



MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

Option: ALIMENTATION EN EAU POTABLE

THEME :

**Analyse des méthodes d'évaluation du facteur C de l'équation
USLE : Cas du bassin de Isser**

Présenté par :

ALI KADA Ahmed Yacine

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
SALAH Boualem	Professeur	Président
KAHLERRAS Malika	M.C.B	Examineur
BENCHIHEB Nedjoua	M.C.B	Examineur
SALHI Chahrazed	M.C.B	Promoteur

Session Octobre 2023

REMERCIEMENT

Tout d'abord, je voudrais commencer par remercier ALLAH qui a éclairé mon chemin et qui m'a donné le courage de terminer mes études tout au long de ces années. J'adresse mes sincères remerciements à tous mes Enseignants de l'ENSH pour leurs contributions à ma formation d'ingénieur d'état en hydraulique. Je voudrais ensuite exprimer ma gratitude à mon promotrice : Mme C.SALHI pour m'avoir guidé avec ses sages conseils afin de mener à bien ce travail. Je remercie le président et les membres du jury qui me font l'honneur de juger mon travail. Également, je souhaite exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude envers mes bien-aimées familles qui ont toujours été présentes à mes côtés. C'est grâce à leur soutien que je me trouve ici aujourd'hui. Mes remerciements s'étendent à mes amis et à toutes les personnes qui ont apporté leur contribution, même avec un simple mot de soutien. Je les remercie d'avoir eu foi en moi.

ALI KADA Ahmed Yacine

Dédicace

C'est avec une profonde émotion que je souhaite dédier ce modeste travail à ceux qui ont été présents à chaque étape de ma vie :

À mes parents, source inépuisable de confiance et de soutien tout au long de mon parcours éducatif. Les mots me manquent pour exprimer la gratitude et la fierté qui habitent mon cœur en tant que votre fils.

À mes chers frères, Soheib et Amine , qui m'ont toujours soutenu et répondu présent en toutes circonstances. Votre soutien inconditionnel a été une lumière dans les moments les plus exigeants, et pour cela, je vous admire.

À mes amis d'enfance, de collège et de l'ENSH, qui ont partagé des moments inoubliables et ont contribué à rendre ce voyage éducatif encore plus mémorable.

À tous ceux qui m'entourent avec affection et me portent dans leur cœur, je vous adresse ma reconnaissance sincère.

Cette dédicace reflète l'importance que chacun d'entre vous revêt dans ma vie et dans la réalisation de cette étape significative.

ALI KADA Ahmed Yacine

ملخص

تركز هذه الدراسة على تقييم العامل C ، الذي يعتبر عاملاً حاسماً لتقدير التآكل في المستجمعات المائية. لهذا الغرض، اخترنا مستجمع مياه يسر، واحداً من أكبر مستجمعات المياه في الجزائر، والذي يغطي مساحة تبلغ 4149 كيلومتر مربع، كمناطق للدراسة. استخدمنا صورة التقطتها مركبة لاند سات 8 وقمنا بتطبيق تحليل مفصل باستخدام أداة تحليل البيانات الجغرافية ArcGIS 10.8 لتحديد الغطاء النباتي وحساب العامل C. بالإضافة إلى ذلك، ومن أجل التحقق من نجاح النهج الذي اتبعناه، استخدمنا صيغتين مختلفتين لتقييم العامل C. تهدف هذه الدراسة إلى تعزيز فهمنا لطرق تقدير العامل C ، مما يعني أهمية كبيرة لإدارة المستجمعات المائية والوقاية من تآكل التربة.

كلمات مفتاحية - عامل إدارة الزراعات (C) ، تحليل الصورة، الغطاء النباتي، تآكل التربة، مستجمعات المياه، طرق التقدير.

Résumé

Cette étude se concentre sur l'évaluation du facteur C, un élément crucial pour estimer l'érosion dans les bassins versants. Pour ce faire, nous avons choisi le bassin versant d'Isser, l'un des plus importants d'Algérie, couvrant une superficie de 4149 km², comme zone d'étude. Nous avons utilisé une image acquise par Landsat 8 et appliqué une analyse détaillée à l'aide de l'outil Analyst Spatial d'ArcGIS 10.8 pour identifier le couvert végétal et calculer le facteur C. De plus, afin de valider notre approche, nous avons utilisé deux formules d'évaluation du facteur C. Cette recherche vise à améliorer notre compréhension des méthodes d'évaluation du facteur C, avec des implications importantes pour la gestion des bassins versants et la prévention de l'érosion des sols.

Mots clés - facteur de gestion des cultures (C), analyse d'image, couverture végétale, érosion des sols, bassin versant, méthodes d'évaluation.

Abstract

This study focuses on the assessment of the C-factor, a crucial element for estimating erosion in watersheds. To do so, we selected the Isser watershed, one of the largest in Algeria, covering an area of 4149 km², as our study area. We used an image acquired by Landsat 8 and applied a detailed analysis using the ArcGIS 10.8 Spatial Analyst tool to identify vegetation cover and calculate the C-factor. Additionally, to validate our approach, we employed two C-factor evaluation formulas. This research aims to enhance our understanding of C-factor assessment methods, with significant implications for watershed management and soil erosion prevention.

Keywords - C-factor, image analysis, vegetation cover, soil erosion, watershed, evaluation methods.

Table des matières

Introduction	1
Chapitre I : Recherche Bibliographique	
I.1 Erosion du sol	4
I.2 Erosion hydrique.....	4
I.3 Mecanisme.....	5
I.3.1 Détachement des particules du sol	6
I.3.2 Transport des particules	7
I.3.3 Dépôt	8
I.4 Forme de l'érosion hydrique.....	9
I.4.1 L'érosion en nappe ou aréolaire ou laminaire.....	9
I.4.2 L'érosion linéaire	9
I.4.3 L'érosion en masse	9
I.5 Facteurs influençant le taux d'érosion des sols par l'eau	10
I.5.1 Intensité des précipitations et ruissellement.....	10
I.5.2 Érodabilité du sol	10
I.5.3 Pente, longueur et forme de la pente	11
I.5.4 Végétation	11
I.6 Modélisation de l'érosion des sols	12
I.6.1 Modèle Empirique.....	12
I.6.2 Modèles Physiques	14
I.7 Les facteurs de l'équation universelle de perte de sol	16
I.7.1 Facteur d'érosivité des précipitations et du ruissellement (R).....	16
I.7.2 Facteur d'érodibilité du sol (K).....	17
I.7.3 Facteur topographique (LS)	17
I.7.4 Facteur de pratiques de conservation de soutien (P).....	17
I.7.5 Facteur couverture végétale et pratiques culturales (C)	17
I.8 Importance du facteur de couverture végétale et pratiques culturales (C)	19
I.9 Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)	20
I.10 La relation entre le NDVI et le facteur C	21
I.11 La teledetection.....	21

I.11.1	Applications de la télédétection et du SIG	21
I.11.2	Application dans le domaine de la couverture et de l'utilisation des terres.....	22
I.12	Traitement d'image pour supprimer l'effet topographique	23
I.12.1	Normalisation topographique.....	24
I.12.2	Normalisation de la somme.....	25
I.13	Études antérieures sur l'évaluation du facteur C.....	26
I.13.1	Évaluation du facteur C par Pierce et al. (1980).....	26
I.13.2	Évaluation du facteur C par Brown et Bullock (1981).....	26
I.13.3	Évaluation du facteur C par El-Swaify et Mansour (1988).....	26
I.13.4	Évaluation du facteur C par Lasanta et al. (2022).....	27
I.13.5	Évaluation du facteur C par Al-Hamdan et al. (2023)	27
I.13.6	Évaluation du facteur C par Toumi et al. (2013).....	27
Conclusion	28

Chapitre II : Matériels et Méthodes

II.1	Cas du Bassin d'Isser : Présentation du bassin d'Isser.....	30
II.1.1	Situation géographique.....	30
II.1.2	Contexte Géologique du Bassin d'Isser.....	31
II.1.3	Végétation	32
II.1.4	Climat.....	33
II.1.5	Réseau hydrographique	36
II.1.6	Ressources en eau.....	37
II.2	Évaluation du coefficient C	38
II.3	Approches utilisées pour l'évaluation du facteur C	38
II.3.1	Première approche (la méthode originale).	38
II.3.2	Deuxième approche.....	39
II.3.3	Troisième approche	40
II.3.4	Quatrième approche	40
II.4	Méthode sur le terrain pour déterminer le facteur C	40
II.4.1	Sous-facteur de couverture de la canopée	42
II.4.2	Sous-facteur de couverture de surface	42
II.4.3	Sous-facteur de rugosité de surface.....	43
II.4.4	Calcul de la valeur du facteur C	43

II.5	Dérivation du facteur C à l'aide de données satellite (NDVI)	44
II.5.1	Formule de De Jong (1994).....	44
II.5.2	Formule de COLMAN (2018).....	44
II.5.3	Formule Durigon et al. (2014).....	45
II.5.4	Formule de Van der Knijff (1999)	45
II.5.5	Formule de Lin et Al (2006)	45
II.5.6	Formule de Lin et al. (2014).....	45
II.6	Validation du mappage du facteur C basé sur le NDVI	46
Conclusion	47
Chapitre III : Résultats et Discussions		
Évaluation du Facteur C pour le Bassin Isser		49
II.7	Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)	49
II.8	Génération du Facteur C en utilisant la technique de De Jong (1994).....	52
II.9	Génération du Facteur C en Utilisant la Formule de Lin et Al (2006).....	54
II.10	Etude comparative	56
II.10.1	Formule de De Jong (1994).....	56
II.10.2	Formule de Lin et al. (2006).....	56
Conclusion	57
Références Bibliographique		58

Listes des tableaux

Chapitre I : Recherche Bibliographique

Tableau I. 1 : Valeur de C pour différents types de couvert végétal.....	18
--	----

Chapitre II : Matériels et Méthodes

Tableau II. 1 : Température moyenne mensuelle et annuelle..	33
Tableau II. 2 : Humidité relative moyenne mensuelle et annuelle en (%).	34
Tableau II. 3 : Vitesses moyennes du vent (m/s).	34
Tableau II. 4 : Evaporation moyenne.	34
Tableau II. 5 : Précipitations moyennes annuelles.	35

Chapitre III : Résultats et Discussions

Tableau III. 1 : Bandes spectrales et résolutions spatiales des images du programme Landsat-8.	50
--	----

Listes des figures

Chapitre I : Recherche Bibliographique

Figure I. 1 : Processus de l'érosion hydrique	5
Figure I. 2 : Effet des gouttes de pluies (effet splash).....	6
Figure I. 3 : Mode de transport des particules dans les cours d'eau.....	7
Figure I. 4 : Les phases de l'érosion Hydrique. (Diagramme de Hjulström)	8
Figure I. 5 : Valeur du facteur de couvert végétal en fonction du pourcentage de couverture du sol et de la hauteur de la végétation	18

Chapitre II : Matériels et Méthodes

Figure II. 1 : Carte de la situation géographique du bassin d'Isser.	30
Figure II. 2 : Réseau hydrographique du bassin d'Isser.	36

Chapitre III : Résultats et Discussions

Figure III. 2 : Carte NDVI de Bassin d'Isser.	51
Figure III. 3 : Carte de la couverture végétale du bassin d'Isser avec la formule de De Jong (1994).	53
Figure III. 4 : Carte de la couverture végétale du bassin d'Isser avec la formule de Lin et Al (2006).	55

Introduction

L'érosion des sols constitue un défi majeur dans la gestion durable des terres et des ressources hydriques. Pour évaluer et prévoir efficacement la perte de sol à long terme, deux modèles prédominants sont couramment utilisés : l'Équation Universelle de la Perte de Sol (USLE) développée par Wischmeier & Smith en 1978, et sa version révisée, la RUSLE (Renard, Foster, Weesies, McCool et Yoder, 1997). Ces modèles jouent un rôle essentiel dans la planification de la conservation des sols et de l'eau, en offrant une base scientifique pour la prise de décisions (Kinnell, 2010).

Au sein de la RUSLE, l'un des facteurs cruciaux influençant la perte de sol est le facteur de couverture et de gestion (C-factor). Ce paramètre, compris entre zéro et un, revêt une grande importance en raison de sa sensibilité aux variations spatio-temporelles. Il capture les effets de la croissance végétale et de la dynamique des précipitations sur l'érosion des sols (Nearing et al., 2005). Le C-factor est défini comme un rapport pondéré par l'érosivité des précipitations entre la perte de sol sur des terres spécifiquement végétalisées et la perte de sol correspondante sur des terres en jachère nue continue (Oliveira et al., 2015b ; Wischmeier & Smith, 1978). Cependant, pour calculer ce facteur, des études sur le terrain impliquant des parcelles expérimentales soumises à des précipitations naturelles sont nécessaires, ce qui peut s'avérer coûteux et chronophage (Nearing et al., 2000).

Dans de nombreuses régions du monde, les données mesurées provenant de telles parcelles expérimentales sont rares voire inexistantes (Morgan, 2005). En conséquence, de nombreux chercheurs ont eu recours au facteur C développé pour les États-Unis d'Amérique (Dissmeyer, George E., Foster, 1981 ; Wischmeier & Smith, 1978) pour cartographier l'érosion des sols en utilisant des systèmes d'information géographique (SIG) (Ganasri et Ramesh, 2016 ; Oliveira, Alves Sobrinho, Rodrigues et Panachuki, 2011). Cependant, cette approche comporte des incertitudes potentielles qui peuvent affecter la qualité des prévisions d'érosion des sols (Oliveira et al., 2015b).

Une alternative largement adoptée pour estimer le facteur C consiste à recourir à des données de télédétection (Borrelli, Meusburger, Ballabio, Panagos, & Alewell, 2018 ; Durigon, Carvalho, Antunes, Oliveira et Fernandes, 2014 ; Panagos et al. , 2015; Schmidt, Alewell et Meusburger,

2018; Vrieling, 2006; Zhang, Xie, Liu et Lu, 2011). Néanmoins, les valeurs du facteur C déduites de ces données de télédétection sont rarement comparées à celles obtenues par des mesures sur le terrain, ce qui peut également engendrer des incertitudes dans les prévisions d'érosion des sols (Oliveira et al., 2015b).

Dans cette perspective, l'utilisation d'indices de végétation, tels que l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI), s'avère être une approche courante pour déterminer le facteur C par télédétection (Durigon et al., 2014 ; Lunetta, Knight, Ediriwickrema, Lyon et Worthy, 2006). Le NDVI est souvent associé à une régression linéaire (Durigon et al., 2014 ; Lin, Lin, & Chou, 2002) ou exponentielle (van der Knijff, Jones et Montanarella, 1999) pour établir la corrélation directe avec le facteur C. Cette méthode de cartographie du facteur C grâce à la télédétection offre un potentiel considérable pour améliorer la modélisation spatiale et temporelle de l'érosion des sols (Borrelli et al., 2018 ; Meusburger, B € anninger, & Alewell, 2010). De plus, elle permet aux chercheurs de comparer les estimations de la perte de sol et du transport sédimentaire (Zhou et Wu, 2008) avec les données expérimentales, renforçant ainsi notre compréhension de l'érosion des sols et de ses impacts environnementaux (Didon e, Minella et Merten, 2015).

Chapitre I :

Recherche Bibliographique

Introduction à l'érosion du sol et à l'équation USLE

I.1 Erosion du sol

Parmi les divers processus de dégradation des terres tels que la compaction du sol, la salinisation, l'acidification, etc., l'érosion des sols constitue un phénomène préoccupant avec des conséquences significatives sur la production environnementale et alimentaire. Selon la définition de Kruthkul et ses collaborateurs en 2001, l'érosion des sols englobe les mécanismes de détachement et de transport des couches de sol, et elle est souvent causée par des agents d'érosion tels que l'eau et le vent. Ce processus peut être subdivisé en deux catégories : l'érosion naturelle et l'érosion accélérée. L'érosion naturelle peut se manifester progressivement dans la nature, éventuellement ralentie ou, dans certains cas, survenir brusquement avec une perte significative de la couche fertile du sol. Parallèlement, l'érosion accélérée peut résulter de l'augmentation du taux d'érosion naturelle due aux activités humaines. Elle est particulièrement courante dans les zones montagneuses en raison des pentes prononcées, surtout lorsqu'elle est exacerbée par des pratiques inadaptées d'utilisation des terres telles que le surpâturage sans mise en œuvre de mesures de conservation appropriées. L'érosion a pour effet de dégrader le sol, en entraînant la perte de la couche arable, la diminution des éléments nutritifs disponibles pour les plantes et la réduction de la profondeur des racines (Petter, 1992).

I.2 Erosion hydrique

L'érosion hydrique est un processus multifactoriel résultant principalement de la conjugaison des effets de la pluie et du ruissellement, lorsque l'eau ne s'infiltré pas adéquatement dans le sol. Ce phénomène entraîne le déplacement des particules de sol en surface en réponse à divers agents, tels que l'eau, le vent, les actions humaines ou simplement la force de gravité, comme le mentionnent Girard et ses collaborateurs en 2005.

Naturellement, l'érosion est caractérisée par l'arrachement des particules du sol par les précipitations et leur mouvement par ruissellement. Ces particules sont ensuite transportées par les eaux superficielles et déposées sur leur chemin, que ce soit sur les pentes ou dans les cours d'eau, comme le décrivent Foster et Meyer en 1972.

La pluie joue un rôle central dans l'érosion en raison de son énergie cinétique, dépendant à la fois de son volume et de son intensité sur une durée donnée (Roose, 1973). Par ailleurs, le ruissellement facilite le transport des particules détachées, conduisant ces débris érodés vers les canalisations agricoles et les fossés, augmentant ainsi la turbidité de l'eau.

Outre les facteurs naturels comme la pluie et le vent, les activités humaines, telles que la surutilisation des terres, le labour, la construction, le surpâturage, la conversion des terres et la déforestation, peuvent également exacerber l'érosion, comme le notent Roose et al. en 1993.

L'érosion du sol a des conséquences directes et sérieuses sur la sécurité alimentaire, la capacité du sol à produire, le stockage d'eau en surface, la qualité de l'eau, la beauté du paysage et l'équilibre écologique. La réponse à ce problème pourrait résider dans l'adoption de pratiques de conservation, comme le suggère Toumi en 2013.

