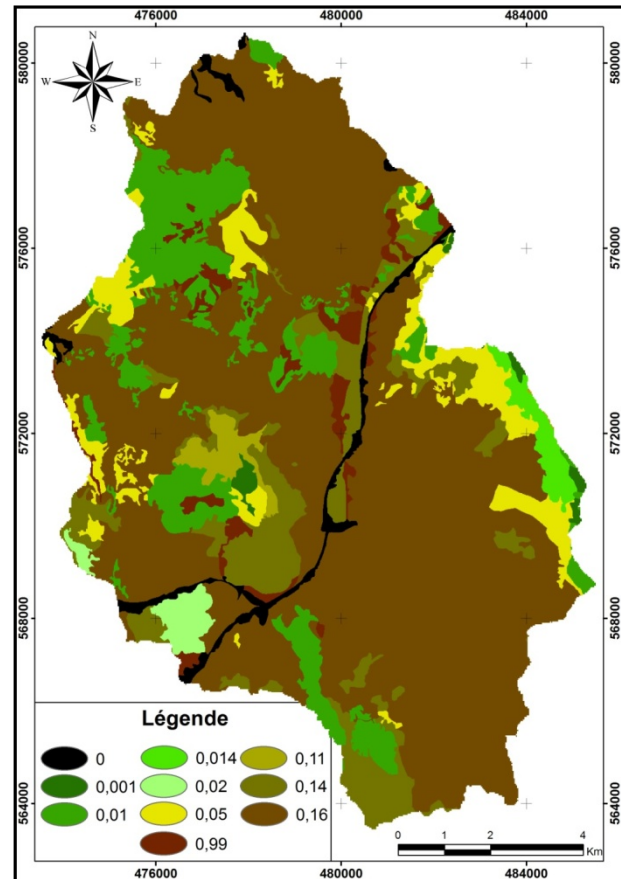


Figure 65 : Carte du facteur couvert végétal C dans le bassin versant de l'oued Aliane.

2. Carte des pertes en sol

Le résultat de la combinaison des quatre facteurs décrits ci-dessus est une carte quantitative d'aléa d'érosion présentant des pertes en sols qui varient entre des valeurs proches de 3 à celles supérieures à 200 t/ha/an (Tableau 38 et Fig. 66). La carte a été classée en 13 classes avec une perte moyenne de 43,5 t/ha/an. Le tableau 38 montre que la classe d'érosion très forte (> 60 t/ha/an) occupe presque la moitié de la superficie totale du bassin (46,51%) et se localise généralement au Nord Est, Sud Est et un peu au centre ; ce qui a rendu la perte moyenne dans la zone relativement élevée. Le reste du bassin est occupé par les différentes classes réparties, chacune selon leur superficie. La classe très faible (<6t/ha/an) et faible (6-12t/ha/an) couvrent successivement 16,22% 7,36% de la superficie et caractérisent essentiellement les secteurs Nord Ouest et Sud Ouest de la zone. La classe d'érosion moyenne (12-30t/ha/an) occupant 14,51% et celle d'érosion forte (30-60t/ha/an), avec une superficie de 15,39%, se localisent généralement sur les secteurs Nord Est, Sud Est et Sud Ouest du bassin.

La comparaison de la carte d'aléa avec les différentes cartes des paramètres de l'érosion (Fig. 67), permet d'en tirer les mêmes remarques que dans les bassins versants précédents. Dans ce bassin, dont les formations lithologiques qui les constituent sont toutes caractérisées par une friabilité moyenne à élevée (Fig. 67C), on observe que la répartition des classes d'érosion ne coïncident pas pratiquement avec l'altitude et la pente (Fig. 67A et B). Ces deux paramètres atteignent leur maximum sur les bordures externes du bassin. Toutefois, une superposition

nette existe entre la carte d'occupation du sol (Fig. 67 D) et la carte des pertes en sols : des zones à végétation naturelle, surtout les forêts et les végétations sclérophylles, présentent un minimum d'érosion tandis que les zones nues ou fortement dégradées correspondent aux secteurs les plus affectés par l'érosion.

Tableau 38 : Répartition des classes des pertes en sol (en T/ha/an) dans le bassin versant de l'oued Aliane.

Pertes en sol (t/ha/an)	Superficie (ha)	% superficie
0	437,14	3,60
<3	819,04	6,75
3 - 6	712,58	5,87
6 - 12	893,74	7,36
12 - 20	898,14	7,40
20 - 30	863,39	7,11
30 - 45	1028,62	8,47
45 - 60	840,44	6,92
60 - 90	1242,85	10,24
90 - 120	860,14	7,09
120 - 150	618,23	5,09
150 - 200	691,01	5,69
>200	2234,06	18,40
Total	12139,37	100%

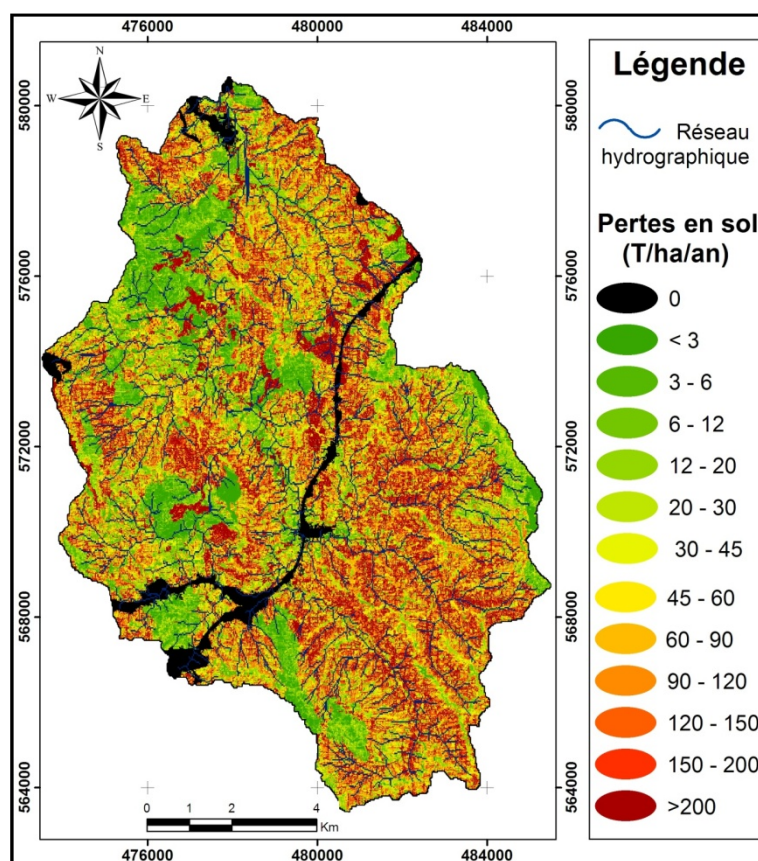


Figure 66 : Carte de pertes potentielles en sol dans le bassin versant de l'oued Aliane.

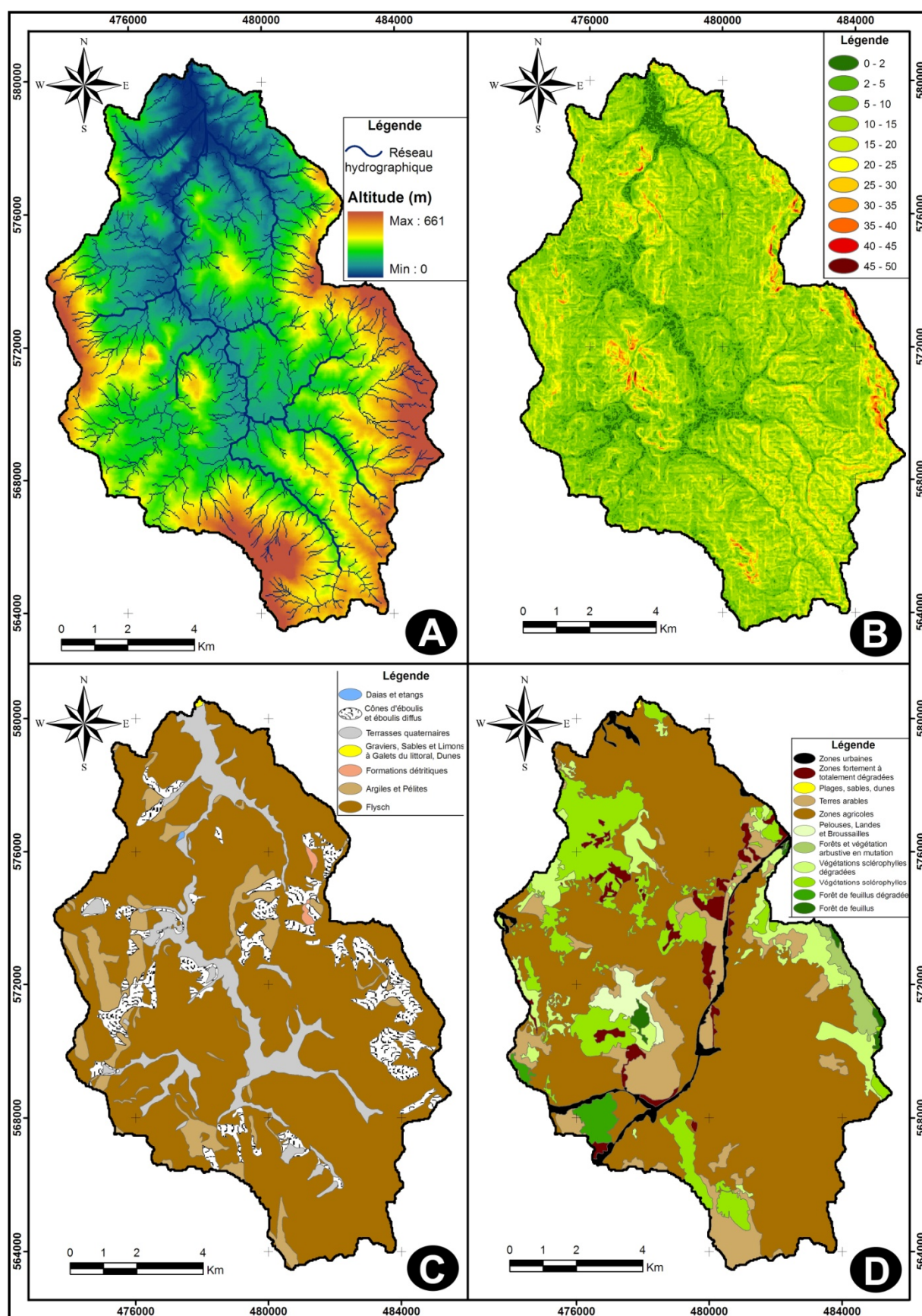


Figure 67 : Cartes des paramètres physiques du bassin versant de l'oued Aliane (A : Altitudes ; B : Pentas ; C : Lithologie et D : Végétation).

VI. BASSIN VERSANT DU BARRAGE AJRAS

1. Cartographie thématique des facteurs de l'érosion

a. Facteur d'érosivité de pluie (R)

La carte d'érosivité de pluie R présente des valeurs échelonnant entre 88 et 113 avec une augmentation progressive de l'Est vers l'Ouest (Fig. 68). Ces valeurs coïncident généralement avec la répartition des classes d'altitude.

b. Facteur d'érodibilité du sol (K)

La carte d'érodibilité du facteur K dans le bassin versant (Fig. 69) présente des valeurs variant de 0,37 et 0,79 avec la dominance de la classe 0,51-0,58 avec 34,21% de la superficie totale du bassin, suivie par la classe 0,37-0,44 occupant 20,56% de la surface. Les classes 0,44-0,51 ; 0,58-0,65 ; 0,65-0,72 ; 0,72-0,79 occupent successivement 16,70%, 13,46%, 7,01% et 6,82 (Tableau 39).

La classe d'érodibilité forte (0,65-0,72), en se référant à la carte de lithologie, correspond aux formations d'argiles et pélites, ce qui reflète cette très forte érodibilité. Pour la classe 0,37-0,44, malgré la présence des formations des terrasses quaternaires sur des zones agricoles, qui sont en fait des zones érodables, on remarque cette faible érodibilité, ce qui est expliqué par le fait de la présence des classes de pente et d'altitude faible dans ces secteurs. Les autres classes fortes 0,51-0,72, se présentent sur des formations des flysh et forêts de feuillus dégradées, des pentes et des altitudes fortes, ce qui est expliqué par la sensibilité de ces formations à l'action érosive.

Tableau 39 : Répartition des classes du facteur K dans le bassin versant du barrage Ajras.

Classes du facteur K	Superficie (ha)	% Superficie
0	47,01	1,24
0,37 – 0,44	778,60	20,56
0,44 - 0,51	632,58	16,70
0,51 – 0,58	1295,88	34,21
0,58 – 0,65	509,98	13,46
0,65 – 0,72	265,46	7,01
0,72 – 0,79	258,227	6,82
Total	3787,73	100%

c. Facteur topographique (LS)

La carte du facteur topographique du bassin est classée en 8 classes avec la dominance, comme les autres bassins précédents, de la classe 0-3, on occupant plus que la moitié de la superficie totale du bassin (51,09%) (Fig. 70, Tableau 40). Les classes moyennes 5-10, 10-20 occupent successivement 11,89% et 13,44 % de la superficie totale du bassin. Le reste du bassin se distribue pour les autres classes avec des superficies mineures. Généralement, la répartition des classes du facteur LS est fort proportionnelle avec la carte de pente.

Tableau 40 : Répartition des classes du facteur LS dans le bassin versant du barrage Ajras.

Classes de LS	Superficie (ha)	% Superficie
0 - 3	1935,06	51,09
3 - 5	210,74	5,56
5 - 10	450,38	11,89
10 - 20	509,03	13,44
20 - 35	341,96	9,03
35 - 55	179,97	4,75
55 - 80	83,76	2,21
>80	76,82	2,03
Total	3787,73	100%

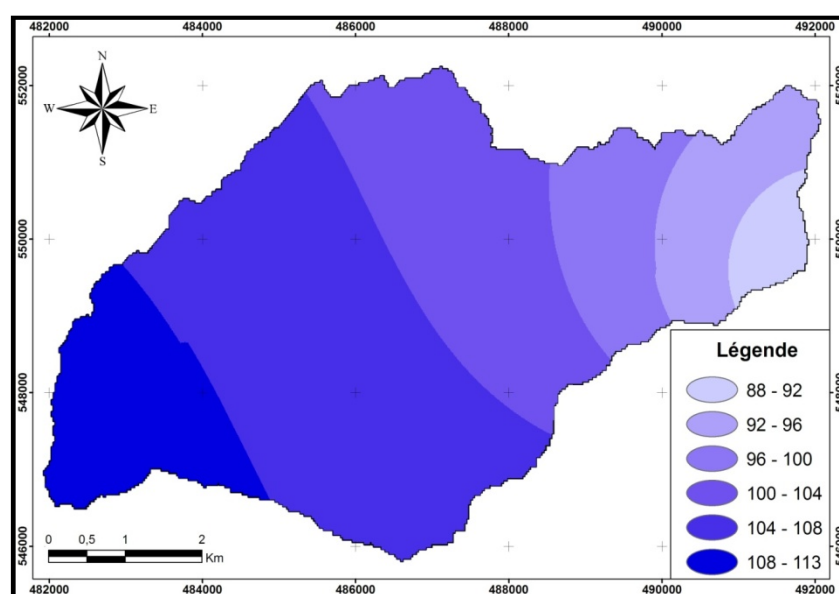


Figure 68 : Carte du facteur d'érosivité de pluie R dans le bassin versant du barrage Ajras.

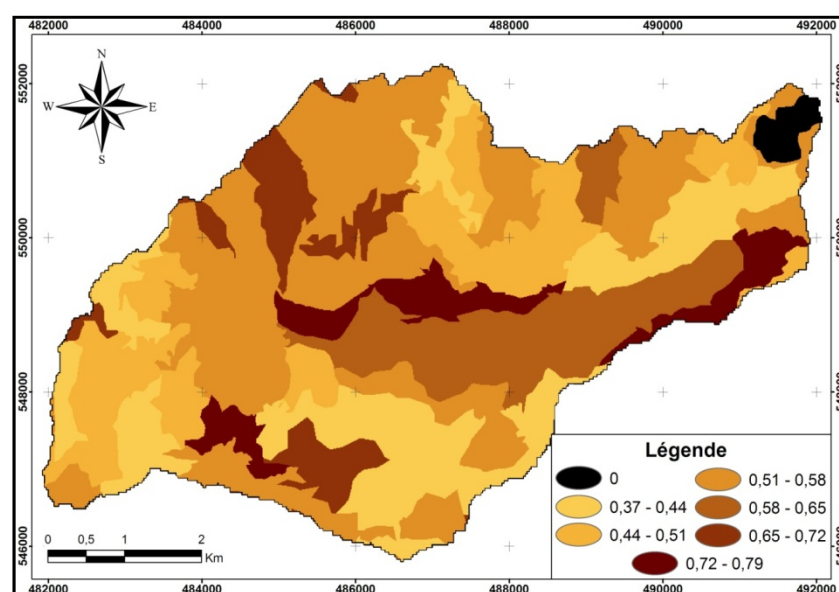


Figure 69 : Carte du facteur d'érodibilité des sols dans le bassin versant du barrage Ajras

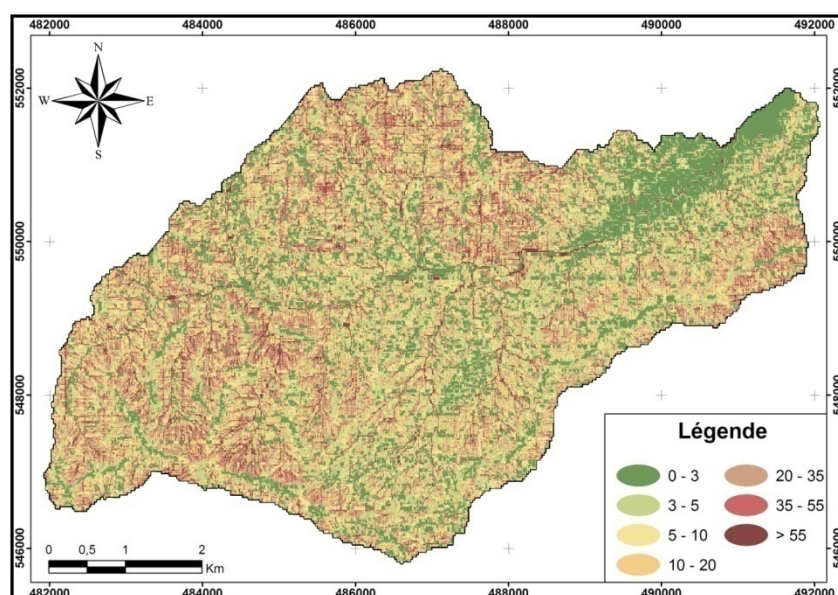


Figure 70 : Carte du facteur topographique LS dans le bassin versant du barrage Ajras.

d. Facteur du couvert végétal (C)

Le facteur du couvert végétal dans le bassin du barrage Ajras est attribué pour chaque type de végétation et il varie de 0 sur les cours et plans d'eau et les zones urbaines à 0,99 pour les zones totalement dégradées (Tableau 41 ; Fig. 71). Les zones agricoles, couvrent la plus grande superficie (53,08%), suivie par les formations de végétations sclérophylles avec une superficie de 36,41% par rapport à la totalité du bassin. Les autres classes, avec leurs facteurs C, n'occupent que 10,51% de la superficie.

