

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REpubLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعلیم العالی و البعث العلمی

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## THESE

Présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT LMD

En : HYDRAULIQUE

Spécialité : Sciences de l'eau

Par : CHIKH Hamza Abdessamad

Sujet

**Contribution à l'étude du fonctionnement  
hydro-érosif au niveau des versants marneux cas  
du bassin versant d'Isser-Tlemcen.**

Soutenue publiquement, le 02 / 10 / 2021 , devant le jury composé de :

Mr. Boumediene Maamar	Maîtres de Conférences A	Univ.Tlemcen	Président
Mr. Habi Mohammed	Professeur	Univ.Tlemcen	Directeur
Mr. Morsli Boutkhil	Maitre de recherche A	INRF.Tlemcen	Co-Directeur
Mr. Remini Boualem	Professeur	Univ. Blida	Examineur
Mr. Guemou Bouabdellah	Maitres de Conférences A	Univ.Aïn témouchent	Examineur

2020 / 2021

# Dédicace

Avec l'aide de Dieu le tout puissant j'ai pu achever ce modeste travail que je dédis A l'âme de mon père Phikh Abdelli.

A ma Mère Berrichie Salima, le grand cœur sur la terre de m'avoir aidé avec ses conseils et son soutien moral, en souhaitant que dieu lui accorde santé.

A mon amour éternel ma femme formidable Hanene pour la patience et le soutien dont elle a fait preuve pendant toute la durée de cette thèse, et notre Prince Foucef, je vous aime tous les deux.

A Ma dixième Mère Nadia et tout ceux qui portent les noms Bessaklia

A mon grand frère Abdelkader et ma soeur unique je t'aime Téma. A mon meilleur frère Olyes.

Avec les enfants Islem, Loqmane et Ritage 'Rebi yestourkoum

A tout ceux qui portent les noms des Phikh et Berrichi

A mes amis et tous ceux qui m'aiment

\*Mr Phikh Hamza. A

# Remerciement

A l'occasion de la rédaction de cette Thèse je tiens particulièrement à remercier ALLAH de m'avoir accordé la foi, le courage, la volonte pour élaborer ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à Pr. Habi Mohammed et Dr. Morsli Boutkhil pour avoir accepté de m'encadrer pour ce sujet ainsi pour leurs orientations, leurs judicieux conseils et leur disponibilité durant toute la période de notre projet.

Mes profonds remerciements vont à Monsieur le président du jury Mr. Boumediene Maamar pour son aide précieuse.

Monsieur Mr. Remini Boualem et Mr. Guemou Bouabdellah pour l'honneur qui nous ont fait en acceptant d'examiner ce modeste travail.

Par ailleurs, je remercie les responsables et techniciens d'I.N.R.F qui nous ont beaucoup aidés.

J'adresse mes remerciements à Mr Benaabidate Lahcen, Mr haytam mesrar, Mr Agustín Millares, Mr Wenceslao Martin-Rosales, Mme Bessaklia Hanene, Mr Kateh Zakaria, Mr Rabah Moshah, Mr Mourad Benabadji, Mr Meghraoui Maamar pour la présence et l'aide précieuse.

À tout ce qui a participé de près ou de loin dans l'élaboration de cette thèse, trouve ici l'expression de mes vifs remerciements. Mes collègues de Sogerhuit Dr. S.Karim, Malika, Fatima, Ikram.

Je voudrais aussi exprimer ma vive reconnaissance envers tous les enseignants du département d'hydraulique ainsi que tous ceux qui ont participé à ma formation.

*\*Mr Chikh Hamza. A*

# Sommaire

Dédicace.....	i
Remerciement .....	ii
Sommaire .....	iii
Liste des tableaux.....	x
NOTATIONS.....	xi
Liste des abréviations.....	xiv
Introduction.....	2
I.1. Synthèses Bibliographiques .....	6
I.1.1. Hydrologie .....	6
I.1.2. Le bassin versant.....	6
I.1.3. Cycle de l'eau .....	7
I.1.3.1. Précipitations .....	8
ii. Formes de précipitation .....	9
I.1.3.2. Ruissellement .....	10
I.1.3.3. Infiltration.....	11
I.1.3.4. Evaporation-transpiration pluie.....	12
I.1.4. L'érosion .....	13
I.1.4.1. Dégradations des sols dans le monde.....	13
I.1.4.2. L'érosion hydrique dans la région méditerranéenne.....	15
I.1.4.3. L'érosion hydrique dans l'Algérie.....	15
I.2. L'érosion et le Transport Solide .....	17
I.2.1. Processus et mécanisme de l'érosion hydrique.....	17
I.2.1.1. Le détachement .....	18
i. Le gonflement différentiel.....	18
ii. La dispersion physico-chimique .....	19
I.2.1.2. Le transport .....	19
i. Le ruissellement diffus et concentré.....	19
I.2.1.3. La sédimentation .....	20
I.2.2. Types d'érosion.....	20
I.2.2.1. Erosion éolienne.....	20

I.2.2.2. Erosion hydrique .....	21
I.2.3. Forme d'érosion hydrique.....	22
I.2.3.1. Erosion de rejaillissement (Splash).....	22
I.2.3.2. Erosion en nappe .....	23
I.2.3.3. Erosion linéaire .....	23
i. Erosion en griffes et rigoles.....	24
ii. Erosion en ravine .....	24
I.2.3.4. Erosion en masse .....	25
i. Les glissements lents .....	25
ii. Les glissements rapides .....	25
iii. Les versants moutonnés .....	26
iv. Les coulées boueuses .....	26
v. Les glissements rotationnels en «coups de cuillère » .....	26
I.2.4. Transport Solide.....	27
I.2.4.1. Le Transport Par Charriage .....	28
I.2.4.2. Le Transport Par Suspension.....	28
I.2.5. Facteurs de l'érosion hydrique.....	29
I.2.5.1. Le climat.....	29
I.2.5.2. L'écoulement superficiel d'eau .....	29
I.2.5.3. Le sol.....	29
I.2.5.4. Le couvert végétale .....	30
I.2.5.5. La topographie.....	30
I.2.5.6. Activités anthropiques.....	30
I.2.6. Méthodes de prévision des apports solides.....	31
I.2.6.1. Mesures de terrain .....	31
i. L'étude des débits solides .....	31
ii. Parcelles expérimentales.....	32
iii. Les levés bathymétriques.....	32
iv. Les mesures topographiques .....	33
I.2.6.2. La télédétection .....	33
I.2.6.3. La modélisation.....	33
i. Les modèles empiriques .....	34
ii. Les modèles déterministes (physiques) .....	34

I.2.6.4. Traçage des sources de sédiments .....	35
I.2.6.5. L'application des formules.....	36
i. Formule de Cavrilovic .....	36
ii. Formule de Fournier .....	36
iii. Formule de Tixeront .....	36
iv. Formule de Sogreah .....	36
v. Formule de l'ANRH .....	37
II. Présentation de la zone d'étude.....	39
II.1. Situation de bassin versant Isser.....	39
II.1.1. Situation administrative .....	39
II.1.2. Le Barrage du bassin versant d'Isser Izdihar de Sidi Abdelli.....	40
II.2. Géologie du bassin versant d'Isser .....	40
II.3. La topographie du bassin versant .....	42
II.3.1. Répartition des surfaces et courbe hypsométrique.....	42
II.3.2. Les pentes.....	42
II.4. Climatologie du bassin versant.....	44
II.4.1. Précipitation .....	44
II.4.1.1. Analyse des précipitations du bassin versant de Isser .....	45
II.4.1.2. Distribution Spatiale Des Précipitations .....	46
II.4.2. La température .....	47
II.4.3. Diagramme ombrothermique de Gaussen.....	47
II.5. Végétation et Agriculture .....	48
III. Matériel et méthode .....	51
III.1 Cartographie prédictive : potentiel d'érosion / risque d'érosion.....	51
III.1.1 Modèle PAP / RAC .....	51
III.2. Cartographie quantitative .....	54
III.2.1. Équation universelle révisée de perte de sol.....	54
i. Facteur R.....	54
ii. Facteur K .....	54
iii. Facteur LS.....	55
iv. Facteur C .....	56
v. Facteur P .....	58
III.2.2. Le modèle MUSEL (Modified Universal Soil Loss Equation) .....	60

III.2.2.1. Analyse basée sur des mesures en continu .....	65
III.2.2.2. Analyse basée sur l'échelle des événements .....	65
III.2.2.3. Analyse des données et sélection des événements.....	65
i. <i>Séparation des événements.</i> .....	65
ii. <i>Entité événementielle.</i> .....	66
iii. <i>Relation pluie-ruissellement.</i> .....	66
III.2.2.4. Analyse de boucle d'hystérésis.....	66
III.2.2.5. Calibrage saisonnier du modèle MUSLE .....	67
III.2.2.6. Estimation et comparaison du taux d'érosion.....	68
IV. Résultats et discussion .....	71
IV.1. Résultats qualitativement de l'érosion à l'aide du PAP / RAC méthode.....	71
IV.1.1. Carte d'érodibilité .....	71
IV.1.2. Carte de protection des sols.....	73
IV.1.3. Carte d'état de l'érosion .....	75
IV.2. Résultats de l'évaluation de l'érosion des sols par la RUSLE modèle.....	76
IV.2.1. Cartes révisées du facteur d'équation universel de perte de sol .....	76
i. Facteur K .....	76
ii. Facteur C.....	78
iii. Facteur LS.....	81
iv. Facteur R.....	82
IV.2.2. Carte du potentiel érosif .....	83
IV.2.3. Cartes des pertes de terres .....	85
IV.3. Résultats de l'évaluation de l'érosion des sols par MUSEL modèle .....	87
IV.3.1. Résultats d'analyse des données.....	87
IV.3.2. Résultats de la relation pluie-ruissellement.....	89
IV.3.3. Résultats d'analyse de boucle d'hystérésis .....	92
IV.3.4. Résultats de la calibration modèle MUSLE .....	95
IV.3.5. Comparaison et résultats des taux d'érosion.....	99
V. CONCLUSION .....	102
Références.....	106

## **LISTE DES FIGURES**

Figure I-1. Principaux processus hydrologiques au sein d'un bassin versant .....	7
Figure I-2. Le cycle de l'eau (le site de l'USGS).....	8
Figure I-3. Principaux mécanismes qui entraînent des précipitations.....	9
Figure I-4. Le mécanisme de la création du ruissellement.....	11
Figure I-5. Le mécanisme de l'évaporation et transpiration des pluies.....	13
Figure I-6. Perte de sol estimée t/ha/an dans le monde par équation USLE (site de la FAO).....	14
Figure I-7. Processus de l'érosion hydrique.....	17
Figure I-8. Le diagramme de Hjulström.....	18
Figure I-9. Schématisation de la dégradation par gonflement différentiel.....	19
Figure I-10. Principaux modes de transport de particules par le vent .....	21
Figure I-11. Effet d'une goutte de pluie (effet splash) .....	22
Figure I-12. L'érosion en nappe.(Julien, 2010).....	23
Figure I-13. Les formes d'érosion hydrique par Rigoles et Ravines.....	25
Figure I-14. Différentes formes d'érosion en masse .....	27
Figure I-15. Les formes et mécanismes de transport solide.....	28
Figure II-1. Carte de situation géographique de la zone d'étude.....	39
Figure II-2. La lac du barrage el Izdihar.....	40
Figure II-3. Carte géologique du bassin versant d'oued Isser (Tafna, NW Algérie).....	41
Figure II-4. Répartition hypsométriques des aires cumulées du sous bassin versant d'Isser.....	42
Figure II-5. Carte des altitudes bassin versant Isser.....	43
Figure II-6. Précipitation moyenne inter-mensuelle.....	44
Figure II-7. L'application de la méthode de Thiessen sur le bassin versant Isser.....	45
Figure II-8. Carte des précipitations moyennes annuelles et saisonnières (1974 - 2004).....	46