I.3 Mécanisme

L'érosion hydrique, un processus naturel complexe, découle d'une séquence de phases comprenant le détachement, le transport et le dépôt des particules du sol. Cette dynamique est principalement influencée par l'action conjointe de la pluie et du ruissellement, mais sa manifestation varie en fonction de divers facteurs, notamment la résistance du milieu (comme le sol, la couverture végétale et les pratiques agricoles) et les caractéristiques topographiques du terrain.

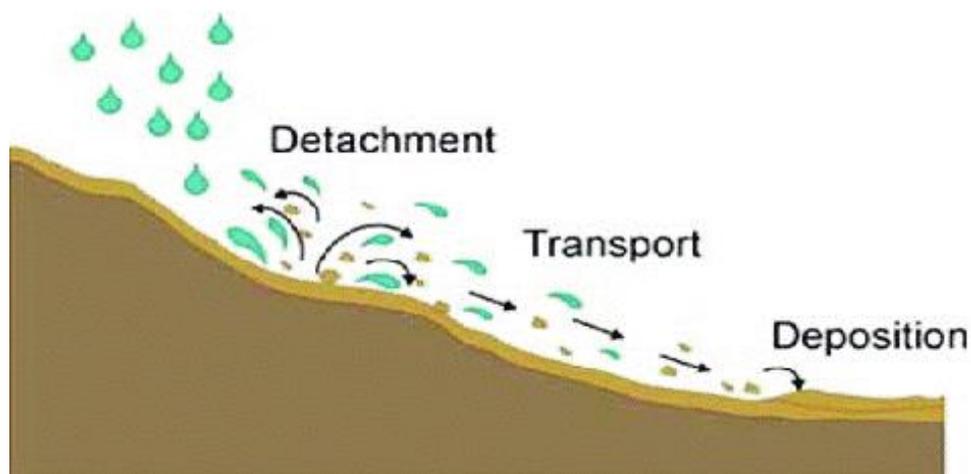


Figure I. 1 : Processus de l'érosion hydrique. (Al-Taai, 2016)

I.3.1 Détachement des particules du sol

Le processus de détachement des particules du sol se déroule à la surface terrestre, déclenché par l'impact des gouttes de pluie. Il peut également être enclenché lorsque la force de cisaillement du ruissellement dépasse la résistance du sol à ce détachement. Cette phase, responsable de l'érosion, est intimement liée à l'énergie de la pluie ainsi qu'à celle de l'écoulement de l'eau, comme l'ont noté Ellison (1944), Ekern (1950) et Leguédois (2003).

Le détachement des fines particules de la surface du sol peut s'effectuer de deux manières distinctes, comme décrit par Boiffin (1994). Tout d'abord, les gouttes de pluie peuvent les détacher par un processus de rejaillissement, communément appelé "splash". Ensuite, les eaux de ruissellement peuvent également contribuer à ce détachement. L'impact des gouttes de pluie brise les agrégats du sol en éléments plus petits, et ce processus est favorisé lorsque le sol est meuble et présente une porosité élevée. Cette première phase s'accompagne du déplacement des particules du sol et du tassement du sol. Lorsque la couche superficielle du sol s'humidifie, trois processus se déroulent simultanément : la dégradation de la structure du sol, la formation d'une pellicule de battance, et enfin, l'érosion par splash ou érosion par rejaillissement.

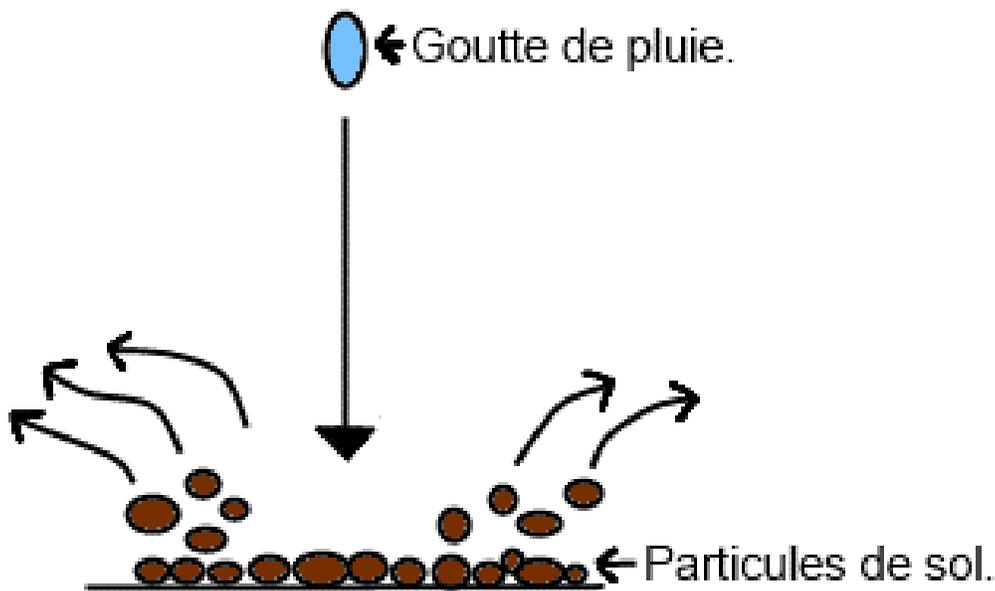


Figure I. 2 : Effet des gouttes de pluies (effet splash). (Kazi-Tani, 2016)

I.3.2 Transport des particules

Les particules du sol, qu'elles soient grossières ou fines, issues du processus de détachement, sont ensuite déplacées vers l'aval sous l'influence de la gravité. Certaines, comme les cailloux d'éboulis et les blocs d'éboulement, tombent directement au sol. Cependant, les particules plus fines sont généralement transportées par un agent de transport, qui est généralement l'eau. La taille des sédiments déplacés est naturellement régie par la force de cet agent de transport. Par exemple, le vent a la capacité de déplacer principalement les poussières et les grains de sable fins, tandis que les cours d'eau peuvent charrier des matériaux plus gros, tels que du sable, du gravier et des galets, comme décrit par Démangeot (2000).

Le transport des particules détachées peut se faire de trois manières distinctes par l'écoulement de l'eau, telles que décrites par Yalin (1980) et Govers et al. (2000) :

- En suspension : L'écoulement de l'eau ou l'impact des gouttes de pluie sur la surface de l'eau provoquent une turbulence qui maintient les particules fines en suspension. Ces particules peuvent ainsi être transportées sur de longues distances.
- Par roulement : Lorsque l'écoulement devient plus important, il peut arracher des particules plus grosses, mais il ne peut pas les maintenir en suspension. Ces particules roulent sur le fond de l'écoulement en fonction de la force de celui-ci.
- Par saltation : Lorsque les particules ont une taille moyenne, elles peuvent se déplacer par sauts successifs, un phénomène appelé "saltation". Ce mode de transport est particulièrement prédominant en présence de vent.

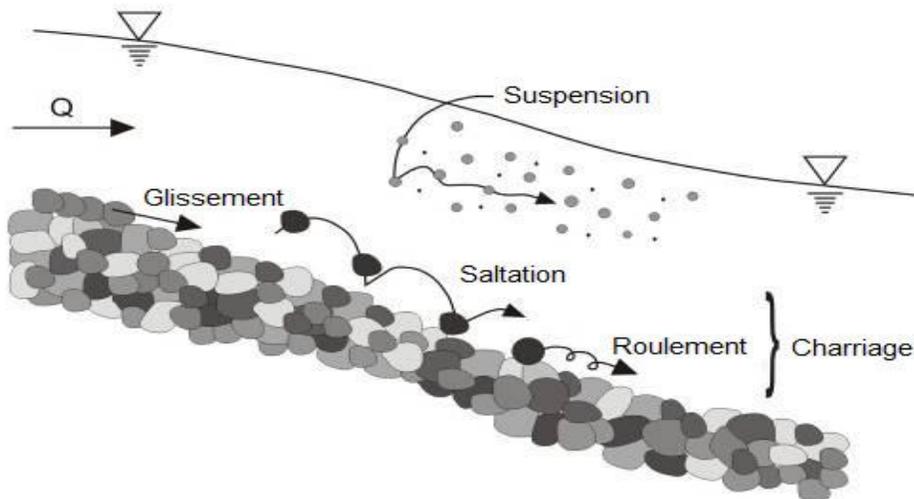


Figure I. 3 : Mode de transport des particules dans les cours d'eau. (Antoine, 2013)

I.3.3 Dépôt

Le dépôt des particules détachées a lieu lorsque l'énergie cinétique qui les déplace diminue ou est complètement annulée, conformément à ce que Démangeot (2000) a observé. Les particules arrachées se déposent progressivement entre leur lieu d'origine et les cours d'eau ou les mers.

Lorsque la vitesse de l'écoulement diminue, le poids des particules devient plus important que les forces de turbulence ou de roulement, ce qui entraîne leur sédimentation. Les particules les plus grosses se déposent en premier, suivies par les particules plus fines, dans un processus de triage naturel.

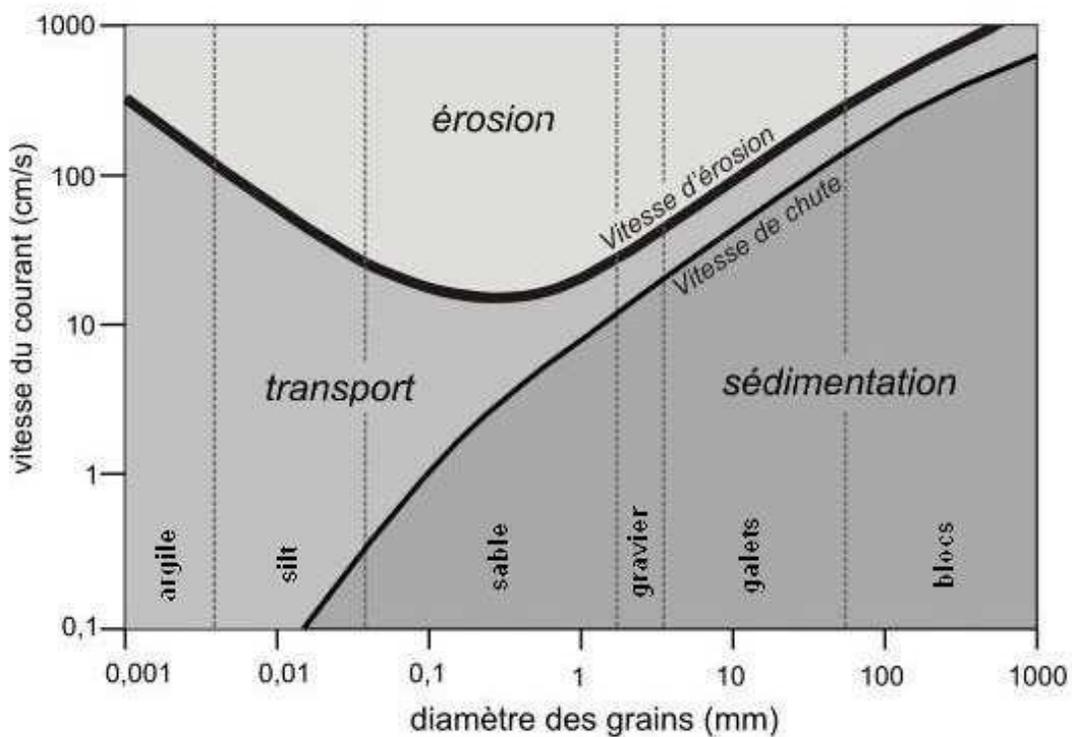


Figure I. 4 : Les phases de l'érosion Hydrique. (Diagramme de Hjulström) (Jaud, 2011)

I.4 Forme de l'érosion hydrique

L'érosion des sols se présente sous diverses formes, chacune avec ses propres caractéristiques et impacts. Elle se divise principalement en trois catégories : érosion en nappe, érosion linéaire et érosion en masse.

I.4.1 L'érosion en nappe ou aréolaire ou laminaire

est la première étape de la dégradation des sols. Elle provoque une dégradation de toute la surface du sol, agissant de manière généralisée. Sa nature diffuse la rend moins apparente d'une année à l'autre. Les signes notables comprennent des taches de couleur pâle dans les zones les plus érodées et la montée des cailloux à la surface suite aux travaux agricoles. Ces cailloux restent après que les pluies aient éliminé les terres fines. Plusieurs facteurs influencent cette érosion, notamment l'intensité et la durée des précipitations, ainsi que l'humidité précédente. L'érosion en nappe commence par le déplacement de particules à courte distance, puis par un ruissellement diffus. Les divers éléments à la surface du sol, tels que les feuilles et les cailloux, limitent sa vitesse.

I.4.2 L'érosion linéaire

L'érosion linéaire se manifeste par des creusements variés sur la surface du sol, tels que les rigoles, griffes, ravines, entre autres. Elle survient quand le ruissellement de surface devient plus organisé, formant des sillons de plus en plus profonds. Des griffes profondes sont caractérisées par des canaux de quelques centimètres de profondeur, tandis que les rigoles ont plus de 10 cm de profondeur mais peuvent encore être corrigées avec des techniques agricoles. Sur une parcelle ou un bassin versant, l'érosion en rigole suit généralement l'érosion en nappe, car le ruissellement se concentre dans les dépressions. À ce moment, plutôt que de converger, les rigoles forment des ruisseaux parallèles.

I.4.3 L'érosion en masse

L'érosion en masse se distingue des deux précédentes par son impact sur un volume intérieur de la couverture pédologique plutôt que sur la surface. Elle englobe tout déplacement de la terre non spécifiquement défini, notamment les mouvements de masse tels que les glissements de terrain et les coulées de boue. Ces phénomènes sont variés et peuvent prendre de nombreuses formes, parmi lesquelles les glissements et les laves torrentielles.

Chacune de ces formes d'érosion présente des défis uniques en matière de gestion et de prévention. La compréhension de leur nature est essentielle pour développer des méthodes efficaces pour les contrer et protéger nos sols.

1.5 Facteurs influençant le taux d'érosion des sols par l'eau

Le taux d'érosion des sols causé par l'eau est soumis à divers facteurs qui ont été identifiés par Wall et al. en 1987 :

1.5.1 Intensité des précipitations et ruissellement

L'intensité des précipitations constitue un élément clé du processus d'érosion. L'énergie cinétique de la pluie est directement liée au détachement du sol et, potentiellement, à l'érosion. Ainsi, l'intensité des précipitations peut être un prédicteur important de l'érosion et du ruissellement. Les gouttes de pluie qui tombent sur la surface du sol peuvent désagréger les agrégats du sol et disperser ces matériaux. Les matériaux plus lourds, comme le sable et les gros graviers, nécessitent plus d'énergie de la part des gouttes de pluie pour être détachés, et ils exigent également un ruissellement plus puissant pour être transportés. En revanche, les matériaux plus légers peuvent être emportés plus facilement. Le ruissellement de surface se forme lorsque l'intensité des précipitations dépasse la capacité d'infiltration du sol. De plus, le ruissellement peut survenir dès qu'il y a un excès d'eau sur une pente qui ne peut pas être absorbé par le sol ou retenue à la surface. La quantité de ruissellement peut être amplifiée en cas de réduction de l'infiltration due au compactage du sol, à la formation de croûtes ou au gel. Le ruissellement des terres agricoles peut être particulièrement important au printemps lorsque les sols sont généralement saturés, que la fonte des neiges a lieu et que la couverture végétale est minimale (Wall et al., 1987).

1.5.2 Érodabilité du sol

L'érodabilité du sol est un indicateur essentiel de sa propension à l'érosion, car elle mesure la sensibilité du sol au détachement et au transport par les agents d'érosion, comme l'ont noté Tejada et Gonzalez en 2006. L'érodabilité du sol résulte de l'interaction de divers processus qui influencent l'acceptation des précipitations et la résistance du sol au détachement et au transport ultérieur des particules érodées. Les propriétés du sol, notamment sa distribution granulométrique, sa stabilité structurale, sa teneur en matière organique, sa minéralogie argileuse et ses caractéristiques de transmission de l'eau, jouent un rôle dans ces processus (Lal, 1994).

Les sols sont généralement plus résistants à l'érosion s'ils présentent un taux d'infiltration élevé, une teneur élevée en matière organique et une structure développée. Les fractions granulométriques du sol, telles que le sable très fin et le limon, sont généralement plus érodables que le sable. L'argile résiste également à l'érosion en raison de sa cohésion. Une mauvaise structure du sol peut résulter du travail du sol et des pratiques culturales avec une faible teneur en matière organique, ce qui peut entraîner un sol compacté favorisant l'érosion. L'augmentation du ruissellement et la réduction du taux d'infiltration peuvent être dues à la formation d'une couche compactée en profondeur. De plus, la formation de croûtes à la surface du sol peut réduire l'infiltration en provoquant un phénomène de scellement de surface (Wall et al., 1987). Bien que la formation de croûtes puisse parfois réduire l'érosion due aux éclaboussures de pluie, elle peut engendrer davantage d'érosion en rigoles en augmentant le ruissellement. Une faible teneur en matière organique du sol peut entraîner une diminution des éléments nutritifs disponibles et une couverture végétale réduite, ce qui réduit la protection du sol.

I.5.3 Pente, longueur et forme de la pente

La pente joue un rôle déterminant dans l'érosion. Non seulement la raideur de la pente, mais aussi son orientation, sa longueur et sa forme sont des facteurs cruciaux. En général, les pentes raides entraînent une érosion du sol plus importante, car l'eau de ruissellement devient plus érosive et peut détacher les sédiments en raison de l'augmentation de la vitesse d'écoulement et du ruissellement accru sur la pente. Outre la raideur de la pente, la longueur et l'orientation de la pente sont également des facteurs importants. Sur une pente plus longue, l'accumulation de l'écoulement de surface a tendance à augmenter l'érosion en rigoles. Même une pente raide peut devenir moins érosive si elle est de courte longueur, tandis qu'une pente douce peut présenter plus d'érosion en raison de sa plus grande longueur (Shrestha, 2007).