Tableau 41 : Répartition des classes du facteur C dans le bassin versant du barrage Ajras.

Classes de végétation	Superficie (ha)	% superficie	Facteur C
Cours et plans d'eau	46,77	1,23	0
Forêt de feuillus dégradée	49,31	1,30	0,02
Forêts et végétation arbustive en mutation	12,25	0,32	0,014
Pelouses, Landes et Broussailles	40,88	1,08	0,11
Terres arables	25,10	0,66	0,14
Végétation sclérophylles	1378,94	36,41	0,01
Zones agricoles	2010,42	53,08	0,16
Zones fortement à totalement dégradées	175,26	4,63	0,99
Zones urbaines	48,80	1,29	0
Total	3787,73	100%	

2. La carte des pertes en sol

Le tableau 42 et la figure 73 représentent la répartition spatiale des différentes classes de pertes en sols dans le bassin versant du barrage Ajras, dont la moyenne des pertes en sols par unité spatiale est de 41,7 T/ha/an.

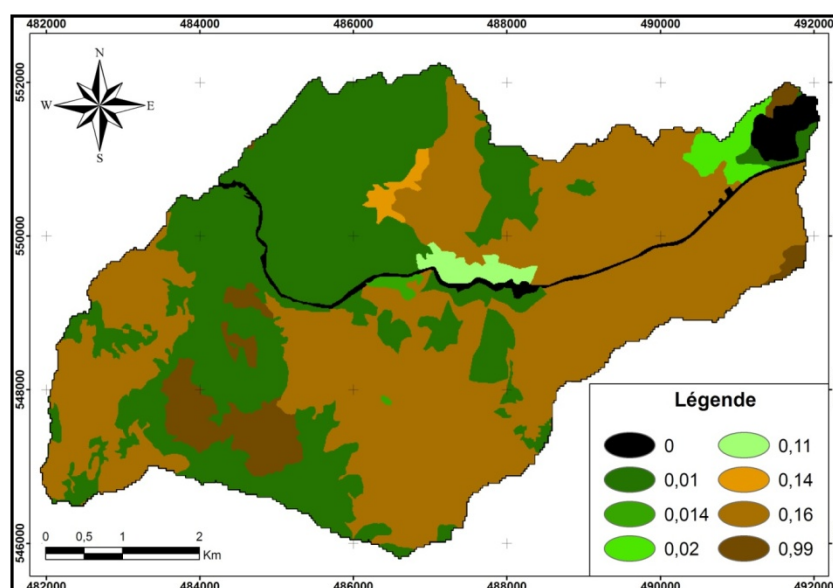


Tableau 71 : Répartition des classes du facteur C dans le bassin versant du barrage Ajras.

Les secteurs qui présentent des valeurs d'érosion très élevées (> 60 T/ha/an) occupent 37,59 % de la superficie totale du bassin, suivie par la classe d'érosion faible (de 3 à 12 T/ha/an) qui couvre 19,7% du bassin puis par les zones où l'érosion est moyenne (entre 12 et 30 T/ha/an) avec 15,33% de la superficie du bassin. Les zones à risque d'érosion faible et les zones où le risque est élevé représentent respectivement 12,28% et 11,78% de la superficie du bassin.

Tableau 42 : Répartition des classes des pertes en sol (en T/ha/an) dans le bassin versant du barrage Ajras.

Pertes en sol (t/ha/an)	Superficie (ha)	% Superficie
0	126,46	3,34
< 3	464,95	12,28
3 - 6	331,88	8,76
6 - 12	414,46	10,94
12 - 20	333,81	8,81
20 - 30	246,98	6,52
30 - 45	258,92	6,84
45 - 60	186,94	4,94
60- 90	272,53	7,20
90 - 120	195,80	5,17
120 - 150	143,44	3,79
150 - 200	169,13	4,47
>200	642,43	16,96
Total	3787,73	100%

Pour une meilleur compréhension de la carte et une bonne discussion de différentes classes des pertes en sols dans ce bassin ainsi que leur répartition spatiale, on s'est référé à la figure 72 qui représente les cartes de 4 paramètres du milieu naturel, qui sont l'altitude, la pente, la lithologie et l'occupation du sol.

Le bassin du barrage Ajras est formé pratiquement en toute sa totalité par des formations dont la vulnérabilité à l'érosion est supérieure, à savoir les flysch, les argiles, les pélites, les éboulis et sédiments de plaines alluviales (Fig. 72 C), ce qui est favorable à l'érosion si on ajoute le fait qu'une grande superficie du bassin est occupée par une activité agricole intense (Fig. 72 D). Dans ces secteurs, l'érosion est moyenne à élevée.

Des zones limitées montrant un risque d'érosion très élevée, voir énorme, correspondent à des zones nues ou fortement dégradées sur des pentes fortes à très fortes (Fig. 72 B et D). Cet effet de l'occupation du sol se distingue également dans les secteurs où le couvert végétal est conservé, dont on observe un risque d'érosion faible à très faible, malgré l'existence de pentes fortes et d'altitudes élevées.

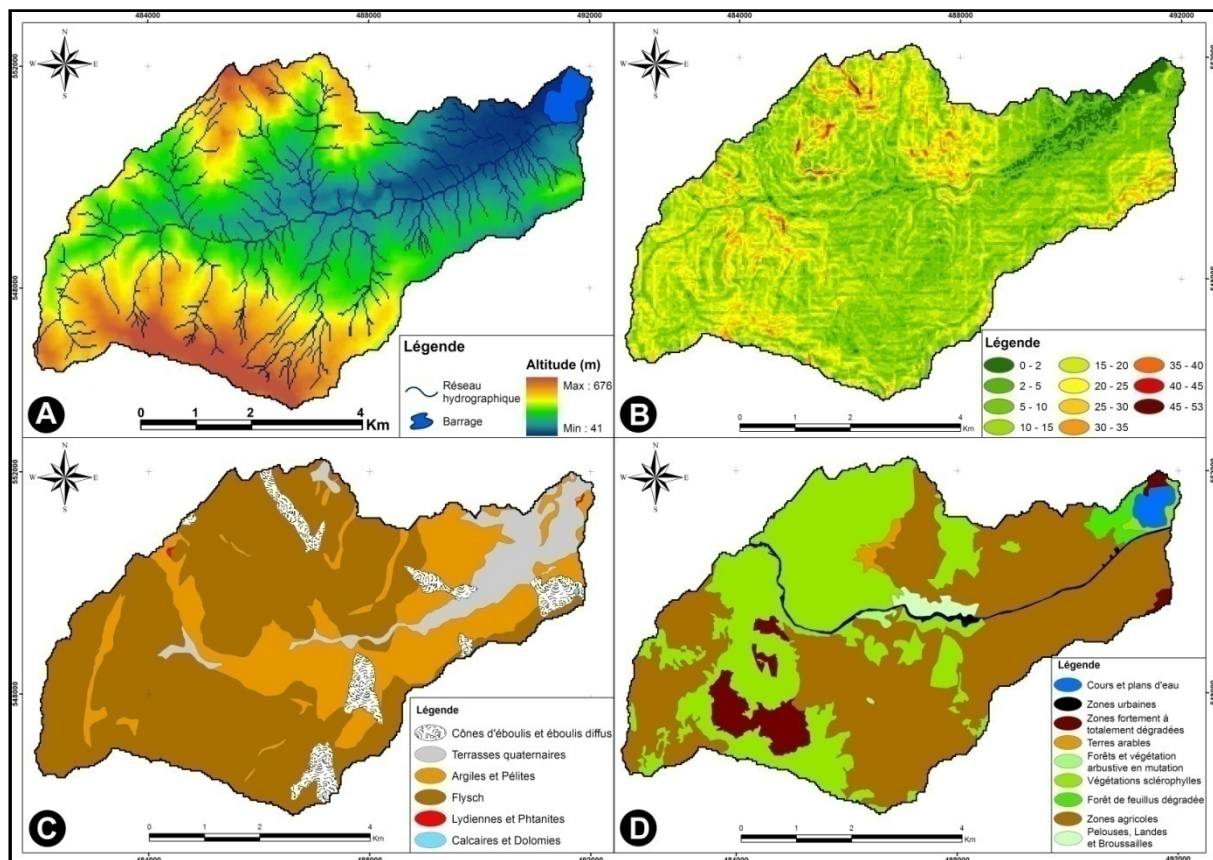


Figure 72 : Cartes des paramètres physiques du bassin versant du Barrage Ajras.
(A : Altitudes ; B : Pentes ; C : Lithologie et D : Végétation).

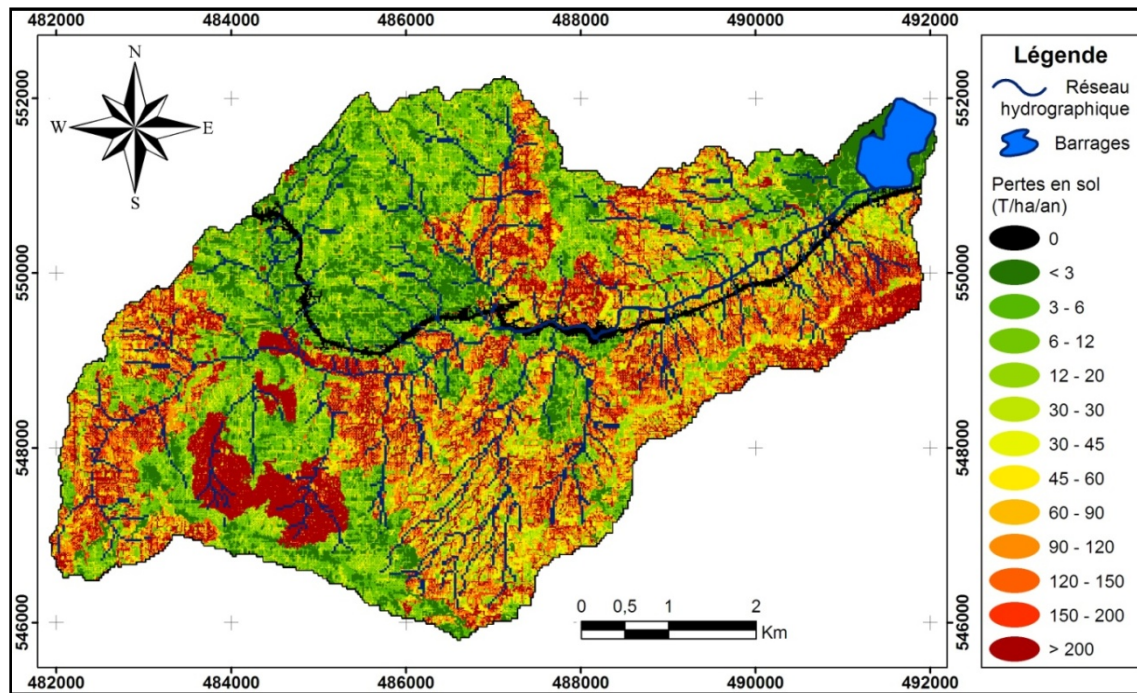


Figure 73 : Carte de risque potentiel d'érosion dans le bassin versant du barrage Ajras.

VII. CONCLUSION

La cartographie des pertes en sols dans les six bassins versants étudiés a mis en exergue l'état de l'érosion des sols dans la région. La répartition des classes de pertes en sols est similaire à la répartition des classes de sensibilité des sols obtenue par l'approche qualitative.

Les moyennes des pertes en sols sont en générale modérées à fortes dans les six bassins versants et sont de ce fait acceptables et raisonnables si l'on compare avec d'autres résultats obtenus dans d'autres bassins appartenant à la région, au Rif ou encore à des études à l'échelle du pourtour méditerranéen.

C'est le cas par exemple de l'étude effectué sur les zones prérfaines (MAMVA, 1995 ; Ben Ali, 2000) et qui a révélé que la dégradation spécifique dépasse les 20T/ha/an et varie de 10 à 20 T/ha/an. Selon Heusch (1990), 60 % des terres érodées au Maroc se situent dans la région Rifaine, qui au contraire, ne couvre que 6% de la superficie totale du pays. Ceci est le résultat de l'interaction de plusieurs facteurs naturels (forte pluviométrie, roches tendres, relief accidenté) et humaines (dégradation des forêts, forte occupation humaine).

En 1996, Lalandais et Fabre estimaient une érosion variant de 18 à 109 t/ha/an, soit une moyenne de 60 t/ha/an, dans le bassin versant de l'oued Ourgha au Préfif. Gartet (1994) a estimé une dégradation spécifique de 1,4 t/ha/an en année sèche passant à 35 t/ha/an en année humide dans le bassin versant de l'oued Leben. Lors d'une étude plus récente, Gartet et al. (2005) ont évalué la dégradation spécifique dans le même basin à 1715 m³/k²/an. En amont du barrage Ibn Battouta dans le Rif occidental, Merzouk et al. (1996) ont estimé une dégradation spécifique de l'ordre de 39 t/ha/an, ce qui correspond à un envasement annuel du barrage de l'ordre de 500.000 m³, soit une diminution de 10% de sa capacité de rétention (Belkheiri, 1987).

L'étude menée par Abdellaloui et al., (2002) sur le barrage Saboun (Rif occidental) a révélé des valeurs de dégradation de l'ordre de 37 t/ha/an, une moyenne qui ne traduit pas la situation réelle puisque ce sont des valeurs estimées à partir des taux d'envasement du barrage, et par suite, ne tenaient pas en compte les sédiments évacués lors de déversements et de vidange de fond ainsi que les sédiments sédimentés en amont.

Dans le bassin versant du barrage Nakhla, la dégradation spécifique est de 38 t/ha/an en moyenne selon Aït Brahim et al. (2003). Ces derniers constatent que les valeurs obtenues par le modèle utilisé (USLE) sont très inférieures aux réalités de terrain, puisque ce modèle ne prend pas en compte plusieurs formes d'érosion répandues dans la région du Rif, tel que les glissements de terrain.

Le bassin versant de l'oued Jemaa (El Garouani et al., 2005), présente des pertes en sol variant de 1 à 264 t/ha/an avec une moyenne de 28 t/ha/an. El Garouani et al. (2007) ont trouvé des valeurs variant de 60,74 à 333,76 t/ha/an. El Garouani et al., en 2003, ont estimé des valeurs d'érosion.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

L'étude des phénomènes de l'érosion présente un axe de recherche en développement constant, les zones étant de plus en plus variées et les exigences de la maîtrise des aléas étant de plus en plus fortes. Au Maroc, ces aléas engendrent des pertes très coûteuses pour l'économie nationale et son développement.

La communauté scientifique a abordé le processus d'érosion selon son propre point de vue et son échelle de travail, apportant avec elle son savoir faire et son approche. Cela a conduit à une connaissance riche et diversifiée de l'érosion mais aussi morcelée et qui manque globalement de cohérence.

Des efforts d'évaluation de l'aléa ont été menés lors des dernières années dans le Rif, mais le nombre de mouvements ne cesse de s'accroître le plus souvent aux endroits censés être déjà étudiés et définis comme étant stable. Cela vient du fait que dans la plupart des cas, seules des approches qualitatives directes basées sur la connaissance de l'analyse qui ont été utilisées pour déterminer la sensibilité des terres à l'érosion.

De nombreuses données ont permis d'appréhender et de distinguer les processus de l'érosion hydrique. Elles ont servi de base au développement des modèles tant au niveau de la conceptualisation que du paramétrage des formules d'érosion. Les paramètres du modèle d'érosion sont intégrés et peuvent être modifiés, simulés et actualisés à volonté, permettant ainsi aux chercheurs de visualiser indépendamment l'effet et l'importance de chacune des variables de l'équation universelle de perte de sol. 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 sensibilité des terres à l'érosion ainsi que les premières cartes des risques d'érosion des six sous bassins versants appartenant à la péninsule Tingitane obtenues mettent en exergue les pertes de terres déterminées dans chaque bassin résultent de l'interaction des différents facteurs qui se conjuguent pour accélérer l'érosion.

La carte de sensibilité montre en générale une vulnérabilité des sols à l'érosion élevée couvrant une grande superficie de la zone d'étude, surtout dans les zones internes, suite à

l'interaction de plusieurs facteurs. Ces terres, essentiellement de type flysch ou pélitico-argileux, sont le support d'une activité agricole intense, dans la plupart des cas traditionnelle et sur des reliefs relativement accidenté. Les zones où l'érosivité est faible montre bien l'influence des trois facteurs, surtout le couvert végétal qui constitue une protection d'importance majeur pour les sols.

Dans les six bassins versants choisis pour l'évaluation quantitative des pertes en sols, on remarque généralement un risque potentiel d'ordre moyen à souvent élevée dans les six bassins, avec des moyennes qui s'échelonnent entre 35T/ha/an au niveau du bassin versant du barrage Raouz et 48 T/ha/an au niveau du bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt. Ces résultats reflètent bien les résultats obtenus dans la carte de sensibilité des sols.