Figure II-9. Température moyenne inter-mensuelle.....	47
Figure II-10. Diagramme ombrothermique de Gaussen.....	48
Figure II-11. Carte des précipitations moyennes annuelles et saisonnières.....	49
Figure III-1. Organigramme des étapes utilisées dans le modèle PAP / RAC.....	53
Figure III-2. Image satellite (Landsat 8) de la zone d'étude.....	57
Figure III-3. Organigramme des étapes utilisées dans RUSLE.....	59
Figure III-4. Emplacement général de la zone d'étude. Barrage d'Isser et stations météorologiques.....	61
Figure III-5. Données disponibles pour le site d'étude. a) Précipitations dans quatre stations météorologiques utilisées comme critères de sélection des événements et d'analyse des incertitudes.....	62
Figure III-6. Organigramme illustrant la méthodologie développée pour ce travail. Des approches à l'échelle des événements et continues sont distinguées afin d'évaluer la SSY saisonnière, DTS et interactions bassin-rivière sur le site d'étude.....	64
Figure IV-1. une carte Lithofacies (PAP / RAC). b Carte des pentes (PAP / RAC). c Carte d'érodibilité (PAP / RAC).....	72
Figure IV-2. a Carte d'utilisation des terres (CAR / PAP). b Carte de couverture terrestre (CAR / PAP). c Carte de protection des sols (PAP / RAC) .....	74
Figure IV-3. c Carte de l'état de l'érosion (PAP / RAC) résultant de la superposition de la carte d'érosion (a) et de la carte de protection des sols (b).....	75
Figure IV-4. Carte de l'érosion du sol (facteur K) dans le bassin versant d'Isser.....	77
Figure IV-5. a Carte du facteur C pendant la période sèche. b Carte du facteur C pendant la période humide.....	79
Figure IV-6. a Carte du facteur C-NDVI pendant la période sèche. b Carte du facteur C-NDVI pendant la période humide.....	80
Figure IV-7. Carte de distribution des valeurs de LS factor dans le bassin versant d'Isser.....	81
Figure IV-8. Carte de distribution des valeurs de LS factor dans le bassin versant d'Isser.....	83

Figure IV-9. Carte d'érosion potentielle dans le bassin versant d'Isser.....	84
Figure IV-10. Carte de perte de sol avec le facteur C a pendant la période sèche et b pendant la période humide.....	85
Figure IV-11. Carte de perte de sol avec le facteur C-NDVI a pendant la période sèche et b pendant la période humide.....	86
Figure IV-12. Précipitations cumulées par rapport au nombre de périodes sans mesures SSC et Q pour différentes intervalle temporelles : (a) 3 à 5 jours, (b) 3 à 50 jours et 3 à 200 jours.....	88
Figure IV-13. Relation entre le SSC et le rejet d'eau des échantillons mesurés pour (a) toute la période, et (b) les périodes sèches et (c) humides.....	90
Figure IV-14. (a) Débit d'eau cumulé et débit de sédiments provenant des mesures et des estimations de la courbe d'évaluation. Impulsions d'événements significatifs et leurs impacts sur le transport des sédiments est clairement identifié.....	91
Figure IV-15. Courbes d'hystérésis pour les 12 événements les plus importants pour lesquels des données étaient disponibles dans les données historiques. D et W se réfèrent respectivement aux périodes sèches et humides. Marque de points la direction de la boucle (du bleu foncé au jaune).....	94.
Figure IV-16. Relation entre la contribution estimée des sédiments mesurée pour chaque événement et celle estimée avec le modèle MUSLE pour le mouillé (bleu triangle) et les périodes sèches (point rouge).....	96
Figure IV-17. (a) Performance mesurée par les valeurs NSE du facteur global de MUSLE correction, FM, pour les périodes humides et sèches. (b) Période humide et (c) période sèche NSE valeurs du coefficient a et de l'exposant b du modèle MUSLE régionalisées pour la zone d'étude..	98
Figure IV-18. Valeurs distribuées de SDR, obtenues en mettant en œuvre la méthodologie de Borselli et al. (2008), et histogrammes associés pour: (a) - (b) humides et (c) - (d) secs.....	99

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau.I-1. types de pluie .....	10
Tableau.I-2.Valeurs des taux d'érosion spécifiques des sols des bassins versants Algérie.....	16
Tableau.II-1. La répartition de la surface de chaque willaya dans le bassin versant.....	39
Tableau.II-2. Répartition hypsométriques des aires cumulées du sous bassin versant d'Isser....	42
Tableau.II-3. Répartition hypsométriques des aires cumulées du sous bassin versant d'Isser.....	43
Tableau.II-4. Températures moyennes mensuelles et annuelles des deux stations climatiques Béni Bahdel et Chouly.....	47
Tableau.II-5. Distribution du couvert végétal dans le bassin versant de l'Oued Isser.....	48
Tableau.III-1. Valeurs du facteur C pour chaque type de terrain Occupation.....	58
Tableau.III-2. Valeurs statistiques des variables mesurées pour la période 1988-2004. P: précipitations annuelles; SSC: concentration de sédiments en suspension, Qs: débit de sédiments; Q: ruissellement. SD: écart type.....	63
Tableau.IV-1. Résumé des saisons et du sens de la boucle d'hystérésis pour les événements sélectionnés.Les zones ombrées indiquent la période sèche et non ombragée la période humide. Les symboles et indiquent respectivement le sens horaire et anti-horaire.....	95
Tableau.IV-2. Résultats des paramètres du modèle MUSLE calibrés dans la zone d'étude, a et b, et le facteur global, FM pour les périodes humides et sèches. NSE: Nash – Sutcliffe critère d'efficacité.....	97

## NOTATIONS

C137 : Radio-isotope césium.

CO<sub>2</sub> : Dioxyde de carbone.

ET : Evapotranspiration.

FM : Le facteur global.

hm<sup>3</sup> : Hectomètres cubes.

I : Infiltration.

IC0 : Etalonnages paramètres

IDA : Les apports amont de la nappe profonde

Kg s<sup>-1</sup> : Kilogramme par seconde.

km<sup>2</sup> : Kilomètre carré

Max : Maximum.

Min : Minimum.

MJ : Mégajoule.

mm : Millimètre.

mm / h : Millimètre par heure.

Moy : Moyenne.

Pi : La moyenne des précipitations mensuelles.

PE : La pluie.

ET : Evapotranspiration.

I : Infiltration.

R : Ruissellement.

Q : Le débit.

Qp : Le débit maximum de l'hydrogramme.

$V_q$  : Le volume de ruissellement.

$Q_s$  : Débit de sédiments.

$R^2$  : Coefficient de corrélation

$t$  : Ton.

ha : Hectare.

ETP : Evapotranspiration potentielle

$\alpha$  et  $\beta$  : Paramètres détermination de la forme de la courbe.

$\lambda$  : La longueur de la pente.

$^{\circ}\text{C}$  : La température.

$v$  : La vitesse de chute ( $\text{cm s}^{-1}$ ).

$I$  : Intensité des précipitations ( $\text{mmh}^{-1}$ ).

$E$ : l'énergie cinétique ( $\text{MJ ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$ ).

$q$  : Le débit de pointe ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ),

$i$  : Intensité des précipitations ( $\text{mm h}^{-1}$ ),

$A$ : La superficie du bassin versant ( $\text{km}^2$ ),

$T_c$ :Le temps de concentration,

$g$  : L'accélération due à la pesanteur ( $9,8 \text{ m s}^{-2}$ )

$h$  : La hauteur de chute.

$E$  : La perte de sol par unité de surface,

$\theta$ : L'angle de la pente

$L$  : La longueur de la pente

TSS : Transport solides spécifique moyenne ( $\text{t}/\text{km}^2/\text{an}$ ).

$K_{USEL}$  : Facteur d'érodabilité,

$C_{USEL}$  : Facteur de couverture sol

P\_USEL : Facteur de la pratique de soutien

[[LS]] \_USEL : Facteur de la pente du terrain

q : Le ruissellement en mm,

V : Le volume d'eau dans le cours d'eau (m<sup>3</sup>).

q\_ch : Le débit moyen (m<sup>3</sup>/s).

f\_csand : Facteur qui donne à faible érodabilité du sol facteurs pour les sols avec des teneurs gros sable élevés et une grande les valeurs pour les sols avec peu de sable,

f\_(cl-si) : Facteur qui donne facteurs d'érodabilité des sols faibles pour les sols à forte argile pour ratios d'envasent,

f\_orgc: Facteur qui réduit l'érodabilité des sols pour les sols avec une teneur en carbone organique élevée,

f\_hisand : Est un facteur qui réduit l'érodabilité des sols pour les sols avec contenu du sable extrêmement élevé.

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

ANRH : L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Algérie.

ANBT : Agence Nationale des Barrages et Transferts.

DEM : Digital elevation model.

FAO: Food and Agriculture Organization.

NDVI : Indice de végétation.

NSE : Coefficient d'efficacité du modèle.

ODA : Les pertes latérales de la nappe profonde.

OSA : Les pertes latérales de la nappe superficielle.

PAP / RAC : Centre d'activités régionales du programme d'actions prioritaires.

RED : Réflectance spectrale le rouge.

SDR : Le taux de livraison des sédiments.

SSC : La concentration des sédiments en suspension.

SSY : Rendement spécifique des sédiments.

SWAT: Soil and water assessment tools.

WDA : Le stocke la nappe profonde.

WSA : Le stocke la nappe superficielle.

NSE : le coefficient d'efficacité Nash-Sutcliffe.

SIG : System d'information géographique.

UTM : Transverse universelle de Mercator.

USLE: The Universal Soil Loss Equation.

RUSLE : Revised Universal Soil Loss Equation.

MUSLE: Modified Universal Soil Loss Equation





# Introduction

### **Introduction**

L'érosion est un phénomène complexe lié à de nombreux facteurs naturels et anthropiques difficiles à contrôler ([Auerswald et al., 2018](#), [Wang et al., 2016](#), [Inoubli, 2016](#), [Abdellaoui et al., 2014](#), [Duchemin, 2000](#)). Environ 33% des terres arables dans le monde sont perdues par l'érosion du sol avec un taux annuel de 10 millions d'hectares([Pirnentel et al., 1995](#)). Dans la région méditerranéenne, les études récentes sur la vulnérabilité aux changements climatiques indiquent une tendance à un accroissement de l'aridité qui accélère l'érosion hydrique ([De Ploey et al., 1991](#), [Shaban and Khawlie, 1998](#)). Dans la rive sud de la méditerranée, l'érosion ne cesse de prendre des proportions considérables en particulier sur les pentes à cause de la nature torrentielle des pluies, de la forte vulnérabilité des terrains (roches tendres, sols fragiles, pentes raides et couvert végétal souvent dégradé), du surpâturage et de l'impact défavorable des activités humaines: déforestation, incendies, mauvaise conduite des travaux agricoles, urbanisme chaotique,...etc.