I.5.4 Végétation

La couverture végétale joue un rôle crucial dans la protection du sol, réduisant ainsi l'impact des gouttes de pluie. De plus, elle ralentit le ruissellement, permettant à l'eau de surface de s'infiltrer. Dans le cas d'une couverture dense, on peut supposer qu'il n'y a pas d'érosion, car l'impact de toutes les gouttes de pluie est atténué. Les feuilles mortes contribuent également à la création de litière qui maintient la matière organique du sol. La perturbation du sol due aux pratiques

agricoles, en réduisant la matière organique, peut entraîner une diminution de la stabilité des agrégats du sol (Six et al., 2000).

I.6 Modélisation de l'érosion des sols

I.6.1 Modèle Empirique

Les modèles empiriques se fondent sur l'établissement d'une relation mathématique entre la variable de sortie et des variables d'entrée. La forme et les coefficients de cette relation sont déterminés à partir d'observations et de mesures sur le terrain. Cette démarche est expérimentale, consistant à ajuster les valeurs calculées par le modèle à celles observées sur le terrain. Ces modèles ont été conçus en vue d'une utilisation opérationnelle, notamment dans le domaine de la conservation des sols et du contrôle de l'érosion hydrique (Company-Redmond, 1996).

I.6.1.1 L'équation universelle de perte en sol (USLE)

Un modèle empirique largement utilisé est l'équation universelle de WISCHMEIER (USLE). Cette équation synthétise toutes les variables en six facteurs majeurs (Wischmeier & Smith, 1965). Elle prédit les pertes moyennes de sol dues à l'érosion de surface en comparant l'érosion d'un site donné à celle d'une parcelle de référence. La formule de ce modèle empirique est la suivante :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

Où:

A : perte de sol annuelle est exprimée en t/ha.an.

R : facteur d'érosivité des pluies, qui est mesuré en MJ.mm/ha.h.an.

K : facteur d'érodibilité des sols, qui est mesuré en t. ha.h/ha.MJ. mm.

L : longueur de la pente (m).

S : inclinaison de la pente (%).

C : facteur adimensionnel des pratiques culturelles et de la couverture végétale.

P : facteur adimensionnel relié aux pratiques de conservation des sols.

L'utilisation de l'équation universelle a été simplifiée grâce à l'utilisation de tableaux de données et de graphiques, rendant ainsi son application plus accessible après sa mise à jour en 1978. Ces données proviennent d'observations et de statistiques effectuées sur de nombreuses parcelles de dimensions réduites sur plusieurs années (Ben Slimen, 2013).

Cependant, l'équation universelle présente certaines limites. Elle ne tient compte que des pertes moyennes à long terme résultant de l'érosion de surface, ne prend pas en compte le ravinement, et ne permet pas d'estimer les pertes en sol pour une saison ou un épisode de pluie spécifique en dehors des champs concernés.

La simplicité d'utilisation du modèle USLE a conduit plusieurs chercheurs à l'adapter pour évaluer l'érosion lors d'un événement pluvieux particulier, en incorporant des facteurs de ruissellement (par exemple, Onstad et Foster, 1975 ; Williams, 1975 ; Renard et al., 1996).

1.6.1.2 MUSLE

La formule de Williams (MUSLE) est utilisée pour calculer l'envasement des lacs et des barrages collinaires, prenant en compte la bathymétrie et le suivi des niveaux d'eau dans la retenue. La formule de Williams pour estimer l'érosion du sol est la suivante :

$$A = 11.8 \times (V \times Q_p)^{0.56} \times K \times LS \times C \times P$$

Où :

- A est la perte moyenne en sol pour une crue.
- V est le volume de la crue en mètres cubes.
- Q_p est le débit de pointe de la crue en mètres cubes par seconde.
- K est le facteur d'érodibilité du sol.
- L est l'indice de pente.
- S est le facteur de longueur de pente.
- C est le facteur d'exploitation du couvert.
- P est le facteur lié aux pratiques antiérosives.

I.6.1.3 Équation universelle révisée de la perte de sol (RUSLE)

La formule de Renard (RUSLE) est utilisée pour évaluer l'envasement des barrages en associant l'estimation des pertes en sol d'un bassin versant selon l'équation de Williams à un coefficient de délivrance du sol (Cd). L'envasement est calculé selon l'équation suivante :

$$Ev = Cd \times A$$

Où :

- Ev représente l'envasement de la retenue en mètres cubes.
- A est la perte en terre du bassin versant calculée à l'aide de la formule de Williams.

I.6.2 Modèles Physiques

Les modèles physiques de l'érosion s'efforcent de quantifier et de cartographier le phénomène de l'érosion en se fondant sur une compréhension approfondie des processus physiques sous-jacents. L'approche fondamentale de ces modèles consiste à décrire l'érosion au moyen de représentations mathématiques des processus hydrologiques et érosifs essentiels, notamment le détachement causé par les gouttes de pluie et/ou par le ruissellement, le transport par les gouttes de pluie, le transport par le ruissellement, et le dépôt par le ruissellement (Foster, 1990).

Les modèles à base physique sont en mesure de simuler de manière détaillée les phénomènes d'érosion et de sédimentation, générant ainsi une multitude de résultats spatiaux (Pullar et Springer, 2000). Ils reposent sur une discrétisation fine du bassin versant, ce qui leur permet de traiter les défis liés aux variations d'échelle spatiale. Cependant, leur utilisation requiert l'évaluation de nombreux paramètres à une échelle spatiale distribuée, ce qui entraîne des calculs intensifs et, par conséquent, des temps de résolution relativement longs (Perrin et al., 2001 ; Santos et al., 2003).

De Vente et Poesen (2005) ont toutefois souligné que les modèles d'érosion développés pour une échelle donnée ne sont pas nécessairement applicables à une autre échelle. En effet, comme c'est le cas pour de nombreux modèles, le choix du modèle et des mécanismes décrits varie en fonction des différentes échelles temporelles et spatiales.

Il ressort ainsi que les modèles à base physique s'avèrent plus adaptés pour décrire et prédire la réponse d'un système à une échelle temporelle et spatiale réduite, permettant ainsi de prendre en

compte la complexité des processus. En revanche, les modèles empiriques trouvent leur meilleure utilisation dans l'estimation de l'érosion à une échelle régionale.

I.6.2.1 Modèle KINEROS

Le modèle KINEROS est un modèle d'érosion hydrique à base physique développé par le Service de recherche agricole du département de l'Agriculture des États-Unis (USDA-ARS) (Woolhiser et al., 1990). Il simule les processus de ruissellement, d'érosion et de transport de sédiments à l'échelle d'un bassin versant ou d'une parcelle. Ce modèle repose sur une approche cinématique pour le ruissellement, une approche empirique pour l'érosion, et une approche sédimentologique pour le transport des sédiments. Il prend en compte des données d'entrée telles que les caractéristiques du bassin versant, du sol et des conditions météorologiques. Le modèle KINEROS est utilisé pour estimer les pertes de sol, élaborer des stratégies de gestion de l'érosion, évaluer les risques d'érosion, et planifier la gestion des infrastructures. Bien qu'il soit relativement simple à utiliser et largement validé, il présente des limites, notamment en ce qui concerne la simulation de certains processus d'érosion. Dans l'ensemble, le modèle KINEROS constitue un outil précieux pour l'étude de l'érosion hydrique, accessible à un large public.

I.6.2.2 Modèle EUROSEM

Le modèle EUROSEM, également connu sous le nom de "The European Soil Erosion Model" (Morgan et al., 1992 ; Morgan et al., 1998), est un modèle à base physique spécialement conçu pour traiter les événements pluvieux. Il se destine à l'étude de petites parcelles au sein d'un bassin versant, couvrant une superficie allant de 1 mètre carré à 1 kilomètre carré. L'outil permet de calculer divers paramètres tels que le taux de ruissellement, les pertes totales de sol, le taux de sédiments générés, tout en identifiant les sources de sédiments transportés et déposés (Jaoued, 2007).

I.6.2.3 Modèle LISEM

Le modèle LISEM, ou "Limburg Soil Erosion Model" (De Roo et al., 1994 ; De Roo et al., 1996a, 1996b ; Takken et al., 1999), représente un modèle distribué à base physique spécifiquement conçu pour la modélisation hydrologique et la compréhension des phénomènes d'érosion du sol au sein de petits bassins versants. Suite à des événements pluvieux, LISEM effectue des estimations du taux d'infiltration, du taux de ruissellement, et de la quantité de sédiments transportés ou déposés dans le bassin versant (Takken et al., 1999).

I.6.2.4 Modèle SWIM

Le modèle SWIM, développé par Krysanova et al. en 2000, est un modèle physique spécialement conçu pour les bassins versants de taille moyenne. Il possède la capacité de simuler de manière détaillée l'influence du climat ainsi que des pratiques de gestion des terres sur l'hydrologie du bassin versant et sur la qualité des eaux à une échelle régionale.

I.6.2.5 Modèle WEPP

Le Projet de Prédiction de l'Érosion Hydrique (WEPP) représente un modèle hydrologique et d'érosion fondé sur des principes physiques, développé pour remplacer l'ancien modèle USLE (Laflen et al., 1991). WEPP se compose de deux sous-modèles : une version adaptée aux pentes de collines et une version destinée aux bassins versants. La version pour les pentes de collines permet d'estimer le détachement et le dépôt du sol le long d'un profil de pente de colline. Elle calcule également la perte totale nette de sol en partant de la fin de la pente, sans prendre en compte les processus d'érosion, de transport et de dépôt dans les canaux permanents.

Quant à la version du bassin versant, elle est conçue pour évaluer la perte nette de sol et les dépôts sur de petits bassins versants. Cette version prend en compte les zones de terrain comprenant des ravines éphémères pouvant être cultivées et relie ces processus d'érosion de surface au réseau de canaux. WEPP peut être utilisé pour une seule tempête ou pour des simulations continues. Son développement visait à améliorer la compréhension et la prédiction des processus d'érosion hydrique en utilisant des approches physiques plus avancées que celles de son prédécesseur, l'USLE.

I.7 Les facteurs de l'équation universelle de perte de sol

I.7.1 Facteur d'érosivité des précipitations et du ruissellement (R)

Le facteur R représente la moyenne annuelle à long terme du produit entre l'énergie cinétique des précipitations d'événements et l'intensité maximale des précipitations sur une période de 30 minutes, exprimée en millimètres par heure. Plusieurs chercheurs ont tenté d'estimer l'érosivité des précipitations en utilisant des données de précipitations avec des intervalles de temps prolongés dans différentes régions du monde. Ils ont établi des relations linéaires entre les précipitations annuelles moyennes et les valeurs d'EI30 calculées pour diverses zones, aboutissant à la création de cartes iso-érodentes pour les valeurs d'EI30 annuelles et saisonnières.

I.7.2 Facteur d'érodibilité du sol (K)

Le facteur K, connu comme la capacité d'érodibilité du sol, caractérise la vitesse à laquelle différents types de sols sont sujets à l'érosion. Toutefois, il ne reflète pas directement la perte de sol réelle, car il est influencé par d'autres paramètres tels que les précipitations, la pente, le couvert végétal, etc. Les valeurs de K sont exprimées en fonction de l'indice d'érosivité (R) des précipitations, ce qui en fait une mesure dépendante des précipitations du taux de perte de sol.

I.7.3 Facteur topographique (LS)

Le facteur topographique (LS) de l'USLE tient compte de l'impact de la topographie sur les processus d'érosion en nappe et en rigoles. Il est déterminé par deux paramètres : le gradient de la pente et le facteur de longueur de pente. Ces paramètres peuvent être obtenus grâce à des mesures sur le terrain ou à partir de modèles numériques d'élévation (MNE).

I.7.4 Facteur de pratiques de conservation de soutien (P)

Le facteur P, associé aux pratiques de conservation de soutien, reflète les effets de mesures telles que le contournage, la culture en bandes, le terrassement, etc. Ces pratiques contribuent à prévenir l'érosion du sol en réduisant le débit de ruissellement. La valeur du facteur P varie en fonction des méthodes de culture et de la pente. Il s'échelonne de 0 à 1, où 0 représente une forte résistance à l'érosion artificielle et 1 indique une absence de mesures de résistance à l'érosion artificielle.

I.7.5 Facteur couverture végétale et pratiques culturales (C)

Le facteur C reflète l'utilisation du terrain, incluant la couverture végétale, les aménagements et les techniques agricoles. Certains types de cultures sont plus susceptibles à l'érosion, tandis que d'autres activités ou aménagements peuvent la réduire ou même la prévenir. La nature de la couverture végétale est essentielle car elle influence la protection contre les impacts de la pluie, la diminution du ruissellement et la facilitation de l'infiltration (Roose, 1994). Le facteur C est influencé par :

- La proportion de sol exposé, car l'érosion est principalement observée sur des sols nus lors de précipitations intenses.
- La hauteur de la couverture végétale. Une couverture est bénéfique, mais si elle est trop dense, elle peut ne plus protéger efficacement contre les impacts de la pluie. Après une première interception, les gouttes peuvent être renvoyées au sol.

- La structure des plantes. Par exemple, des plantes en forme de cône peuvent canaliser l'eau et causer des érosions, tandis que des plantes avec une forme "parapluie" dispersent les gouttes, réduisant ainsi leur force. Le facteur C est décrit comme un rapport entre la perte de sol sur des terrains cultivés dans des conditions spécifiques et la perte sur un terrain en friche (Wischmeier et Smith, 1978). Il peut être déterminé à l'aide de nomogrammes (Roose, 1994) ou basé sur des valeurs reconnues pour différents types de végétation ou de culture.

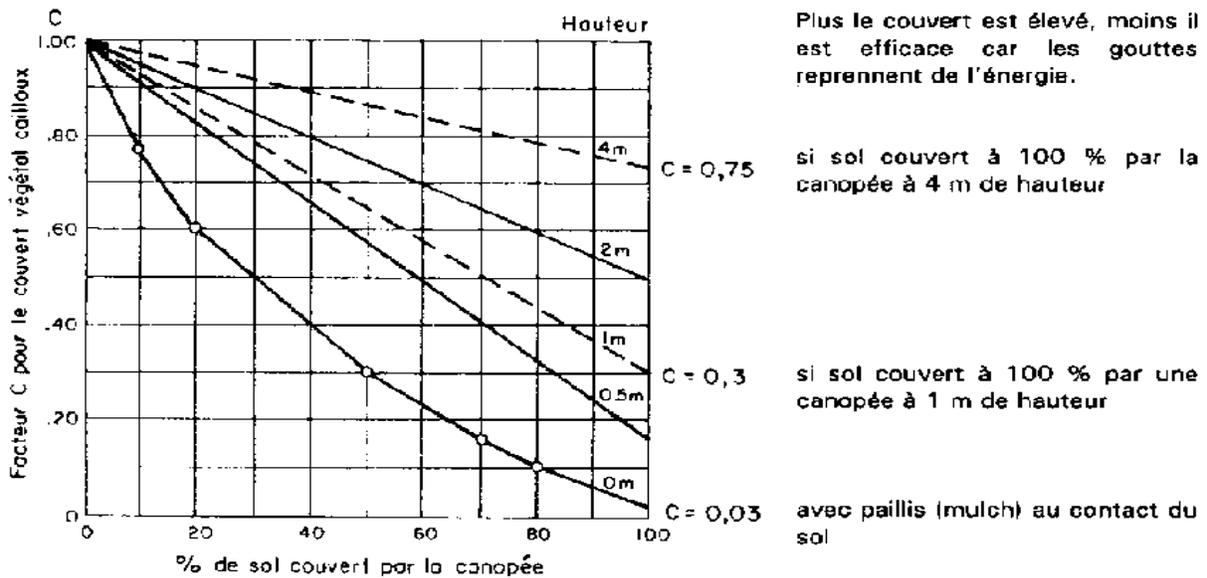


Figure I. 5 : Valeur du facteur de couvert végétal en fonction du pourcentage de couverture du sol et de la hauteur de la végétation (Roose, 1994)

Tableau I. 1 : Valeur de C pour différents types de couvert végétal. (Sadiki et al., 2004)

C	Type de couverture végétal
0.058	Reboisement dense
0.13	Forêt moyennement dense
0.17	Matorral dégradé parcouru dense
0.18	Reboisement clair
0.20	Matorral clair parcouru dense
0.22	Matorral très dégradés
0.32	Steppes à alfa
0.70	Céréaliculture
1	Terrain nu

I.8 Importance du facteur de couverture végétale et pratiques culturales (C)

Le facteur C (facteur de couverture et de gestion) est l'un des composants essentiels de l'Équation Universelle de Perte de Sol (USLE). Son importance dans l'USLE réside dans le fait qu'il quantifie l'influence de la couverture végétale et des pratiques de gestion sur le processus d'érosion des sols. Voici quelques points clés qui mettent en évidence l'importance du facteur C dans l'USLE :

- Protection contre l'érosion : Le facteur C évalue dans quelle mesure la couverture végétale existante, qu'elle soit naturelle ou résultant de pratiques de gestion, protège le sol contre l'érosion. Une végétation dense et bien entretenue peut agir comme un bouclier naturel en réduisant la vitesse des gouttes de pluie, en absorbant l'énergie du ruissellement, et en maintenant le sol en place.
- Identification des zones à risque : En utilisant le facteur C, l'USLE permet d'identifier les zones où la couverture végétale est insuffisante ou les pratiques de gestion sont inadéquates, ce qui les rend vulnérables à l'érosion. Cela est crucial pour la planification de la conservation des sols et des terres.
- Évaluation des pratiques de gestion : Le facteur C tient compte des pratiques de gestion telles que la culture en terrasses, la plantation d'arbres coupe-vent, la mise en place de couvertures végétales, ou l'utilisation de méthodes agricoles durables. Il permet d'évaluer l'efficacité de ces pratiques en termes de réduction de l'érosion.
- Prédiction des pertes de sol : En intégrant le facteur C dans l'USLE, on peut estimer les pertes de sol dues à l'érosion dans une zone donnée. Cette prédiction est cruciale pour évaluer l'impact potentiel de l'érosion sur la productivité des terres et sur la qualité de l'eau.
- Gestion durable des terres : Le facteur C est un outil précieux pour promouvoir la gestion durable des terres. Il encourage l'adoption de pratiques agricoles et de gestion des terres qui préservent la couverture végétale, réduisent l'érosion et minimisent les effets néfastes sur l'environnement.
- Suivi des changements environnementaux : En surveillant les changements dans le facteur C au fil du temps, on peut évaluer l'impact des activités humaines, des catastrophes naturelles ou des changements climatiques sur la couverture végétale et la sensibilité à l'érosion. Cela aide à orienter les interventions de conservation.