La répartition spatiale des pertes en sols dans chaque bassin versant est fonction de la répartition spatiale de chaque facteur et des paramètres naturels ainsi que les interactions entre eux. L'analyse de la carte de risque d'érosion par comparaison aux différentes cartes mono-factorielles et les autres cartes des paramètres naturels du milieu permettent de localiser, spatialement, le ou les facteurs responsables d'une valeur élevée d'érosion ou, dans le cas contraire, une bonne préservation des sols.

Généralement, en dehors de l'agressivité des pluies qui est le facteur déclenchant et la friabilité des terres qui est un paramètre primaire dans le processus de l'érosion, on remarque dans les six bassins versants et dans la plupart des cas, une relation nette qui relie degré d'érosion avec la densité du couvert végétal : l'augmentation de ce dernier diminue le premier. Dans le cas où le couvert végétal n'est pas un facteur protecteur, la topographie, et surtout la pente, peut jouer un rôle clé dans le processus de l'érosion. Dans les zones à pentes très faibles, les pertes restent dans des seuils acceptables même si les autres facteurs favorisent l'érosion.

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.

En effet, les résultats obtenus par cette approche nous ont permis de :

- Constituer une base de données multi-sources de la région, à l'aide du SIG, qui est un outil essentiel pour la spatialisation de l'information ainsi que pour la mise à jour des données ;
- Montrer l'apport des SIG et de la télédétection à la cartographie des zones à risque d'érosion ;
- Cartographier les différents facteurs de l'érosion hydrique ;
- Appliquer le modèle qualitatif et obtenir la carte de sensibilité de terre à l'érosion de la région ;
- Elaborer des documents numériques à référence spatiale qui ont l'avantage de pouvoir être agrandis et édités selon la zone d'intérêt et l'échelle souhaitée ;

- Appliquer l'équation universelle de perte de sol USLE, adaptée selon les conditions marocaine, dans l'étude de l'érosion hydrique des bassins versants ;
- Elaborer des documents cartographiques évaluant l'érosion hydrique au niveau des bassins versants ;
- Orienter la priorité d'intervention et d'aménagement, par une localisation plus précise des zones les plus vulnérables à l'érosion.

Dans la mise en place de ces modèles, plusieurs difficultés apparues concernent essentiellement la collecte des données nécessaires pour alimenter la base de données, en particulier celles dont ne nous possédons pas, comme la pédologie et l'intensité des précipitations pendant les 30 min.

Il faut mentionner cependant que des vérifications continues et détaillées des résultats sur le terrain s'avèrent indispensables afin de reconnaître les secteurs qui présentent des résultats erronés par les deux approches décrites précédemment, reconnaître la source de l'erreur et mettre à jour la base de données d'une manière continue.

Ainsi, s'ajoute d'autres facteurs qui rendent le résultat imputable, à savoir :

- La complexité de l'érosion suite à l'hétérogénéité des supports sur lesquels il se produit. Elle on est à l'interface entre plusieurs milieux : l'eau, le sol, les sédiments et le couvert végétal ;
- Les connaissances sur la nature du ruissellement en terme physique et mécanique ;
- L'érosion a souvent été abordée sans une étude approfondie de l'hydrologie ;
- Il existe des interstices importants dus à des différences d'échelle de travail ou un manque de concertation vis-à-vis de l'ensemble des travaux à vocation érosion ;

Le travail ainsi réalisé pourrait être approfondie, et cela par certaines perspectives :

- L'amélioration et la précision de la modélisation en prenant en compte de nouveaux paramètres ;
- L'utilisation des données détaillées des précipitations, la hauteur, l'énergie cinétique et l'intensité moyenne sur 30 min de pluie de chaque averse ;
- L'ajout des données manquants et l'intégration de la notion de sédimentation et d'autres paramètres et facteurs d'érosion comme, la battance, la rugosité de surface, l'effet des pierres et des fragments de roches ;
- L'utilisation de la dimension temporelle en effectuant des études et applications saisonniers ou mensuelles pour montrer l'effet de changement de certains facteurs comme le couvert végétal ;
- La comparaison de plusieurs applications en faisant des modèles de perte en sol différents ;
- La validation des résultats obtenus par l'installation des parcelles expérimentales ;

- Enfin, une généralisation de ces perspectives sur l'ensemble de la région de Tanger Tétouan, pour mettre en place une base de données complète sur les sols et le phénomène de l'érosion dans la région.

Pourtant, un grand travail reste à faire pour pouvoir lutter efficacement contre le phénomène d'érosion qui menace le pays et dont les conséquences sont de plus en plus apparentes. Le phénomène, étant naturel, variable dans le temps et dans l'espace et fonction de plusieurs facteurs et paramètres qui changent eux aussi et qui interagissent entre eux, nécessite un travail fastidieux et une mise à jour continuelle pour bien cerner les problèmes et les conséquences et par suite, proposer aux décideurs les meilleures solutions.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

- Abaoui J., El Ghmari A., El Harti A., Bachaoui E.M., Bannari A., El Bouadili A. 2005. Cartographie de l'érosion hydrique en zone montagneuse : cas du bassin versant des Ait Bou Goumez, Haut Atlas, Maroc. *Estudios Geol.*, 61, pp. 33-39.
- Abdellaoui B., A. Merzouk, M. Aberkan et J.Lbergel (2002). Bilan hydrologique et envasement du barrage Saboun (Maroc). *Rev. Sci. Eau*, 15, pp.737-748.
- Aboulabbes O., Merzouk A., Benchekroun F. 2005. *Application des Directives CAR/PAP pour la formulation d'un programme de gestion de contrôle de l'érosion et de la désertification. Cas du bassin versant de Beni Boufrah*. Programme d'Actions Prioritaires. Centre d'Activités Régionales. Secrétariat D'état auprès du Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement Charge de l'environnement. Direction de la Surveillance et de la Prévention des Risques. Rabat. MAROC.
- Adediji A., Tukur A.M., Adepoju K.A. 2010. Assessment of Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Katsina Area, Katsina State of Nigeria using Remote Sensing (RS) and Geographic Information System (GIS). *Iranica Journal of Energy & Environment*, 1 (3), pp. 255-264.
- AEE, 1999. *L'environnement dans l'Union européenne à l'aube du XXIe siècle*. Agence européenne pour l'environnement, rapport 651p.
- Aït Brahim L., Sossey Alaoui F., Siteri H., Tahri M. 2003. Quantification des pertes en sols dans le bassin versant Nakhla (Rif septentrional). *Sécheresse : Science et changements planétaires*, Vol. 14 (2) : pp. 101-106.
- Ait Fora A. 1995. *Modélisation spatiale de l'érosion hydrique dans un bassin-versant du Rif marocain : validation de l'approche géomatique par la sédimentologie, les traceurs radioactifs et la susceptibilité magnétique des sédiments*. Thèse de PhD, Univ. Sherbrooke, Québec, Canada, 1995, p. 231.
- Alami HB., Watteux R. Rapport du Projet intégré de développement agricole de Tanger-Tétouan. Partie de Tanger ; Etude des sols au 1/100.000 (édition au 1/50.000). Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire. Direction provinciale de l'agriculture de Tanger, Institut National de la Recherche Agronomique - Centre Régional de Tanger.
- Al Karkouri J, Laouina A, Roose E, Sabir M. 2000. Capacité d'infiltration et risques d'érosion des sols dans la vallée des Béni Boufrah – Rif Central (Maroc). *Bull Réseau Erosin*, 20 : 342-56.
- Amanti M., Castataldo G., Marchionna G., Pecci M. 1992. Classificazioni dei fenomeni franosi. *Bolletino del servizio geologico d'Italia*, vol. CXI, tav.1.

- Anderson, H.W. 1954. Suspended sediment discharge as related to stream flow, topography, soil and land use. *Am. Geophys. Union Trans.* 35(2), pp. 268-281.
- André A., 1971. Introduction à la géographie physique de la Péninsule Tingitane”, *Rev. Géog. Maroc*, Vol. 19, pp. 57-75.
- Andrieux J. 1967. Métamorphisme épizonale et tectoniques superposées dans le sillon externe de la chaîne alpine de l’Afrique du Nord : l’unité de Ketam (Rif, Maroc). *C. R. somm. Soc. Géol. France*, 7, pp. 252-253.
- Andrieux J. 1971. La structure du rif central. Etude des relations entre la tectonique de compression et les nappes de glissement dans un tronçon de la chaîne alpine. *Notes et M. Serv. Géol. Maroc*, 235, 155p.
- Andrieux J., Mattauer M. 1962. La nappe de Jbel Chouamat, nouvelle nappe ultra du Rif septentrional (Maroc). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 255, pp 2481-2483.
- Angima, S.D., Stott, D.E., O’Neill, M.K., Ong, C.K., Weesies, G.A., 2003. Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agricultur. Ecosyst. Environ.* 97 (1/3), pp. 295–308
- Anys H. 1991. *Utilisation des données de télédétection dans un système d'information géographique pour l'étude de l'érosion hydrique du bassin versant d'Oued Aricha, (Settat, Maroc)*. Mémoire de Maîtrise. Département de géographie et de télédétection, Univ. Sherbrooke, Québec, Canada, 83 p.
- Anys, H., Bonn, F. and Merzouk, A. (1994) Remote sensing and GIS based mapping and modeling of water erosion and sediment yield in a semi-arid watershed of Morocco. *Geocarto International*, vol. 9, n°1, pp. 31-40.
- Arnoldus H.M.J. 1977. *Methodology used to determine the maximum potential average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco*. Report of an FAO/UNEP Expert Consultation on Assessing soil degradation, Rome, 18-20 January 1977, FAO Soils Bulletin, N° 34, pp. 39-48.
- Assebry L. 1984. Études géologique de la zone subrifaine. Nouvelle interprétation géographique et structurale du rif externe. Exemple de moyen Ouerrha, Maroc. Thèse 3° Cycle, Rabat.
- Auzet A-V. 1987. L’érosion des sols par l’eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques. *Min. Env/Min Agr, CEREG-URA 95, CNRS, Strasbourg*, 60p.
- Bachaoui M., El Harti A, Bannari ., El Ghmari A. 2007. Cartographie des zones à risque d’érosion hydrique : exemple du Haut Atlas marocain. *Revue Télédétection*, vol. 7, n° 1-2-3-4, pp. 393-404
- Balesdent J. 1998. Les biotransformations du carbone et de l'azote. pp 67-82 *in Sol, interface fragile*, (P. Stengel et S. Gelin Eds), INRA Editions, Paris.

- Beasley, R.P. 1972. Erosion and sediment pollution control. The Iowa State University Press, Ames, 320 p.
- Beasley, D. B., Higgins, L. F. and Monke, E. J. 1980. ANSWERS : A model for watershed planning. Transaction American Society of Agricultural Engineers, n°23, p. 938-944.
- Belkheiri A., 1987. *Conséquences de la dégradation des bassins versants sur : les retenues des barrages*. Ministère de L'Agriculture et de Réforme Agraire, Rabat, 1987. 34p
- Ben Ali D. 2000. *Les sources documentaire et statistique se rapportant aux domaines des ressources naturelles et l'environnement au Maroc*. In : Femise network, ed. Comptabilité de l'environnement dans le cadre d'une matrice des comptes sociaux : le cas du Maroc. sl : sn. : pp.1-48.
- Ben Yaich A. 1981. *Etude géologique de la dorsale calcaire entre Tleta Taghrant et Ben Younès (Haouz, Rif, Maroc)*. Thèse 3eme cycle, Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 202 p.
- Ben Yaich A. 1991. *Evolution tectono-sédimentaire du Rif externe centro-occidental (régions de M'sila et Ouezzane, Maroc) ; la marge africaine du Jurassique au Crétacé inférieur : Les bassins néogènes d'avant-fosse*. Thèse d'Etat, Univ. Pau (France), 308 p.
- Benchabane A. 1997. Impact de l'exploitation du prélèvement du bois de feu sur l'érosion du sol en haute montagne (Cas du haut Atlas de Marrakech, Maroc). *Sécheresse*, 8(4), pp. 264-269.
- Benmoussa M., Elyamani M., Saidi A. 1993. Application de l'équation universelle de perte en sol au bassin versant de l'oued Tasrafet. *GéoObserver*, Rabat, Vol. 3, pp. 59-70.
- Bennet, H. H. (1926) Some comparisons of the properties of humid-tropical and humid-temperate American soils; with special reference to indicated relations between chemical composition and physical properties. *Soil Sci.* 21: pp. 349 - 375.
- Bernier J., Parent E., Boreux J-J. 2000. Statistiques pour l'environnement. Traitement bayésien de l'incertitude. Editions TEC & DOC, pp. 14-15.
- Berthelin J., Huang P.M, Bollag J.M., Andreux F. 1999. Effect of mineral-organic-microorganism interactions on soil and freshwater environments. Publication of The Second International Symposium Mineral-Organic-Microorganism International (ISMOM) held in Nancy, France, September 1996. Kluwer Academic/Plenum, New York, 378p.
- Blum, P. 2001. (Ed.), *Archaea, ancient microbes, extreme environments and the origin of life*. Adv. Appl. Microbiol. vol. 50, pp. 1-382. Academic Press, New York. In : *Le sol, un milieu complexe au pouvoir épurateur limité*. J.-P. Camuzard. Ingénieur du GREF. ENGREF Paris ».
- Blum, W.E.G., Santelises A. 1992. A concept of sustainability and resilience based on soil functions: The role of ISSS in promoting sustainable land use. Greenland, DJ; Szabolcs, I. (ed.). *Soil resilience and sustainable land use: Proceedings of a symposium held in*

- Budapest, 28 September to 2 October 1992, including the Second Workshop on the Ecological Foundations of Sustainable Agriculture (WEFSA II), pp. 535–542.
- Bolline A. 1982. *Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique*. Thèse de doctorat présentée à l'Université de Liège, Faculté des Sciences. 356 p. +annexes.
- Bonn (1998). La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites. *Science et changements planétaires. Sécheresse*; 9; 3: 185-192.
- Bonn F., Cyr L., Anys H., Chakroun H. 1994. Une modélisation spatiale des pertes de sol liées à l'érosion hydrique. In Bonn, F. (dir.) *Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone. Presses de l'université du Québec*, Montréal, pp. 75-97.
- Bou Kheir, R., Girard, M.-C., Khawlie, M., 2004. Use of a structural classification OASIS for the mapping of landscape units in a representative region of Lebanon. *Canadian Journal of Remote Sensing* 30, 617–630.
- Bou Kheir R., Cerdan O., Abdallah C. 2006. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology*, Vol. 82, pp. 347–359.
- Bou Kheir R., Shaban A., Khalie M., Girard M-C. 2000. Human practices influencing hydric erosion in mount Lebanon. Regional workshop on “degradation and rehabilitation of marginal lands in the Arab region”, CEDARE, Cairo, Egypt, 2-4 July 2000, 8p.
- Bou Kheir R., Girard M.C., Khawlie M., Abdallah C. 2001a. Érosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens : une revue bibliographique. *Étude et Gestion des Sols*, Vol. 8, pp. 231-45.
- Bou Kheir R., Shaban A., Khawlie M., Girard M-C, 2001b. Impact des activités humaines sur l'érosion hydrique des sols dans la région côtière montagneuse du Liban. *Sécheresse*, 12(3), pp.157-165.
- Bou Kheir R., Girard M-C, Shaban A., Khawlie M., Faour G., Darwich T., 2001c. Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière montagneuse du Liban. *Télédétection*, 2, pp. 91-102.
- Bou Kheir R., Abdallah C., Runnstrom M., Martensson U., 2008. Designing erosion management plans in Lebanon using remote sensing, GIS and decision-tree modeling. *Landscape and Urban Planning, Volume 88, Issues 2-4, 1 December 2008, Pages 54-63*.
- Bourgois J. 1978. La transversale de Ronda. Cordillères bétiques. Espagne. Données géologiques pour un modèle d'évolution de l'arc de Gibraltar. *Ann. Scient. Univ. Besançon, Géologie*, 3^{ème} série, 445p.

- Boutayeb N. 1988. Impact de la dégradation des bassins versant sur l'économie nationale. Proceeding of Séminaire National sur l'Aménagement des Bassins Versants, 18-23 Janvier. ARA / MEFPFC / PNUD / FAO.
- Brilly, M., Smith, M. & Vidmar, A. (1993) Spatially oriented surface water hydrological modelling and GIS. In: *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management* (ed. by K. Kovar & H. P. Nachtnebel) (Proc. Vienna Conf.), 547-557. IAHS Publ. no. 211.
- Browning G.M., Parish C.L., Glass J.A. 1947. A method for determining the use and limitation of rotation and conservation practices in control of soil erosion in Iowa. *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol. 23, pp. 246-249.
- Bruckler, L. 1998. Chapitre 3 : Les transferts dans le sol. In : Stengel P. et Gelin S. (Eds.). *Sol interface fragile*. Paris (FRA) : INRA Editions.
- Bzioui M. 2004. Rapport national sur les ressources en eau au Maroc. UN WATER-AFRICA, 94p.
- Calvet R., 2003. Le sol, propriétés et fonctions. Tome 2, phénomènes physiques, applications agronomiques et environnementales. ISBN 2-85557-084-0. Edition France Agricoles, 2003. 510p.
- CEC (Commission Des Communautés Européennes). 2002. "Communication de la commission au conseil, au parlement européen, au comité économique et social et au comité des régions : Vers une stratégie thématique pour la protection des sols". Rapport final, Bruxelles. COM 179 final.
- Cerdan O., 2001. Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle de petits bassins versants cultivés. Thèse de Docteur de l'Université d'Orléans, 175 p. + annexes.
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., Saby N., 2002a. Modelling interrill erosion in small cultivated catchments", *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 3215-3226.
- Cerdan O., Souchère V., Lecomte V., Couturier A., Le Bissonnais Y., 2002b. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff and erosion model STREAM (Sealing Transfer Runoff Erosion Agricultural Modification)", *Catena*, Vol. 46, 2002b pp. 189-205.
- Cerdan O, Le Bissonnais Y, Souchère V, King C, Antoni V, Surdyk N, Dubus I, Arrouays D, Desprats JF. 2006. Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols Rapport n°3 : Synthèse et recommandations générales. Rapport BRGM-RP-55104-FR, 85 pp., 24 ill.
- Chakroun, H. 1993. *Intégration d'un modèle hydrologique conçu pour la télédétection et d'un modèle de perte de sol dans un système d'information géographique*. Mémoire de Maîtrise. Dépt. Géographie et de Télédétection, Univ. Sherbrooke, Québec, Canada, 94 p.