En Algérie septentrionale l'érosion hydrique reste un problème majeur et très préoccupant ([Touaibia et al., 1999](#), [Salhi et al., 2013](#), [Morsli, 2015](#)). Avec une érosion spécifique annuelle moyenne variant entre 2 000 et 4 000 t/km<sup>2</sup> ([Demmak, 1982](#)), l'Algérie est classée parmi les pays aux sols les plus érodibles du monde ([Touaibia, 2010](#)). Environ 32 millions d'hectares dans les zones montagneuses et steppiques sont menacés par l'érosion hydrique et 6 millions d'entre eux sont soumis à l'érosion active et la réduction annuelle des terres agricoles a atteint 40.000 hectares ([Mazour and Roose, 2002](#), [Bouchetata and Bouchetata, 2006](#)). Les pertes annuelles des eaux dans les barrages, dues à l'envasement, sont estimées à 65 millions de m<sup>3</sup> ([Remini, 2017](#)). L'érosion en amont des barrages, sous ses différentes formes (en nappe, en rigole, en ravine, des berges, glissement de terrain, coulée de boue, etc.) est à l'origine de l'envasement des barrages. Que ce processus soit naturel ou anthropique, l'érosion reste un phénomène complexe. Les conséquences de l'érosion ne se limitent pas à l'envasement des barrages, mais contribue aussi à la perte de la couche arable, la plus fertile du sol, diminuant la productivité des sols et dégradant la qualité des eaux de surface. En Algérie, les conséquences sont désastreuses et spectaculaires, offrant un paysage nu et sillonné par un ravinement intense, menaçant d'un envasement précoce des barrages en exploitation. L'importance des enjeux, a fait apparaître la nécessité d'un diagnostic sur l'érosion des sols et sur leurs évolutions dans l'espace et dans le temps. Pour mieux contrôler les divers types de dégradation, il est nécessaire de mieux comprendre les processus en cause.

## Introduction

De nos jours, les techniques de cartographie numérique, depuis les traitements d'images satellitaires jusqu'aux systèmes d'information géographique en se fondant sur l'équation universelle de pertes en sols de Wischmeier sont de plus en plus utilisées ([Kheir et al., 2006](#), [Sadiki and Mesrar, 2012](#), [Sepuru and Dube, 2018](#)). Elles permettent de spatialiser les risques et d'estimer les pertes en sols. L'utilisation des SIG et de la télédétection rend l'estimation de l'érosion des sols et sa distribution spatiale possible avec des coûts raisonnables et une meilleure précision dans les grandes régions ([Millward and Mersey, 1999](#), [Wang et al., 2003](#)).

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la contribution à la protection de barrage Sidi Abdelli. Elle vise à développer des méthodes applicables à ce type d'environnement. Le but principal est d'évaluer le risque d'érosion hydrique et d'identifier les domaines qui nécessitent une intervention prioritaire. Aussi d'étudier la saisonnalité de la charge de sédiments en suspension et sa relation avec le rendement sédimentaire. Afin de cerner le risque de l'érosion hydrique, une démarche a été conçue, basée sur deux approches : cartographie pour l'évaluation de la sensibilité et la quantification de l'érosion en mettant en relation les caractéristiques du bassin versant et la productivité des sédiments. L'objectif est d'évaluer l'érosion hydrique et les facteurs causaux en utilisant de trois modèles, le PAP/CAR, le RUSLE et MUSLE.

Le modèle PAP/CAR (Actions Prioritaires Par le Centre d'activités régionales) qui a montré son efficacité dans plusieurs travaux scientifiques ([Faleh and Maktite, 2014](#), [Golobič and Breskvar Zaucer, 2010](#), [Hassan et al., 2013](#), [Hili et al., 2016](#), [Mesrar et al., 2015](#)) est utilisé pour l'évaluation de la sensibilité. Le modèle PAP/CAR a été mis en œuvre par plusieurs ateliers dans différents pays du monde entre 1985 et 2000. Malgré l'application de cette méthode dans plusieurs pays, elle n'a jamais été appliquée en Algérie. Pour cela, il a été décidé d'essayer son application dans l'Environnement algérien.

Le RUSLE, le plus utilisé et le plus adopté dans plusieurs travaux ([Arekhi et al., 2012](#), [Gadiga and Martins, 1999](#), [Meghraoui et al., 2017](#), [Rawat et al., 2016](#), [Wall et al., 2002](#)) est utilisé pour la quantification de l'érosion par l'évaluation des valeurs des divers facteurs. Mais vu que le couvert végétal est différent d'une saison à l'autre, et vu l'impact du facteur de couverture végétale (C) sur la quantité de sol érodé, nous avons quantifié l'érosion pour chaque saison (sèche ou humide).

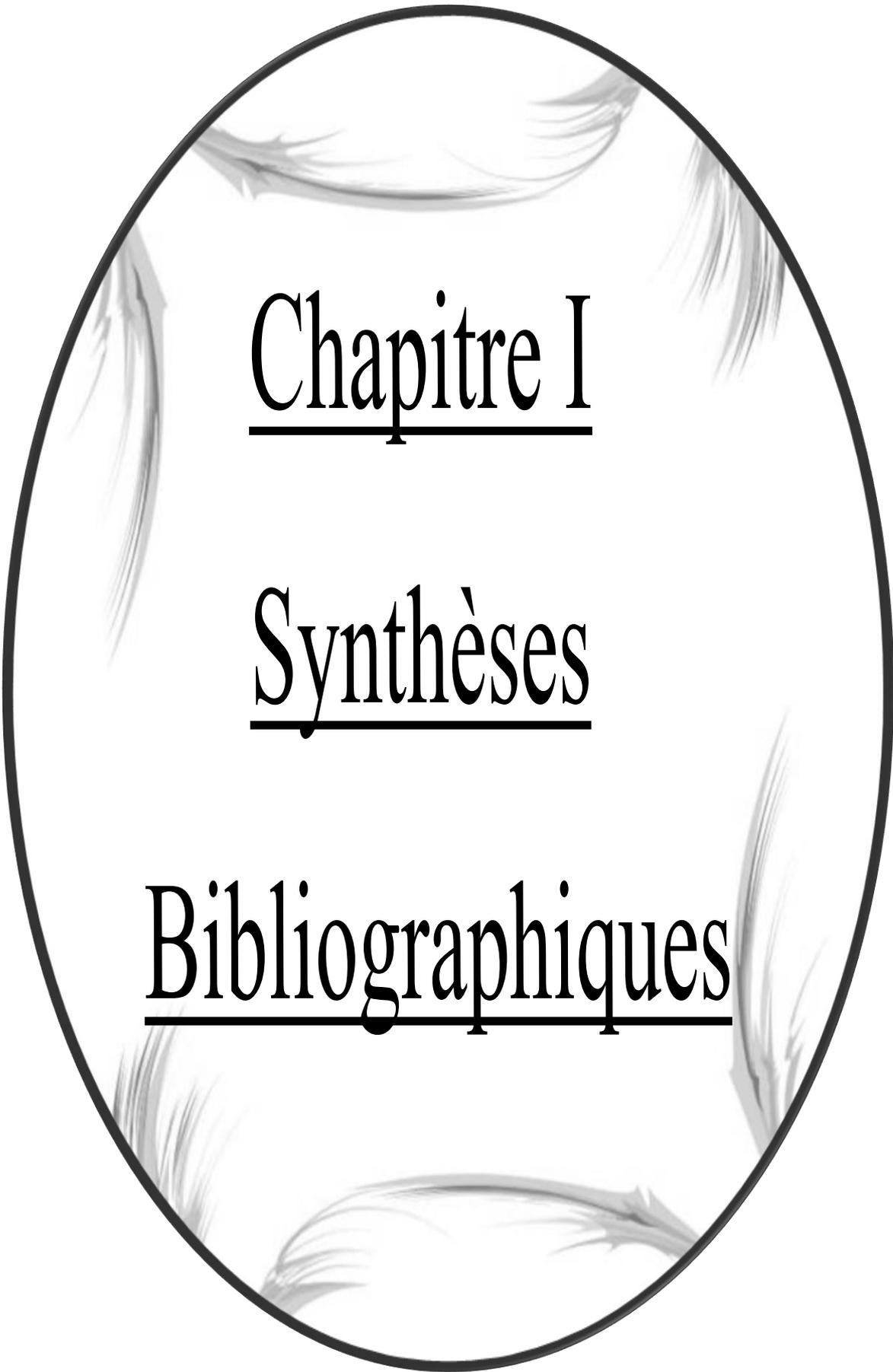
Le modèle MUSLE est utilisé pour calculer le potentiel flux d'érosion des sols à l'échelle de l'événement. Ce modèle a été utilisé dans de nombreux bassins du monde ([Sadeghi and Mizuyama, 2007](#), [Pandey et al., 2009](#), [Zhang et al., 2009](#), [Arekhi et al., 2011](#), [Kumar et al.,](#)

## Introduction

[2015](#), [Kateb et al., 2019](#), [Kateb et al., 2020](#)). Le modèle paramétrique est une version modifiée de l'USLE ([Wischmeier and Smith, 1978](#)), calibré à partir d'environ 778 tempêtes individuelles dans 18 bassins de 15 à 1500 ha. L'étalonnage des paramètres a et b est essentiel pour représenter correctement la dynamique érosive d'une zone d'étude ([Cariello et al., 2014](#), [Prado-Hernández et al., 2017](#), [Williams, 1975](#)). Dans ce travail, la calibration des paramètres du MUSLE est envisagée, ainsi que l'ajustement d'un facteur FM, qui nous permet d'évaluer l'écart de l'aversion originale du modèle.

Le bassin versant Isser-Tlemcen, zone représentative des versants marneux de l'ouest algérien et siège d'activité érosive intense, a fait l'objet d'étude. Les apports solides annuels à l'El Izdihar (Isser-Tlemcen) sont de l'ordre 600 000 m<sup>3</sup> ([Zoubiri, 2018](#)). Selon des chiffres officiels de l'administration du barrage d'Izdihar, qui est situé à la sortie du bassin sous étude, ce barrage avait une capacité de stockage initiale de 110 hm<sup>3</sup> lors de sa mise en service en 1988; ce volume était 103 hm<sup>3</sup> en 2003 selon le levé bathymétrique réalisée à ce moment-là; puis il est descendu à 95 hm<sup>3</sup> en 2016. Ces chiffres indiquent qu'une recherche active est nécessaire dans ce domaine afin d'identifier les zones les plus sensibles à l'érosion et donc de minimiser la perte de capacité de stockage d'eau du barrage.

Nous avons conçu ce travail sur cinq chapitres distincts. Le premier chapitre est consacré au cadre théorique, où nous abordons la description des processus d'érosion hydrique et des principaux facteurs qui l'affectent ainsi que les méthodes d'étude de l'érosion. Le cadre expérimental fait l'objet du deuxième chapitre, dans lequel nous présentons l'étude du milieu de la zone d'étude. Le troisième chapitre est consacré à la méthodologie adoptée dans le cadre de ce travail. L'ensemble des résultats ainsi que la discussion des résultats sont illustrés dans le quatrième chapitre.