En résumé, le facteur C dans l'USLE est un outil crucial pour évaluer et gérer l'érosion des sols. Il permet de quantifier l'effet de la couverture végétale et des pratiques de gestion sur la prévention de l'érosion, contribuant ainsi à la préservation des sols, à la durabilité des terres agricoles et à la protection des ressources en eau.

I.9 Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)

L'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) est un indicateur crucial utilisé en télédétection pour évaluer la quantité et la santé de la végétation. Il est calculé en comparant la réflectivité mesurée dans les parties rouge et proche infrarouge du spectre électromagnétique. Ces deux bandes spectrales sont fortement influencées par l'absorption de la chlorophylle dans la végétation feuillue verte et par la densité de la végétation verte en surface. En outre, dans ces deux bandes, la distinction entre le sol nu et la végétation est maximale (CGIS, 2004).

En général, les zones végétalisées présentent une réflectance élevée dans le proche infrarouge et une réflectance faible dans le rouge visible. Dans l'indice NDVI, la végétation verte se traduit par des valeurs élevées, l'eau par des valeurs négatives, et le sol nu par une valeur autour de zéro. Les valeurs moyennes indiquent des différences de couverture végétale. L'intérêt du NDVI réside dans sa capacité à compenser les variations liées aux conditions d'éclairage, aux pentes de surface et à l'aspect (Lillesand et Kiefer, 1999).

Le NDVI peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Où :

NIR : représente la réflectance dans la bande du proche infrarouge.

R : représente la réflectance dans la bande rouge.

Pour les données de Landsat 8, la formule peut être adaptée comme suit :

$$NDVI = \frac{TM5 - TM4}{TM5 + TM4}$$

Où :

TM4 : correspond à la bande 4 de Landsat TM (0,630 - 0,680 μ m).

TM5 : correspond à la bande 5 de Landsat TM (0,845 - 0,885 μm).

Le NDVI est largement utilisé pour surveiller la croissance des cultures, évaluer la santé des forêts, suivre les changements d'utilisation des terres, et bien d'autres applications liées à la végétation en télédétection.

I.10 La relation entre le NDVI et le facteur C

Un indice de végétation appelé NDVI (indice de différence normalisée de la végétation) mesure la quantité de rayonnement réfléchi par la végétation par rapport au rayonnement réfléchi par le sol. Un facteur qui représente l'impact de la couverture végétale sur l'érosion hydrique est le facteur C de l'équation universelle des pertes en sol (USLE).

De nombreux chercheurs ont étudié la relation entre le NDVI et le facteur C. En général, les deux variables ont une relation négative, ce qui signifie que les valeurs plus élevées du NDVI sont liées à des valeurs plus faibles du facteur C. Une relation linéaire

I.11 La teledetection

La télédétection, terme initialement introduit par Evelyn Pruitt au bureau américain de la recherche novatrice en 1958 (Estes et Jensen, 1998), est devenue une discipline majeure depuis le lancement du premier satellite d'observation de la Terre, Landsat-1, en 1972. Elle peut être définie comme la science et la technologie permettant d'identifier, de mesurer et d'analyser les caractéristiques des objets d'intérêt sans nécessiter un contact direct. Selon Colwell (1997), la télédétection est l'ensemble des méthodes et des outils permettant d'acquérir des informations fiables sur les objets physiques et l'environnement. Cela s'accomplit en enregistrant, mesurant et interprétant les images ainsi que les représentations numériques des modèles d'énergie dérivés de systèmes de capteurs qui fonctionnent sans établir un contact physique avec les objets en question. Cette technologie joue un rôle essentiel dans l'évaluation du facteur C de l'équation de l'érosion USLE.

I.11.1 Applications de la télédétection et du SIG

L'utilisation de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) revêt une importance croissante dans les domaines de l'hydrogéologie et de la gestion des ressources en eau. Plusieurs chercheurs ont réalisé des études approfondies en hydrogéologie pour délimiter les zones à potentiel élevé en eaux souterraines dans des terrains rocheux durs (Rao et al., 2001).

Une exploration exhaustive des applications de la télédétection et du SIG dans la préservation de la biodiversité a été compilée par Gross et al. (2009), Joshi et al. (2009), et Roy (2003).

La télédétection et les SIG se distinguent comme les seules techniques capables d'adopter une perspective globale pour étudier l'environnement dans son ensemble, tout en mettant en lumière les divers processus et interrelations qui existent au sein des différentes composantes biophysiques. Cette approche holistique ouvre la voie vers un développement écologique, comme le souligne Falkenmark (1983), ainsi qu'un environnement équilibré, conformément aux idées de Tolba (1988). Les applications de la télédétection et des SIG peuvent s'étendre à de nombreux domaines variés.

I.11.2 Application dans le domaine de la couverture et de l'utilisation des terres

L'utilisation de la télédétection dans le domaine de la couverture et de l'utilisation des terres englobe une gamme diversifiée d'applications cruciales pour la gestion, la planification et la préservation des ressources terrestres. Voici une description plus détaillée de ces applications, avec des références similaires à celles que vous avez fournies :

- Gestion des ressources naturelles : La télédétection permet de surveiller l'état des ressources naturelles telles que les forêts, les terres agricoles, les zones humides, et les ressources en eau. Elle offre des données continues et précises pour une gestion durable de ces ressources (Hansen et al., 2008).
- Conservation des habitats fauniques : Les données de télédétection sont essentielles pour l'identification et la surveillance des habitats fauniques, contribuant ainsi à la conservation de la biodiversité (Turner et al., 2015).
- Création de cartes de base pour l'intégration dans les systèmes d'information géographique (SIG) : La télédétection fournit des informations de base pour la création de cartes numériques, qui sont ensuite utilisées dans les SIG pour la planification territoriale et la prise de décision (Ariza-Villaverde et al., 2018).
- Surveillance de l'expansion urbaine et de l'empiétement sur les terres : Les données satellitaires permettent de suivre la croissance des zones urbaines et de surveiller les changements dans l'utilisation des terres, ce qui est essentiel pour une planification urbaine efficace (Seto et al., 2011).

- Détection et délimitation des dommages causés par des phénomènes naturels : La télédétection est utilisée pour évaluer les dommages causés par des catastrophes naturelles telles que les inondations, les incendies de forêt et les séismes, facilitant ainsi une réponse rapide et une gestion des catastrophes (Chen et al., 2015).
- Détection de cibles : La télédétection permet l'identification de cibles spécifiques telles que les pistes d'atterrissage, les routes, les clairières, les ponts, et les zones d'interface entre les terres et les eaux, ce qui est utile dans divers domaines (Bruzzone et al., 2000).

Ces applications démontrent l'importance de la télédétection dans la gestion durable des terres et des ressources naturelles, ainsi que dans la planification territoriale.

I.12 Traitement d'image pour supprimer l'effet topographique

Le traitement d'image pour supprimer l'effet topographique est une étape cruciale dans l'analyse des données de télédétection, en particulier pour les zones montagneuses. L'effet topographique, également connu sous le nom de radiométrie topographique, est une distorsion de la luminosité des images causée par les variations d'éclairage solaire, de l'angle du terrain et des caractéristiques de la couverture de surface dans des régions montagneuses (Hodgson, 1994).

Pour remédier à cet effet et obtenir des données plus précises, différentes techniques de traitement d'image sont mises en œuvre. Ces techniques visent à corriger les distorsions topographiques, à extraire des informations utiles, ou à réaliser des analyses statistiques. Voici quelques-unes des méthodes couramment utilisées :

- Correction radiométrique topographique : Cette technique vise à corriger l'effet topographique en ajustant la luminosité des pixels en fonction de l'orientation de la surface par rapport aux rayons du soleil (éclairage incident) et de l'angle de pente. Des modèles mathématiques sont souvent utilisés pour réaliser ces corrections (Teillet et al., 1985).
- Utilisation de données LiDAR : Les données LiDAR (Light Detection and Ranging) fournissent des informations détaillées sur la topographie du terrain. En fusionnant les données LiDAR avec les images satellitaires, il est possible de compenser l'effet topographique et d'améliorer la précision des images (Glennie et al., 2009).

- Filtrage d'image : Des techniques de filtrage sont utilisées pour atténuer les variations de luminosité dues à l'effet topographique. Les filtres peuvent être conçus pour lisser les images et réduire les variations indésirables (Zhang et al., 2003).
- Analyse de séries temporelles : L'effet topographique peut varier avec le temps en raison des changements saisonniers. L'analyse de séries temporelles d'images permet de suivre ces variations et de les corriger en conséquence (Feng et al., 2014).
- Modélisation numérique du terrain (MNT) : L'utilisation d'un MNT précis est essentielle pour comprendre et corriger l'effet topographique. Un MNT de haute résolution permet de mieux caractériser la topographie locale (Gallant et Wilson, 2000).

Ces techniques de traitement d'image sont cruciales pour améliorer la précision des données de télédétection dans les zones montagneuses, en éliminant les distorsions causées par l'effet topographique et en permettant une analyse plus fiable de ces régions.

I.12.1 Normalisation topographique

La normalisation topographique est une technique avancée utilisée en télédétection pour corriger les effets d'illumination solaire qui induisent des contraintes topographiques dans les zones montagneuses. Elle repose sur le modèle de réflectance non lambertienne, qui tient compte des variations de la surface observée en termes de réflectance solaire dans différentes directions (Minnaert et Szeicz, 1961). Cette méthode est essentielle pour obtenir des images corrigées des zones montagneuses et pour effectuer des analyses précises. Voici une explication plus détaillée de la normalisation topographique :

- Modèle de réflectance non lambertienne : La réflectance solaire d'une surface terrestre peut varier en fonction de l'angle de vue du capteur et de la position du soleil. Le modèle de réflectance non lambertienne considère que la réflectance n'est pas uniforme dans toutes les directions et prend en compte les variations liées à la topographie.
- Azimut solaire et élévation solaire : Pour appliquer la normalisation topographique, les données de l'azimut solaire (l'angle entre le nord et la direction du soleil) et de l'élévation solaire (l'angle vertical entre le soleil et la surface terrestre) des images satellites sont utilisées. Ces paramètres sont cruciaux pour calculer les corrections appropriées (Wunderle et Itten, 1997)

- Correction des images : En utilisant les informations d'azimut solaire et d'élévation solaire, la normalisation topographique apporte des corrections aux images satellites. Ces corrections compensent les variations de luminosité dues à la topographie et permettent d'obtenir des images plus homogènes (Teillet et al., 1985).
- Amélioration des analyses : La normalisation topographique est particulièrement bénéfique pour les analyses quantitatives, telles que l'estimation de la végétation, la détection des changements d'utilisation des terres, ou l'évaluation de la topographie. En éliminant les distorsions topographiques, elle permet des résultats plus précis (Reuter et al., 2005).
- Applications variées : Cette technique est largement utilisée dans divers domaines, notamment la géologie, l'écologie, la cartographie, la gestion des ressources naturelles et l'observation environnementale. Elle est particulièrement pertinente dans les régions montagneuses, où les variations topographiques sont fréquentes.

I.12.1.1 La constante de Minnaert (k)

La constante de Minnaert (k) est un paramètre important en télédétection qui permet de corriger les variations de luminosité observées dans les images en fonction de la pente et de l'aspect du terrain. Elle peut être obtenue en effectuant une régression sur un ensemble de valeurs de luminosité observées à partir d'imageries de télédétection, pourvu que toutes les observations dans cet ensemble proviennent du même type de couverture terrestre. La valeur de k correspond à la pente de la droite de régression, ce qui permet de quantifier l'effet topographique sur la réflectance des surfaces terrestres (Hodgson, 1994).

I.12.2 Normalisation de la somme

La normalisation de la somme est une autre technique couramment utilisée pour supprimer l'effet de la topographie dans les images satellites. Conformément à Shrestha et Zinck (2001), cette méthode vise à atténuer l'influence des variations d'éclairage sur la réflectance de la surface. Elle consiste à normaliser l'intensité de chaque bande satellite en utilisant la somme de l'éclairage de toutes les bandes, suivie d'une multiplication par une valeur constante.

I.13 Études antérieures sur l'évaluation du facteur C

I.13.1 Évaluation du facteur C par Pierce et al. (1980)

L'article "A Study of the Erodibility Factor (C) for the Universal Soil Loss Equation," rédigé par R.L. Pierce et J.L. Hupp en 1980 et publié dans le journal "Soil Science Society of America Journal," se penche sur le facteur C de l'Universal Soil Loss Equation (USLE) dans la région du Nebraska, aux États-Unis. Les résultats mettent en évidence une variation significative du facteur C en fonction des caractéristiques du sol et du couvert végétal, avec des valeurs s'étalant de 0,01 à 1,0. Les prairies permanentes affichent les valeurs les plus basses du facteur C, tandis que les sols nus présentent les valeurs les plus élevées. Ces conclusions soulignent l'importance de l'évaluation précise du facteur C pour obtenir des prévisions exactes des pertes de sol dans le cadre de l'USLE.

I.13.2 Évaluation du facteur C par Brown et Bullock (1981)

Dans cette étude de Brown et Bullock (1981), les chercheurs ont exploré l'impact de la végétation sur l'érosion des sols dans le bassin méditerranéen. Ils ont recouru à une combinaison de données provenant de parcelles expérimentales et de sites naturels pour évaluer l'érosion des sols dans divers contextes de couverture végétale. Les résultats ont clairement démontré que la végétation joue un rôle significatif dans la préservation des sols contre l'érosion, avec des parcelles dotées d'une couverture végétale dense enregistrant des taux d'érosion nettement inférieurs à ceux des parcelles sans végétation. Plus précisément, cette étude a mis en lumière que le pouvoir protecteur de la végétation peut réduire l'érosion des sols de manière substantielle, oscillant entre 50 et 90 %, en fonction du type de végétation et des caractéristiques du sol. En conclusion, les chercheurs soulignent l'importance cruciale de la végétation pour contrer l'érosion, en particulier dans les régions à topographie escarpée du bassin méditerranéen.

I.13.3 Évaluation du facteur C par El-Swaify et Mansour (1988)

Dans cette recherche menée par El-Swaify et Mansour (1988), l'attention s'est portée sur l'impact de la végétation sur l'érosion des sols au sein du bassin méditerranéen. Pour ce faire, les scientifiques ont utilisé une variété de données provenant de parcelles expérimentales et de sites naturels pour examiner l'érosion des sols dans divers contextes de couverture végétale. Les résultats ont révélé que la végétation est en mesure de réduire de manière significative l'érosion des sols, avec une plage d'efficacité allant de 50 à 90 %. Il est à noter que l'impact de la

végétation sur l'érosion est particulièrement prononcé dans les régions caractérisées par une topographie escarpée et une faible couverture végétale. Les chercheurs concluent que la préservation de la couverture végétale dans la région est essentielle pour protéger les sols de l'érosion.

I.13.4 Évaluation du facteur C par Lasanta et al. (2022)

Dans l'article de Lasanta et al. (2022), les chercheurs se sont penchés sur l'effet du changement climatique sur l'érosion des sols dans le bassin méditerranéen. Ils ont fait usage de modèles climatiques pour simuler l'érosion des sols dans cette région sous divers scénarios de changement climatique. Les résultats ont révélé que le changement climatique est susceptible d'accentuer l'érosion des sols dans la région méditerranéenne. Les chercheurs ont identifié que l'augmentation des précipitations et des températures pourrait intensifier les phénomènes de ruissellement et d'inondations, ce qui entraînerait une augmentation de l'érosion des sols. Dans leur conclusion, les auteurs soulignent l'importance de prendre en compte le changement climatique lors de la planification des mesures pour atténuer l'érosion des sols dans le bassin méditerranéen.

I.13.5 Évaluation du facteur C par Al-Hamdan et al. (2023)

L'article d'Al-Hamdan et al. (2023) examine le rôle central de la végétation dans la gestion de l'érosion des sols au sein du bassin méditerranéen. Les chercheurs ont utilisé une compilation de données provenant de parcelles expérimentales et de sites naturels pour évaluer l'érosion des sols dans divers contextes de couverture végétale. Les résultats de cette étude mettent en lumière le rôle crucial joué par la végétation dans la régulation de l'érosion des sols, en ralentissant les écoulements, en favorisant l'infiltration des eaux de pluie, et en stabilisant les particules de sol. Les chercheurs concluent en soulignant l'importance vitale de la préservation de la couverture végétale de la région pour protéger les sols contre l'érosion.

I.13.6 Évaluation du facteur C par Toumi et al. (2013)

L'article de 2013, rédigé par S. Toumi et al., explore l'évaluation du facteur C de l'USLE (Universal Soil Loss Equation) dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie. Cette estimation repose sur des paramètres tels que la couverture végétale, la pente et l'utilisation des terres, qui ont été cartographiés à l'aide de données de télédétection et de systèmes d'information géographique (SIG). Les résultats démontrent une variation du facteur C de 0 à 1 dans la région d'étude, avec des valeurs plus élevées observées dans les zones caractérisées par une couverture

végétale limitée et des pentes abruptes. En revanche, les zones dotées d'une couverture végétale dense, comme les forêts et les zones urbaines, présentent des valeurs de facteur C plus faibles. Plus précisément, 45 % des zones affichent un facteur C élevé ($C > 0,5$), 35 % ont un facteur C moyen ($0,2 < C < 0,5$), et 20 % montrent un faible facteur C ($C < 0,2$). En conclusion, cette étude met en évidence l'importance du facteur C dans le contexte de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Mina, offrant ainsi des indications cruciales pour la mise en place de mesures de préservation des sols, telles que la plantation de végétation, la création de terrasses et la gestion des terres.

L'ensemble de ces études converge vers une conclusion fondamentale : la végétation joue un rôle primordial dans la préservation des sols contre l'érosion dans le bassin méditerranéen. Les études montrent que la végétation peut réduire l'érosion des sols de manière significative, avec des pourcentages de protection variant de 50 à 90 %, en fonction du type de végétation et des caractéristiques du sol. En parallèle, le changement climatique est susceptible d'exacerber l'érosion des sols dans la région, en augmentant les phénomènes de ruissellement et d'inondations. Par conséquent, la préservation de la couverture végétale dans le bassin méditerranéen apparaît comme une mesure cruciale pour contrer l'érosion des sols et protéger ces précieux écosystèmes.