- Chalouan A. 1986. *Les nappes ghomarides (Rif septentrional, Maroc) : Un terrain varisque dans la chaîne alpine*. Thèse d'Etat, Univ. Strasbourg, 317p.
- Clauzon G., Vaudou J. 1969. Observations sur les effets de la pluie en Provence. *Annales de Géographie*, 13 (4), pp. 390-405.
- Cluis, D. 1994. Des nouvelles technologies pour une gestion intégrée à l'échelle du bassin versant. Association Québécoise des Techniques de l'eau (AQTE). Assises annuelles, 8-10 avril, 1992, Montréal.
- Company-Redmond A. 1996. *Images SAR possibilités d'extraction d'un paramètre physique du ruissellement, la rugosité (modélisation et expérimentations)*. Thèse de doctorat. Laboratoire Géosol. Sciences de la terre. Université de Bourgogne, Dijon, 254 p.
- Cooke H.L. 1936. The nature and controlling variables in the water erosion process. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1, pp. 60-64.
- Coote D.R., Mac Donald E.M., Dickinson W.T., Ostry R.C., Frank R. 1982. "Agricultural and water quality and the Canadian Great Lakes Basin: I Representative agricultural watershed". *J. Environ. Qual.*, 11 pp. 475 - 481.
- CREOCEAN. 2010. projet d'extension du complexe portuaire Tanger Med. Etude d'impact sur l'environnement. Rapport Final, 295p.
- CSRE (Conseil Scientifique Régional de l'Environnement). 2003. *Gestion des sols et apports des déchets organiques en Bretagne*. Rapport du Conseil Scientifique, 58p.
- D'souza V-P-C., Morgan R-P-C. 1976. A laboratory study of the effect of slope steepness and curvature on soil erosion. *Journal agric. Engineering Research*, 21, pp. 31-30.
- Daki M. 2004. Programme d'Aménagement Côtier en Méditerranée marocaine : Etude de faisabilité. Rapport PNUE/PAM/PAP., Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement, Département de l'Environnement, Maroc, 113p.
- Dautrebande S. 2003. Guide méthodologique pour le choix d'aménagements appropriés en matière de conservation des sols et des eaux. Fascicule 2 du rapport final de la Convention, « Etude méthodologique pour la prévention et la correction des problèmes d'érosion et de colluvionnement des terres en zone rurale », 147 p.
- Dautrebande S. 2004. Guide pour des aménagements de conservation des eaux et des sols appropriés en Région wallonne. FUSAGx, financement DGA-RW, (2004), 50 pp.
- Dautrebande S., Colard F. 2003a. « Cartographie des zones à risque de ruissellement et d'érosion en région wallonne : Méthodologie et cas pilotes » Fascicule n°1 de la convention « érosion 243 », Gembloux : FUSAGx Convention réalisée au profit de la DGA (RW), 66 p.

- Dautrebande, S., Colard, Fr. 2003b. « Méthodologie de détermination et cartographie des zones à risque d'érosion diffuse et des zones à risque de ruissellement concentré ». Rapport UHAGx-FUSAGX, pour la DGA-RW, 40p.
- Dautrebande S., Mokadem A. 2006. Erosion hydrique et ruissellement : le projet ERRUISSOL. In Etudes et Documents (éd. DGATLP-RW) « Aménagements et Urbanisme » n°7 « Les risques majeurs en région wallonne : Prévenir en aménageant ».
- Dautrebande, S., Sohier, C. 2006. *L'érosion hydrique et les pertes de sol agricoles en Région wallonne*. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon. Unité d'hydrologie et d'hydraulique agricole, Génie rural et environnemental, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux. Gembloux. 122p.
- Dautrebande S., Cordonnier H., Thirion M., Biolders C. 2006. Lutter contre l'érosion des terres. Les livrets de l'Agriculture n° 12, 44p.
- De Jong S.M. 1994. Applications of Reflective Remote Sensing for Land Degradation Studies in a Mediterranean Environment. *Netherlands Geographical Studies*, n°177, KNAG Utrecht, Proefschrift, Universiteit Utrecht, 240 p.
- De Luca P. 1984. Preuve de l'autochtonie de l'unité chaotique des kebdana (Maroc oriental) équivalent oriental de l'olistostrome préifain. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 299, Série II, n°7, pp. 331-336.
- Delattre. 1971 (s.d.) In : Camuzard. J.-P. (s.d.). Le sol, un milieu complexe au pouvoir épurateur limité. Rapport ENGREF Paris, 83 p.
- Delhoume J-P. 1981. Etudes en milieu méditerranéen semi-aride : ruissellement et érosion en zone montagneuse de Tunisie centrale (Djebel Semmama). Campagnes 1975 à 1979. Tunis, Orstom/DRE, 187 p.
- Derruau M. 1988. *Précis de Géomorphologie* (septième édition). Paris : Masson.
- Didon J., Durand-Delga M., Kornprobst J. 1973. Homologies géologiques entre les deux rives du détroit de Gibraltar. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 7, XV, pp.77-105.
- Didon J., Durand-Delga M., Kornprobst J. 1973. Homologies géologiques entre les deux rives du Détroit de Gibraltar (cordillères bétiques occidentales, Espagne). *Bull. Soc. Géol. France*, Vol. 1 (XV, 2), pp. 77-105.
- Dion F. 1989. Modélisation cartographique de la perte de sol: application de l'équation universelle de perte de sol adaptée aux pentes complexes sur un système d'information géographique en mode **raster**. Mémoire de maîtrise. Département de géographie et de télédétection. Université de Sherbrooke, Sherbrooke. 185 p.
- Doran JW, Sarrantonio M and Lieberg M. 1996. Soil health and sustainability. Pages 1–54. In: Sparks DL (Ed.) *Advances in Agronomy* Vol. 56, Academic Press, San Diego, CA,

- USA.El Garouani A., Merzouk A., Ozer A. 2003. Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique au pré-Rif marocain. Proceedings of an international symposium on Hydrology of die Mediterranean and Semiarid Regions. Montpellier, April 2003. *IAHS Publ.*, n°. 278, pp. 380-386.
- Durand-Delga M. 1961. Au sujet du sillon méso-méditerranéen du flysch au Crétacé et au Nummulitique. *C.R. somm. Soc. géol. Fr.*, 2, p. 45.
- Durand Delga M. 1965a. Manifestations d'une importante phase tectonique antécénomaniennne dans les Corbières orientales. *Bull. Soc. Hist. nat. Toulouse*, t. 100, pp. 81-95.
- Durand Delga M. 1965b. Le problème de la position structurale du flysch albo aptien dans le Nord du Rif : la nappe de Melloussa-Chaoumat (Maroc). *C. R. Soc. Géol. Fr.*, pp. 58-59.
- Durand Delga M. 1972. La courbure de Gibraltar; extrémité occidentale des chaînes alpines, unit l'Europe et l'Afrique. *Eclogae Géol. Helv.*, n°2, vol. 65, pp. 267-278.
- Durand Delga M., Mattauer M. 1959a. Les unités structurales internes de la zone marnoschisteuse du Rif septentrional. *Compt. Rend.*, 248, pp. 2364-2366.
- Durand Delga M., Mattauer M. 1959b. Les unités structurales externes de la zone marnoschisteuse du Rif septentrional. *Compt. Rend.*, 248, pp. 2499-2501.
- Durand Delga M., Mattauer M. 1959c. Existence dans le Rif d'une nappe supérieure à matériel « Numidien » (Nappe de J. Sougna). *C. R. Soc. Géol. Fr.*, pp. 225-227.
- Durand Delga M., Mattauer G. 1960. Sur l'origine ultra-rifaine de certaines nappes du Rif septentrional. *C.R. Somm.Soc. Géol. Fr.*, 2, pp. 22-23.
- Durand Delga M., Kornprobst J. 1963. Esquisse géologique de la région de Ceuta (Maroc). *Bull. Soc. Géol. France* 7V, 1049-1057.
- Durand-Delga M., Villiaumey M. 1963. Sur la stratigraphie et la tectonique du groupe de Jbel Moussa (Rif septentrional, Maroc). *Bull. Soc. Géol. France*, (7), t. V. pp. 70-79.
- Durand-Delga M., Didon J. 1984a. Carte géologique du Rif, Feuille de Melloussa au 1/50.000. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, N° 296.
- Durand-Delga M., Didon J. 1984b. Carte géologique du Rif, Feuille de Ksar Sghir au 1/50.000. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, N° 295.
- Durand-Delga M., Didon J., Medioni R. 1985. Carte géologique du Rif, Feuille de Tanger Al Manzla au 1/50.000. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, N° 294.
- Durand Delga M, Hottinger L., Marcais J., Milliard Y. et Sauter G. 1962. Données actuelles sur la structure du Rif. *Mém. Soc. Géol. France*, h. Série 1 ; pp. 399 – 422.
- Durand Delga M., Hottinger L., Marcais J., Mattauer M., Milliard Y. et Sutter G. 1962. Données actuelles sur la structure du Rif. *Mém. h.s. Soc. Géol. Fr.* (Livre mémoire P.

- Fallot), t. 1, pp. 399-422.
- El Gharbaoui A. 1981. La terre et l'Homme dans la péninsule Tingitane : étude sur l'homme et le milieu naturel dans le Rif occidental. *Trav. Inst. Sci. Rabat, Serv. Géol. Géogr. Phys.* No. 15, 439 p
- El Garouani A., Merzouk A., Ozer A. 2003. Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique au pré-Rif marocain. Proceedings of an international symposium on Hydrology of die Mediterranean and Semiarid Regions. Montpellier, April 2003. *IAHS Publ.*, n°. 278, pp. 380-386.
- El Garouani A., Merzouk A., Jabrane R., Boussema M.R. 2005. Analyse Spatiale De L'érosion En Nappe Et De L'infiltrabilité Des Sols Dans Le Pré-Rif Marocain. *Télédétection*, 2005, Vol. 5, n°(1-2-3), pp. 69-80
- El Garouani A., Chen H., Lewis L., Tribak A., Abahrour M. 2007. Apport de la Télédétection et du SIG pour le suivi spatio-temporel de l'occupation du sol et de l'érosion nette dans le bassin de l'Oued Tlata (Maroc). *Actes des 1ères JSIRAUF « Gestion intégrée des eaux et des sols Ressources, aménagements et risques en milieux ruraux et urbains »*, 6-9 novembre, Hanoi, Vietnam, 9p.
- El Garouani A., Chen H., Lewis L., Tribak A., Abahrour M. 2008. Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG Idrisi au nord-est du Maroc. *Revue Télédétection*, Vol. 8, n° 3, pp. 193-201.
- El Hatimi N. 1982. Contribution à l'étude géologique et structurale de la région d'Assifane (Rif, Maroc). Thèse 3° cycle. Rabat.
- El Hatimi N. 1991. *Rifting mésozoïque sur la bordure occidentale du Rif interne (Maroc). Evolution géodynamique d'un secteur de la marge ouest-téthysienne (exemples du Haouz et du groupe du Moussa)*. Thèse d'Etat, Univ Pau (France), 317 p.
- El Hatimi, N., Duée, G., Hervouet, Y. (1991) La Dorsale calcaire du Haouz: ancienne marge continentale passive téthysienne (Rif, Maroc). *Bulletin de la Société géologique de France*, 162: 79-90.
- El Ouadini M., Ait Brahim L., Moukhchane M., Benjbara A. et Nachite D. 2000. Erosion dans le bassin versant de MARTIL, Maroc NO. *Bull. Réseau Erosion 20*, IRD, Montpellier, France, pp. 78-86.
- Ellison W.D. 1944. Studies of raindrop erosion. *Agric. Eng.* 25: 13 1-181.
- Evenari M., Shanan L., tadmor N. 1992. The Negev: The Challenge of a Desert. Harvard University Press, Massachsetts, 437 p.
- Fabbri K. P. 1991. *The use of geographic information systems and remote sensing analysis for the assessment of soil erosion hazard : a case study in central Bolivia*. Master of Science, International Institute for Aerospace Surveys and Earth Sciences, ITC, Enschede,

- Netherlands, 142 p.
- Fallot P. 1937. Essai sur la géologie du Rif septentrional. Notes et Mém. du Serv. Géol. Maroc, 40, 533 p.
- FAO. 1966. Mesures de terrain de l'érosion et de l'écoulement des eaux de surface. Bulletin pédologique, 68, 153p.
- FAO. 1975. Lutte contre l'érosion et conservation du sol au Maroc. Analyse des problèmes d'érosion à l'échelle nationale. Rapport établi sur la base des travaux de l'équipe d'experts du projet. Rome.
- FAO. 1976. La conservation des sols dans les pays de développement. Bulletin pédologique, 30, 92p.
- FAO. 1983. Garder la terre en vie : L'érosion des sols, ses causes et ses remèdes. Bulletin pédologique, 50, 62p.
- FAO. 1990. *Erosion mapping using high resolution satellite data and geographic information system. Pilot study in the state of Parana, Brasil*, Remote Sensing Center, FAO, Rome, 147 p.
- Foster G. R. ; Yoder D. C. ; Weesies G.A. ; McCool D. K. ; McGregor K. C. ; Bingner R. L., 2003. *USER'S GUIDE Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2)*. USDA-Agricultural Research Service Washington, D.C. 163 pp.
- Foster G. R., McCool D. K., Renard K. G., Moldenhauer W. C. 1981. Conversion of the Universal Soil Loss Equation to Simetric units. *Journal of Soil and Water Conservation* 36(6):pp. 355-359.
- Foster, G.R., Lane, L.J., 1987. Beyond the USLE: Advancements in soil erosion prediction. In: L.L. Boersma and et al. (Editors), *Future Developments in Soil Science Research*. Soil Sci. Soc. of Amer., Madison, Wisconsin, pp. 315-326.
- Foucault A., Raoult J.-F., 1995. *Dictionnaire de géologie*. 4^e édition, Masson, Paris. 324 pp. ISBN2-225-84635-9
- Frizon De Lamotte D. 1985. La structure du Rif oriental (Maroc). Rôle de la tectonique longitudinale et importance des fluides. *Mém. Sci. Terre, Univ. P. et M. Curie*, Paris, pp. 85-103.
- Frizon De Lamotte D. 1987. Un exemple de collage synmétamorphe: la déformation miocène des Tamsamani (Rif, Maroc). *Bull. soc. Géol. France*, (8), t. III, n° 2, pp. 337-344.
- Frizon de Lamotte D., Leikine M. 1985. Métamorphisme miocène du Rif oriental (Maroc) et individualisation gravitaire d'Aknoul. *Revue de Géologie dynamique et de Géographie physique*, 26: pp. 29-42.
- Gaddas F. 2001. *Proposition d'une méthode de cartographie des pédo-paysages, application*

- à la moyenne vallée du Rhône. Thèse. Institut National Agronomique Paris-Grignon, 218 p
- Gartet, A. 1994. *Morphogenèse et hydrologie dans le bassin versant de l'oued Lebène (Rif méridional et Prérif central et oriental, Maroc)*. Thèse Doct. Univ. Provence, Aix-en-Provence, 342p.
- Gartet A., Gartet J., y Conesa C.C. 2005. Dégradation spécifique et transports solides dans le bassin versant de l'oued Lebène (Prérif central, Maroc septentrional). ISSN : 0213-1781. *Papeles de Geografia*, 2005, 41-42 ; pp. 85-100.
- Govers, G., Poesen, J. 1988. Assessment of the interrill and rill contributions to total soil loss from an upland field plot. *Geomorphology* 1, pp. 343-354
- Griffon J.C. 1966. Etudes géologiques sur la chaîne du Rif : la dorsale. Notes et Mém. du Serv. Géol. Maroc, 184, pp. 149-212.
- Gubeli A. 1982. Stratigraphische und sedimentologische untersuchungen der detreitischen unterkeide-serien des zentralen Rif (Marokko) Thèse ETH, Zurich ronéot.
- Gubeli A., Hochuli P.A., Wildi W. 1984. lower cretaceous turbiditic sediment from the Rif chain (northern Morocco), palynology, stratigraphy setting. *Geol. Rundsch.*, Stuttgart, 73, 3, pp. 1081-1114.
- Gutnic M. 1969. La Dorsale rifaine dans la région d'Assifane. Notes et Mém. du Serv. Géol. Maroc, 194, pp. 51-122.
- Haoues C. 2008. *Evaluation par analyse multicritères du risque d'érosion dans la vallée de l'Oued Labiod (Approche systémique)*. Mémoire de fin d'étude Magister, Université colonel El Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, 132p.
- Harris, M.T., Boardman, J., 1990. A rule-based expert system approach to predicting waterborne soil erosion. In: Boardman, J., Foster, D.L., Dearing, J.A. (Eds.), *Soil Erosion on Agricultural Land*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 401–412.
- HCP-DRTT (Haut Commissariat Au Plan - Direction Régionale de Tanger-Tétouan). . 2008. Monographie de la région de Tanger Tétouan. Rapport Mai 2008. 178p.
- Herbreteau V. 2003. *Evaluation de la sensibilité à l'érosion des zones viticoles. Influence des pratiques culturales (exemple du Fronsadais)*. Mémoire ENITA, Bordeaux., 2003, 71 p.
- Herbreteau V., Bouchetal B., Commagnac L., Lee A., Chery P., 2003. Évaluation de la sensibilité à l'érosion des zones viticoles. Influence des pratiques culturales (exemple du Fronsadais), Actes des journées 2003, Association Internationale pour l'Écologie du Paysage 8-10/10/2003, Gap, France, éd. Cemagref
- Heusch, B. 1970 Estimation et contrôle de l'érosion hydraulique. *Soc Sc Phys Maroc*; no spécial, pp. 41-54.