Chapitre I

Synthèses

Bibliographiques

## **I.1. Recherche bibliographique et notions préliminaire**

### **I.1.1. Hydrologie**

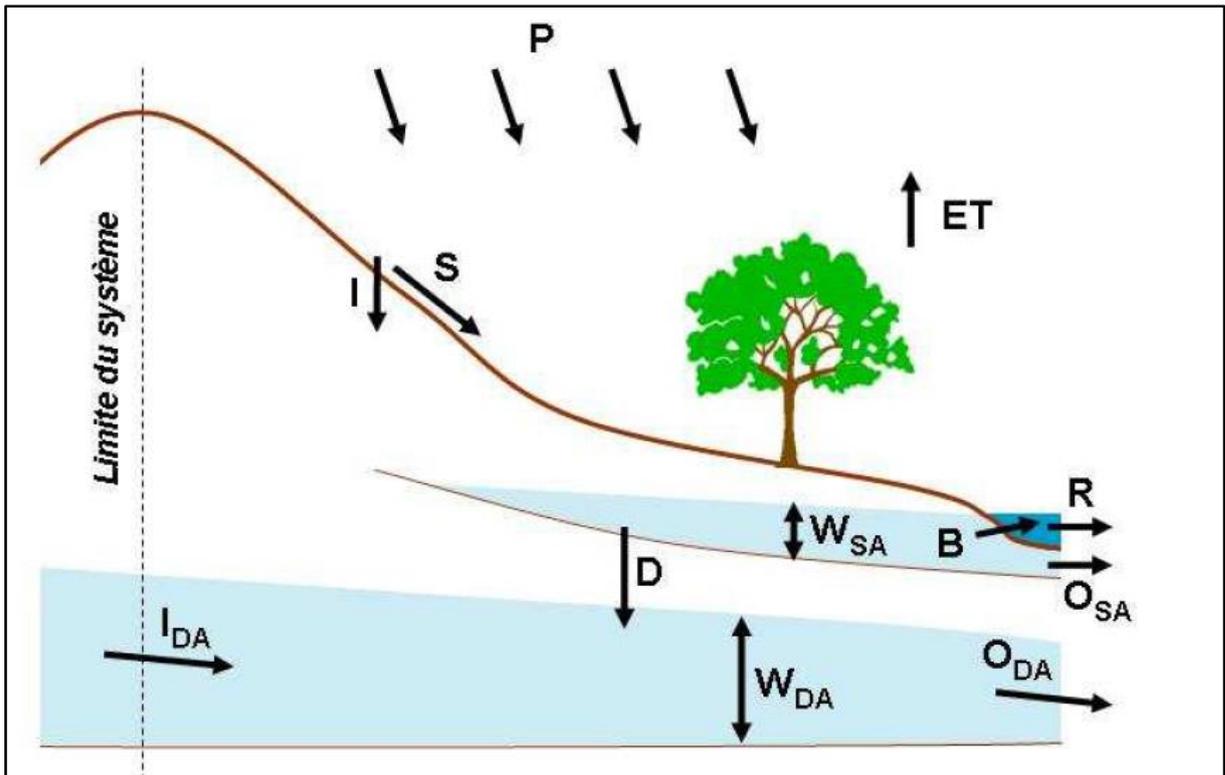
L'hydrologie est la géoscience qui décrit et prévoit l'occurrence et la circulation de la Terre eau fraîche ([Dingman, 2015](#)). Le climat est appelé principalement le temps et les autres couches supérieures des phénomènes terrestres ([Karamouz et al., 2012](#)). En générale les caractéristiques hydrologiques d'une région aride ou semi-aride sont déterminées en grande partie par son climat, sa géologie et sa géographie ([Soliman, 2010](#)).

On peut définir l'hydrologie comme la science qui étudie justement la distribution et les échanges entre les différentes masses d'eau, ainsi que les variations de paramètres comme la température, ou la composition minérale qu'elles subissent au cours du temps et de leur déplacement ([Desmarteau et al., 2006](#)).

### **I.1.2. Le bassin versant**

Le ruissellement se produit lorsque les précipitations ou la fonte des neiges se déplacent sur la surface du sol. Ces bilans hydriques sont généralement calculés pour une zone spécifique, appelée bassin versant, bassin de drainage ou également appelé zone de rejet. Le bassin versant est la principale unité hydrologique considérée dans le domaine de l'hydrologie et de la géomorphologie ([Eslamian, 2014](#)). Ces unités hydrologiques ont une variété de formes et tailles, certains ont des millions de km<sup>2</sup> de superficie et autres ne sont que quelques hectares ([Gupta, 2011](#)). Les bassins versants sont considéré comme des systèmes biophysiques, c'est-à-dire sont des combinaisons hétérogènes de couvertures végétales, de sols et de terres utilisations avec des caractéristiques topographiques et des configurations des canaux de cours d'eau variées ([Brooks et al., 2012](#)).

Chaque bassin versant comprend de nombreux sous-bassins versants plus petits qui transfèrent l'eau à la sortie ([Karamouz et al., 2012](#)). En général, l'eau s'écoule à travers des zones de haute altitude vers les zones de basse altitude captage dû à la gravité. Tous les points couvrant la surface du sol recevant des précipitations et à travers lesquels les eaux de ruissellement alimentant le ruisseau à un point spécifique sont considérés comme le bassin de drainage de ce ruisseau ou rivière à ce point ([Mimikou et al., 2016](#)). La figure I-1 montre un drainage typique du bassin pour un ruisseau ([John, 1997](#)).



**Figure I-1.** Principaux processus hydrologiques au sein d'un bassin versant ([Charlier, 2007](#)). Avec P la pluie, ET l'évapotranspiration, I l'infiltration, R le ruissellement total (Runoff), S le ruissellement de crue (Storm flow), B le drainage de nappe ou débit de base (Base flow), W<sub>SA</sub> le stock de la nappe superficielle (Shallow Aquifer), D la percolation profonde (Deep percolation), W<sub>DA</sub> le stock de la nappe profonde (Deep Aquifer), O<sub>SA</sub> les pertes latérales de la nappe superficielle (Outflows), IDA les apports amont de la nappe profonde (In flows), O<sub>DA</sub> les pertes latérales de la nappe profonde.

### I.1.3. Cycle de l'eau

L'eau sur terre existe dans un espace appelé l'hydrosphère qui s'étend sur 15 km plus haut dans l'atmosphère et environ 1 km plus bas dans la lithosphère, la croûte terrestre ([Te Chow et al., 1962](#)). La ressource totale en eau de la terre, seulement 2,7% environ eau douce dont environ 77% existe dans les calottes polaires et les glaciers et environ 11% de l'eau douce est stockée dans des aquifères souterrains profonds laissant environ 12% pour la circulation active ([Brooks et al., 2012](#)).

Le mouvement constant de l'eau et son changement d'état physique sur cette planète est appelé le cycle de l'eau (figure I-2), également connu sous le nom de cycle hydrologique ([ASCE, 1996](#)). Il agit comme une énorme pompe globale qui est entraînée principalement par l'énergie solaire et gravitée ([Ojha et al., 2008](#)). La force motrice d'un système mondial de transport des

eaux est fournie par le soleil ([Viessman et al., 1989](#)). Cette roue hydraulique implique les processus et voies par lesquelles des surfaces d'eau s'évaporent de la terre pour faire partie de l'atmosphère. La vapeur d'eau est transportée et soulevée dans l'atmosphère jusqu'à ce qu'il se condense et précipite sur la terre ou les océans. Tout cela humidifie la surface et une certaine quantité est stockée, qui s'évapore plus tard ([McCray, 2007](#)).

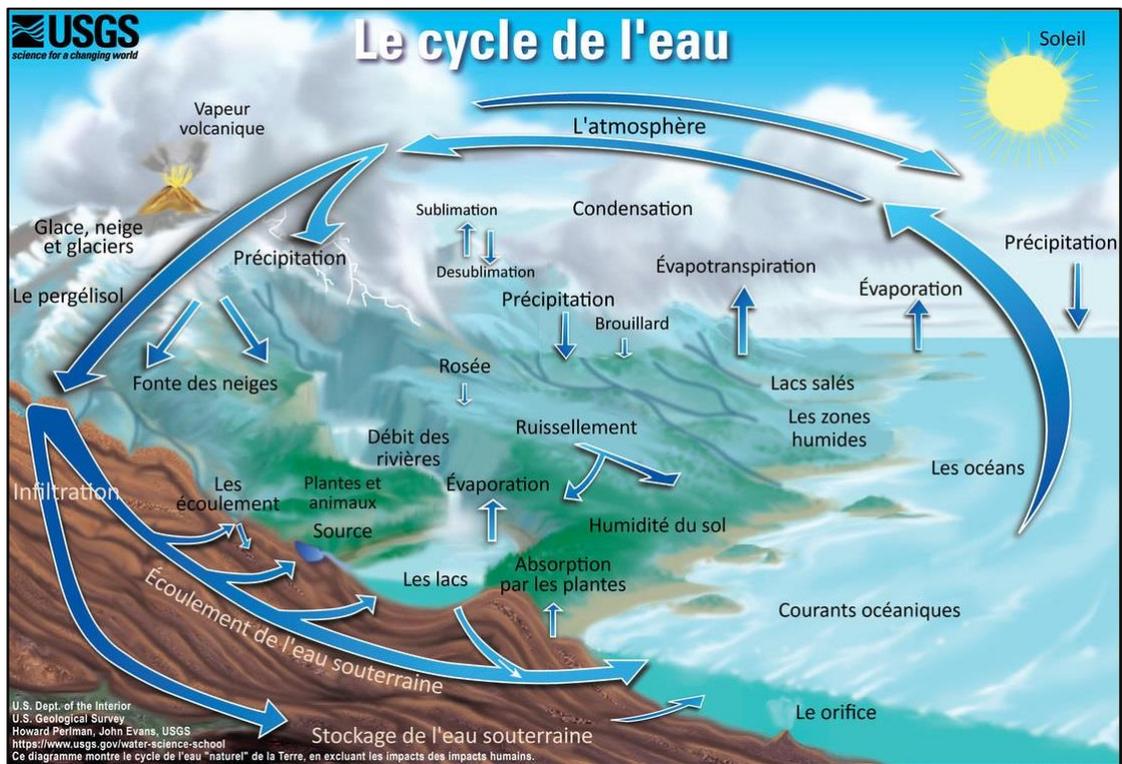


Figure I-2. Le cycle de l'eau (le site de l'USGS).

### I.1.3.1. Précipitations

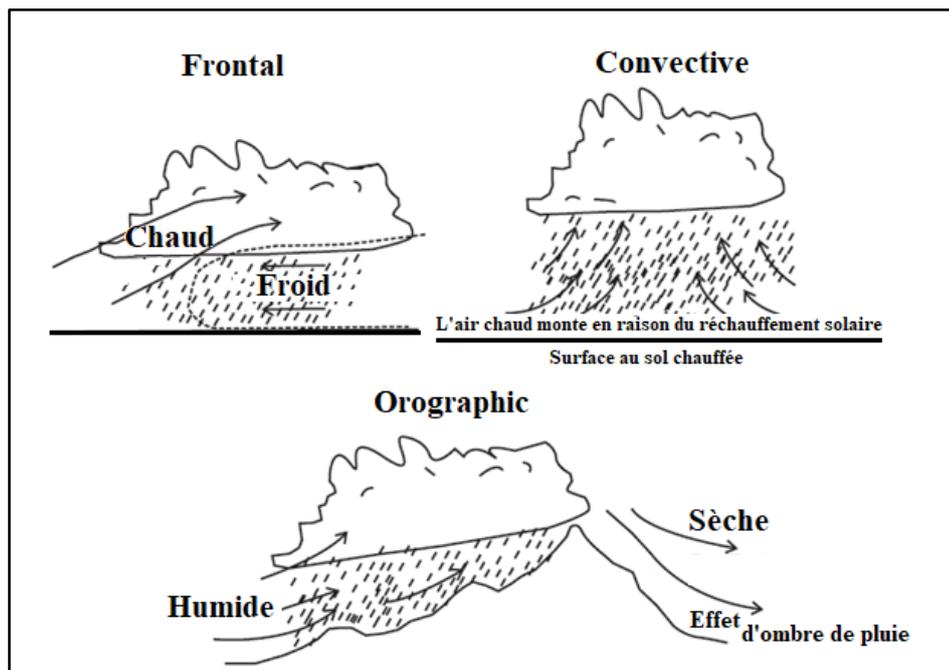
Les précipitations sont la principale source d'approvisionnement en eau de la terre. Il comprend toute l'eau qui tombe de l'atmosphère à la surface de la terre. Les précipitations annuelles moyennes sont une caractéristique climatologique majeure d'une région ([ASCE, 1996](#)). Les précipitations affectent la quantité, le moment, la distribution spatiale et la qualité de l'eau ajoutée un bassin versant de l'atmosphère.