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons exploré en profondeur la littérature existante sur l'érosion du sol, en mettant l'accent sur l'érosion hydrique. Nous avons examiné les mécanismes sous-jacents de l'érosion, les facteurs qui l'influencent, ainsi que les différentes méthodes de modélisation utilisées pour évaluer ce phénomène. De plus, nous avons mis en évidence l'importance du facteur de couverture végétale et pratiques culturales (C) dans ce contexte. Ces connaissances bibliographiques sont essentielles pour comprendre le contexte de notre étude et fourniront une base solide pour l'analyse des résultats à venir.

Chapitre II :

Matériels et Méthodes

II.1 Cas du Bassin d'Isser : Présentation du bassin d'Isser

II.1.1 Situation géographique

Le bassin d'Isser se trouve dans le nord de l'Algérie, à une distance d'environ 70 kilomètres au sud-est d'Alger. Il s'étend partiellement sur quatre wilayas, à savoir Médéa, Boumerdes, Bouira et Tizi Ouzou. Les coordonnées géographiques du bassin d'Isser se situent entre les longitudes 3° 32' Est et 3° 53' Est, ainsi qu'entre les latitudes 36° 38' Nord et 36° 52' Nord, couvrant ainsi une superficie totale de 4149 km².

Ce bassin est délimité comme suit :

- À l'est, il est bordé par les bassins de Soummam et du littoral algérois.
- Au sud, ses limites sont marquées par les bassins du Chott el Hodna et du Cheliff.
- Au nord, il est adjacent à la mer Méditerranéenne.
- À l'ouest, il est délimité par le bassin côtier algérois.

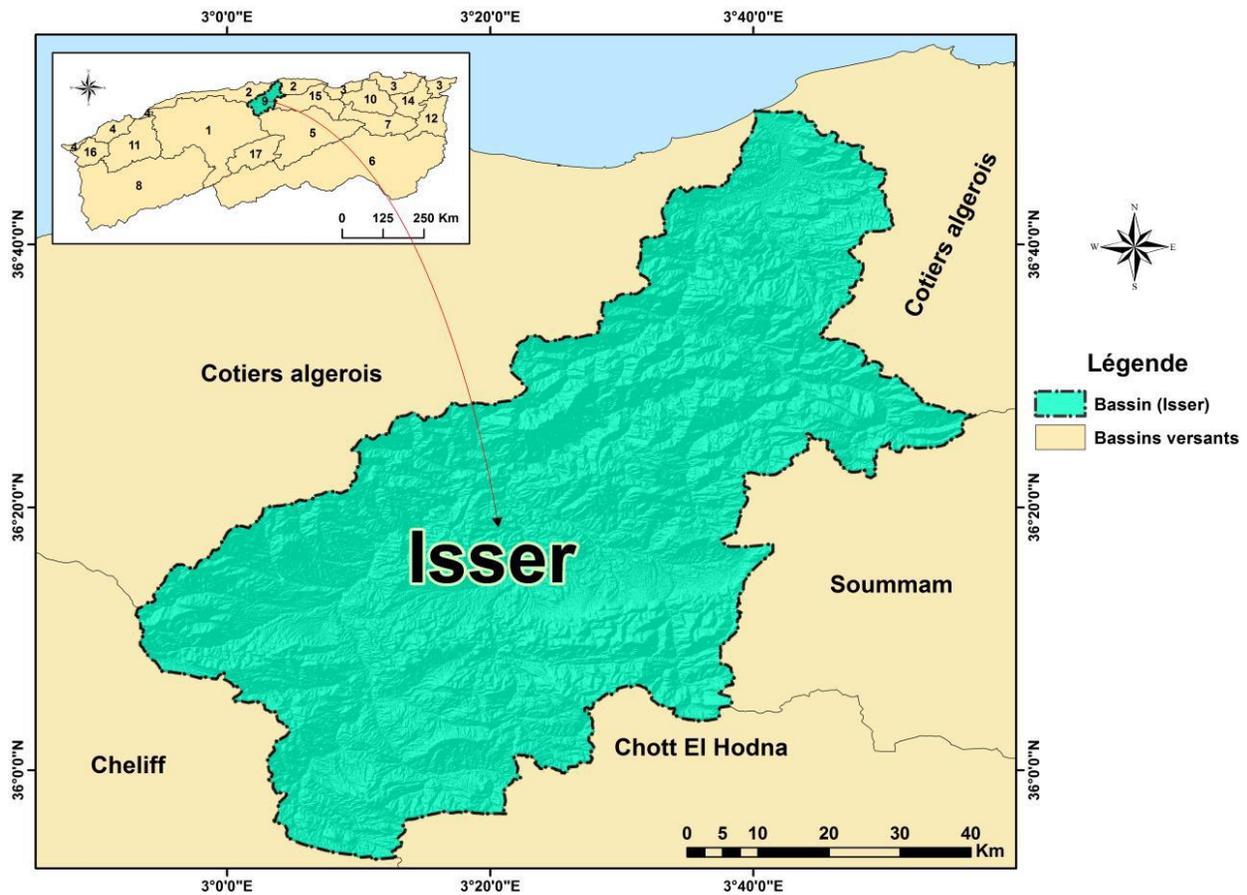


Figure II. 1 : Carte de la situation géographique du bassin d'Isser.

II.1.2 Contexte Géologique du Bassin d'Isser

Le bassin d'Isser présente une variété de formations géologiques qui contribuent à sa composition lithologique diversifiée. Cette description est basée sur des données de référence (Abdelhafid, 2014) et tient compte des caractéristiques géologiques des différentes zones du bassin.

II.1.2.1 Haut Isser

Dans la zone du Haut Isser, environ 60% de la surface est constituée de formations marneuses et marno-calcaires, qui remontent au Crétacé inférieur, moyen et supérieur. Cette région abrite également environ 13% d'argiles et de sable rouge d'origine aquitanaise continentale. En outre, on y trouve des dépôts alluviaux en terrasses du Quaternaire continental, couvrant environ 12% de la surface du bassin. Il est à noter que la présence de pointements triasiques dans le Crétacé supérieur a conduit à la salinité des eaux de l'Oued Mellah.

Ces marnes, représentant environ 69% de la superficie totale, sont sujettes à la fissuration et à la crevasse en raison de la déshydratation pendant la saison sèche. Elles subissent une altération sur plusieurs centimètres, formant un tapis de gravillons mélangés à de la poussière argilo-calcaire, qui est emporté lors des premières averses orageuses de la saison des pluies. Ces formations se caractérisent par leur érodabilité relativement élevée.

II.1.2.2 Moyen Isser

Dans la région du Moyen Isser, environ 70% de la surface est occupée par des schistes argileux, des marnes grises et schisteuses, ainsi que des couches de grès, datant du Crétacé inférieur, moyen et supérieur. Environ 13,41% de la superficie totale est constituée d'oligocène marin, représenté par des conglomérats, des grès et des marnes. Le Miocène inférieur est également présent sous forme de grès et de marnes, couvrant environ 4% du bassin. Des alluvions du Quaternaire continental occupent 6,90% de la superficie totale. De plus, il y a des traces de trias marin ou lagunaire qui représentent environ 0,6% du bassin. Le Moyen Isser est caractérisé par la présence de formations généralement meubles et facilement érodables.

II.1.2.3 Bas Isser

Le Bas Isser se compose principalement de formations marneuses, de grès et de conglomérats, appartenant à l'oligocène marin, couvrant environ 43,15% de la superficie. Le Miocène inférieur marin est représenté par des grès et des marnes, occupant environ 14,91% du Bas Isser. On y

trouve également des schistes cristallins et micacés, notamment des schistes à chlorite et à séricine, ainsi que du quartz à biotite, formant 19,84% de la superficie totale.

Le Crétacé inférieur est présent dans environ 2,11% du bassin, sous forme de schistes argileux, de marnes grises et de grès. Environ 18,6% de la superficie est occupée par des alluvions du Quaternaire continental. De plus, des formations granitiques, représentées par des granites, couvrent environ 1,93% de la superficie totale. Ces formations plus dures, telles que les conglomérats et les granites, confèrent au Bas Isser une caractéristique de moins grande érodabilité par rapport au Haut Isser (Abdelhafid, 2014).

II.1.3 Végétation

II.1.3.1 Haut Isser

Lorsque l'on étudie le bassin du Haut Isser, la caractéristique la plus évidente est l'absence d'une couverture végétale arbustive dense. Cette absence favorise le phénomène de l'érosion et entraîne des conséquences néfastes, telles que la perte de terres cultivables et l'envasement des ouvrages hydrauliques existants dans cette région. Les collines marneuses du Haut Isser sont principalement couvertes de cultures céréalières, maraîchères et fourragères. On y trouve également, mais en petite quantité, des plantations d'arbres fruitiers, ainsi que des versants abrupts dénudés ou couverts de broussailles clairsemées, où l'on peut trouver le pin d'Alpe et le chêne vert.

II.1.3.2 Moyen Isser

Le Moyen Isser est principalement occupé par des terres agricoles. Les plaines longeant l'oued Isser sont caractérisées par la prédominance des cultures d'arbres fruitiers, notamment les agrumes, les espèces à noyaux et à pépins, les oliviers et les vignes de table. Ces cultures occupent actuellement plus de 40 % de la superficie cultivée. Les collines du Moyen Isser sont quant à elles utilisées pour la culture de céréales et d'arbres fruitiers. Il est important de noter que le Moyen Isser souffre d'un manque de couverture végétale forestière dense, à l'exception des forêts de pins au sud du bassin, bien que souvent dégradées (Abdelhafid, 2014).

II.1.3.3 Bas Isser

La répartition de la végétation dans le Bas Isser est dominée par les cultures annuelles. Sur la plaine, on trouve la vigne, des fourrages, des céréales, des légumes secs et des cultures maraîchères. Sur les collines, la culture céréalière et la culture de fourrages sont prédominantes,

ainsi que la culture du melon. Dans les montagnes et les piémonts, la culture de l'olivier est très répandue, et on peut également trouver d'autres espèces forestières telles que le peuplier, le chêne-liège et le pin (Bouчек et Ikhlef, 2015).

II.1.4 Climat

Dans le cadre de notre recherche, nous avons utilisé les données climatiques provenant de la station météorologique de Dar El Beida, gérée par l'Office National de la Météorologie (O.N.M), sur la période s'étalant de 1975 à 2014, Le climat de la région où se situe notre zone d'étude est de type méditerranéen, caractérisé par la présence du sirocco en été, des étés chauds et arides, ainsi que des hivers pluvieux et doux.

II.1.4.1 Température :

La température dans la région présente une variation notable en fonction de la distance par rapport à la mer. En général, on observe des températures maximales plus élevées à l'intérieur des terres par rapport aux régions côtières. Les mois les plus froids de l'année sont généralement janvier et février, caractérisés par des températures moyennes minimales oscillant entre 5°C et 18°C. En revanche, les mois les plus chauds se situent en juin, juillet et août, avec des températures moyennes maximales variant entre 16°C et 31°C. Pour obtenir une perspective plus détaillée de la variation des températures mensuelles et annuelles.

Tableau II. 1 : Température moyenne mensuelle et annuelle. (1975-2014).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne Annuelle
Max	28,8	24,8	20,3	17,6	16,5	17,1	18,6	20	22,4	26,9	30,6	30,7	30,7
Moy	23,3	19,4	14,9	12,1	10,5	11,4	11,9	14,4	17,6	21,6	24,8	25,5	17,3
Min	16,8	13,1	9,2	7,3	5,4	6,4	6,7	8,7	11,4	15,4	18,4	18,7	5,4

Source : ONM

II.1.4.2 Humidité relative :

L'humidité relative correspond au rapport entre la quantité de vapeur d'eau présente dans un volume d'air donné et la quantité maximale de vapeur d'eau que ce même volume d'air pourrait contenir à la même température. Les valeurs de l'humidité relative enregistrées sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Tableau II. 2 : Humidité relative moyenne mensuelle et annuelle en (%). (1975-2014)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne Annuele
Max	91,8	92,3	93,7	92,8	93,5	94	94	94	93,9	93	91,2	91,7	94
Moy	71,8	73,6	77,2	78,3	77,9	77,3	77,2	76	75,6	71,2	69,6	70,2	74,7
Min	44,6	46,4	49,8	52,7	51,2	52,3	48,7	50,6	49,7	45,7	40,8	44,1	40,8

Source : ONM

II.1.4.3 Le vent

Le vent joue un rôle significatif en tant que facteur climatique majeur dans la région. Il prédomine généralement avec une direction allant du nord au sud et du nord-ouest, transportant souvent des masses d'air humide. Durant la saison estivale, les vents secs sont plus fréquents et soufflent généralement de sud à nord, avec une vitesse variante entre 2,9 et 3,4 mètres par seconde. Pour plus de détails sur les vitesses moyennes du vent enregistrées, veuillez consulter le tableau I.4.

Tableau II. 3 : Vitesses moyennes du vent (m/s). (1975-2014).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne Annuele
V (m/s)	2,9	3	2,9	3,4	3,1	3,3	3,3	3,3	3,1	3,3	3,4	3,1	3,2

Source : ONM

II.1.4.4 L'évaporation

L'évaporation moyenne est déterminée en utilisant les données recueillies au barrage El Hamiz par l'Agence Nationale Des Ressources Hydrauliques en 2018. Vous pouvez trouver ces valeurs dans le tableau I.5.

Tableau II. 4 : Evaporation moyenne.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne annuelle
Mm (%)	126	96	69	54	61	68	83	92	122	149	168	176	105.3
	10	7,6	5,4	4,3	4,8	5,4	6,5	7,3	9,7	11,8	13,3	13,9	100.0

Source : (ANRH, 2018)

II.1.4.5 Précipitations

Les moyennes des quantités de pluie enregistrées dans les stations météorologiques au cours de la période allant de 1975 à 2014 sont présentées ci-dessous :

Tableau II. 5 : Précipitations moyennes annuelles (1975-2014).

Code	Station	Précipitations moyennes annuelles (mm)
90104	SOUAGHI	344,6
90201	EL OMARIA	469,8
90202	MAHTERRE	653,7
90203	TABLAT DRS (A.N.R.H)	581,8
90205	EL OMARIA Pep,	365,8
90301	DJOUAB	573,1
90302	BINI SLIMANE	385,3
90304	PONT DE LA TRAILLE	484,7
90314	DECHMYA	488,7
90401	KHABOUZIA	414,3
90402	SOUK EL KHEMIS	519,1
90403	DJEBAHIA	607,8
90406	TAZEROUT	771,5
90413	OULED TOUATI	521,8
90419	BSIBSA	713,1
90502	LAKHDARIA GORGES	701,6
90503	OULED BOUHADDADA	770,9
90506	TIZI GHENIF	728,1
90510	B, MENAIEL PEPIN	668,7
90512	CHABET EL AMEUR	701,6

Source : ANRH

Les données révèlent que les régions côtières présentent une pluviométrie annuelle significative dépassant les 600 mm, tandis que les zones intérieures enregistrent une pluviométrie annuelle qui ne dépasse pas les 500 mm par an. La station de Tazerout affiche la pluviométrie maximale enregistrée, atteignant 771,5 mm, tandis que la station de Souaghi enregistre la pluviométrie la plus basse, avec 344,6 mm.

II.1.5 Réseau hydrographique

Le bassin versant de l'Isser est traversé par un réseau hydrographique dense, avec la mer Méditerranée servant de déversoir naturel. Ce réseau comprend cinq (05) stations hydrométriques et deux (02) barrages situés sur le cours d'eau principal, à savoir le Koudiat Acerdoun et Beni Amrane. La figure ci-dessous illustre le réseau hydrographique présent dans le bassin de l'Isser.

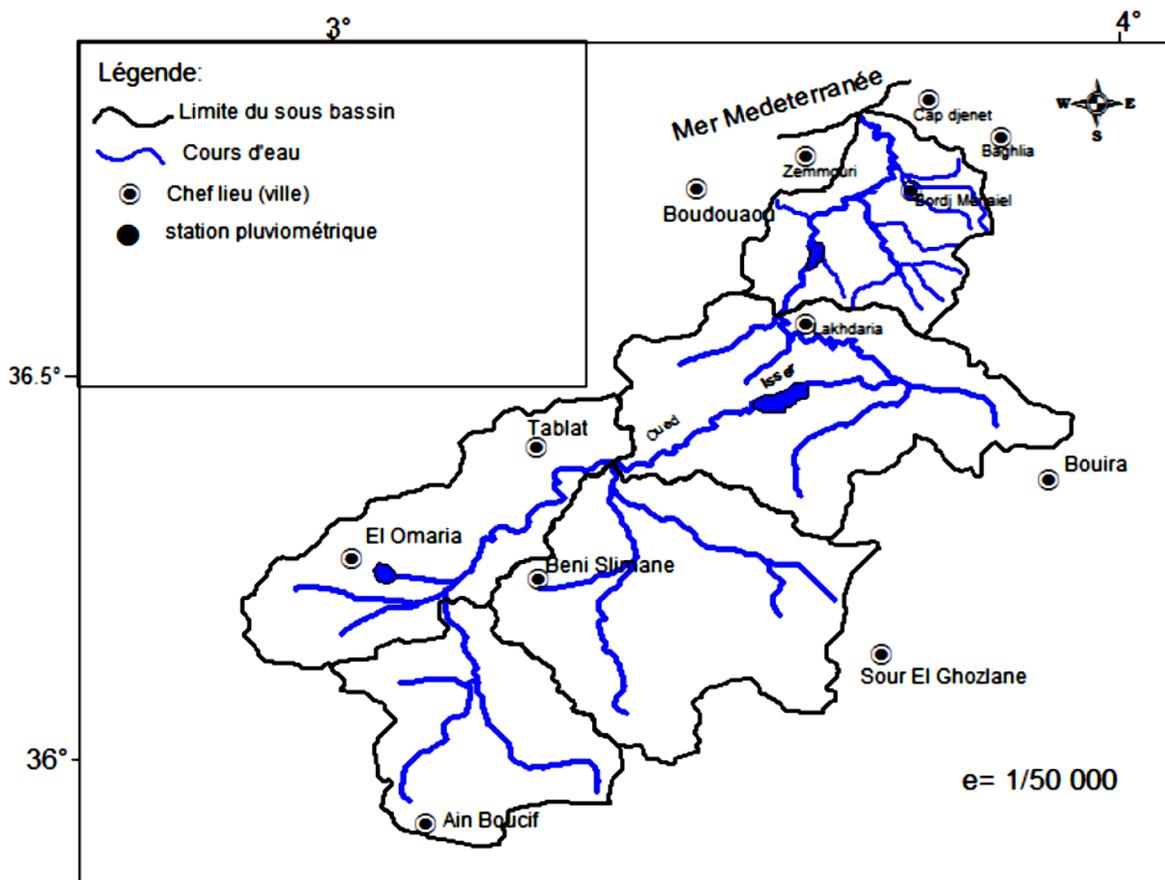


Figure II. 2 : Réseau hydrographique du bassin d'Isser. (Abdelhafid,2014)

II.1.6 Ressources en eau

II.1.6.1Eaux superficielles

Le bassin versant d'Isser dispose de barrages opérationnels qui sont exploités pour la gestion des ressources en eaux de surface, tant pour l'irrigation que pour la consommation urbaine.