- Heusch B, 1990. *L'érosion du pré-Rif, une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du pré-Rif occidental*. Ann Recherche Forestière du Maroc ; 12 : pp.9-176.
- Hill J., Mégier J., Mehl W. 1994. Land degradation, soil erosion and desertification monitoring in Mediterranean ecosystems. *Remote Sensing Review*, Vol. 12, pp. 107-130.
- Hiltner L., 1904. Über neuere Erfahrungen und besonderer Berücksichtigung der Gründung und Brache. Arb DLG 98:59-78. In : Le sol, un milieu complexe au pouvoir épurateur limité. J.-P. Camuzard. Ingénieur du GREF. ENGREF Parts ».
- Hjulström F., 1935, Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyries, Bull. Geo. Inst. Univ. Uppsalla, 25, pp. 221-527.
- Hudson N.W. 1963. *Rainfall intensity and erosivity*. Advisory notes, Dept. of Conservation, Rhodesia, 5 p.
- Humbert M. 1971. Géologie & Morphologie, Contribution à la connaissance du Tangerois, Notes & Mémoires No. 222 Bis, Service Géologique du Maroc.
- JGRC (Société Japonaise des Ressources Vertes). 2001. *Guide technique de la conservation des terres agricoles. Redonner au sol sa productivité dans une perspective durable*. Documentation technique de la JGRC. Générer l'abondance dans le Sahel par la lutte contre la désertification Vol. 5. 43p.
- Kalman R. 1967. Essai d'évaluation pour le pré-Rif du facteur couverture végétale de la formule de Wischmeier de calcul de l'érosion. Rapport Rabat, 1- 12.
- Knisel W. 1980. CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion From Agricultural Management Systems. *Conservation Report No. 26, U.S. Department of Agriculture*.
- Kornprobst J. 1962. Observation sur la série métamorphique de la presqu'île de Ceuta (Rif septentrional, Maroc). C.R. Acad.Sc. Paris, 255. Série D, pp. 2140-2142.
- Kornprobst J. 1966. La chaîne du Haouz, de la hafa Oueddana au col d'Azlu d'Arabia. Notes et Mém. du Serv. Géol. Maroc, 184, pp. 1-60.
- Kornprobst J. 1971. Contribution à l'étude pétrographique et structurale de la zone interne du Rif (Maroc septentrional). Notes et Mém. du Serv. Géol. Maroc, 251, 256p.
- Kornprobst J. 1974. Contribution à l'étude pétrographique et structurale de la zone interne du Rif (Maroc). *Note et Mem. Serv. Géol. Maroc*, 250p.
- Kornprobst J., Durand-Delga M. 1985a. Carte géologique du Rif, Feuille de Sebta au 1/50.000. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, N° 291.
- Kornprobst J., Durand-Delga M. 1985b. Carte géologique du Rif, Feuille de Tétouan Ras Mazari au 1/50.000. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, N° 292.

- Lahlou A. 1997. *Dégradation spécifique des bassins versants au Maroc*. Rapport n°1000. Rabat : Ministère de l'équipement et de la promotion nationale, Direction de l'hydraulique, Division exploitation, service de gestion des eaux.
- Lal R. 1988. Erodibility and erosivity. In: *Soil Erosion Research Methods* (ed. par R. Lal), 141–160. Soil and Water Conservation Society, Iowa and Subcommittee C: Soil Conservation and Environment, International Society of Soil Science, The Netherlands.
- Lal R., ed. 1988. *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conservation Society. Ankeny, IA.
- Laouina A., Nafaa R., Chaker M. 2000. Gestion des eaux et des terres et dégradation dans les collines de Ksar Kebir, Marpc. Bull. réseau Erosion, 19, 18p.
- Le Bissonnais Y., Renaux B., Debouche H. 1995. Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *Catena*, 2, pp. 1-14.
- Le Bissonnais Y., Montier C., Daroussin J., King D. 1998. *Erosion hydrique des sols en France*. Rapport INRA-IFEN, France, 77 p.
- Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C., Daroussin J 2002, *Erosion hydrique des sols en France*. Rapport INRA-IFEN, France, 102 p.
- Le Bissonnais Y., Dubreuil N., Daroussin J., Gorce M.. 2004. Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale. Exemple du département de l'Aisne. *Étude et Gestion des Sols*, 11, 3, pp. 307 – 321.
- Le Blanc, D. 1971. Structure du Prérif oriental au Nord de Taza (Maroc). *Notes Service Géologique du Maroc n° 237, T. 31*, pp. 41-48, Rabat.
- Leblanc D. 1975. Etude géologique du Rif externe oriental au nord de Taza (Maroc). Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, n° 281 (imprimé en 1979), 159p.
- Leblanc D. 1977. Stratigraphie et structure du Rif externe oriental au Nord de Taza (Maroc). *Bull. Soc. Géol. France*, (7), t. XIX, pp. 319-330.
- Leblanc D. 1986. Cisaillement plats dans l'avant-pays rifain, un modèle pour la structure profonde du Prérif (Maroc). *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys.* Vol. 27, fasc. 1, pp. 37-46.
- Leblanc D., VIDAL J.C. 1970). Contact du Prérif charrié sur l'avant-pays à l'Ouest de Taza (Maroc). *C.R. Somm. Soc. Géol. France*, 2, pp. 41-42.
- Leblanc, D. (1979): Etude géologique dans le Rif externe oriental au Nord de Taza (Maroc). *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, 281, 160 p.
- Lee, S. 2004. Soil erosion assessment and its verification using the universal soil loss equation and geographic information systems: a case study at Boun Korea. *Environmental Geology*, vol. 45, pp. 457-465.

- Lefay O. 1986. Etude de l'efficacité des travaux de DRS en Algérie. Mémoire stage, CNEARC/ORSTOM/INRF, 50p.
- Leikine M. 1969. La chaîne du Haouz au Nord de Tétouan, (Jbel Dersa). In : Études géologiques sur la chaîne du Rif. II, *Notes et M. serv. géol. Maroc*, No. 194, pp. 7-49.
- Lelandais F, Fabre G., 1996. Plan d'aménagement anti-érosif du bassin-versant de l'oued Ouergha (Maroc), Risques d'érosion et systèmes d'information géographique. *Bull. Réseau Erosion* ; 16, pp.439-43
- Lemanceau P., Heulin T., 1998. *La rhizosphère*. In : Stengel P, Gelin S (eds): *Sol : interface fragile*. INRA Edition, Paris, pp 93-106.
- Leonard M. 2003. *L'érosion hydrique des sols cultivés : analyse systémique et propositions de gestion. Application aux vignobles d'Ardèche méridionale*. Thèse de doctorat: Université Joseph Fourier, Institut de Géographie Alpine, Grenoble, 2003, 546 p.
- Leonard, R. A., W. G. Knisel, and D. A. Still. 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *Transactions of the ASAE* 30(5), pp. 1403-1418.
- Lespinasse P. 1975. Géologie des zones externes et des flyschs entre Chaouen et Zoumi (centre de la chaîne rifaine, Maroc). These Sc. Univ. Paris, VI, 248.
- Litzler C. 1988. *Maîtrise de l'érosion en vignoble de coteau, aspects agronomiques*. Ministère de l'Environnement, Chambre d'Agriculture de Saône-et-Loire, 54p.
- Macary F. et D., Berville, 2003. *Synthèse bibliographique : bilan des connaissances sur l'érosion et les phénomènes de ruissellement*, Sinfotech., 28 pages.
- Maidment, D. R., 1992. A Grid-Network Procedure for Hydrologic Modeling. Report Prepared for the Hydrologic Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers, Davis, California, October, 1992.
- Maidment, D. R., 1993a. Developing a Watershed Structure. Report Prepared for the Hydrologic Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers, Davis, California, April, 1993.
- Maidment, D. R., ed., 1993b. *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- MAMVA/BRL, 1995. *Plan d'aménagement anti-erosif du bassin versant de l'Oued Ouergha en amont du Barrage Al Wahda. 1 ère phase Analyse de la situation actuelle*. Rapport Principale pour le Monistère de l'Agriculture et de la mise en valeur agricole. (MAMVA, Rabat) Juin, 1995.
- Marcais. J. 1937. Sur la constitution tectonique du Rif oriental français. C.R. Acad, Sc. Paris, 197, pp. 790-792.
- Margat J. et Vallée D., 2000. Mediterranean Vision on water population and the environment for the 21st Century. Document prepared by the Blue Plan for Global Water Concil.

- Martin C. 1975. L'érosion des sols sur les roches métamorphiques en milieu méditerranéen provençal. *Rev. Géomorphologie Dynamique*, 24, pp. 49-63.
- Mattauer M. 1963. Le style tectonique des chaînes tellienne et rifaine. *Géol. Rundschau*, t. 53, n°1, pp. 296-313.
- Megard F. 1969. La partie orientale du massif des Bokkoyas, Note et Mém. Serv. Géol. Maroc. 275, pp. 107-134.
- Mériaux S. 1961. Action du chaulage sur les composantes de la structure et sur l'état de saturation du sol. *Compte rendu à l'Académie d'Agriculture*, pp. 322-325.
- Merzouk A. 1985. *Relative erodability of nine selected moroccan soils as related to their physical, chemical and mineralogical properties*. PhD Thesis. University of Minesota, St. Paul, 124 p.
- Merzouk A., Fenjiro I., Laouina, A. 1996. Cartographie de l'évolution des formes d'érosion dans le Rif occidental: étude multirate utilisant un SIG-Bassin versant. Etats de surface du sol et risques de ruissellement et d'érosion. *Bulletin - Réseau Erosion*, 1996, (16), pp. 444-456.
- Merzouk A., Dahman H., Abdellaoui B., Houssa R. 1997. Transformations des terres du Rif et son impact sur l'envasement du barrage Ibn Battota (Tangérois, Maroc). *Journée sur l'utilisation des techniques spatiales et des systèmes d'informations géographiques (SIG) pour la gestion du territoire. Journée organisée par l'Asso. des Ing. de E'Ecole Hassnnia des Travaux publics*. Rabat. 13 p.
- Merzouki T. 1992. Diagnostic de l'envasement des grands barrages marocains. *Rev Marocaine Génie Civil*; 38 : pp. 46-50.
- Meyer L.D. 1984. Evolution of the universal Soil Equation. *Journal of soil and Water Conservation*, Vol. 39, pp. 99-104.
- Michard .A, Chalouan A., Montigny R., Ouazzani-Touhami M. 1983. Les nappes cristallophylliennes du Rif (Sebtides), témoin d'un édifice alpin de type pennique. *C.R.Acad, Sc. Paris*, 296.pp. 13337-1340.
- Milliard Y. 1959. Les massifs métamorphiques et ultrabasiques de zone paléozoïque interne du Rif. Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 18, 147, pp. 125-160.
- MINENV. 2001. "Rapport sur l'État de l'Environnement du Maroc. (Secrétariat d'état chargé de l'eau et de l'environnement" - Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement), 292 p.
- Monie.P, Frizon De Lamotte D. & Leikine M. 1984. Etude géochronologique préliminaire par la méthode K/AR du métamorphisme alpin dans le Rif externe (Maroc), *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys*, Vol.25, fasc. 4, pp. 307-317.
- Morgan, R.P.C. 1995. *Soil erosion & conservation*. John Wiley & Sons, New York. 198 p.

- Morley C.K. 1988. The tectonic evolution of the Zoumi sadstone, western Moroccan Rif. *Journal of the Geological Society*, London, Vol. 145, pp. 55-63.
- Mouhssine M. 1991. Dynamique de transfert plate forme-marge liée au rifting liasique de la thétise : Les formations à silex des Bokoya centraux et orientaux (Rif interne Maroc). Thèse 3^{ème} cycle, Fac. Sc. Univ. Mohammed V. Rabat. 127p.
- Mourier T. (1982) *Etude géologique et structurale du massif des Bokoya (Rif central, Maroc)*. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Paris Sud, Orsay, 6, 270p.
- Mulders M.A. 1987. *Remote Sensing in Soil Science*. Elsevier Science publishers B.V: Amsterdam, 379 p.
- Musgrave, G.W. 1947. The quantitative evaluation of factors in water erosion: a first approximation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2(3), pp. 133-138.
- Nearing M, Lane L., Lopes V. 1994. Modeling Soil Erosion, pp 126-156; In: Lal, R. (1994); *Soil Erosion Research Methods*; 2nd edition; Soil and Water Conservation Society and St. Lucie Press; Delray Beach, FL, 340p.
- Nold M., Uttinger M., Wildi W. 1981. Géologie de la Dorsale calcaire entre Tétouan et Assifane (rif interne, Maroc). *Notes et Mém. Serv. géol. Maroc*, n° 300.
- Nyssen J., Haile M., Poesen J., Deckers J., Moeyersons J. 1999. Les effets du ramassage des pierres sur la perte du sol et les récoltes en dogua tembien, Tigré, Ethiopie. *Bulletin Réseau Erosion*, 19, pp. 427-440.
- Oldeman L., Hakkeling R., Sombroek W. 1990. "World map of the status of human induced soil degradation, an explanatory note". International soil reference and information center, Wageningen, United Nations Environmental Program –I11, Nairobi, Kenya, Global Assessment of Soil Degradation GLASOD, first edition, 41p.
- Olivier Ph. 1978. *Etude géologique et structurale de la région de Jebha (Rif, Maroc). La terminaison NE de l'accident de Jebha-Chrafate*. Thèse 3^{ème} cycle, Toulouse, 129 p.
- Osborne H-B., Simanton J-R, Renard K-G. 1976. Use of the universal soil loss equation in the semiarid southwest. Soil erosion: prediction and control, special publication n°21, *The proceeding of a national conference on Soil Erosion*, 24-26 May 1976, pp. 41-49.
- Papy F., Le Bissonnais Y., Guérif J. 1995. *Valorisation et protection de la ressource en eau. Projet : Recherches sur les processus physiques et la maîtrise de l'érosion hydrique à l'échelle d'un territoire agricole. Le programme valorisation et protection des ressources en eau 1992-1995*. Protection des ressources en eau, INRA éditions, 27p.
- Pimental DC, 1995. Environmental and economic cost of soil erosion and conservation benefits. *Science* 1995; 267(5201): pp. 1117–1123
- Plan Bleu. 1999. Publication téléchargé sur le site.

- Poesen J. 1983. An improved splash transport model. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 29 (2), 373-382.
- Poesen J. 1990. Erosion process research in relation to soil erodibility and some implication for improving soil quality. In: Albaladejo J., Stocking M-A., Diaz E., Editors. *Soil degradation and rehabilitation in Mediterranean environmental conditions*, C.S.I.C., Murcia, pp. 159-170.
- Poesen J-W., Torri D., Bunte K., 1994. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scale: a review. *Catena*, 23, pp. 141-166.
- Poesen J-W., Vandeke K., Van Wesemael B. 1996. Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. *Erosion and sediment yield: global and regional perspectives* (Proceedings of the Exeter symposium, July 1996), *IAHS Publ.* 236, pp. 251-266.
- Rahhou M. 1999. *L'érosion dans le Prérif central, zone interfluviale Leben-Sebou-Ouergha, un prolongement de l'évolution naturelle, une production sociale*. Thèse d'Etat, Univ. Mohammed V, Rabat, 300p.
- Raoult J.F. 1966. La chaîne du Haouz du col d'Azlu d'Arabia au Bab Aounsar. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, 184, pp. 61-148.
- Rejeb M.M. 1996. *Contribution à l'étude de l'érosion et de l'envasement de la retenue collinaire dans le bassin versant de Saadine 1 (Tunisie) à l'aide du système d'information géographique (SIG)*. Louvain: Fac. Sci. Agro., Mémoire d'Ingénieur, 173 p.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K. and Yoder D.C., 1997. *Predicting soil erosion by water : A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Agricultural handbook N° 703, USDA, 125 p.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Porter J.P. 1991. RUSLE : Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46p.
- Renard K.G., Foster G.R., Yoder D.C., McCool D. 1994. RUSLE revisited: status, questions, answers and the future. *Journal of Soil and Water Conservation* 49(3), pp. 213-220.
- Roose E, 1994 - Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin pédologique de la FAO*, 70, 354 p.
- Roose E. 1973. *Dix-sept années de mesure expérimentale de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire*. ORSTOM Abidjan, Thèse Doc. Ing. Fac. Sci. Abidjan, n° 20, 125 p.
- Roose E. 1999. Evolution historique des stratégies de lutte antiérosive. Vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols : (CGES). *Bulletin Réseau Erosion*, 19, pp. 11-25.

- Roose E. et Sarrailh J.M. 1989. Erodibility de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 25(1), pp. 7-30.
- Roose E., Arabi M., Brahamia K., Chebbani R., Mazour M., Morsli B. 1993. Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification sur la production agricole par la GCES : Synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 28(2), pp. 289-308.
- Ryan J. 1982. *A perspective on soil erosion and conservation in Lebanon*. Publication n° 69, American University of Beirut, pp. 15-38.
- Sabir M., Barthes B. Rosse E. 2004. Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). *Sécheresse*, vol. 15, n° 1, pp. 105-110.
- Saccardy L., 1950. Note sur le calcul des banquettes de restauration des sols. *Terres et Eaux*, 11, pp. 3-19.
- Saddiqi O. 1988. *Tectonique de la remontée du manteau : les péridotites des Beni Bousra et leur enveloppe métamorphique, Rif interne, Maroc*. Thèse, Univ. L. Pasteur, Strasbourg, 171 p.
- Sadiki A., Bouhlassa S., Auajjar J., Faleh A., Macaire J.J. 2004. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation Universelle de Perte en Sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'Oued Boussouab. *Bulletin de l'Institut Scientifique*, Rabat, section Sciences de la Terre, no 26, pp. 69-79.
- Sanoussi Manzo M.L. 2011. *Utilisation de la géomatique pour la contribution à la cartographie des sols de la région de Tétouan*. Mémoire IAV Hassan II, 108p.
- Schwing J.F. 1979. Evaluation du poids économique de l'érosion dans le vignoble alsacien. *In: Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré*. Strasbourg C.R. publiés par H. et T. Vogt, CEREG, Strasbourg, 275 p. : pp. 175-182
- Shi Z.H., Cai C.F., Ding S.W., Li Z.X., Wang T.W., Sun Z.C. 2002. Assessment of Erosion Risk with the Rusle and Gis in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang River. *Proceeding of the 12th ISCO Conference*, Beijing, pp. 73-78.
- Shrimalil, S.S., Aggarwalz, S.P. and Samra, J.S. (2001) Prioritizing erosion-prone areas in hills using remote sensing and GIS – a case study of the Sukhna Lake catchment (Northern India). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 3, pp. 54-60.
- Sinniger R., J.-L. Boillat, G. DeCesare et N. Beyer (eds.). 1996. Ruissellement et érosion de surface. *Comptes-rendus du séminaire du 24 octobre à l'EPFL*, Rapport LCH, 19 p.