Les hydrologues considèrent les précipitations comme le paramètre principal du bassin versant et une clé de ses caractéristiques de production d'eau. Les écologistes reconnaissent le rôle des précipitations pour déterminer les types de sols et de végétation qui se produisent sur un bassin versant. Les agriculteurs, les forestiers et les gestionnaires des parcours considèrent les précipitations comme un ingrédient essentiel production végétative sur le terrain ([Brooks et al., 2012](#)).

### *i. Formation de la précipitation*

Il y a toujours de la vapeur d'eau dans l'air et certains la condensation se produit toujours dans l'atmosphère. Les nuages peuvent être composés de vapeur d'eau, gouttelettes d'eau, cristaux de glace ou une combinaison ([Ward and Trimble, 2003](#)). Le processus des précipitations commence lorsque le nombre de molécules d'eau retournant à une surface dépasse celles qui partent, il y a un filet dépôt d'eau de l'air, appelé condensation ([Karamouz et al., 2012](#)).

Trois principaux types de mécanisme de levage pour l'air les colis fonctionnent dans l'atmosphère. Quand deux des masses d'air de températures différentes se rencontrent le long d'un avant, comme le montre la figure I-3, (i) l'air chaud monte menant à des précipitations frontales; (ii) chauffage de l'air en contact avec la surface terrestre fournit également flottabilité ascendante et conduit à des précipitations convectives; et (iii) le mouvement ascendant se produit lorsque l'air est forcé le long d'une barrière de montagne, provoquant orographique précipitations (figure I-3) ([Gupta, 2011](#)).



**Figure I-3.** Principaux mécanismes qui entraînent des précipitations ([Saadaoui, 1995](#)).

### *ii. Formes de précipitation*

Les précipitations sont évidemment le facteur essentiel des régimes hydrologiques puisqu'elles constituent la matière première des débits des cours d'eau ([Roche, 1963](#)). Certaines des formes courantes de précipitations sont la pluie, la neige, la bruine, le glacis, le grésil, et grêle.

Les précipitations peuvent atteindre la surface du sol sous différentes formes. La bruine est une précipitation très légère, généralement uniforme, gouttes d'eau de moins de 0,5 mm de

diamètre ; intensité inférieure à 1 mm / h. La pluie est une précipitation constituée de gouttes d'eau supérieures à 0,5 mm. Ça peut être classée comme pluie légère lorsque l'intensité est inférieure à 2,5 mm/h, modérée lorsqu'elle est comprise entre 2,5 et 7,5 mm/h, et lourde lorsqu'elle dépasse 7,5 mm/h (tableau.I-1). L'intensité et la fréquence des précipitations varient considérablement à la fois dans l'espace et temporellement ([Potter and Colman, 2003](#)). On suppose souvent que le taux de précipitation est uniforme, c'est-à-dire l'hyétogramme (graphique du taux de pluie en fonction du temps) est au sommet carré ([Stephenson, 1981](#)).

La neige est une précipitation sous forme de cristaux de glace. Bien que des cristaux de glace individuels puissent atteindre la surface du sol, généralement de nombreux cristaux de glace fusionnent et forment des flocons de neige. Ces flocons ont tendance à être plus gros à des températures proches du point de congélation. la neige a une densité initiale variant de 0,06–0,15 gramme par centimètre cube, mais il suppose généralement une densité moyenne de 0,1 gramme par centimètre cube ([Brooks et al., 2012](#), [Mimikou et al., 2016](#), [McCray, 2007](#)). La probabilité d'occurrence est décrite par le terme période de retour, qui est le nombre moyen d'années entre deux épisodes pluvieux qui égalent ou dépassent un nombre donné de pouces sur une durée donnée, L'intensité des tempêtes est un phénomène aléatoire. Une tempête de 10 ans pourrait se produire à un endroit au cours ans tant que la moyenne à long terme est une tous les 10 ans ([John, 1997](#)).

**Tableau.I-1.** types de pluie ([Soliman, 2010](#)).

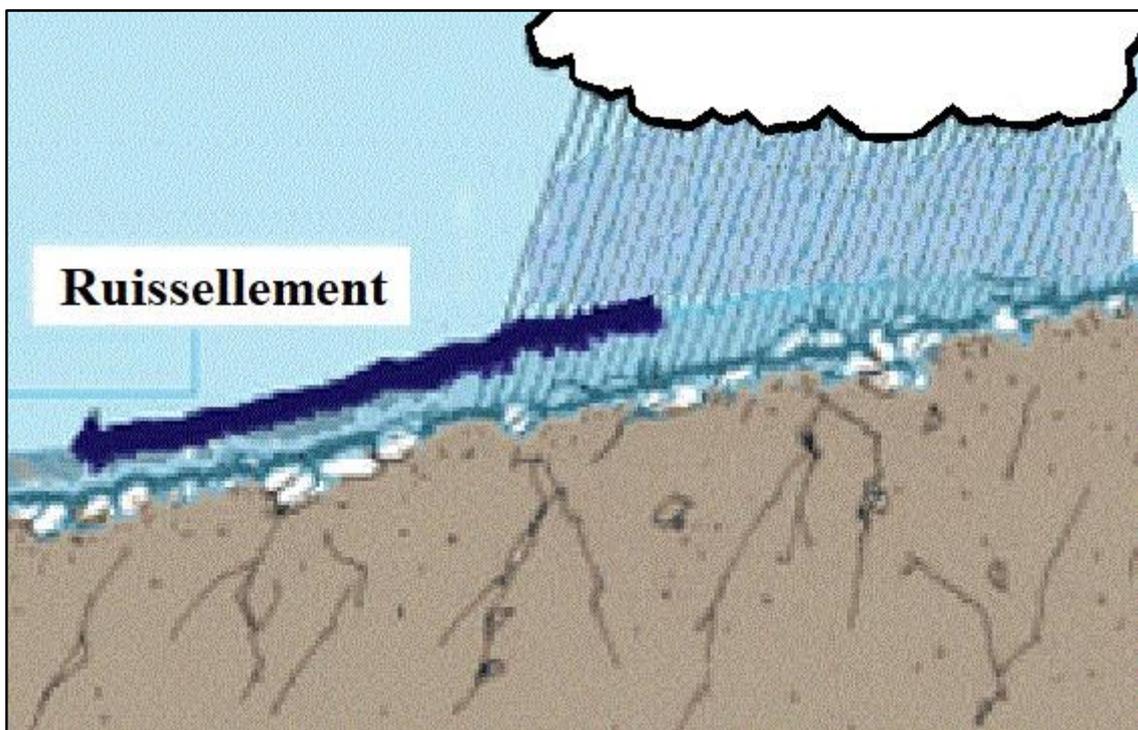
Le type de la pluie	intensité
Pluie légère	$\leq 2.5$ mm/h
Pluie modérée	2.5 mm/h -7.5 mm/h
Forte pluie	$\geq 7.5$ mm/h

### I.1.3.2. Ruissellement

L'écoulement de l'eau sur une surface du bassin versant est un processus complexe variant dans l'espace et le temps ([Te Chow et al., 1962](#)). Pour tous les sols sauf les plus perméables ([Rushton, 2004](#)), le ruissellement (figure I-4) se produit lorsque le taux de précipitation dépasse le taux d'infiltration à la surface du sol ou lorsque le sol est saturé ([Potter and Colman, 2003](#)). Il comprend : (i) écoulement par voie terrestre à la surface du sol; (ii) flux intermédiaire à travers

le profil du sol; (iii) effluent des eaux souterraines dans les rivières et les sources; et (iv) les précipitations directes sur les canaux ([Gupta, 2011](#)).

Le flux terrestre se concentre en petits ruisseaux, qui à leur tour se combinent pour former de plus grands ruisseaux et rivières, finalement, les rivières se jettent dans océans achevant le cycle hydrologique ([ASCE, 1996](#)). Plusieurs facteurs déterminent le ruissellement, y compris la position du paysage, le type de sol, la couverture végétale, la terre l'utilisation, les conditions géologiques au bassin versant ([Brooks et al., 2012](#)). L'intensité et les taux de précipitations qu'il est un facteur qui doit être pris en compte lorsque nous envisager l'érosion, car il jouera un rôle pour déterminer la probabilité de saturation excès de ruissellement des versants ([Shukla, 2011](#)).



**Figure I-4.** Le mécanisme de la création du ruissellement ([Mabit et al., 2002](#)).

### I.1.3.3. Infiltration

L'infiltration joue un rôle important dans la nature et l'homme activités ([Ward and Trimble, 2003](#)). L'eau est présente dans chaque profil de sol, mais la quantité varie avec le temps et le lieu ([Koorevaar et al., 1983](#)). Le phénomène d'infiltration est généralement définie comme le processus d'entrée d'eau à la surface du sol comme les précipitations, l'irrigation ou la fonte des neiges ([ASCE, 1996](#)). L'infiltration résulte des forces combinées de capillarité et de gravité agissant sur l'eau dans la matrice du sol ([Brooks et al., 2012](#)).

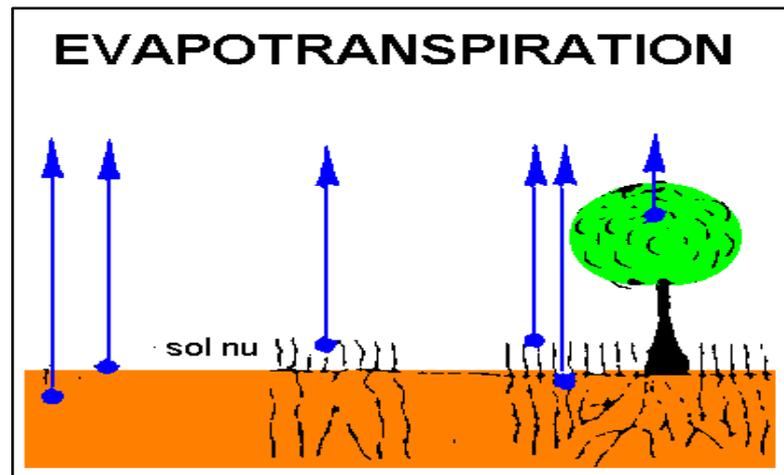
La capacité d'infiltration ou le taux d'infiltration est défini comme le taux maximal auquel l'eau peut infiltrer ([Karamouz et al., 2012](#)). Cela dépendra de l'humidité ambiante contenu, En outre,

il diminuera avec le temps lors d'une tempête à mesure que les pores se remplissent et que la nappe phréatique monte ([McCray, 2007](#), [Stephenson, 1981](#)). De nombreux facteurs influencent le taux d'infiltration, y compris le type et l'étendue de la couverture végétale, l'état de la croûte de surface, la température, les précipitations intensité, propriétés physiques du sol et qualité de l'eau ([Viessman et al., 1989](#)).