- Barrage Koudiat Acerdoune : Ce barrage a été mis en service en 2009 dans le but d'alimenter en eau potable 14 centres urbains et 34 localités, ainsi que pour l'irrigation des terres dans les périmètres de la Mitidja centre et Est.
- Barrage Beni Amrane : Situé sur l'oued Isser, ce barrage a une capacité de stockage de 6 millions de mètres cubes (6 Hm³).
- Barrage Ladrat : Implanté le long de l'oued Ladrat, ce barrage est spécifiquement destiné à l'irrigation du périmètre de Ladrat, avec une capacité de stockage de 9 millions de mètres cubes (9 Hm³).

II.1.6.2Eaux souterraines

Le bassin d'Isser est caractérisé par plusieurs unités hydrogéologiques distinctes, comprenant :

- L'unité hydrogéologique du haut et moyen Isser.
- L'unité hydrogéologique du bas Isser.
- L'unité hydrogéologique de la plaine des Arribs.
- L'unité hydrogéologique de l'oued Mellah.

La potentialité en termes d'eaux souterraines dans le bassin d'Isser est estimée à environ 210 millions de mètres cubes (210 Hm³) selon l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH).

II.2 Évaluation du coefficient C

Le coefficient C évalue les effets préventifs de la culture ou de la couverture végétale et se situe dans une plage de 0 à 1. Lorsqu'il n'y a aucune utilisation des terres pour contrer l'érosion, le coefficient C atteint la valeur maximale de 1. Dans tous les autres cas, il reste inférieur à 1, atteignant même 0 lorsque l'érosion est complètement empêchée grâce à la gestion du sol. Parmi les facteurs considérés pour le calcul de la valeur RUSLE, le coefficient C est reconnu comme l'un des plus déterminants. Toy et ses collègues (1999) ont avancé deux raisons pour expliquer l'importance de ce coefficient : "(1) il reflète des conditions de surface souvent gérables pour la prévention de l'érosion, et (2) ses valeurs varient de quasiment 0 à légèrement supérieur à 1, ce qui a un impact significatif sur le taux de perte de sol." C'est pourquoi il est vivement recommandé de choisir le coefficient C avec une grande précision, car une sélection erronée de sa valeur peut entraîner d'importantes erreurs dans les calculs relatifs à l'érosion (Karpilo et Toy, 2004).

II.3 Approches utilisées pour l'évaluation du facteur C

II.3.1 Première approche (la méthode originale).

Il existe différentes approches pour déterminer le facteur C, qui représente les effets préventifs de la culture ou du couvert végétal. Nous présentons ici la première approche, également connue sous le nom de méthode originale du RUSLE, suivant laquelle le facteur C est calculé en utilisant des travaux de terrain et des expériences (Laflen et al., 1985 ; Weltz et al., 1987 ; Renard et al., 1997). Voici comment cette méthode fonctionne :

$$SLR = PLU \times CC \times SC \times SR \times SM$$

Dans cette approche, on utilise un facteur appelé ratio de perte de sol (SLR) pour des conditions spécifiques. Le SLR est calculé en combinant 5 sous-facteurs différents : PLU (utilisation antérieure des terres), CC (couvert végétal), SC (couvert végétal), SR (rugosité de surface) et SM (sous-facteur d'humidité du sol). Tous ces sous-facteurs varient de 0 à 1 et sont directement liés au facteur C. Par conséquent, le SLR est calculé pour différentes périodes de temps, en supposant que les paramètres importants restent constants (Renard et al., 1997).

Ensuite, une moyenne pondérée est calculée pour la période correspondante, et le facteur C annuel moyen est déterminé en utilisant la relation suivante suggérée par Renard et al. (1997) :

$$C = \frac{SLR_1 \times EI_1 + SLR_2 \times EI_2 + \dots + SLR_n \times EI_n}{EI_t}$$

Où EI_n représente l'énergie totale des tempêtes multipliée par l'intensité maximale de 30 minutes, et EI_t est la valeur totale de EI.

Cette approche est idéale dans des conditions idéales, mais elle présente également des limites. Tout d'abord, elle repose sur des tests effectués sur des échantillons prélevés, supposant que les conditions représentées par ces échantillons sont uniformes dans toute l'unité où ils sont prélevés. Par conséquent, la zone d'étude doit être subdivisée en classes discrètes, chacune représentée par des polygones, et les résultats des observations doivent être attribués aux polygones correspondants de l'unité. En fonction de la densité de l'échantillonnage, le facteur C peut être approximatif et ne pas refléter les variations progressives entre différents polygones, correspondant à différents types d'utilisation des terres. De plus, il n'est pas toujours possible d'obtenir les données nécessaires pour calculer le facteur C selon cette méthode. Dans de telles situations, le facteur C peut être estimé à partir de données de télédétection ou tiré de recherches antérieures soutenues par des observations sur le terrain.

II.3.2 Deuxième approche

Une autre approche couramment utilisée pour estimer le facteur C implique l'utilisation de techniques de télédétection, en particulier l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). Parmi les diverses techniques de télédétection répertoriées par Erenčin (2000), l'utilisation du NDVI est la plus répandue. Plusieurs études, telles que celles menées par De Jong (1994), Gutman et Ignatov (1998), et Van der Knijff et al. (2000), ont examiné la relation empirique entre le facteur C et le NDVI. Cette compréhension de la relation entre le NDVI et le facteur C repose sur des comparaisons entre les valeurs de C estimées selon la méthode de Renard et al. (1997) et les valeurs de NDVI pour les mêmes points d'échantillonnage.

Cependant, il convient de noter que le NDVI peut ne pas couvrir entièrement tous les sous-facteurs du facteur C. Les valeurs de NDVI sont principalement basées sur la teneur en chlorophylle de la végétation, ce qui signifie qu'elles reflètent principalement le sous-facteur SC de la méthode de calcul du facteur C. En revanche, le NDVI ne tient pas compte des autres sous-

facteurs tels que PLU, CC, SR, et SM. Par exemple, les prairies pourraient afficher des valeurs de NDVI plus élevées que les zones boisées. Dans une telle situation, si les valeurs de NDVI étaient directement converties en facteur C, cela conduirait à une conclusion erronée selon laquelle une zone forestière serait plus sujette à l'érosion qu'une zone de prairie. Cette limitation conceptuelle soulève des préoccupations quant à l'exactitude des estimations ou conversions du facteur NDVI en facteur C.

II.3.3 Troisième approche

Lorsqu'il n'est pas possible de déterminer les valeurs du facteur C à l'aide des méthodes précédentes, une troisième approche consiste à recourir à la littérature existante. Cependant, cette méthode présente certaines limites. Tout d'abord, elle ne tient généralement pas compte des variations graduelles au sein d'une même classe d'utilisation des terres, ce qui peut entraîner une perte de précision. De plus, les valeurs du facteur C suggérées dans la littérature pour des conditions similaires peuvent varier considérablement.

En outre, en Turquie, il y a eu peu de calculs du facteur C basés sur des données de terrain, ce qui a conduit à l'utilisation de valeurs du facteur C provenant de la littérature publiée dans d'autres pays, caractérisés par des conditions géographiques, environnementales et climatiques différentes. Par conséquent, extraire des valeurs du facteur C de la littérature, même si les classes d'utilisation des terres sont identiques, peut introduire une incertitude supplémentaire dans les résultats en raison de la diversité des conditions à travers différentes régions géographiques.

II.3.4 Quatrième approche

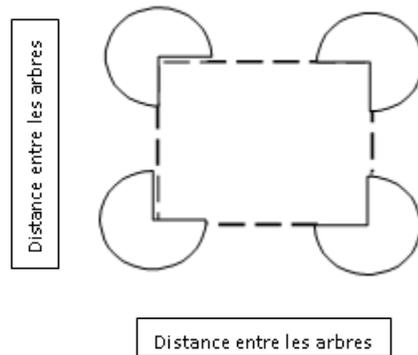
La quatrième approche repose sur les mesures réelles du rendement sédimentaire ou de l'érosion du sol, généralement effectuées à l'échelle d'une parcelle ou d'un bassin versant (Cinnirella et al., 1998). Par conséquent, lorsque des données d'entrée relatives aux autres facteurs de la RUSLE sont disponibles, il est envisageable de calculer le facteur de gestion des cultures pour chaque événement en suivant cette méthode récursive. Toutefois, il est important de noter que, dans la plupart des cas, l'accès à de telles données est limité voire impossible.

II.4 Méthode sur le terrain pour déterminer le facteur C

Le facteur de gestion du couvert, communément désigné sous le nom de facteur C, représente l'impact de la végétation, des pratiques de gestion, et des mesures de lutte contre l'érosion sur la perte de sol (Toy et Foster, 1998). L'évaluation de la valeur du facteur C repose sur l'utilisation

d'un sous-facteur terrain, ainsi que sur des données de sous-facteurs provenant de sources littéraires, comme expliqué ci-dessous. Dans cette étude, un total de 138 échantillons ont été recueillis à des fins d'apprentissage, tandis que 125 échantillons ont été collectés pour la validation des résultats. L'estimation du facteur C est effectuée en utilisant un sous-facteur qui intègre la couverture de la canopée, la couverture de surface (couverture du sol), l'utilisation antérieure des terres (PLU), et la rugosité de surface, en appliquant la méthode RUSLE (Renard, 1997), comme décrit ci-dessous :

- L'évaluation de la couverture de la canopée et de la couverture de surface s'est déroulée sur le terrain en utilisant des mesures spécifiques. La fraction de la surface terrestre couverte par la canopée (F_c) et le pourcentage de la surface terrestre couverte par la couverture de surface (S_p) ont été estimés de la manière suivante :



Pour estimer F_c , un ruban à mesurer a été employé pour mesurer la distance entre les arbres. La méthode consistait à placer le ruban au sol à la base des plantes et à mesurer le rayon de la canopée supérieure. La somme des quartiers de la surface couverte par chaque groupe de quatre arbres formait une surface en forme de cercle. Cette surface de canopée était ensuite extrapolée à l'échelle de la totalité de la zone en utilisant les distances entre les arbres. Enfin, F_c a été calculé en divisant la surface de la canopée par la surface totale.

En ce qui concerne S_p , une évaluation visuelle a été effectuée pour estimer la couverture de surface dans la zone où F_c était estimée. Pour les zones ouvertes, la couverture de surface a été mesurée avec précision en utilisant un ruban pour mesurer une zone précise, par exemple 2 x 2 mètres carrés, suivie d'une évaluation visuelle de cette petite zone pour extrapoler la couverture de surface globale.

II.4.1 Sous-facteur de couverture de la canopée

L'estimation du couvert forestier repose sur une évaluation dépendant de la végétation présente dans différentes classes d'utilisation des terres. Dans le cas des forêts et des zones forestières dégradées, le couvert forestier a été principalement estimé en fonction des essences végétales dominantes, à savoir le teck et le bambou respectivement. Les zones recouvertes par une végétation herbacée naturelle ont été considérées comme des prairies. Sur le terrain, la fraction de la surface terrestre couverte par la canopée (F_c) a été collectée et utilisée pour le calcul du couvert forestier. Le calcul du sous-facteur de couverture de canopée (CC) a été effectué en utilisant l'équation suivante, conformément à la méthode de Wischmeier et Smith (1978) :

$$CC = F_c \times e^{-0.1 \times H} \times H$$

Où :

CC : sous-facteur de couverture de canopée (varie de 0 à 1)

F_c : fraction de la surface terrestre couverte par la canopée

H : distance parcourue par les gouttes de pluie après avoir percuté la canopée (exprimée en millimètres)

II.4.2 Sous-facteur de couverture de surface

Le deuxième sous-facteur, la couverture de surface, a été calculé en utilisant des données terrain pour déterminer le pourcentage de la surface terrestre recouverte par la couverture de surface (Sp). Les autres variables nécessaires, telles que la rugosité aléatoire (Ru) et un coefficient empirique (b), ont été extraites de sources littéraires (Renard, 1997). Ces variables étaient spécifiques aux différents types de végétation et à l'état d'érosion. Les valeurs du sous-facteur de couverture de surface ont été obtenues en utilisant l'équation suivante :

$$SC = e^{-b \times Sp \times \left(\frac{0.24}{Ru}\right)^{0.08}}$$

Où :

SC : sous-facteur de couverture de surface

b : coefficient empirique

Sp : pourcentage de la surface terrestre couverte par une couverture de surface

Ru : rugosité de surface aléatoire

II.4.3 Sous-facteur de rugosité de surface

La rugosité de la surface du sol fait référence aux variations microscopiques de l'élévation de la surface à travers un terrain, résultant principalement des pratiques de travail du sol et de la texture du sol (Moreno et al., 2008). Ce sous-facteur exerce un contrôle prépondérant sur la plupart des processus hydrauliques et d'érosion. Il engendre des variations rapides dues aux opérations de labour, suivies d'une évolution lente des caractéristiques de la surface du sol sous l'influence des précipitations (Taconet et Ciarletti, 2007).

Le sous-facteur de rugosité de surface (SR) est estimé en fonction de la rugosité aléatoire de surface (Ru) en utilisant l'équation suivante :

$$SR = e^{-0.66 \times (Ru - 0.24)}$$

Où :

SR : sous-facteur de rugosité de surface

Ru : rugosité de surface aléatoire

II.4.4 Calcul de la valeur du facteur C

La détermination de la valeur du facteur C s'est effectuée en multipliant les différents sous-facteurs entre eux. L'un de ces sous-facteurs est l'utilisation antérieure des terres (PLU), une composante adaptée des directives RUSLE (Toy et Foster, 1998). Ce paramètre reflète les actions liées aux travaux du sol ou à d'autres perturbations du sol, qui ont pour effet de rendre le sol plus vulnérable à l'érosion en raison d'une structure plus fragile et instable.

Pour les zones forestières et les zones forestières dégradées, une valeur de 0,5 a été attribuée, car elles sont parfois sujettes à des perturbations humaines, telles que les opérations mécaniques dans les zones forestières dégradées ou les incendies de forêt (Toy et Foster, 1998). À l'inverse, les zones agricoles, les prairies et les vergers ont été évalués avec une valeur de 1 (Shi et al., 2004). Dans les zones agricoles, les résidus de récolte sont généralement retirés ou brûlés, tandis que les prairies sont souvent exposées à des incendies en saison sèche. Pour les vergers, les agriculteurs ont tendance à pratiquer l'ensemencement ou l'élimination de l'herbe fertilisée.

L'équation suivante a été appliquée pour combiner les valeurs dérivées des sous-facteurs et obtenir le facteur C final :

$$C = PLU \times CC \times SC \times SR$$

II.5 Dérivation du facteur C à l'aide de données satellite (NDVI)

II.5.1 Formule de De Jong (1994)

Dans le cadre de sa thèse de doctorat, De Jong (1994) a exploré l'utilisation d'indices de végétation pour extraire les paramètres de végétation à des fins de modélisation de l'érosion. En utilisant des données de terrain, une analyse statistique a été réalisée, révélant une relation linéaire entre l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) et le facteur C de l'USLE. La corrélation obtenue était négative, avec une valeur de -0,64. La formule suivante a été utilisée pour générer une carte du facteur C à partir d'une carte NDVI :

$$C = 0.431 - (0.805 \times NDVI)$$

Où :

C : Facteur C

NDVI : Indice de Végétation par Différence Normalisée

II.5.2 Formule de COLMAN (2018)

Le facteur C est ajusté en fonction du NDVI dans des conditions climatiques tropicales selon la formule suivante :

$$C = 0.1 - \frac{(-NDVI + 1)}{2}$$

Colman (2018) a comparé le facteur C calculé à l'aide d'approches de télédétection avec des études expérimentales sur le terrain (Oliveira et al., 2015b). Il a observé un biais systématique décuplé pour la méthode développée par Durigon et al. (2014) et a donc recommandé un facteur d'ajustement de 0,1 pour la production du facteur C. Cette approche adaptée a également été adoptée par Sone et al. (2019), qui ont trouvé que cette méthode conduisait à des valeurs appropriées du facteur C.

II.5.3 Formule Durigon et al. (2014)

Pour un climat caractérisé par des conditions de mousson tropicale avec une saison des pluies annuelle de septembre à décembre, la formule du facteur C est définie comme suit :

$$C = \frac{-NDVI + 1}{2}$$

II.5.4 Formule de Van der Knijff (1999)

Dans le rapport de Van der Knijff (1999) sur l'évaluation du risque d'érosion des sols en Italie, il est noté que la valeur estimée du facteur C dérivée de la régression linéaire avec le NDVI est relativement faible. La formule suivante a été utilisée pour générer la carte du facteur C dans ces conditions

$$C = e^{-\alpha \frac{NDVI}{\beta - NDVI}}$$

Où :

C : Facteur C

NDVI : Indice de Végétation par Différence Normalisée

Les valeurs α et β sont respectivement égales à 2 et 1 (Van der Knijff et al., 1999).