- Siteri H., Aït Brahim L., Sossey A.F., Al Hamdouni I., El Hatimi N., Labraimi M., Ammar A., Baghdad B., Tahri M. 2003. Intégration du modèle USLE dans un SIG pour la détermination de la dégradation spécifique des sols dans le Rif Septentrional (cas du bassin versant de l'oued Nakhla). *Trav. Inst. Sci. Rabat, sér. Géol. & Géogr. phys.*, Vol. 21, pp. 241-276.
- Smith D.D. 1941. Interpretation of soil conservation data for field use. *Agric. Eng.*, Vol. 22, pp. 173-175.
- Smith D.D., Whitt, D.M. 1947. Estimating soil losses from field areas of claypan soils. *Soil: "Science Society of America Proceedings"*, Vol. 12, pp. 485-490.
- Smith D.D., Whitt, D.M. 1948. Evaluating soil losses from field areas. *Agric. Engng*, N° 29, pp. 394-398.
- Smith D.D., Wischmeier W.H. 1957. Factors affecting sheet and rill erosion. *Amer. Geophys. Union Trans.* 386: 88-896.
- Sohier C., Dautrebande S.. 2005. *Modélisation hydrologique des sols et des bassins versants de la Région wallonne en relation avec les pratiques agricoles : le modèle EPICgrid*. Rapport final 2005 – Projet «Pirene» Méthodes agri-environnementales du Gouvernement wallon (2001-2004), 80p.
- Stengel P., Gelin S. (dirs.), 1998, *Sol: interface fragile*, QUAE EDITIONS. Paris, INRA.
- Suter G. 1965. La région du moyen Ouerrha (Rif, Maroc). Etude préliminaire sur la stratigraphie et la tectonique. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, n° 183, pp. 7-17.
- Suter G. 1980. Carte géologique de la chaîne rifaine. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, n° 245.
- Suter G. 1986. Carte géologique d'Asilah à 1/50.000. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc* n°346.
- Suter G., Fiechter G. 1966. Le Rif méridional atlantique (Maroc) : aperçu structural sur la région Ouezzane-Zoumi et le pays du Habt (Larache). *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*. T 26, n°188, 15-20p.
- Tahiri M, Merzouk A, Lamb HF, Maxted RW. 1993. Étude de l'érosion hydrique dans le plateau d'Imelchil dans le Haut Atlas central. Utilisation d'un SIG. *Géo Observateur*; 3 : pp. 51-60.
- Taibi M., Tardif L., Carrier D., Laflamme G., Rompré M., 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 27 p.
- Tayaa M. 1997. *Bassin versant d'Oued Nakhla. Caractéristiques physiques, hydrologiques et détermination du taux d'érosion*. Rabat : projet PREM – Ministère de l'Environnement et l'Agence Américain pour le Développement International (USAID), 94 p.

- Tejera De Leon, J. 1993. Les bassins néogènes d'avant-pays du Rif externe occidental liés à la transformante de Jebha-Arbaoua (Maroc). *Thèse de Doctorat ès Sciences*, Univ. De Pau et des Pays de l'Adour, 323 p.
- Thornes J-B. 1995. Mediterranean desertification and the vegetation cover. In: Fantechi R., Peter D., Balabanis P., Rubio J-L., Editors. Desertification in a European context: physical and socio-economic aspects. European Commission Report EUR 15415, pp. 169-194.
- Van Den Bosch J. W. 1974. Quelques principes généraux de l'interprétation gravimétrique illustrés par des exemples empruntés à la carte gravimétrique du Maroc (structure du Rif et intrusions granitiques au Maroc central). Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 255, pp. 117-136.
- Van Dijck, S., 2000. Effects of agricultural land use on surface runoff and erosion in a Mediterranean area, Thesis, Utrecht, 246 pp.
- Van Doren C.A., Bartelli L.J. 1956. A method of forecasting soil losses. Agric. Eng., 37, pp. 335-341.
- Verheye W., Osman A. 1974. Observations sur la lithologie du liban Sud et son influence sur le développement des sols et le façonnement du paysage. Institut des Recherches Agronomiques Liban. Publication n°55, série scientifique, Septembre 1974, 38p.
- Vidal J.C. 1971. Une interprétation nouvelle des nappes du Prérif central (Maroc) et ses conséquences sur la structure de leur substratum autochtone. C.R. Acad. Sc. Paris, t.272, Série D, pp. 24-27.
- Vidal J.C. 1977. Structure actuelle et évolution depuis le Miocène de la chaîne rifaine (partie sud de l'arc de Gibraltar). *Bull. soc. Géol. France*, (7), t XIX, n° 4, pp. 789-796.
- Viguié J.M. 2003. *Mesure et modélisation de l'érosion pluviale. Application au vignoble de Vidouban (Var)*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 335 p.
- Vogt T., Gomer D. 1992. Estimation du ruissellement et des matières en suspension par l'utilisation d'un SIG : intégrant MNT, données Landsat TM et données hydrologiques de terrain. *Conférence Européenne de l'année spatiale internationale, Munich, 2 avril, Bulletin S.F.P.T. n° 128, session n° 4*, pp. 7-17.
- Wachal, D.J. and Hudak, P.F. 2000. Mapping landslide susceptibility in Travis Country, Texas, USA. *GeoJournal*, vol. 51, pp. 245-253.
- Wicherek S., Laverdière M. 1993. Agricultural lands in Canada: Degradation and conservation. *Cahiers Agricultures* 2(4), pp. 245-255.
- Wildi W. 1981. Le Frysche Cône de sédimentation en eau profonde à la bordure nord-ouest de l'Afrique au Jurassique moyen et supérieur (Rif externe, Maroc). *Eclogae. Géol. Helv.*, vol. 74/2, pp. 481-527.
- Wildi W., Wold M., Uttinger J. 1977. La Dorsale calcaire entre Tétouan et Assifane (Rif

- interne, Maroc). *Eclog. geol. Helv.*, Bâle, vol. 70, n° 2, p. 371-416.
- Wildi, W. 1983. La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. *Rev. Géol. Dyn. Géogr. phys.*, 24, pp. 201-297.
- Williams J.R. 1975. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, ARS-S-40, US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, pp. 244-252.
- Williams J.R., Nicks A.D., Arnold J.G. 1985. Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(6), pp. 970-986.
- Williams JR, Jones CA, Dyke PT. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASAE* 27, pp. 129-144.
- Wischmeier W.H. 1955. Punched cards records runoff and soil loess data. *Agr. Engin.*, 36, pp. 664-666
- Wischmeier W.H. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. *Soil Se. Soc. Amer. Proc.*, Vol. 23, pp. 246-249.
- Wischmeier, W. H. 1976. Use and misuse of the universal soil loss equation. *J. Soil and Water Cons.* 31(1):5-9.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans Amer Geophys Union Washington*, Vol. 39, pp. 285-291.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. 1960. A universal soil loss estimation equation to guide conservation farm planning. *Inter. Cong. soil Sci.*, 7, Madison, Vol. 1, pp. 418-425.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. 1965. *Prediction rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains : a guide for selection of practices for soil and water conservation*. Agricultural Research Service, U.S. Dept of Agriculture in cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station. Agric. Handbook, n° 282, 47p.
- Wischmeier W. H. et Smith D. D. 1978. Predicting rainfall erosion. A guide to conservation planning. USDA-ARS, *Agriculture Handbook* n° 537, 58 p.
- Yacouba, M., C. Reij and R. Rochette, 1995: Atelier de restitution sur la gestion des terroirs et le développement local au Sahel, Niamey, 30 Mai-2 Juin 1995. Club de Sahel, SAH/D(95)448.
- Zingg A.W. 1940. Degree and length of land slope as its affect soil loss and runoff. *Agricultural Engineering*, Vol. 21, pp. 59-64.

WEBOGRAPHIE

DESPA, 2005. <http://despa.obspmJr/-moncuque/DESS/nodel.html>

Fox D., Carrega P., Morschel J., Emsellem K. 2008. La dégradation des sols dans le monde. [<http://unt.unice.fr/uoh/degsol/index.php>].

Mitasova H., Brown W.M., Hohmann M., Warren S. (s.d., en ligne) *Using Soil Erosion Modeling for Improved Conservation Planning: A GIS-based Tutorial*. Geographic Modeling Systems Lab, University of Illinois at Urbana-Champaign. [<http://skagit.meas.ncsu.edu/~helenag/mslab/reports/CerlErosionTutorial/denix/default.htm>].

Nafo I.I. 2000. *Conservation des sols avec l'aide du SIG et de la télédétection; Exemple d'utilisation du SIG et de la télédétection pour l'estimation des pertes en terres dans un petit bassin de l'ouest du Mali*. Symposium Malien sur les Sciences Appliquées, 2000, 11 p. [<http://www.msas.maliwatch.org/msas2000/html/msas009a.html>], pp. 141-151.

Ruellan A., Blanchart E., Brauman A., Grimaldi ., Grünberger O., Barbiero L., Chaplot V., Monga O., Bernoux M. 2008. Les sols, des milieux vivants très fragiles. Les dossiers thématiques de l'Institut de recherche pour le développement IRD. SUDS en ligne. [<http://www.mpl.ird.fr/suds-en-ligne/sols/index.html>].

Tsague G.E. 2005. La compaction des sols : les causes et les solutions. *Agri-réseau, grandes cultures*, 5 p. [<http://www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/navigation.aspx?sid=1015>].

Zaher H. 2010. Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs. Département Sol-Eau-Biodiversité, Tabriquet, Salé, MAROC. [<http://www.ma.auf.org/erosion/index.html>].

ANNEXES

ANNEXE I

Tableau des Unités Cartographiques Homogènes

Code	UCV	UCPh	UCM	Superficie (ha)	Superficie moyenne (ha)	% superficie
1	Cours et plans d'eau	11	Argiles et Pérites	150,70	75,37	0,06%
2	Cours et plans d'eau	11	Daïas et étangs	2988,13	597,63	1,27%
3	Cours et plans d'eau	11	Flysch	268,12	89,39	0,11%
4	Cours et plans d'eau	11	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	109,44	36,50	0,05%
5	Cours et plans d'eau	11	Marnes	52,69	52,74	0,02%
6	Cours et plans d'eau	11	Terrasses quaternaires	3255,24	250,41	1,39%
7	Cours et plans d'eau	21	Terrasses quaternaires	274,55	91,53	0,12%
8	Cours et plans d'eau	31	Flysch	69,20	69,24	0,03%
9	Cours et plans d'eau	31	Terrasses quaternaires	193,95	97,00	0,08%
10	Cours et plans d'eau	51	Flysch	106,08	106,13	0,05%
11	Forêt de feuillus	11	Daïas et étangs	37,95	38,00	0,02%
12	Forêt de feuillus	11	Formations détritiques	88,26	88,31	0,04%
13	Forêt de feuillus	11	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	189,22	94,63	0,08%
14	Forêt de feuillus	21	Formations détritiques	71,26	35,65	0,03%
15	Forêt de feuillus	21	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	87,36	43,70	0,04%
16	Forêt de feuillus	31	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	53,96	54,01	0,02%
17	Forêt de feuillus	31	Flysch	368,96	92,25	0,16%
18	Forêt de feuillus	31	Formations détritiques	96,09	96,14	0,04%
19	Forêt de feuillus	31	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	112,08	112,13	0,05%
20	Forêt de feuillus	31	Grès	94,23	94,28	0,04%
21	Forêt de feuillus	31	Schistes	26,19	26,24	0,01%
22	Forêt de feuillus	31	Terrasses quaternaires	644,05	161,02	0,27%
23	Forêt de feuillus	32	Calcaires et Dolomies	43,66	43,71	0,02%
24	Forêt de feuillus	32	Flysch	34,17	34,22	0,01%
25	Forêt de feuillus	33	Flysch	48,84	48,89	0,02%
26	Forêt de feuillus	34	Flysch	77,84	77,89	0,03%
27	Forêt de feuillus	41	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	218,72	109,38	0,09%
28	Forêt de feuillus	41	Flysch	471,41	94,29	0,20%
29	Forêt de feuillus	41	Formations détritiques	103,85	103,90	0,04%
30	Forêt de feuillus	41	Grès	203,13	203,18	0,09%

31	Forêt de feuillus	41	Schites	212,05	106,05	0,09%
32	Forêt de feuillus	42	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	660,47	165,13	0,28%
33	Forêt de feuillus	42	Flysch	2167,35	83,36	0,92%
34	Forêt de feuillus	42	Formations détritiques	47,39	47,43	0,02%
35	Forêt de feuillus	42	Grès	241,29	120,67	0,10%
36	Forêt de feuillus	43	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	64,54	64,59	0,03%
37	Forêt de feuillus	43	Flysch	1287,55	75,74	0,55%
38	Forêt de feuillus	44	Flysch	236,61	78,89	0,10%
39	Forêt de feuillus	51	Flysch	749,86	124,98	0,32%
40	Forêt de feuillus	51	Formations détritiques	266,99	133,52	0,11%
41	Forêt de feuillus	51	Grès	346,40	57,74	0,15%
42	Forêt de feuillus	51	Roches métamorphiques	115,52	115,57	0,05%
43	Forêt de feuillus	51	Schites	889,58	98,85	0,38%
44	Forêt de feuillus	51	Terrasses quaternaires	56,16	56,21	0,02%
45	Forêt de feuillus	52	Calcaires et Dolomies	150,49	75,27	0,06%
46	Forêt de feuillus	52	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	46,61	46,66	0,02%
47	Forêt de feuillus	52	Flysch	2803,98	127,46	1,19%
48	Forêt de feuillus	52	Formations détritiques	1035,04	207,02	0,44%
49	Forêt de feuillus	52	Grès	1211,90	134,66	0,52%
50	Forêt de feuillus	52	Roches métamorphiques	121,45	121,50	0,05%
51	Forêt de feuillus	52	Schites	3822,13	212,34	1,63%
52	Forêt de feuillus	52	Terrasses quaternaires	58,93	58,97	0,03%
53	Forêt de feuillus	53	Calcaires et Dolomies	663,01	221,02	0,28%
54	Forêt de feuillus	53	Flysch	2841,85	142,10	1,21%
55	Forêt de feuillus	53	Formations détritiques	296,63	74,17	0,13%
56	Forêt de feuillus	53	Grès	521,86	130,48	0,22%
57	Forêt de feuillus	53	Mames	164,15	164,20	0,07%
58	Forêt de feuillus	53	Schites	1224,46	174,93	0,52%
59	Forêt de feuillus	54	Calcaires et Dolomies	161,83	80,94	0,07%
60	Forêt de feuillus	54	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	70,05	70,10	0,03%
61	Forêt de feuillus	54	Flysch	205,53	102,79	0,09%
62	Forêt de feuillus dégradée	21	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	103,42	103,47	0,04%
63	Forêt de feuillus dégradée	31	Argiles et Pérites	108,41	108,46	0,05%
64	Forêt de feuillus dégradée	31	Flysch	138,30	69,17	0,06%
65	Forêt de feuillus dégradée	31	Terrasses quaternaires	97,21	97,26	0,04%
66	Forêt de feuillus dégradée	32	Flysch	215,07	215,12	0,09%
67	Forêt de feuillus dégradée	41	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	107,13	107,18	0,05%

68	Forêt de feuillus dégradée	41	Flysch	360,32	72,07	0,15%
69	Forêt de feuillus dégradée	42	Flysch	1320,40	165,06	0,56%
70	Forêt de feuillus dégradée	43	Flysch	639,70	159,94	0,27%
71	Forêt de feuillus dégradée	51	Roches métamorphiques	87,34	87,38	0,04%
72	Forêt de feuillus dégradée	52	Flysch	275,29	91,78	0,12%
73	Forêt de feuillus dégradée	52	Formations détritiques	67,28	67,33	0,03%
74	Forêt de feuillus dégradée	52	Grès	64,45	64,49	0,03%
75	Forêt de feuillus dégradée	52	Roches métamorphiques	48,99	49,04	0,02%
76	Forêt de feuillus dégradée	52	Schistes	477,48	95,51	0,20%
77	Forêt de feuillus dégradée	53	Calcaires et Dolomies	221,06	221,11	0,09%
78	Forêt de feuillus dégradée	53	Flysch	485,83	161,96	0,21%
79	Forêt de feuillus dégradée	53	Formations détritiques	133,52	133,56	0,06%
80	Forêt de feuillus dégradée	53	Schistes	347,41	115,82	0,15%
81	Forêts et végétation arbustive en mutation	31	Schistes	57,15	57,20	0,02%
82	Forêts et végétation arbustive en mutation	31	Terrasses quaternaires	212,23	212,28	0,09%
83	Forêts et végétation arbustive en mutation	41	Flysch	203,52	101,78	0,09%
84	Forêts et végétation arbustive en mutation	42	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	187,36	187,40	0,08%
85	Forêts et végétation arbustive en mutation	42	Flysch	253,49	84,51	0,11%
86	Forêts et végétation arbustive en mutation	43	Argiles et Pérites	106,37	106,42	0,05%
87	Forêts et végétation arbustive en mutation	43	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	79,92	79,97	0,03%
88	Forêts et végétation arbustive en mutation	43	Flysch	44,54	44,59	0,02%
89	Forêts et végétation arbustive en mutation	44	Flysch	86,76	86,81	0,04%
90	Forêts et végétation arbustive en mutation	52	Schistes	197,09	197,14	0,08%
91	Forêts et végétation arbustive en mutation	53	Argiles et Pérites	65,55	65,60	0,03%
92	Forêts et végétation arbustive en mutation	53	Calcaires et Dolomies	271,73	271,78	0,12%
93	Forêts et végétation arbustive en mutation	53	Flysch	105,66	52,86	0,04%
94	Forêts et végétation arbustive en mutation	53	Formations détritiques	60,49	60,54	0,03%
95	Forêts et végétation arbustive en mutation	54	Calcaires et Dolomies	261,24	261,29	0,11%
96	Forêts et végétation arbustive en mutation	54	Flysch	97,33	97,38	0,04%
97	Pelouses, Landes et Broussailles	11	Daïas et étangs	223,80	74,62	0,10%
98	Pelouses, Landes et Broussailles	11	Marnes	63,94	63,99	0,03%
99	Pelouses, Landes et Broussailles	11	Terrasses quaternaires	160,45	80,25	0,07%
100	Pelouses, Landes et Broussailles	21	Terrasses quaternaires	239,92	79,99	0,10%
101	Pelouses, Landes et Broussailles	31	Argiles et Pérites	219,98	220,03	0,09%
102	Pelouses, Landes et Broussailles	31	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	183,96	92,00	0,08%
103	Pelouses, Landes et Broussailles	31	Flysch	33,90	33,95	0,01%
104	Pelouses, Landes et Broussailles	31	Formations détritiques	84,41	84,45	0,04%