#### **I.1.3.4. Evaporation-transpiration pluie**

Lorsque l'eau liquide se transforme en phase gazeuse (vapeur d'eau), ce processus est appelé évaporation ([Karamouz et al., 2012](#)). La transpiration est un cas particulier d'évaporation ([ASCE, 1996](#)). Le terme comprend donc l'évaporation des rivières et des lacs (eau libre), sol nu, et surfaces végétatives (perte d'interception); évaporation de l'intérieur des feuilles des plantes (transpiration); et sublimation des surfaces de glace et de neige (figure I-5) ([Dingman, 2015](#)). Sont des processus majeurs dans la composante principale du cycle hydrologique qui renvoie l'eau précipitée dans l'atmosphère terrestre sous forme de vapeur ([ASCE, 1996](#)).

La quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère est inférieure à 1 partie sur 100 000 de toutes les eaux de la terre, mais elle joue un rôle vital dans le cycle hydrologique ([Te Chow et al., 1962](#)). L'évaporation plus la transpiration à partir d'une surface végétalisée avec un approvisionnement en eau illimité est connu sous le nom d'évaporation potentielle (PE) ou évapotranspiration potentielle (TEP), et elle constitue le taux maximum possible en raison de la conditions météorologiques ([Eslamian, 2014](#)). Cette transition nécessite d'abord un approvisionnement énergétique pour fournir de l'eau molécules l'énergie cinétique nécessaire pour s'échapper de la surface liquide ([McCray, 2007](#)). La transpiration est un processus complexe à visualiser mesurer et influencé par (i) l'atmosphère des conditions telles que l'humidité relative, la température, Concentration de CO<sub>2</sub> dans l'air et le vent la vitesse; et (ii) type de couverture végétale (large feuillus / conifères, herbes, arbustes, etc.) ([Gupta, 2011](#)). La transpiration se produit principalement dans les heures de la lumière du jour et peut varier de 180 l / jour pour une grande arbre à environ 2 l / jour pour une petite plante agricole ([Sharp and Sawden, 2013](#)). Le taux annuel moyen d'évaporation peut varier de 200 mm à froid climats humides jusqu'à 2000 mm dans les zones chaudes et arides ([Stephenson, 1981](#)).



**Figure I-5.** Le mécanisme de l'évaporation et transpiration des pluies. (Jodeau, 2004)

### I.1.4. L'érosion

L'érosion du sol survient sous l'effet de trois principaux phénomènes : le vent, l'eau et peut être accélérée par certaines activités agricoles (jachères, cultures en rang, etc.) (MacKay and Hewitt). A l'échelle globale l'érosion hydrique des sols résulte de l'impact des eaux de pluies et de ruissellement sur le sol (Boukrim et al., 2016). Elle est largement reconnue comme un processus majeur de dégradation des sols (Maugnard et al., 2013, Li et al., 2007). Ce phénomène très complexe difficilement maîtrisable (El Hafid and Akdim, 2018); affecte la qualité des sols en induisant la détérioration de leurs couches superficielles riches en matière organique et ensuite la perte de productivité des sols et à la dégradation des terres (Modeste et al., 2016). Ainsi, génère des conséquences importantes au niveau économique, humain et écologique (Eblin et al., 2017).

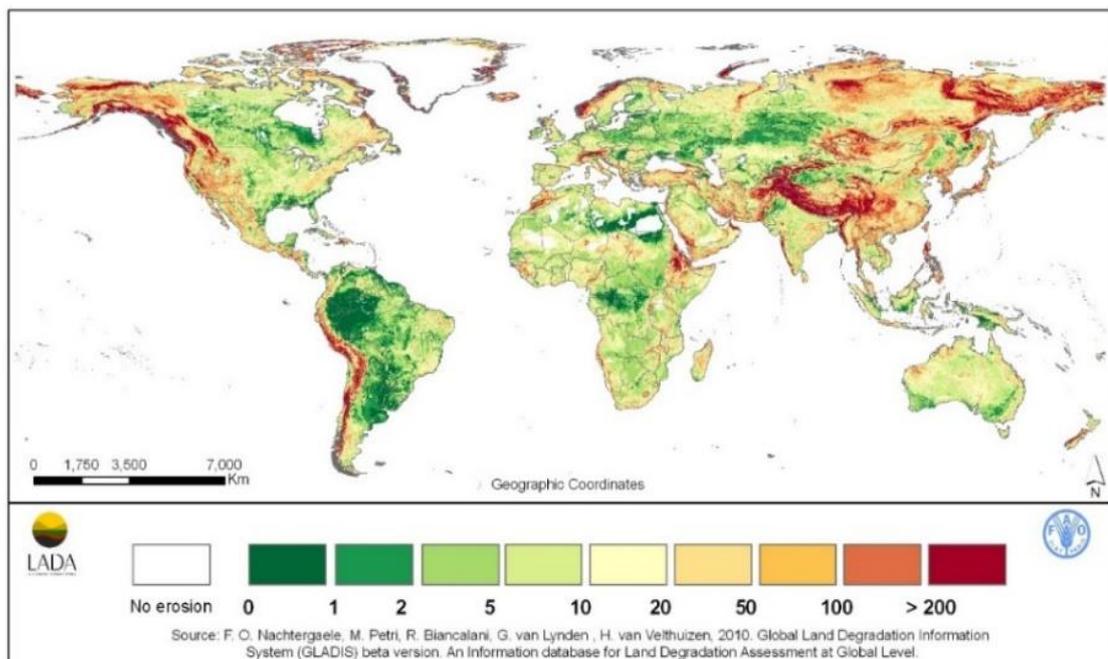
#### I.1.4.1. Dégradations des sols dans le monde.

Les auteurs passent en revue l'érosion taux dans de nombreuses parties du monde et avance un argument concernant l'impact d'érosion (Boardman, 1998). Bien que les préoccupations récentes pour l'environnement mondial aient eu tendance à mettre en évidence les menaces le réchauffement climatique et le changement climatique, l'érosion des sols et la dégradation des terres qui y est associée demeurent sans aucun doute problèmes sérieux (Walling, 2000). En ce qui concerne problème environnemental, économique et social (J. Ritter, 2012, García-Ruiz et al., 2017).

Le destin des générations présentes et futures dépend principalement de la façon dont elles gèrent les sols et ses ressources (Zezin et al., 2015). L'érosion des sols induite par l'homme a longtemps été considérée comme une menace pour les populations (Dregne, 1990). Près de 60%

des taux de l'érosion actuelle du sol sont causés par l'activité humaine (Yang et al., 2003). Dans de nombreuses régions du monde, l'érosion des sols est l'un des principaux processus réduire les couches fertiles de la couche arable (figure I-6) (Vrieling, 2007). Cela plus la salinisation et l'engorgement entraîne la perte irrémédiable d'environ 6 millions hectares chaque année (Pimentel et al., 1995). Ainsi, affectant gravement la nourriture de l'économie mondiale (Pimentel et al., 1987). Au cours des 40 dernières années, près d'un tiers des terres arables du monde ont été perdues par l'érosion, la perte se poursuivant à un rythme de plus de 10 millions d'hectares par an (Yang et al., 2003).

Chaque année, environ 75 milliards de tonnes de sol sont érodées des écosystèmes terrestres du monde atteindre un pourcentage de 17.5 % par le vent et l'eau (Pimentel and Kounang, 1998) et (Pimentel et al., 1995). Environ de 88 millions de km<sup>2</sup> de terres, correspondant à environ 60% de la surface terrestre du monde, sont considérées être modérément à très sensible à l'érosion par l'eau (Batjes, 1996). D'autre part, (Lal, 2003) a mentionné que la superficie totale des terres touchées par l'érosion hydrique est de 1094 millions d'hectares, dont 751 millions d'hectares sont gravement touchés. L'érosion des sols affecte environ un milliard de personnes dans le monde, mais environ 50% de la population touchée est concentrée en Afrique (Blanco and Lal, 2008). La couverture mondiale des sols irrécupérables est d'environ 9 millions d'hectares, dont plus de 5 millions en Afrique (Oldeman et al., 1990).



**Figure I-6.** Perte de sol estimée t/ha/an dans le monde par équation USLE (site de la FAO).

#### **I.1.4.2. L'érosion hydrique dans la région méditerranéenne.**

Écosystèmes méditerranéens sont fragiles et toute altération du système pourrait conduire à la dégradation des sols ([de Paz et al., 2006](#)). Ce grave menace ([Zalidis et al., 2002](#)), est considéré comme l'un des sujets les plus étudiés dans la région méditerranéenne et la forme la plus courante du processus de dégradation des sols ([García-Ruiz et al., 2013](#), [Delusca, 1999](#), [De Baets et al., 2007](#)). Cela conduit donc à l'envasement rapide de nombreux réservoirs artificiels construits au cours des dernières décennies qui affecte le déclin de la capacité de stockage des eaux de surface peut avoir un impact considérable sur le développement agricole, économique et social ([Kosmas et al., 1997](#), [Ben Slimane et al., 2016](#)). Ceci est principalement dû aux conditions climatiques de la Méditerranée ([Prosdocimi et al., 2015](#)).

Walling (1984) a estimé les taux de rendement spécifique des sédiments SSY entre 10 et 50 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> dans les pays de cette région. Au Maroc, l'érosion des sols menace jusqu'à 12,5 × 10<sup>6</sup> ha dans les cultures et les parcours ([Naimi et al., 2005](#)), avec une dégradation spécifique supérieure à 20 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> ([Ghanam, 2003](#)). La Tunisie perd plus de 15 000 ha de terres agricoles chaque année en raison des processus d'érosion ([Slim and Jeddi, 2011](#)), avec la perte annuelle de sa capacité de réservoir plus de 0,5% ([Saadaoui, 1995](#)).

#### **I.1.4.3. L'érosion hydrique dans l'Algérie.**

L'érosion des sols en Afrique est un problème répandu et accéléré, surtout dans la région du nord-ouest ([Lal, 1995](#)). Elle pose un risque majeur pour les barrages des pays du Maghreb en général et l'Algérie en particulier ([Meddi et al., 2016](#)).

Pertes irréversibles de productivité des sols par l'érosion hydrique semble être grave sur échelle nationale en Algérie ([Dregne, 1990](#)). Il est, à son tour, considéré comme influent sur l'environnement, l'agricole et le social ([Meghraoui et al., 2017](#)). Il est connu que tout cela est dû à leur géologique, géomorphologique, et les conditions hydro-climatiques ([Arar and Chenchouni, 2014](#), [Toubal et al., 2018](#)). La partie nord du climat méditerranéen semi-aride est la région la plus touchée par les diverses formes d'érosion ([Arabi and Roose, 1992](#)).

Guidoum (2014) et Meddi (2016), estiment que plus de 20 millions et 14 millions d'hectares des terres sont menacés par l'érosion hydrique respectivement. L'Algérie est un pays qui connaît un énorme déficit en eau ([Benchettouh et al., 2017](#)). Depuis l'indépendance de l'Algérie en 1962, le nombre total des barrages au niveau national a atteint 85 en 2019, d'une capacité de stockage près de neuf (09) milliards de m<sup>3</sup> (ANBT). Taux d'érosion importants, compris entre 23 et 72 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> dans certaines régions d'Algérie, se traduit par plus de 50 hm<sup>3</sup> de perte

de volume de la capacité du réservoir ([Megnounif et al., 2003](#), [Remini and Bensafia, 2016](#), [Tachi et al., 2016](#)). Parmi les conséquences de la dégradation des bassins versants dans le nord de l'Algérie, une valeur élevée des boues cumulées déposée au fond de ces barrages est environ un (1) milliard de mètres cubes ([Hallouz et al., 2018](#)). Avec un taux de sédimentation annuels peuvent atteindre jusqu'à  $30 \times 10^6 \text{ m}^3$  ([Lahlou, 1996](#)). De plus, ces processus ont considérablement augmenté les dernières décennies de  $20 \text{ hm}^3$  d'envasement des barrages en 1980 à  $45 \text{ hm}^3$  en 2000 ([SERBAH, 2011](#), [Tachi et al., 2016](#)).