II.5.5 Formule de Lin et Al (2006)

Le modèle élaboré par Lin et Al est couramment utilisé dans les pays asiatiques et la formule du facteur C est définie comme suit :

$$C = \left(\frac{1 - NDVI}{2}\right)^{1+NDVI}$$

II.5.6 Formule de Lin et al. (2014)

Ce modèle développé par Lin et Al est utilisé en Chine et la formule du facteur C est définie comme suit :

$$C = \begin{cases} 1 & f_g = 1 \\ 0.6508 - 0.343 \times \log(f_g) & 0 < f_g < 78.3 \% \\ 1 & f_g = 1 \end{cases}$$

Où :

$$f_g = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

II.6 Validation du mappage du facteur C basé sur le NDVI

Pour évaluer la précision du mappage du facteur C basé sur le NDVI, plusieurs mesures sont utilisées, notamment le coefficient d'efficacité (C.E.), l'erreur moyenne (M.E.) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). La carte du facteur C qui présente une fiabilité plus élevée est ensuite utilisée comme paramètre d'entrée pour le calcul de la capacité de transport dans le modèle d'érosion. Les techniques statistiques utilisées dans cette évaluation sont détaillées ci-dessous :

- Coefficient d'efficacité (C.E.) :

$$C.E. = \frac{\sum_{i=1}^n (Xval_i - \overline{Xval})^2 \sum_{i=1}^n (Xp_i - Xval_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Xval_i - \overline{Xval})^2}$$

Où :

C.E. : Coefficient d'efficacité

Xval_i : Valeurs du facteur C validées

\overline{Xval} : Moyenne des valeurs validées du facteur C

Xp_i : Valeurs prédites du facteur C

Des valeurs de C.E. plus proches de 1 indiquent une meilleure prédiction.

- **Erreur moyenne (M.E.) :**

$$M.E. = \frac{\sum_{i=1}^n (Xp_i - Xval_i)^2}{n}$$

Où :

M.E. : Erreur moyenne

Xp_i : Valeurs du facteur C prédites

$Xval_i$: Valeurs du facteur C validées

n : Nombre total de valeurs de facteur C validées

Des valeurs de M.E. plus proches de 0 indiquent une meilleure prédiction.

- **Erreur quadratique moyenne (RMSE):**

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Xp_i - Xval_i)^2}{n - 1}}$$

Où :

RMSE : Erreur quadratique moyenne

Xp_i : Valeurs du facteur C prédites

$Xval_i$: Valeurs du facteur C validées

n : Nombre total de valeurs de facteur C validées

Des valeurs de RMSE plus petites indiquent une meilleure prédiction par rapport à des valeurs plus élevées.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le cadre de notre étude en se concentrant sur le Bassin d'Isser. Nous avons décrit en détail la géographie, la géologie, la végétation, le climat, le réseau hydrographique et les ressources en eau de la région. De plus, nous avons discuté des différentes approches et méthodes que nous avons utilisées pour évaluer le facteur C, y compris des méthodes sur le terrain et des méthodes basées sur les données satellite (NDVI). La sélection de ces méthodes est cruciale pour garantir l'exactitude de nos résultats et de nos conclusions ultérieures.

Chapitre III :

Résultats et discussions

Évaluation du Facteur C pour le Bassin Isser

L'analyse du Facteur C pour le Bassin Isser est essentielle pour comprendre la sensibilité de la perte de sol dans cette région. Plusieurs études antérieures ont mis en évidence l'importance de la couverture végétale dans ce contexte (Renard et Ferreira, 1993 ; Benkobi et al., 1994 ; Biesemans et al., 2000). La couverture végétale joue un rôle crucial en protégeant le sol contre l'érosion en dissipant l'énergie des gouttes de pluie avant qu'elles n'atteignent la surface du sol. Le Facteur C, qui quantifie cet effet, varie en fonction du type de végétation, de son stade de croissance et du pourcentage de couverture (Gitas et al., 2009). Il est généralement compris entre 0 et 1, avec des valeurs spécifiques pour chaque type de couverture terrestre.

Il est important de noter que le Facteur C peut être estimé en utilisant des indices tels que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (De Jong, 1994 ; Tweddales et al., 2000 ; De Jong et al., 1999 ; De Jong et Riezebos, 1997). Cette corrélation entre le NDVI et le Facteur C a été exploitée par de nombreux chercheurs qui ont utilisé des analyses de régression pour estimer les valeurs du Facteur C pour différentes classes de couverture terrestre lors de l'évaluation de l'érosion (Lin et al., 2002 ; 2006 ; Symeonakis et Drake, 2004 ; Van der Knijff et al., 2002).

L'objectif central de l'analyse de régression est d'estimer les valeurs inconnues du Facteur C en se basant sur les valeurs du NDVI, en utilisant un modèle mathématique approprié. Les équations de régression, qu'elles soient linéaires ou non linéaires, sont élaborées grâce à une analyse de corrélation entre les valeurs du NDVI obtenues à partir d'images satellites et les valeurs du Facteur C correspondantes, qui peuvent être soit extraites des tables guides USLE/RUSLE, soit calculées à partir d'observations sur le terrain.

Cette approche analytique fournira des informations cruciales pour une gestion durable des ressources de sol dans le Bassin Isser, en identifiant les zones à risque d'érosion et en guidant les efforts de conservation des sols et de protection de l'environnement.

II.7 Indice de végétation par différence normalisée (NDVI) :

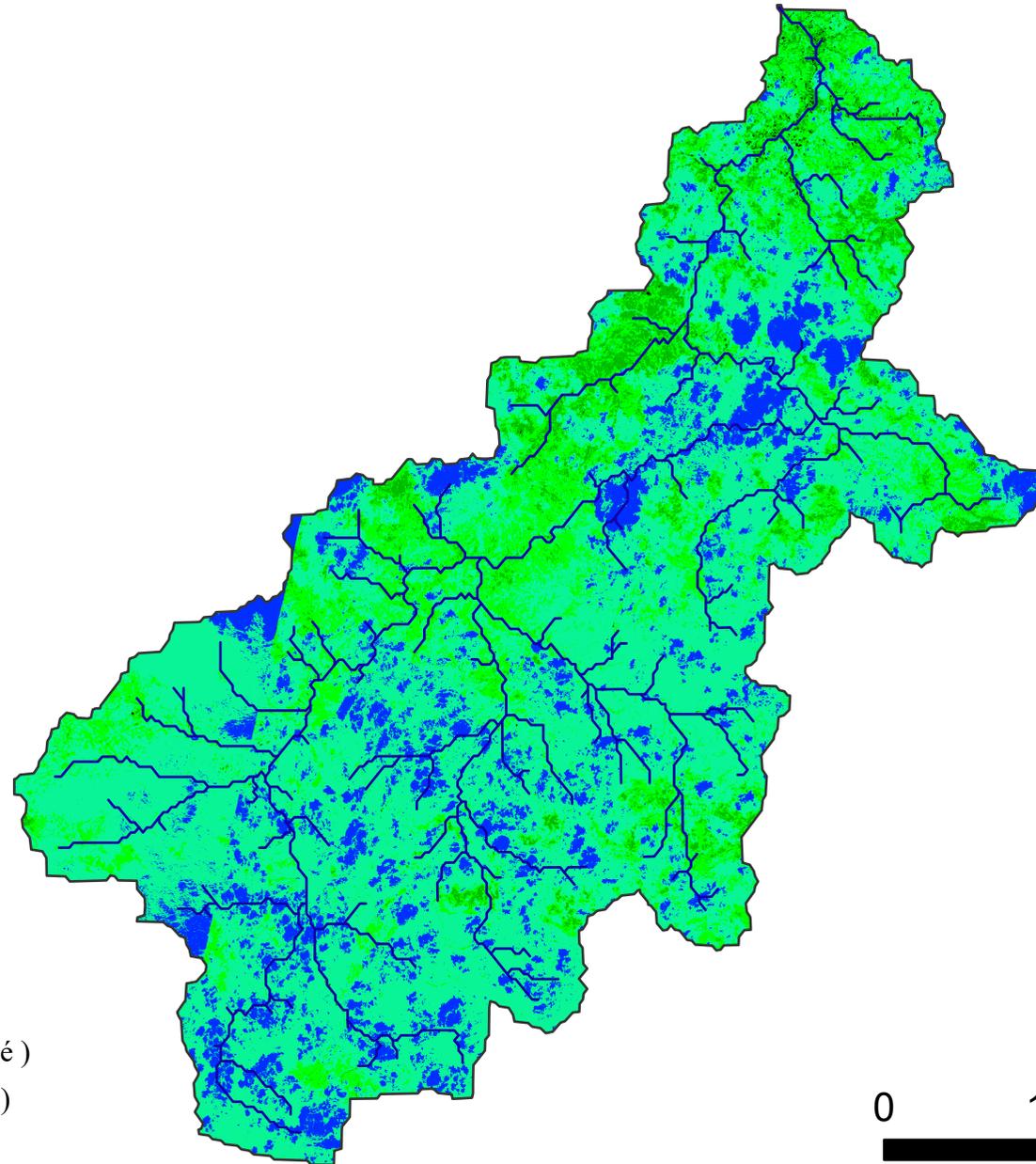
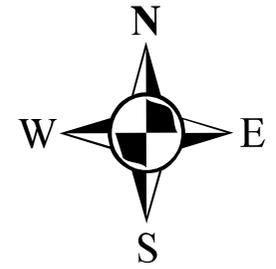
L'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) a été calculé à partir d'une série temporelle d'images Landsat 8 capturées en aout 2023. En utilisant ces données NDVI, nous avons calculé la valeur moyenne du NDVI pour la zone de Bassin Isser . (Voir figure III.1).

Tableau III. 1 : Bandes spectrales et résolutions spatiales des images du programme Landsat-8.

Bande Spectral	Longueur d'onde	Resolution	Irradiance Solaire
Band 1 - Coastal / Aerosol	0.433 – 0.453 μm	30 m	2031 W/($\text{m}^2\mu\text{m}$)
Band 2 - Blue	0.450 – 0.515 μm	30 m	1925 W/($\text{m}^2\mu\text{m}$)
Band 3 - Green	0.525 – 0.600 μm	30 m	1826 W/($\text{m}^2\mu\text{m}$)
Band 4 - Red	0.630 – 0.680 μm	30 m	1574 W/($\text{m}^2\mu\text{m}$)
Band 5 - Near Infrared	0.845 – 0.885 μm	30 m	955 W/($\text{m}^2\mu\text{m}$)
Band 6 - Short Wavelength Infrared	1.560 – 1.660 μm	30 m	242 W/($\text{m}^2\mu\text{m}$)
Band 7 - Short Wavelength Infrared	2.100 – 2.300 μm	30 m	82.5 W/($\text{m}^2\mu\text{m}$)
Band 8 - Panchromatic	0.500 – 0.680 μm	15 m	1739 W/($\text{m}^2\mu\text{m}$)
Band 9 - Cirrus	1.360 – 1.390 μm	30 m	361 W/($\text{m}^2\mu\text{m}$)

Source : (Journaux, 2014)

Carte NDVI de Bassin d'Isser

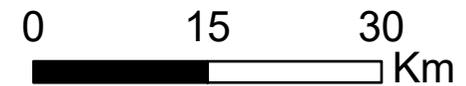


Legende

Bassin Versant d'Isser

Valeurs de NDVI

-  < 0,04 (Eaux)
-  0,04 - 0,15 (Sol nu)
-  0,15 - 0,25 (Végétation clairsemé)
-  0,25 - 0,4 (Végétation moyenne)
-  0,4 - 1 (Végétation dense)



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 31N

2°40'0"E

3°20'0"E

4°0'0"E

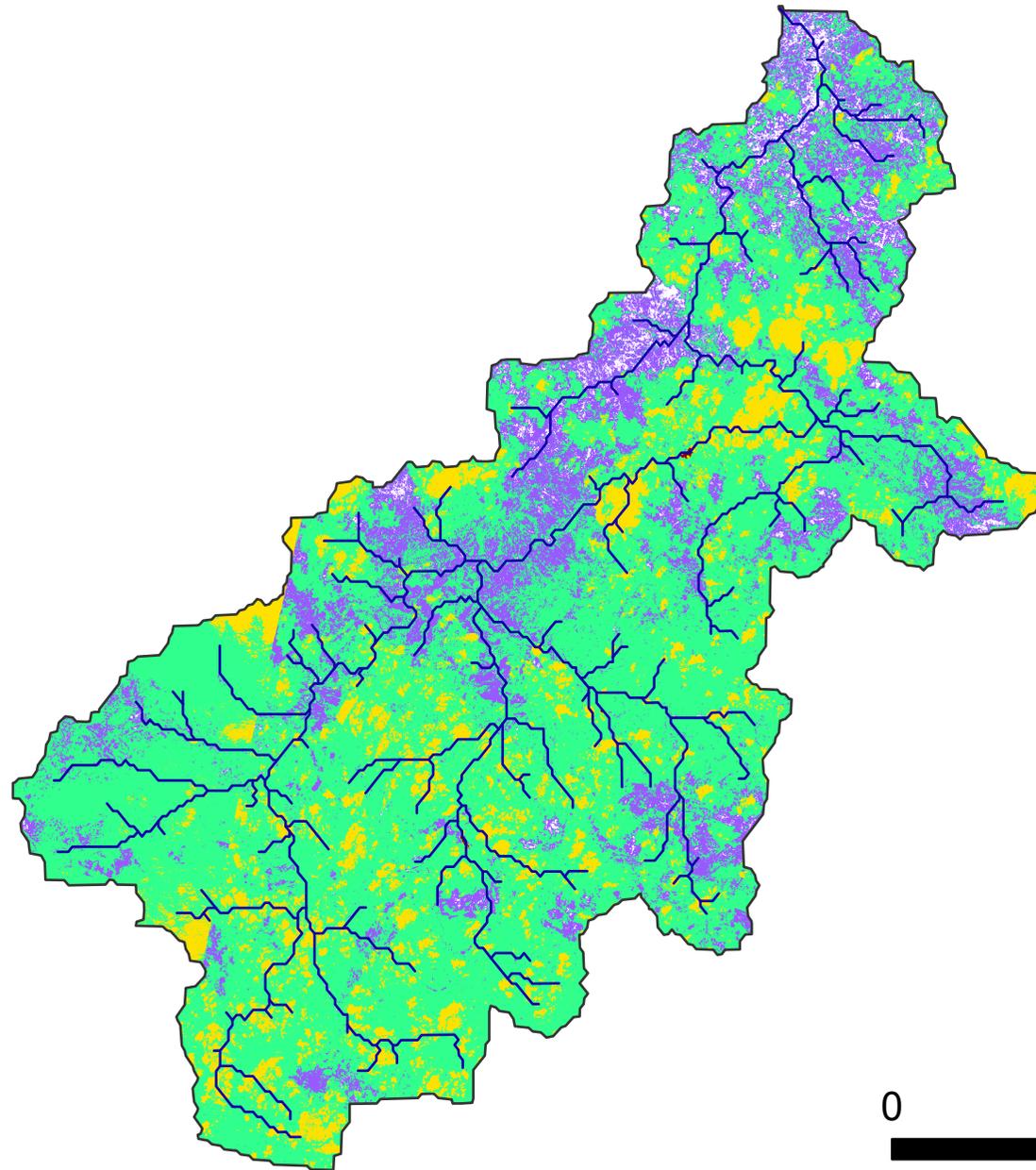
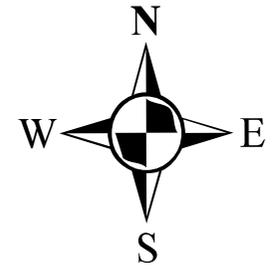
Figure III. 2 : Carte NDVI de Bassin d'Isser.

II.8 Génération du Facteur C en utilisant la technique de De Jong (1994)

La méthodologie adoptée repose sur l'hypothèse d'une corrélation linéaire entre le NDVI et le Facteur C, en utilisant les valeurs de NDVI des zones de sol nu et des zones forestières comme points de référence. Des échantillons de valeurs de NDVI ont été collectés à partir d'une image NDVI moyenne, en se concentrant sur les classes de sol nu et de couvert forestier. Conformément à la relation établie, où les valeurs du Facteur C varient de 0 pour un sol bien protégé à 1 pour un sol nu (Pierce et al., 1986 ; Vicenta et al., 2007), des données de NDVI ont été associées à ces valeurs de Facteur C de référence.

La carte finale du Facteur C a été générée en utilisant l'équation de De Jong (1994) avec l'aide de l'outil Spatial Analyst du logiciel ArcGIS 10.8, Cette carte, présentée à la figure III.2, illustre la distribution spatiale des valeurs du Facteur C dans la région étudiée.