105	Pelouses, Landes et Broussailles	31	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	200,86	100,45	0,09%
106	Pelouses, Landes et Broussailles	31	Marnes	121,57	121,62	0,05%
107	Pelouses, Landes et Broussailles	31	Terrasses quaternaires	527,58	87,94	0,22%
108	Pelouses, Landes et Broussailles	32	Argiles et Pélites	157,41	157,46	0,07%
109	Pelouses, Landes et Broussailles	32	Flysch	160,62	53,56	0,07%
110	Pelouses, Landes et Broussailles	32	Terrasses quaternaires	83,58	83,63	0,04%
111	Pelouses, Landes et Broussailles	34	Calcaires et Dolomies	63,81	63,86	0,03%
112	Pelouses, Landes et Broussailles	41	Argiles et Pélites	124,66	41,57	0,05%
113	Pelouses, Landes et Broussailles	41	Flysch	448,46	74,75	0,19%
114	Pelouses, Landes et Broussailles	42	Flysch	1316,75	146,31	0,56%
115	Pelouses, Landes et Broussailles	42	Marnes	129,84	129,89	0,06%
116	Pelouses, Landes et Broussailles	42	Terrasses quaternaires	78,84	78,89	0,03%
117	Pelouses, Landes et Broussailles	43	Calcaires et Dolomies	45,47	45,52	0,02%
118	Pelouses, Landes et Broussailles	43	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	73,03	73,08	0,03%
119	Pelouses, Landes et Broussailles	43	Flysch	423,73	105,95	0,18%
120	Pelouses, Landes et Broussailles	52	Flysch	162,33	40,59	0,07%
121	Pelouses, Landes et Broussailles	52	Grès	25,62	25,67	0,01%
122	Pelouses, Landes et Broussailles	52	Marnes	87,42	87,47	0,04%
123	Pelouses, Landes et Broussailles	52	Schistes	157,64	78,84	0,07%
124	Pelouses, Landes et Broussailles	53	Calcaires et Dolomies	224,70	74,92	0,10%
125	Pelouses, Landes et Broussailles	53	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	123,43	123,47	0,05%
126	Pelouses, Landes et Broussailles	53	Flysch	298,65	99,56	0,13%
127	Pelouses, Landes et Broussailles	53	Formations détritiques	72,93	72,98	0,03%
128	Pelouses, Landes et Broussailles	54	Calcaires et Dolomies	706,20	100,89	0,30%
129	Pelouses, Landes et Broussailles	54	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	89,55	44,80	0,04%
130	Pelouses, Landes et Broussailles	54	Flysch	117,26	117,31	0,05%
131	Pelouses, Landes et Broussailles	54	Formations détritiques	94,70	94,75	0,04%
132	Pelouses, Landes et Broussailles	54	Marnes	198,67	99,36	0,08%
133	Pelouses, Landes et Broussailles	55	Calcaires et Dolomies	243,31	121,68	0,10%
134	Pelouses, Landes et Broussailles	55	Marnes	176,71	88,38	0,08%
135	Plages, sables, dunes	11	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	372,22	93,07	0,16%
136	Plages, sables, dunes	11	Terrasses quaternaires	73,93	73,97	0,03%
137	Plages, sables, dunes	21	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	330,83	82,72	0,14%
138	Plages, sables, dunes	31	Flysch	37,75	37,80	0,02%
139	Plages, sables, dunes	31	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	277,35	69,35	0,12%
140	Terres arables	11	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	95,80	95,85	0,04%
141	Terres arables	21	Flysch	105,40	105,45	0,04%

142	Terres arables	21	Formations détritiques	52,60	52,65	0,02%
143	Terres arables	21	Terrasses quaternaires	97,51	97,56	0,04%
144	Terres arables	31	Argiles et Pérites	1632,81	136,07	0,70%
145	Terres arables	31	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	66,30	66,35	0,03%
146	Terres arables	31	Flysch	404,30	67,39	0,17%
147	Terres arables	31	Marnes	1091,87	218,38	0,46%
148	Terres arables	31	Terrasses quaternaires	1405,32	66,92	0,60%
149	Terres arables	32	Argiles et Pérites	49,20	49,25	0,02%
150	Terres arables	32	Flysch	66,01	33,03	0,03%
151	Terres arables	32	Terrasses quaternaires	293,54	293,59	0,12%
152	Terres arables	34	Argiles et Pérites	81,80	81,84	0,03%
153	Terres arables	41	Argiles et Pérites	32,31	32,36	0,01%
154	Terres arables	41	Flysch	1142,84	126,99	0,49%
155	Terres arables	41	Marnes	725,98	121,00	0,31%
156	Terres arables	41	Terrasses quaternaires	118,69	39,58	0,05%
157	Terres arables	42	Argiles et Pérites	317,83	105,96	0,14%
158	Terres arables	42	Flysch	1278,71	159,84	0,54%
159	Terres arables	42	Marnes	679,05	113,18	0,29%
160	Terres arables	42	Terrasses quaternaires	31,57	31,62	0,01%
161	Terres arables	43	Argiles et Pérites	205,11	68,38	0,09%
162	Terres arables	43	Flysch	865,82	123,70	0,37%
163	Terres arables	43	Marnes	105,00	105,04	0,04%
164	Terres arables	44	Flysch	27,80	27,84	0,01%
165	Terres arables	51	Flysch	320,97	321,02	0,14%
166	Terres arables	51	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	62,37	62,42	0,03%
167	Terres arables	51	Schistes	130,91	130,96	0,06%
168	Terres arables	52	Flysch	69,62	69,67	0,03%
169	Terres arables	52	Marnes	99,34	99,39	0,04%
170	Terres arables	52	Schistes	99,27	49,66	0,04%
171	Terres arables	53	Marnes	37,41	37,45	0,02%
172	Terres arables	53	Schistes	51,62	51,66	0,02%
173	Végétations sclérophylles	11	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	50,41	50,46	0,02%
174	Végétations sclérophylles	21	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	87,78	87,83	0,04%
175	Végétations sclérophylles	31	Argiles et Pérites	167,50	83,77	0,07%
176	Végétations sclérophylles	31	Flysch	694,21	173,57	0,30%
177	Végétations sclérophylles	31	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	53,96	54,01	0,02%
178	Végétations sclérophylles	31	Grès	66,47	66,52	0,03%

179	Végétations sclérophylles	31	Roches métamorphiques	110,53	110,58	0,05%
180	Végétations sclérophylles	31	Schistes	63,94	63,99	0,03%
181	Végétations sclérophylles	31	Terrasses quaternaires	106,92	53,49	0,05%
182	Végétations sclérophylles	32	Argiles et Pérites	100,74	100,79	0,04%
183	Végétations sclérophylles	32	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	125,67	125,72	0,05%
184	Végétations sclérophylles	32	Flysch	930,82	84,62	0,40%
185	Végétations sclérophylles	32	Terrasses quaternaires	220,06	110,05	0,09%
186	Végétations sclérophylles	33	Calcaires et Dolomies	315,60	105,22	0,13%
187	Végétations sclérophylles	33	Flysch	60,10	60,14	0,03%
188	Végétations sclérophylles	41	Argiles et Pérites	118,11	39,39	0,05%
189	Végétations sclérophylles	41	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	142,96	143,01	0,06%
190	Végétations sclérophylles	41	Flysch	1604,44	123,42	0,68%
191	Végétations sclérophylles	41	Grès	112,55	112,60	0,05%
192	Végétations sclérophylles	41	Marnes	135,35	135,39	0,06%
193	Végétations sclérophylles	41	Roches métamorphiques	123,22	123,27	0,05%
194	Végétations sclérophylles	41	Schistes	102,65	102,70	0,04%
195	Végétations sclérophylles	41	Terrasses quaternaires	79,96	80,01	0,03%
196	Végétations sclérophylles	42	Argiles et Pérites	110,99	37,01	0,05%
197	Végétations sclérophylles	42	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	394,40	65,74	0,17%
198	Végétations sclérophylles	42	Flysch	4633,40	132,38	1,97%
199	Végétations sclérophylles	42	Marnes	371,72	61,96	0,16%
200	Végétations sclérophylles	42	Terrasses quaternaires	249,30	124,67	0,11%
201	Végétations sclérophylles	43	Argiles et Pérites	149,39	149,44	0,06%
202	Végétations sclérophylles	43	Calcaires et Dolomies	206,89	68,98	0,09%
203	Végétations sclérophylles	43	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	318,56	106,20	0,14%
204	Végétations sclérophylles	43	Flysch	2323,85	110,66	0,99%
205	Végétations sclérophylles	43	Marnes	85,83	42,94	0,04%
206	Végétations sclérophylles	44	Argiles et Pérites	240,52	240,57	0,10%
207	Végétations sclérophylles	44	Calcaires et Dolomies	310,10	155,08	0,13%
208	Végétations sclérophylles	44	Flysch	837,66	104,71	0,36%
209	Végétations sclérophylles	44	Grès	74,96	75,01	0,03%
210	Végétations sclérophylles	51	Argiles et Pérites	50,19	50,24	0,02%
211	Végétations sclérophylles	51	Flysch	463,96	51,56	0,20%
212	Végétations sclérophylles	51	Grès	112,21	56,13	0,05%
213	Végétations sclérophylles	52	Argiles et Pérites	131,47	65,76	0,06%
214	Végétations sclérophylles	52	Calcaires et Dolomies	158,47	79,26	0,07%
215	Végétations sclérophylles	52	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	151,99	76,02	0,06%

216	Végétations sclérophylles	52	Flysch	1878,25	85,38	0,80%
217	Végétations sclérophylles	52	Schistes	243,59	81,21	0,10%
218	Végétations sclérophylles	53	Calcaires et Dolomies	730,33	81,15	0,31%
219	Végétations sclérophylles	53	Flysch	2211,94	88,48	0,94%
220	Végétations sclérophylles	53	Marnes	79,76	79,81	0,03%
221	Végétations sclérophylles	54	Argiles et Pérites	39,05	39,09	0,02%
222	Végétations sclérophylles	54	Calcaires et Dolomies	1404,06	280,82	0,60%
223	Végétations sclérophylles	54	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	49,30	49,35	0,02%
224	Végétations sclérophylles	54	Flysch	1866,33	169,67	0,79%
225	Végétations sclérophylles dégradées	11	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	88,17	88,22	0,04%
226	Végétations sclérophylles dégradées	11	Terrasses quaternaires	162,91	162,96	0,07%
227	Végétations sclérophylles dégradées	31	Flysch	269,90	53,99	0,11%
228	Végétations sclérophylles dégradées	31	Terrasses quaternaires	25,77	25,82	0,01%
229	Végétations sclérophylles dégradées	32	Argiles et Pérites	69,54	69,59	0,03%
230	Végétations sclérophylles dégradées	32	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	32,86	32,91	0,01%
231	Végétations sclérophylles dégradées	32	Flysch	88,92	88,96	0,04%
232	Végétations sclérophylles dégradées	41	Argiles et Pérites	126,34	126,39	0,05%
233	Végétations sclérophylles dégradées	41	Flysch	546,28	78,05	0,23%
234	Végétations sclérophylles dégradées	42	Argiles et Pérites	101,56	101,61	0,04%
235	Végétations sclérophylles dégradées	42	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	181,88	181,93	0,08%
236	Végétations sclérophylles dégradées	42	Flysch	857,37	107,18	0,37%
237	Végétations sclérophylles dégradées	42	Marnes	152,14	76,09	0,06%
238	Végétations sclérophylles dégradées	43	Argiles et Pérites	51,14	51,19	0,02%
239	Végétations sclérophylles dégradées	43	Calcaires et Dolomies	64,66	64,71	0,03%
240	Végétations sclérophylles dégradées	43	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	140,26	46,77	0,06%
241	Végétations sclérophylles dégradées	43	Flysch	618,25	103,05	0,26%
242	Végétations sclérophylles dégradées	43	Grès	103,66	103,70	0,04%
243	Végétations sclérophylles dégradées	51	Flysch	259,98	86,67	0,11%
244	Végétations sclérophylles dégradées	51	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	32,31	32,36	0,01%
245	Végétations sclérophylles dégradées	51	Grès	291,87	97,30	0,12%
246	Végétations sclérophylles dégradées	51	Roches métamorphiques	167,59	83,82	0,07%
247	Végétations sclérophylles dégradées	51	Schistes	244,95	61,25	0,10%
248	Végétations sclérophylles dégradées	51	Terrasses quaternaires	170,92	85,48	0,07%
249	Végétations sclérophylles dégradées	52	Flysch	305,39	61,09	0,13%
250	Végétations sclérophylles dégradées	52	Grès	330,39	110,14	0,14%
251	Végétations sclérophylles dégradées	52	Roches métamorphiques	107,46	107,50	0,05%
252	Végétations sclérophylles dégradées	52	Schistes	497,92	124,49	0,21%

253	Végétations sclérophylles dégradées	53	Calcaires et Dolomies	104,36	52,20	0,04%
254	Végétations sclérophylles dégradées	53	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	124,94	124,99	0,05%
255	Végétations sclérophylles dégradées	53	Flysch	945,23	105,03	0,40%
256	Végétations sclérophylles dégradées	53	Grès	133,04	133,09	0,06%
257	Végétations sclérophylles dégradées	53	Schistes	44,93	44,98	0,02%
258	Végétations sclérophylles dégradées	54	Argiles et Pérites	66,06	66,11	0,03%
259	Végétations sclérophylles dégradées	54	Calcaires et Dolomies	353,84	176,95	0,15%
260	Végétations sclérophylles dégradées	54	Flysch	190,63	63,56	0,08%
261	Zones agricoles	11	Daïas et étangs	1055,38	95,95	0,45%
262	Zones agricoles	11	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	197,13	197,18	0,08%
263	Zones agricoles	11	Terrasses quaternaires	5507,42	211,83	2,34%
264	Zones agricoles	21	Argiles et Pérites	63,74	63,79	0,03%
265	Zones agricoles	21	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	30,95	31,00	0,01%
266	Zones agricoles	21	Daïas et étangs	66,75	66,79	0,03%
267	Zones agricoles	21	Formations détritiques	298,05	149,05	0,13%
268	Zones agricoles	21	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	190,60	63,55	0,08%
269	Zones agricoles	21	Terrasses quaternaires	5863,47	172,46	2,50%
270	Zones agricoles	31	Argiles et Pérites	13131,43	215,27	5,59%
271	Zones agricoles	31	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	1122,12	112,22	0,48%
272	Zones agricoles	31	Daïas et étangs	194,04	64,70	0,08%
273	Zones agricoles	31	Flysch	1913,97	91,14	0,81%
274	Zones agricoles	31	Formations détritiques	3673,30	244,89	1,56%
275	Zones agricoles	31	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	228,22	76,09	0,10%
276	Zones agricoles	31	Grès	143,85	143,90	0,06%
277	Zones agricoles	31	Marnes	3696,83	115,53	1,57%
278	Zones agricoles	31	Roches métamorphiques	55,71	55,76	0,02%
279	Zones agricoles	31	Schistes	341,38	68,28	0,15%
280	Zones agricoles	31	Terrasses quaternaires	17672,89	229,52	7,52%
281	Zones agricoles	32	Argiles et Pérites	3152,33	150,11	1,34%
282	Zones agricoles	32	Calcaires et Dolomies	38,35	38,39	0,02%
283	Zones agricoles	32	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	347,41	173,73	0,15%
284	Zones agricoles	32	Flysch	975,51	108,39	0,42%
285	Zones agricoles	32	Marnes	420,75	84,16	0,18%
286	Zones agricoles	32	Terrasses quaternaires	695,17	69,52	0,30%
287	Zones agricoles	33	Argiles et Pérites	60,42	60,47	0,03%
288	Zones agricoles	33	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	34,53	34,58	0,01%
289	Zones agricoles	41	Argiles et Pérites	1433,72	75,46	0,61%

290	Zones agricoles	41	Calcaires et Dolomies	60,69	60,74	0,03%
291	Zones agricoles	41	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	481,17	80,20	0,20%
292	Zones agricoles	41	Flysch	5173,99	166,90	2,20%
293	Zones agricoles	41	Formations détritiques	237,34	59,35	0,10%
294	Zones agricoles	41	Marnes	1546,64	128,89	0,66%
295	Zones agricoles	41	Schistes	456,70	91,35	0,19%
296	Zones agricoles	41	Terrasses quaternaires	1831,75	87,23	0,78%
297	Zones agricoles	42	Argiles et Pérites	5757,81	179,93	2,45%
298	Zones agricoles	42	Calcaires et Dolomies	1017,52	169,59	0,43%
299	Zones agricoles	42	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	1180,25	90,79	0,50%
300	Zones agricoles	42	Flysch	13353,38	199,30	5,69%
301	Zones agricoles	42	Grès	622,19	155,56	0,26%
302	Zones agricoles	42	Marnes	2594,82	162,18	1,10%
303	Zones agricoles	42	Schistes	384,08	192,07	0,16%
304	Zones agricoles	42	Terrasses quaternaires	258,14	36,88	0,11%
305	Zones agricoles	43	Argiles et Pérites	1059,66	75,69	0,45%
306	Zones agricoles	43	Calcaires et Dolomies	183,77	91,91	0,08%
307	Zones agricoles	43	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	995,66	99,57	0,42%
308	Zones agricoles	43	Flysch	6320,54	217,95	2,69%
309	Zones agricoles	43	Grès	490,12	122,54	0,21%
310	Zones agricoles	43	Marnes	391,77	195,91	0,17%
311	Zones agricoles	43	Terrasses quaternaires	92,17	92,22	0,04%
312	Zones agricoles	44	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	46,31	46,36	0,02%
313	Zones agricoles	44	Flysch	337,82	84,47	0,14%
314	Zones agricoles	44	Grès	42,98	43,03	0,02%
315	Zones agricoles	51	Daïas et étangs	64,66	64,71	0,03%
316	Zones agricoles	51	Flysch	385,77	96,45	0,16%
317	Zones agricoles	51	Formations détritiques	204,51	102,28	0,09%
318	Zones agricoles	51	Schistes	257,91	64,49	0,11%
319	Zones agricoles	51	Terrasses quaternaires	552,97	138,25	0,24%
320	Zones agricoles	52	Calcaires et Dolomies	41,60	41,64	0,02%
321	Zones agricoles	52	Flysch	2779,67	111,19	1,18%
322	Zones agricoles	52	Formations détritiques	591,12	98,53	0,25%
323	Zones agricoles	52	Marnes	41,22	41,27	0,02%
324	Zones agricoles	52	Schistes	1209,92	151,25	0,52%
325	Zones agricoles	53	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	56,60	56,65	0,02%
326	Zones agricoles	53	Flysch	2486,89	124,35	1,06%