**Tableau.I-2.** Valeurs des taux d'érosion spécifiques des sols des bassins versants Algérie ([Tadrist and Debauche, 2016](#)).

Le bassin versant	Érosion spécifique ( $\text{t.km}^2/\text{an}$ )	La source
Oued Abd	136	( <a href="#">Achite and Ouillon, 2007</a> )
Algérie orientale	145	( <a href="#">Bourouba, 1998</a> )
Oued Bellah	610	( <a href="#">Elahcene et al., 2013</a> )
Oued Boukadir	446	( <a href="#">Tadrist and Debauche, 2016</a> )
Oued Ebda	1 875	( <a href="#">Meddi, 1999</a> )
Oued El-Hachem	318	( <a href="#">Tadrist, 2004</a> )
Oued Kebir bassin	572	( <a href="#">Khanchoul et al., 2012b</a> )
Bassin versant la haute Tafna	1 120	( <a href="#">Megnounif et al., 2003</a> )
Bassin versant la Tafna	150	( <a href="#">Sogreah, 1967</a> )
Oued 'Isser Lakhdaria	2 300	( <a href="#">Bourouba, 1997</a> )
Oued Mina	187	( <a href="#">Achite and Meddi, 2005</a> )
Oued Mouilah	126	( <a href="#">Terfous et al., 2001</a> )
Oued Agrioun	7 200	( <a href="#">Probst and Suchet, 1992</a> )
Oued Saf Saf	461	( <a href="#">Probst and Suchet, 1992</a> )
Bassin versant Sebdou	1 330	( <a href="#">Ghenim, 2008</a> )
Bassin versant Sebdou	937	( <a href="#">Bouanani, 2004</a> )
Bassin versant Sebdou	343	( <a href="#">Megnounif et al., 2013</a> )
Bassin versant Sikkak	170	( <a href="#">Bouanani, 2004</a> )
Oued Souagui II	1 268	( <a href="#">Keddar, 2011</a> )

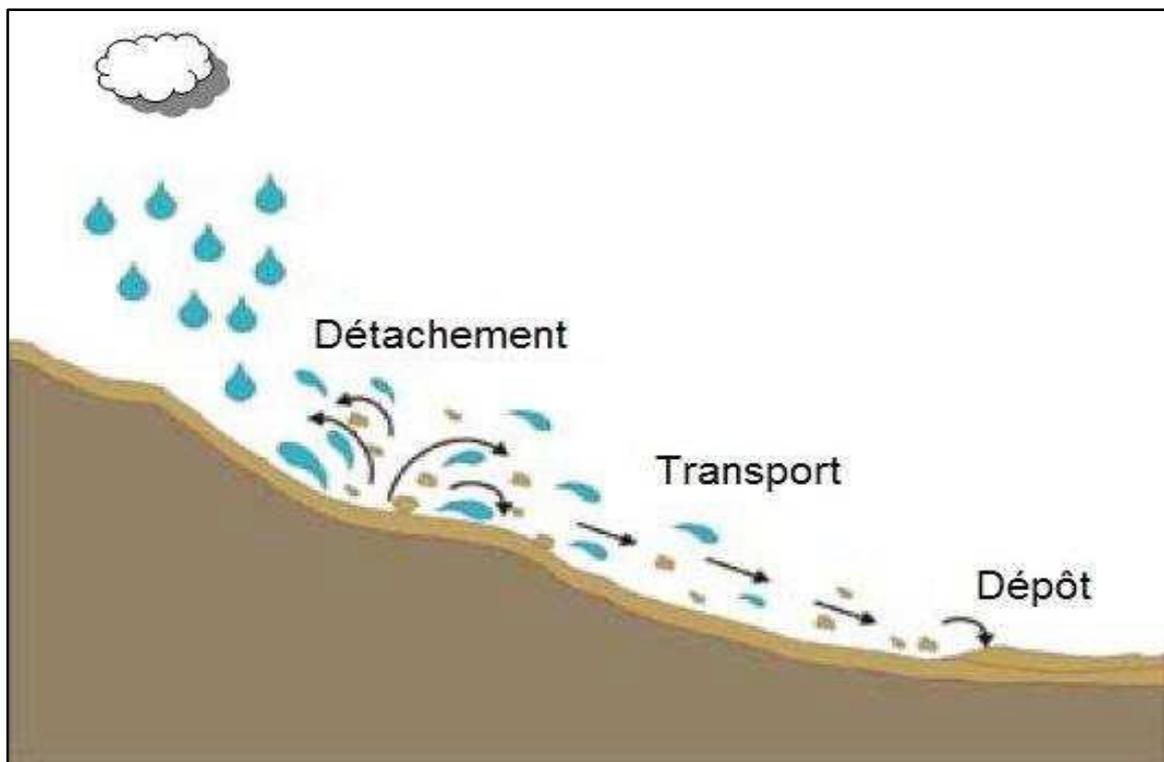
Avec l'utilisation de différentes méthodes et modèles, plusieurs recherches précédemment ont démontré qu'il existe un problème grave d'érosion en Algérie (tableau.I-2). Comme la déduction de relations empiriques en utilisant données différentielles ([Demmak, 1982](#), [Meddi et al., 2016](#)), utilisant divers types d'équations, était basée sur la relation entre flux liquide et solide et analyse graphique basé sur les données de plusieurs bassins versants algériens ([Meddi et al., 1998](#), [Terfous et al., 2003](#), [Benkhaled and Remini, 2003](#), [Ghenim et al., 2007](#), [Megnounif et al., 2007](#), [Ghenim et al., 2008](#), [Khanchoul et al., 2012a](#), [Remini et al., 2015](#), [Megnounif and](#)

[Ghenim, 2016](#)), et l'utilisation de différents modèles tels que USLE, RUSLE, PAP/CAR et SWAT, méthodes reposaient sur la distribution du radio-isotope C137 ([Toumi, 2013](#), [Mesrar et al., 2015](#), [Chikh et al., 2019](#), [Kateb et al., 2020](#), [Millares et al., 2020](#), [Badreddine et al., 2021](#)).

## I.2. L'érosion et le Transport Solide

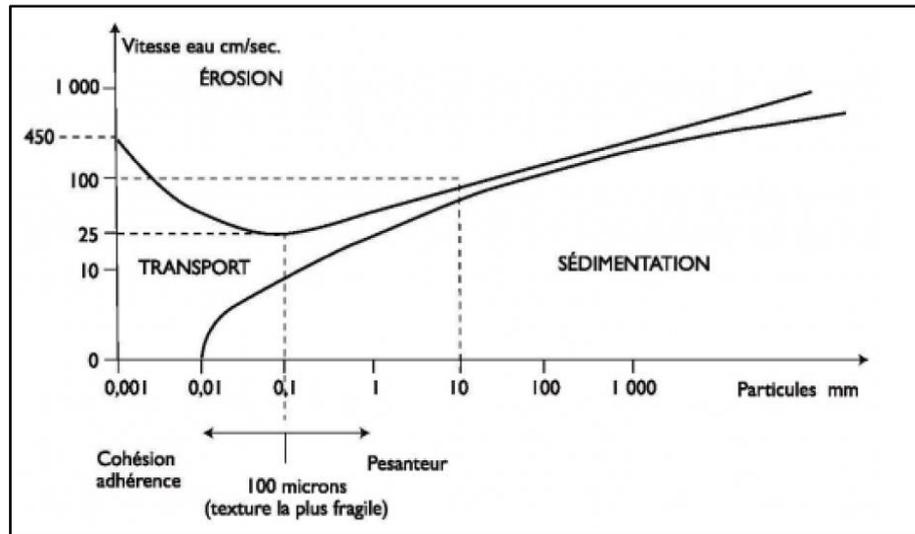
### I.2.1. Processus et mécanisme de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est un processus qui emporte et redistribue le sol. Il est défini comme le détachement et le transport de particules de sol de son emplacement d'origine par différents agents vers un lieu de dépôt. Ce mécanisme se passe à cause de pluie et le ruissellement superficiel en trois étapes (figure I-7) ([Faleh and Maktite, 2014](#)) :



**Figure I-7.** Processus de l'érosion hydrique ([Cheggour, 2008](#)).

Si la dimension des grains s'accroît, la vitesse critique décroît, jusqu'à un seuil (estimé par Hjulström) de 0,2 mm à partir duquel la vitesse nécessaire à l'arrachage s'accroît à nouveau (figure I-8.) ([Cheggour, 2008](#)).



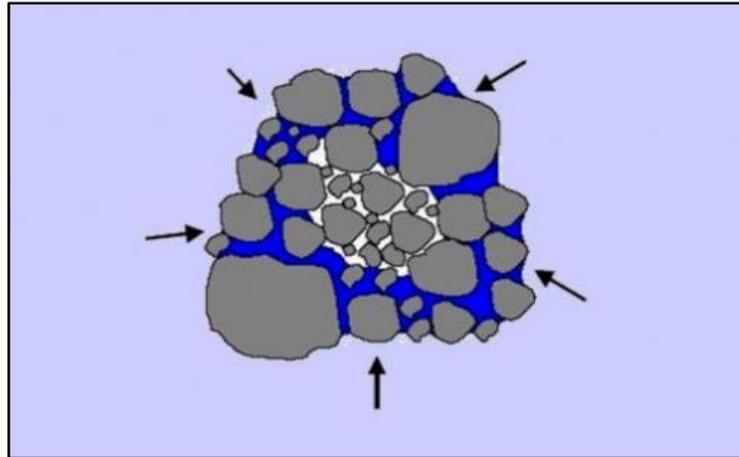
**Figure I-8.** Le diagramme de Hjulström (Roose et al., 2010).

### I.2.1.1. Le détachement

Le détachement du sol est défini comme le délogement du sol particules de la masse du sol à un endroit particulier à la surface du sol (Zhang et al., 2002). Avant que les sédiments et matières organiques soient transportés, ils doivent d'abord être détachés des forces cohésives présentes dans le sol. L'énergie atteint le sol, décomposant les agrégats et détachant les particules de sol (Zumr et al., 2019). Le détachement, dans le cas de l'érosion hydrique, est principalement le fait de l'impact des gouttes de pluie et du ruissellement, tous les deux ont le potentiel de détacher et de transporter les sédiments (Soriat and Lacharité, 1988). En particulier par l'écoulement terrestre peu profond (Li et al., 2017).

#### *i. Le gonflement différentiel*

Ce phénomène intervient suite à l'humectation et la dessiccation des argiles, entraînant des fissurations dans les agrégats (Seddik, 2016). L'importance de ce mécanisme dépend en grande partie de la teneur et de la nature de l'argile des sols (Hammouda, 2010, Bouguerra, 2018). L'essentiel de la destruction des agrégats a lieu lors des 5 premiers mm de pluie et résulte surtout des effets conjugués de la microfissuration produite par le gonflement différentiel des argiles (figure I-9) (Nord, 2006).



**Figure I-9.** Schématisation de la dégradation par gonflement différentiel ([Sulistyo, 2016](#)).

*ii. La dispersion physico-chimique*

La corrélation entre l'érodibilité des sols et les paramètres géotechniques est très difficile due au grand nombre de variables qui interfèrent dans cette propriété ([Goutte-Lima et al., 2008](#)). En plus les facteurs climatiques et biologiques la genèse des sols résulte l'altération physico-chimique ([Algui and Chezal, 1996](#)). La dispersion physico-chimique correspond à la réduction des forces d'attraction entre particules colloïdales lors de l'humectation, elle dépend de la taille et la valeur des actions (particulièrement du sodium) pouvant lier les charges négatives dans le sol ([Amamra, 2017](#)).