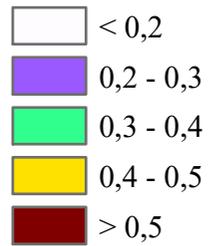
Carte de la couverture végétale de bassin d'Isser



Legende

Valeurs De Facteur C

De jong (1994)



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 31N

2°40'0"E

3°20'0"E

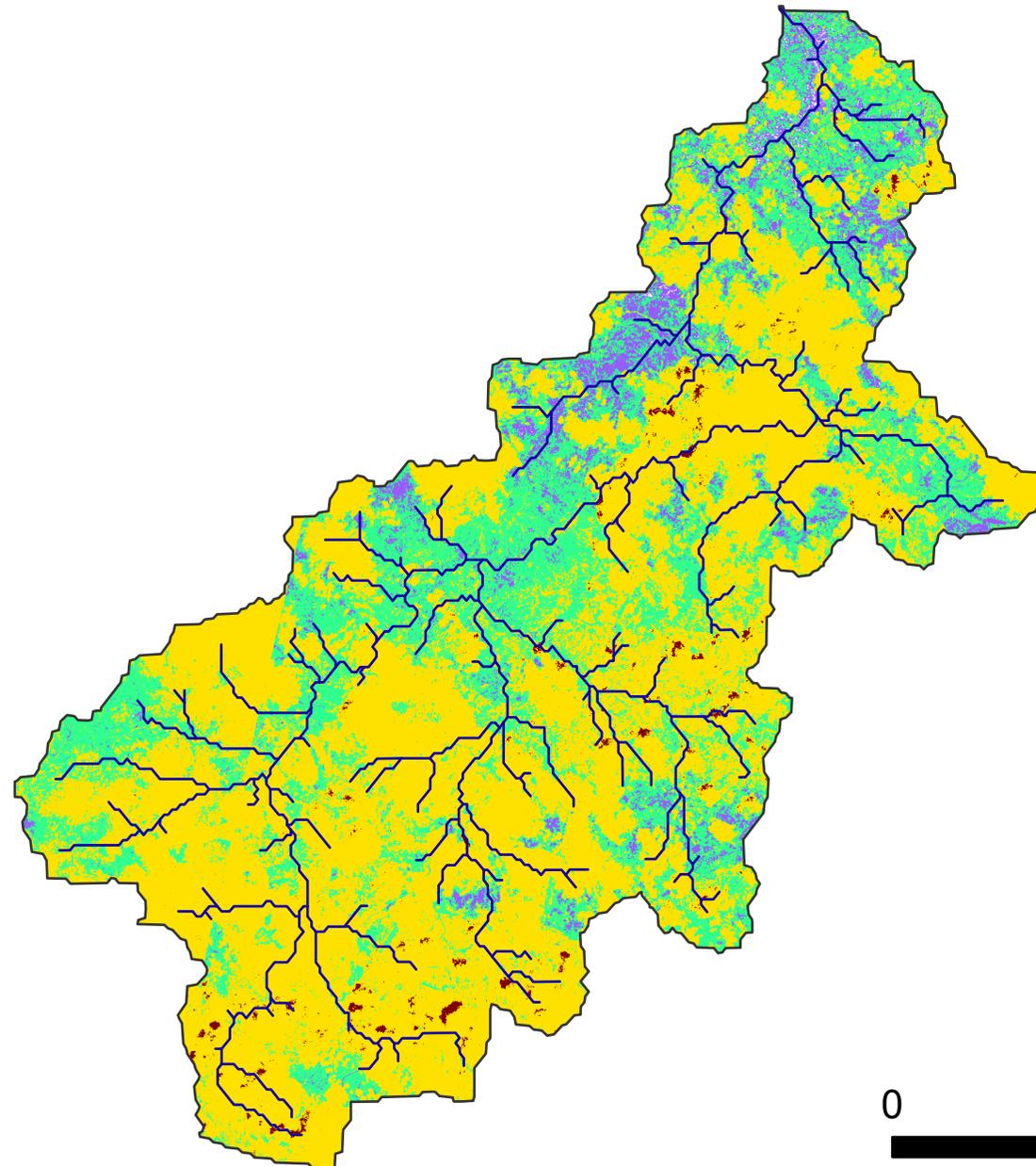
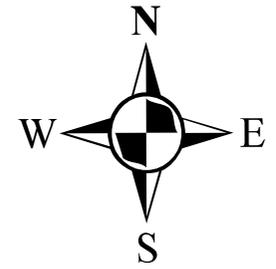
4°0'0"E

Figure III. 2 : Carte de la couverture végétale du bassin d'Isser avec la formule de DeJong (1994).

II.9 Génération du Facteur C en Utilisant la Formule de Lin et Al (2006)

La méthode de Lin et al. offre une approche simple et efficace pour calculer le facteur C à partir d'une image NDVI. Cette méthode peut être employée pour créer des cartes du facteur C, qui à leur tour permettent d'évaluer le risque d'érosion des sols. La carte finale du facteur C a été générée en utilisant l'équation de Lin et al. (2006), grâce à l'outil Spatial Analyst du logiciel ArcGIS 10.8. La représentation cartographique du facteur C est illustrée dans la figure (III.3).

Carte de la couverture végétale de bassin d'Isser



Legende

Valeurs De Facteur C

Lin et Al (2006)

-  < 0,2
-  0,2 - 0,3
-  0,3 - 0,4
-  0,4 - 0,5
-  > 0,5

0 15 30 Km

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 31N

2°40'0"E

3°20'0"E

4°0'0"E

Figure III. 2 : Carte de la couverture végétale du bassin d'Isser avec la formule de Lin et Al (2006).

II.10 Etude comparative

La cartographie du facteur C a été réalisée en utilisant les données acquises par le satellite Landsat 8. Le calcul du NDVI a été effectué spécifiquement pour la zone d'étude. Deux approches différentes ont été employées pour générer les cartes des facteurs C à partir des valeurs de NDVI, et ces résultats ont ensuite été soumis à une comparaison approfondie.

II.10.1 Formule de De Jong (1994)

- Plage de valeurs du facteur C : -0,092 à 0,919
- L'équation de De Jong (1994) a conduit à une plage de valeurs relativement large pour le facteur C, couvrant à la fois des sols peu érodables et des sols très érodables.

II.10.2 Formule de Lin et al. (2006)

- Plage de valeurs du facteur C : 0,056 à 0,917
- Les valeurs sont toutes positives, ce qui signifie que cette équation produit des facteurs C positifs dans toute la zone d'étude.

En résumé, l'utilisation de l'équation de De Jong a généré une plage plus large de valeurs de facteur C, montrant une variabilité importante de la sensibilité à l'érosion des sols dans la zone d'étude. En revanche, l'équation de Lin et al. a produit des valeurs de facteur C plus resserrées, indiquant une variation moins prononcée de la sensibilité à l'érosion. Le choix de l'équation utilisée aura des implications importantes pour la gestion de l'érosion des sols dans cette zone, car il peut influencer les recommandations de conservation des sols et des terres.

Conclusion

Dans le cadre de cette étude, nous avons exploré diverses méthodes pour déterminer le facteur de couverture et de gestion (facteur C) à partir de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) en utilisant différentes équations. Nous avons constaté que l'approche de De Jong (1994) présente une alternative particulièrement pertinente pour évaluer les pertes de sol. Cette méthode offre des avantages significatifs, notamment une capacité d'évaluation à grande échelle et un suivi temporel amélioré, ce qui renforce l'analyse spatiale et temporelle des phénomènes d'érosion des sols. Elle s'avère également précieuse dans le cadre de la planification de la conservation des sols et de l'eau, ainsi que pour estimer les pertes de sol et la production de sédiments en utilisant différentes approches de télédétection pour évaluer la couverture et le facteur de gestion. En somme, cette approche contribue à une évaluation plus précise des vastes zones géographiques et à une surveillance plus efficace des processus d'érosion des sols au fil du temps.

Références Bibliographique

Roose (E.J) 1977 Erosion et ruissellement en afrique de l'Ouest , ORSTOM ISBN : 2-7099-0480-2

Wischmeier, W et Smith , D.D, 1978 predicting rainfall erosion guide to conservation. U.S department of agriculture Handbook No. 537.

Morgan, R.P.C., 2005. Érosion et conservation des sols. Longman, Harlow.

Renard et al, 1991 RUSLE : revised universal soil loss equation 46 (1) ,pp 30-33

Morgan, R.P.C., Morgan, D.D.V. et Finney, H.J., 1984. Un modèle prédictif pour l'évaluation du risque d'érosion des sols. *Agricult. Engineering Res:* 245-253.

Zhang, X., Zhao, W., Wang, L., Liu, Y., Feng, Q., Fang, X., Yue Liu, X. 2018. Distribution of shrubland and grassland soil erodibility on the Loess Plateau. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(6), 1193, 1-17.

CGIS, 2004. Centre d'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) de l'Université GIS de Towson, Towson http://chesapeake.towson.edu/data/all_ndvi.asp.

Colby, J.D., 1991. Normalisation topographique en terrain accidenté. *Génie photogrammétrique et télédétection* 57: 531-537.

Cracknell, A. et Hayes, L., 1991. Introduction à la télédétection. Burgess Science Press, Basingtoke.

De Jong, S.M., 1994. Application de la télédétection par réflexion pour les études sur la dégradation des terres dans l'environnement méditerranéen, Université d'Utrecht, Utrecht.

ESRI, 2020. Aide d'ArcGIS 10.7 Desktop.

Petter, P., 1992. SIG et télédétection pour les études sur l'érosion des sols en milieu semi-aride, Université de Lund, Lund.

Renard, K.G.e., 1997. Prédiction de l'érosion des sols par l'eau : un guide de planification de la conservation avec l'équation universelle révisée de la perte de sol RUSLE. Manuel de l'USDA ; 703. Département de l'agriculture des États-Unis (USDA), Washington, D.C., 384 p.

Kinnell, P. I. (2010). Event soil loss, runoff and the universal soil loss equation family of models: A review. *Journal of Hydrology*, 383(1-2), 1-18.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Agricultural Handbook.

Kinnell, P. I. (2010). Event soil loss, runoff and the universal soil loss equation family of models: A review. *Journal of Hydrology*, 383(1-2), 1-18.

- Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J., & Nichols, S. J. (2005). Chapter 21: Soil erosion rates, processes, and prediction. In *Soil erosion and conservation* (pp. 811-898). John Wiley & Sons.
- Oliveira, P. T. S., Alves Sobrinho, T., Rodrigues, B. L., & Panachuki, E. (2013). Soil erosion modeling using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geographic information systems (GIS): a review. *Catena*, 104, 134-143.
- Nearing, M. A., Lane, L. J., & Laflen, J. M. (2000). Chapter 3: Overland flow and erosion dynamics. In *Handbook of soil science* (pp. 435-455). CRC Press.
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil erosion and conservation* (3rd ed.). Blackwell Publishing.
- Dissmeyer, G. E., & Foster, G. R. (1981). *A guide for predicting sheet and rill erosion on agricultural land*. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Agriculture Handbook.
- Ganasri, B. P., & Ramesh, H. (2016). A review on the application of remote sensing in soil erosion assessment. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(3), 1-19.
- Borrelli, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Panagos, P., & Alewell, C. (2018). A high resolution assessment of soil erosion susceptibility in Europe using a matrix of land use and soil types. *Geoderma*, 319, 127-136.
- Durigon, V. B., Carvalho, D. F., Antunes, M. A. H., Oliveira, P. T. S., & Fernandes, B. M. (2014). Soil erosion modeling using RUSLE and GIS techniques in the light of climate change for a watershed in Southeast Brazil. *Land Degradation & Development*, 25(6), 573-583.
- Lunetta, R. S., Knight, K. L., Ediriwickrema, J., Lyon, J. G., & Worthy, L. L. (2006). Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 105(2), 246-254.
- Lin, J. C., Lin, M. J., & Chou, W. C. (2002). Using remote sensing data to assess land cover change and its impact on soil erosion in a reservoir watershed in southern Taiwan. *International Journal of Remote Sensing*, 23(21), 4715-472
- Jaud, M. (2011). *Techniques d'observation et de mesure haute résolution des transferts sédimentaires dans la frange littorale*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale, Brest.
- Journaux, P., Cavaillès, J., & Lavigne, F. (2014). Analyse du bocage par imagerie de télédétection: Comparaison à l'analyse manuelle. *Alterre Bourgogne-Franche-Comté*, 25(2), 15-30.
- Ellison, W. D. (1944). The influence of rainfall intensity on soil erosion. *Journal of Agricultural Research*, 68(12), 649-668.
- Ekern, P. (1950). The splash erosion of fine soil particles. *Proceedings of the 4th International Soil Science Congress*, 1(1), 104-112.
- Leguédois, S. (2003). *Érosion des sols par l'eau : approche physique et modélisation*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, Rennes, France.

Boiffin, J. (1994). Erosion hydrique des sols. In P. Guiné (Ed.), *Érosion et conservation des sols* (pp. 15-30). Paris, France : INRA Éditions.

Yalin, M. S. (1980). *Mechanics of sediment transport*. New York, NY: Pergamon Press.

Wall, G. J., M. J. Kirkby, and P. J. Morgan. 1987. *Soil erosion and conservation*. London: Longman.

Shrestha, D.R. (2007). Impact of slope length and orientation on soil erosion by water. *Journal of Hydrology*, 337(1-4), 32-42.

Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., & Combrink, J.A. (2000). Soil organic matter: management options to mitigate greenhouse gas emissions. In: R. Lal (Ed.), *Soil carbon sequestration and greenhouse gas mitigation*. *Advances in Soil Science*, vol. 29 (pp. 1-46). CRC Press, Boca Raton, FL.

Company-Redmond, J. (1996). Use of empirical models for predicting soil erosion rates. In: J.B. Thornes (Ed.), *Soil erosion and conservation* (pp. 227-246). John Wiley & Sons, Chichester, UK.

Ben Slimen, M. (2013). *Modélisation de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant*. Thèse de doctorat, Université de Tunis El Manar, Tunis, Tunisie.

Woolhiser, D. A., Lane, L. J., Williams, J. R., & Gassman, P. W. (1990). KINEROS: A physically based, distributed model for simulating surface runoff and erosion from agricultural watersheds. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 33(6), 1699-1708.

De Roo, A. P., Wesseling, J., & van der Knijff, J. (1994). LISEM: A distributed model for simulating water flow, soil erosion and sediment transport in catchments. *Journal of Hydrology*, 157(1-4), 47-66.

De Roo, A. P., Wesseling, J., & van der Knijff, J. (1996a). LISEM: A distributed model for simulating water flow, soil erosion and sediment transport in catchments. Part 2: Model description and verification. *Journal of Hydrology*, 179(1-4), 109-129.

De Roo, A. P., Wesseling, J., & van der Knijff, J. (1996b). LISEM: A distributed model for simulating water flow, soil erosion and sediment transport in catchments. Part 3: Model application and validation. *Journal of Hydrology*, 186(1-4), 239-258.

Takken, I., De Roo, A. P., Wesseling, J., & van der Knijff, J. (1999). LISEM: A distributed model for simulating water flow, soil erosion and sediment transport in catchments. Part 4: Model application and validation for small catchments. *Journal of Hydrology*, 218(1-4), 139-158.

Ben Slimen, H. (2013). *Évaluation de l'érosion hydrique par l'équation universelle de l'érosion (USLE) : cas d'un bassin versant agricole en Tunisie*. Mémoire de Master, École nationale d'ingénieurs de Tunis, Tunisie.

De Roo, A. P. J., Wesseling, C. G., & Van Deursen, W. P. A. (1994). LISEM: a distributed model for simulating the impact of land use changes on water quantity and quality at the catchment scale. *Journal of Hydrology*, 157(1-4), 47-66.

De Roo, A. P. J., Wesseling, C. G., & Van Deursen, W. P. A. (1996a). A distributed model for simulating the impact of land use changes on water quantity and quality at the catchment scale: LISEM model description. *Journal of Hydrology*, 182(1-4), 298-319.

De Roo, A. P. J., Wesseling, C. G., & Van Deursen, W. P. A. (1996b). A distributed model for simulating the impact of land use changes on water quantity and quality at the catchment scale: LISEM model application. *Journal of Hydrology*, 182(1-4), 320-346.

Estes, J. E., & Jensen, J. R. (1998). *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Falkenmark, M. (1983). The massive water scarcity now threatening Africa: why isn't it being addressed? *Ambio*, 12(2), 112-118.

Krysanova, V., De Roo, A. P. J., Wesseling, C. G., & Van Deursen, W. P. A. (2000). A distributed model for simulating the impact of land use changes on water quantity and quality at the catchment scale: SWIM model description. *Journal of Hydrology*, 229(1-4), 141-169.

Laflen, J. M., Foster, G. R., Lane, L. J., & Yoder, D. C. (1991). WEPP: a new water erosion prediction project for evaluating management effects. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46(4), 237-243.

Takken, I., De Roo, A. P. J., & Wesseling, C. G. (1999). A distributed model for simulating the impact of land use changes on water quantity and quality at the catchment scale: LISEM model validation. *Journal of Hydrology*, 229(1-4), 170-188.

Woolhiser, D. A., Lane, L. J., & Nearing, M. A. (1990). KINEROS: a physically based watershed runoff and erosion model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 33(3), 969-974.

Ariza-Villaverde, M., De la Riva, J. M., & García-Gorriz, M. (2018). Remote sensing for land cover mapping: A review. *Remote Sensing*, 10(12), 1962.

Chen, Y., Xu, B., Yang, L., & Chen, X. (2015). A review of remote sensing applications for post-disaster assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 36(18), 4609-4637.

Bruzzone, L., Serpico, S., & Uncini, A. (2000). Classification of remotely sensed images for target detection: A review. *Pattern Recognition*, 33(9), 1657-1674.

Minnaert, M., & Szeicz, G. (1961). On the reflection of light by a rough surface. *Journal of the Optical Society of America*, 51(10), 1145-1151.

Glennie, C. L., Le Heron, J. R., & Zhang, J. (2009). A review of methods for topographic correction of remotely sensed imagery. *Remote Sensing of Environment*, 113(1), 33-49.

Zhang, J., Gong, P., & Howarth, P. J. (2003). A new method for topographic correction of remotely sensed images. *International Journal of Remote Sensing*, 24(21), 4221-4236.

Feng, Z., Li, Q., & Li, X. (2014). A review of time series analysis methods for topographic correction of remotely sensed images. *Remote Sensing*, 6(1), 171-191.

Gallant, J. C., & Wilson, J. P. (2000). The impact of DEM resolution on topographic correction of remotely sensed images. *Remote Sensing of Environment*, 74(3), 303-312.

Pierce, R.L., et J.L. Hupp. 1980. "A Study of the Erodibility Factor (C) for the Universal Soil Loss Equation." *Soil Science Society of America Journal* 44 (4): 725-730.

Brown, J.R., et P. Bullock. 1981. "The Effects of Vegetation on Soil Erosion in the Mediterranean Region." In *Soil Conservation: Problems and Policies*, edited by J.R. Brown, 23-44. Chichester, UK: John Wiley & Sons.

El-Swaify, S.A., et M.A. Mansour. 1988. "Vegetation and Soil Conservation in the Mediterranean Region." In *Soil Erosion and Conservation: Problems and Policies*, edited by J.R. Brown, 45-66. Chichester, UK: John Wiley & Sons.

Lasanta, T., et al. 2022. "The Impact of Climate Change on Soil Erosion in the Mediterranean Basin." *Frontiers in Environmental Science* 9: 830220.

Abdelhafid.2014 Étude des hydrogrammes des crue du bassin versant Isser (09) Algérie (W.Boumerdes) , 2014

Al-Hamdan, M.A., et al. 2023. "The Role of Vegetation in Soil Erosion Management in the Mediterranean Region." *Land Degradation & Development* 34 (3): 1028-1040.

Toumi, S., et al. 2013. "Estimation of the Erodibility Factor (C) for the Universal Soil Loss Equation in the Oued Mina Watershed, Algeria." *Journal of Arid Environments* 91: 12-20.