327	Zones agricoles	53	Formations détritiques	165,67	165,72	0,07%
328	Zones agricoles	53	Schites	296,09	74,04	0,13%
329	Zones agricoles	54	Argiles et Pérites	100,21	100,26	0,04%
330	Zones agricoles	54	Flysch	26,66	26,70	0,01%
331	Zones agricoles	54	Marnes	108,73	108,78	0,05%
332	Zones agricoles	54	Schites	57,47	57,52	0,02%
333	Zones agricoles	55	Calcaires et Dolomies	69,38	69,43	0,03%
334	Zones fortement ou totalement dégradées	11	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	58,32	58,37	0,02%
335	Zones fortement ou totalement dégradées	11	Terrasses quaternaires	70,03	70,08	0,03%
336	Zones fortement ou totalement dégradées	21	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	144,90	72,48	0,06%
337	Zones fortement ou totalement dégradées	31	Argiles et Pérites	71,38	71,43	0,03%
338	Zones fortement ou totalement dégradées	31	Flysch	178,51	89,28	0,08%
339	Zones fortement ou totalement dégradées	31	Formations détritiques	58,34	58,39	0,02%
340	Zones fortement ou totalement dégradées	31	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	66,53	66,58	0,03%
341	Zones fortement ou totalement dégradées	31	Marnes	66,12	33,08	0,03%
342	Zones fortement ou totalement dégradées	31	Terrasses quaternaires	177,99	89,02	0,08%
343	Zones fortement ou totalement dégradées	32	Argiles et Pérites	163,31	54,45	0,07%
344	Zones fortement ou totalement dégradées	32	Terrasses quaternaires	76,28	38,17	0,03%
345	Zones fortement ou totalement dégradées	33	Calcaires et Dolomies	127,40	127,45	0,05%
346	Zones fortement ou totalement dégradées	34	Calcaires et Dolomies	83,38	83,43	0,04%
347	Zones fortement ou totalement dégradées	41	Argiles et Pérites	168,35	168,39	0,07%
348	Zones fortement ou totalement dégradées	41	Calcaires et Dolomies	62,01	62,06	0,03%
349	Zones fortement ou totalement dégradées	41	Flysch	466,02	116,52	0,20%
350	Zones fortement ou totalement dégradées	41	Formations détritiques	78,26	78,30	0,03%
351	Zones fortement ou totalement dégradées	42	Calcaires et Dolomies	62,11	62,15	0,03%
352	Zones fortement ou totalement dégradées	42	Flysch	325,17	54,20	0,14%
353	Zones fortement ou totalement dégradées	43	Argiles et Pérites	133,10	133,15	0,06%
354	Zones fortement ou totalement dégradées	43	Flysch	202,69	101,37	0,09%
355	Zones fortement ou totalement dégradées	44	Calcaires et Dolomies	62,49	62,54	0,03%
356	Zones fortement ou totalement dégradées	44	Flysch	90,70	45,38	0,04%
357	Zones fortement ou totalement dégradées	51	Argiles et Pérites	35,93	35,97	0,02%
358	Zones fortement ou totalement dégradées	51	Flysch	550,85	137,73	0,23%
359	Zones fortement ou totalement dégradées	51	Grès	42,95	43,00	0,02%
360	Zones fortement ou totalement dégradées	51	Terrasses quaternaires	56,83	56,88	0,02%
361	Zones fortement ou totalement dégradées	52	Calcaires et Dolomies	148,48	148,53	0,06%
362	Zones fortement ou totalement dégradées	52	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	48,42	48,47	0,02%
363	Zones fortement ou totalement dégradées	52	Flysch	514,64	85,78	0,22%

364	Zones fortement ou totalement dégradées	52	Schites	40,04	40,09	0,02%
365	Zones fortement ou totalement dégradées	53	Calcaires et Dolomies	252,24	126,15	0,11%
366	Zones fortement ou totalement dégradées	53	Flysch	166,38	83,22	0,07%
367	Zones fortement ou totalement dégradées	53	Formations détritiques	71,79	71,84	0,03%
368	Zones fortement ou totalement dégradées	53	Marnes	27,66	27,71	0,01%
369	Zones fortement ou totalement dégradées	54	Calcaires et Dolomies	2489,15	355,60	1,06%
370	Zones fortement ou totalement dégradées	54	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	73,46	36,75	0,03%
371	Zones fortement ou totalement dégradées	54	Flysch	81,03	40,54	0,03%
372	Zones fortement ou totalement dégradées	55	Calcaires et Dolomies	353,51	88,39	0,15%
373	Zones urbaines	11	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	232,48	77,51	0,10%
374	Zones urbaines	11	Marnes	40,57	40,62	0,02%
375	Zones urbaines	11	Terrasses quaternaires	648,83	92,70	0,28%
376	Zones urbaines	21	Flysch	33,03	33,08	0,01%
377	Zones urbaines	21	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	153,13	76,59	0,07%
378	Zones urbaines	21	Terrasses quaternaires	264,46	52,90	0,11%
379	Zones urbaines	31	Argiles et Pérites	2426,76	242,68	1,03%
380	Zones urbaines	31	Calcaires et Dolomies	163,20	81,62	0,07%
381	Zones urbaines	31	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	451,55	90,32	0,19%
382	Zones urbaines	31	Flysch	1010,28	91,85	0,43%
383	Zones urbaines	31	Formations détritiques	490,11	81,69	0,21%
384	Zones urbaines	31	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	723,14	120,53	0,31%
385	Zones urbaines	31	Marnes	509,42	101,89	0,22%
386	Zones urbaines	31	Terrasses quaternaires	3931,88	218,44	1,67%
387	Zones urbaines	32	Argiles et Pérites	28,88	28,93	0,01%
388	Zones urbaines	32	Cônes d'éboulis et éboulis diffus	109,37	109,41	0,05%
389	Zones urbaines	32	Flysch	212,98	42,61	0,09%
390	Zones urbaines	41	Argiles et Pérites	204,41	68,15	0,09%
391	Zones urbaines	41	Calcaires et Dolomies	214,35	71,47	0,09%
392	Zones urbaines	41	Flysch	587,12	117,43	0,25%
393	Zones urbaines	41	Formations détritiques	88,11	44,08	0,04%
394	Zones urbaines	41	Graviers, Sables et Limons à Galets du littoral, Dunes	130,44	130,49	0,06%
395	Zones urbaines	41	Marnes	130,05	43,37	0,06%
396	Zones urbaines	41	Schites	160,36	160,41	0,07%
397	Zones urbaines	41	Terrasses quaternaires	292,65	146,35	0,12%
398	Zones urbaines	42	Argiles et Pérites	38,65	38,69	0,02%
399	Zones urbaines	42	Calcaires et Dolomies	219,52	219,56	0,09%
400	Zones urbaines	42	Flysch	504,74	84,13	0,21%

401	Zones urbaines	43	Flysch	93,29	93,34	0,04%
402	Zones urbaines	51	Flysch	63,89	63,94	0,03%
403	Zones urbaines	51	Roches métamorphiques	102,33	102,38	0,04%
404	Zones urbaines	51	Terrasses quaternaires	156,31	78,18	0,07%
405	Zones urbaines	52	Calcaires et Dolomies	71,96	72,01	0,03%
406	Zones urbaines	55	Calcaires et Dolomies	74,73	74,78	0,03%
407	Zones urbaines	55	Marnes	86,46	86,51	0,04%
Total				234874,14	128,50	100 %

ANNEXE II

Les analyses chimiques :

I. La matière organique

« METHODE WALKLEY ET BLACK »

1. Principe général

Le carbone de la matière organique présent dans l'échantillon de sol est oxydé par mélange de bichromate de potassium en milieu sulfurique jusqu'au dégagement de CO_2 .

L'oxydation de carbone peut se schématiser par l'équation suivante :

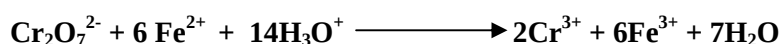


L'excès de bichromate inutilisé dans la réaction est dosé par le sel de Mohr en présence de diphénylamine et de fluorure de sodium dont la couleur passe du bleu foncé au bleu vert.

Ce titrage en retour donne lieu à la réaction suivante :



Ou en écrivant l'équation ionique :



Dans cette méthode, l'oxydation s'effectue à froid mais elle est incomplète.

La proportion de carbone oxydé varie de 60 à 88 %. La moyenne étant de 77 %, il y a lieu d'utiliser un facteur de correction $(100/77) = 1,3$

2. Réactifs

- ❖ Bichromate de potassium $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, solution 1 N.
- ❖ Sel de Mohr, solution 0,5 N.
- ❖ Acide sulfurique concentré (H_2SO_4) $d = 1,83$.
- ❖ Diphénylamine.
- ❖ Acide phosphorique H_3PO_4 , 85 % ($d = 1,71$).

3. Matériels

- ❖ Jeu de pipettes
- ❖ Fioles jaugées de 100 ml
- ❖ Eprouvettes graduée du 100 ml
- ❖ Burettes à piston
- ❖ Erlenmeyer de 300 ml
- ❖ Erlenmeyer de 250 ml

4. Mode opératoire

- peser 0,5 g de terre fine pour les sols riches en matière organique, 1g si le sol est moyennement riche et 2 à 4 g si le sol est pauvre en matière organique ;

- introduire la prise d'essai dans un erlenmeyer de 250ml ;
- ajouter 15ml de bichromate de potassium 1N, puis 20 ml de H₂SO₄ concentré en agitant doucement et laisser reposer une demi-heure.
- ajouter 115 ml d'eau distillée, bien homogénéiser et laisser au repos pendant 2 heures.
- prélever 50 ml de solution surnageant dans un erlenmeyer de 250 ml et ajouter 5 ml de H₃PO₄ concentré ou NaF à 3 %, puis 3 ou 4 gouttes de diphénylamine.
- titrer ensuite l'excès de bichromate par la solution de sel de Mohr (NH₄)₂Fe(SO₄)₂. La couleur passe du bleu foncé au vert clair

5. Calcul

a. Titre de la solution de sel de Mohr T

En supposant que le titre du bichromate est 1 :

$$15 \times 1 = \frac{V_1 \times 150}{50} \times T$$

$$T = \frac{5}{V_1}$$

Avec V_1 = volume en ml de la solution de sel de Mohr utilisée pour titrer le témoin.

b. Calcul du taux de carbone

D'après l'équation : $C + O_2 \longrightarrow CO_2$

Une molécule d'oxygène oxyde une molécule de carbone.

- 1 ml de K₂Cr₂O₇ oxyde 3 mg de carbone.
- $(V_1 - V_2)$ ml de K₂Cr₂O₇ oxyde (x) mg de carbone

Le taux de carbone en % de sol de la façon suivante :

$$C \% = (V_1 - V_2) \times T \times \frac{150}{50} \times 3 \times \frac{100}{77} \times \frac{100}{P} \times \frac{1}{1000}$$

Avec : V_1 : volume en ml de la solution de sel de Mohr utilisée pour titrer le témoin.

V_2 : volume en ml de la solution de sel de Mohr pour titrer l'échantillon.

T : normalité du sel de Mohr.

3 : quantité de C (en mg) correspondant à 1 ml de solution K₂Cr₂O₇ 1N.

100/77 : facteur de correction pour la méthode WALKLEY et BLACK.

P : prise d'essai de sol en g

Donc :

$$C \% = \frac{V_1 - V_2}{P \cdot V_1} \cdot 5,85$$

Le carbone total peut également s'exprimer en taux de la matière organique M.O %, en multipliant le résultat C % par un coefficient 1,724 :

$$\text{M.O \%} = \text{C \%} \times 1,724$$

II. la conductivité électrique

1. Matériels

- ❖ Chimique
 - Eau distillée
- ❖ Physique
 - Tube en plastique
 - Pissette
 - Spatule
 - Becher

2. Appareils

- Balance électrique
- Conductivimètre électrique
- Centrifugeuse

3. Mode opératoire

- peser 50 grammes de terre fine dans un tube en plastique ;
- ajouter l'eau distillée et laisser pour une nuit pour que l'eau s'infiltre bien et enfin obtenir une pate saturée ;
- mettre les tubes dans la centrifugeuse pendant 10 minutes (à 3000 tours/min), afin de séparer le sol de sa solution ;
- verser l'eau surnagent dans un autre tube et mesurer la conductivité électrique à l'aide d'un conductivimètre.

Les analyses physiques : la granulométrie

1. Matériels

- ❖ Chimiques :
 - Eau distillée
 - Eau oxygénée
 - L'alcool
 - Acide chlorhydrique 3N
 - Chlorure de potassium
 - Pyrophosphate de sodium
- ❖ Physiques :
 - Pissette
 - Agitateur magnétique
 - Spatules
 - Prince en bois
 - Erlenmeyer
 - Eprouvette
 - Trompe à eau

Capsule

2. Appareils

Balance électrique

Plaque chauffante

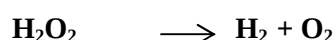
Densimètre Bouyoucos

Calcimètre

Etuve

3. Mode opératoire**➤ Attaque de la matière organique et élimination des cations adsorbants (Ca^{++} , Mg^{++} , NH_4^+ , H^+) :**

- peser environ 20 grammes de terre fine (P) dans un erlenmeyer de 500ml ;
- ajouter environ 100ml d'eau distillée ;
- ajouter environ 5 ml d'eau oxygénée ;
- agiter énergiquement et laisser reposer une demi-heure ;
- ajouter encore si c'est nécessaire 5 à 10ml d'eau oxygénée et laisser agir une nuit ;
- porter sur une plaque chauffante (bain de sable recommandé) et sans porter à ébullition pour ne pas perdre l'eau oxygénée qui se décompose à 70°C selon la réaction :



- ajouter de temps en temps quelques gouttes d'eau oxygénée jusqu'à ce que le surnageant soit limpide et la couleur devient plus claire, puis on porte à l'ébullition pour éliminer l'excès d'eau oxygénée;

Remarque : si la mousse est trop abondante, ajouter quelques gouttes d'alcool.

➤ Attaque du calcaire :

- ajouter la quantité nécessaire d'HCl 3N pour attaquer le CaCO_3

Soit X le pourcentage du calcaire présent dans chaque prise d'essai et P le poids de la prise d'essai :

$$V(\text{HCl}) = ((P \cdot X)/15) + 5$$

Après l'élimination du calcaire par l'acide HCl, on passe à l'élimination de ce dernier, ce qu'on appelle le siphonnage ;

➤ siphonnage

- ajouter de l'eau distillée dans l'erlenmeyer, jusqu'à 500 ml, et laisser décanter jusqu'à la sédimentation de toutes les particules, puis siphonner le surnageant à l'aide de la trompe à eau.
- ajouter une pincée de Chlorure de potassium KCl afin d'éliminer les H^+ fixés sur les argiles et les cations adsorbants. Et rajouter de l'eau distillée, continuer le siphonnage jusqu'à la disparition totale d'HCl ;

La granulométrie proprement dite :

- ajouter 25 ml d'une solution de Pyrophosphate de sodium $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ (un dispersant) à concentration 50g/l, fermer l'erlenmeyer avec un bouchon adéquat et agiter énergiquement ;
- verser chaque échantillon dans une éprouvette d'un litre et agiter. Compléter avec l'eau distillée jusqu'à 1000ml ;
- agiter par retournement et poser l'éprouvette sur la payasse en déclenchant le chronomètre et effectuer les lectures à l'aide d'un densimètre Bouyoucos à 6min et 8h ;
- verser le contenu de l'éprouvette dans un tamis de 0,05mm en lavant plusieurs fois l'échantillon, et obtenir alors la fraction sableuse ; mettre la dernière dans une capsule et la mettre dans l'étuve ;
- séparer le sable fin et le sable grossier à l'aide d'un tamis de 0,2mm.

En parallèle avec ces étapes, la mesure de l'humidité du sol a été faite de la manière suivante (par gravimétrie) :

- peser d'abord la capsule vide, puis une quantité quelconque de terre fine ;
- mettre les capsules dans l'étuve à 105°C, et les laisser 24h ;
- peser après séchage pour en déduire le pourcentage de l'eau présent dans le sol selon la formule :

$$\% \text{ d'eau} = ((\text{Poids avant séchage} - \text{poids après séchage}) * 100) / \text{poids d'échantillon}$$

Calcul

Soit X_6 la lecture à 6min, X_8 à 8h, SF : la fraction sable fin et SG la fraction sable grossier, H : humidité, K : coefficient de correction de l'humidité ; on a :

$$K = 100 / (100 - H)$$

$$\% \text{ d'Argile} = (X_8 / P) * 100 * K$$

$$\% \text{ de Limon fin} = ((X_6 - X_8) / P) * 100 * K$$

$$\% \text{ de Sable fin} = (SF / P) * 100 * K$$

$$\% \text{ de Sable grossier} = (SG / P) * 100 * K$$

$$\% \text{ de Limon Grossier} = 100 - (\%A + \%LF + \%SF + \%CaCO_3 + \%MO + \%H)$$