**I.2.1.2. Le transport**

L'eau de pluie ne ruisselle à la surface que lorsque l'intensité de la pluie excède le taux d'infiltration du sol. Les particules érodées, sont le plus souvent transportées par l'eau. Ces sédiments entraînés dans un ruisseau qui coule peuvent être transporté le long du lit comme charge de lit, en suspension comme charge suspendue, ou le long du sommet (air-eau) surface de l'écoulement comme charge de lavage ([Gupta, 2011](#)). La quantité de particules de sol transportée est en fonction de la vitesse du ruissellement et de la turbulence qui sont fortement influencés par la raideur de la pente, la dimension, la forme et la densité des sédiments transportés de même eue par la rugosité de la voie d'eau ([Dudal, 1980](#)).

*i. Le ruissellement diffus et concentré*

Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace ([Le Bissonnais et al., 2002](#)). Les expressions "ruissellement diffus" et "ruissellement concentré" sont largement employées pour désigner un écoulement distribué sur une surface assez vaste, ou en rigoles ([Guiton, 1994](#)). On parlera de ruissellement diffus si les écoulements se font sous la forme de fins filets d'eau, ou de

ruissellement concentré si les écoulements disposent d'une forte capacité de transport ([Mabit et al., 2002](#)). Le ruissellement concentré qui se forme dans les réseaux d'écoulement acquiert une capacité de transport solide qui augmente avec la vitesse de l'écoulement mais possède également une énergie cinétique capable d'inciser les surfaces parcourues ([Pinte, 2006](#)).

### **I.2.1.3. La sédimentation**

La sédimentation est la phase finale du processus d'érosion, indique la baisse de compétence de l'écoulement et correspond au dépôt des particules transportées en bas du versant. La déposition survient lorsque le poids des particules devient plus important que les forces de transport conduisant à un ralentissement de la vitesse du transport de particules jusqu'à l'arrêt. La diminution de la pente du sol, la réduction de l'intensité de pluies ou encore en présence d'obstacles, les banquettes d'herbe, les graviers et les cailloux agissent aussi sur le ralentissement de la vitesse de transport des particules par ruissellement. La sédimentation affecte non seulement la retenue mais aussi des zones s'étendant loin en aval et sur de courtes distances en amont du pool de conception, le principal impact de sédimentation dans un réservoir est perte de stockage ([Garcia, 2008](#)). Le dépôt fluvial est important pour plusieurs raisons :

- À long terme, poursuite des dépôts dans des formes de relief qui reflètent des périodes distinctes d'histoire géo-morphique ;
- À court terme, le dépôt crée un fond des fonctionnalités telles que les dunes, les bars et les séquences de piscine à rapides qui sont étroitement liés au canal modèle et le caractère et la distribution des flux dans le canal ([Gupta, 2011](#)).

## **I.2.2. Types d'érosion**

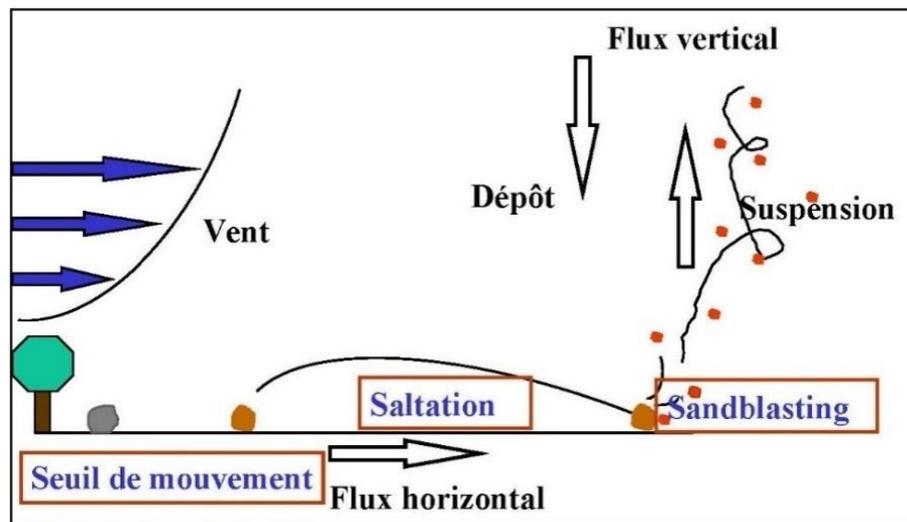
### **I.2.2.1. Erosion éolienne**

Correspond à un phénomène naturel de dégradation des sols. Dans ce type, le vent exerce sur les particules solides au repos une pression sur la surface exposée au flux d'air, appliquée au-dessus du centre de gravité, auquel s'oppose un frottement centré sur la base des particules (figure I-10). Ces deux forces constituent un couple tendant à faire basculer et rouler les particules lourdes (0,5 à 2 mm) ([Roose, 1994](#)).

L'arrachage des particules du sol est déterminé par les forces du vent qui s'exercent à la surface du sol, où la vitesse du vent qui se déplace au-dessus de cette surface du sol devient plus importante dès qu'on s'éloigne du sol. De plus, la différence de vitesse entre la base et le sommet des particules provoque leur aspiration vers le haut. Les particules les plus légères s'élèvent à

la verticale jusqu'à ce que le gradient de vitesse ne les porte plus. Elles retombent alors, poussées par le vent, suivant une trajectoire subhorizontale. En retombant, ces grains de sable transmettent leur énergie à d'autres grains de sable (comme dans un jeu de boules) ou dégradent les agrégats limono-argileux en dégageant de la poussière (Heusch, 1970).

En conditions naturelles, la couverture végétale pérenne (même si elle est faible) constitue une protection significative contre l'érosion éolienne en même temps que l'encroûtement des sols contribue à la stabilité des surfaces non végétalisées en augmentant la cohésion des particules du sol (Bouet et al., 2015).



**Figure I-10.** Principaux modes de transport de particules par le vent (Touré et al., 2018).

#### I.2.2.2. Erosion hydrique

En générale l'érosion du sol survient sous l'effet de trois principaux phénomènes : le vent, l'eau et peut être accélérée par certaines activités agricoles (jachères, cultures en rang, etc.) (MacKay and Hewitt). L'érosion hydrique résulte de nombreux processus qui jouent au niveau de trois phases comme le détachement des particules et le transport solide et la sédimentation (Roose, 1994).

A l'échelle globale ce phénomène des sols résulte de l'impact des eaux de pluies et de ruissellement sur le sol (Boukrim et al., 2016). Elle est largement reconnue comme un processus majeur de dégradation des sols (Maugnard et al., 2013, Li et al., 2007). Ce phénomène très complexe difficilement maîtrisable (El Hafid and Akdim, 2018) ; affecte la qualité des sols en induisant la détérioration de leurs couches superficielles riches en matière organique et ensuite la perte de productivité des sols et à la dégradation des terres (Modeste et al., 2016). Ainsi, génère des conséquences importantes au niveau économique, humain et écologique (Eblin et al., 2017).

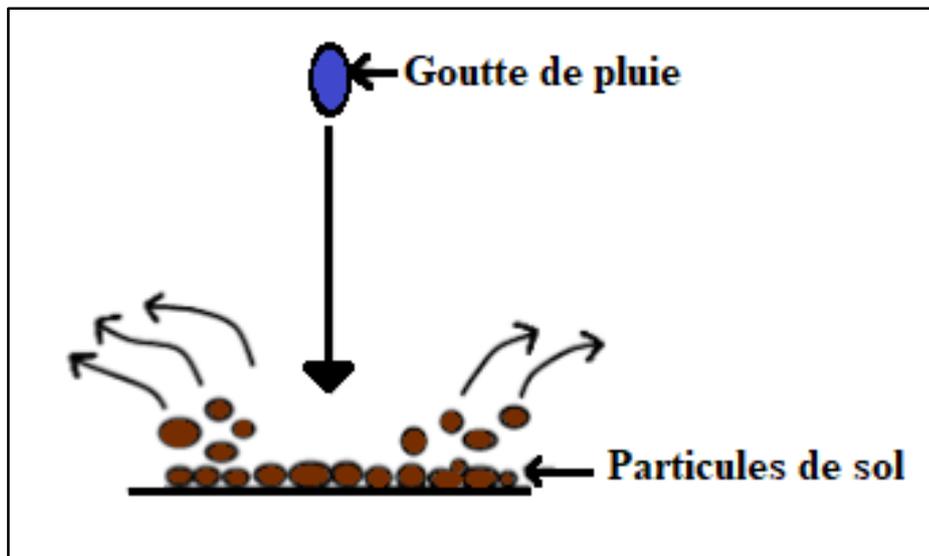
### I.2.3. Forme d'érosion hydrique

#### I.2.3.1. Erosion de rejaillissement (Splash)

Ce phénomène de rejaillissement sous l'impact, ou « splash », déplace les particules sur quelques dizaines de cm, la distance dépend de la masse des particules et de l'angle d'incidence des gouttes de pluie par rapport à la surface (figure I-11) ([Morsli, 2015](#)). L'érosion hydrique s'initie lorsque, sous l'impact des gouttes de pluie, les agrégats de sols se brisent et sont mis en mouvement ([Grangeon, 2012](#)). L'énergie cinétique des gouttes des pluies n'est plus absorbée mais elle est transformée en force de cisaillement qui provoque le détachement et le splash ([Amamra, 2017](#)).

Le rejaillissement peut projeter les particules du sol jusqu'à 0,60 m verticalement et 1,5 m horizontalement ([Maamar kouadri, 2012](#)). L'humidité initiale du sol est une variable importante affectant les procédés d'érosion du sol et peut être responsable d'une grande partie de la variation de l'éclaboussure et la variation du taux d'érosion ([Ben bachir, 2012](#)). L'impact des gouttes de pluies « Splash ». Sur sol nu, ces impacts ont un rôle majeur, car ils provoquent :

- La rupture des agrégats de sol et le rejaillissement des fragments.
- La modification de la surface du sol qui donne naissance à une croûte de battance.
- La modification du régime d'écoulement qui tient principalement à une diminution de la vitesse et une augmentation de la turbulence de l'écoulement ([Lenoble, 2003](#)).



**Figure I-11.** Effet d'une goutte de pluie (effet splash) ([Bouhadeb, 2019](#)).

### I.2.3.2. Erosion en nappe

L'érosion en nappe (figure I-12), qui est l'arrachement plus ou moins uniforme d'une couche mince du sol, constitue la résultante de l'écoulement d'un mélange d'eau et de terre comme une nappe le long de la pente ([Rakotonanahary et al., 2008](#)). Ce type d'érosion est difficilement détectable, mais il peut causer des pertes de sol importantes ([Beaulieu et al., 2007](#)). Ce phénomène est surtout observé sur les pentes faibles où l'eau ne peut se concentrer, le processus de l'érosion en nappe dépend de l'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement et elle dépend de l'énergie cinétique des pluies, c'est-à-dire l'impact des gouttes qui arrachent les particules ([Villemure, 2006a](#)). Il s'agit d'un décapage uniforme de la couche superficielle de terre, où 1 mm sur 1 ha correspond à la perte d'un volume de 10 m<sup>3</sup> de limons fertiles ces dégâts sont pratiquement irréversibles ([Naulin and Triplet, 2003](#)).

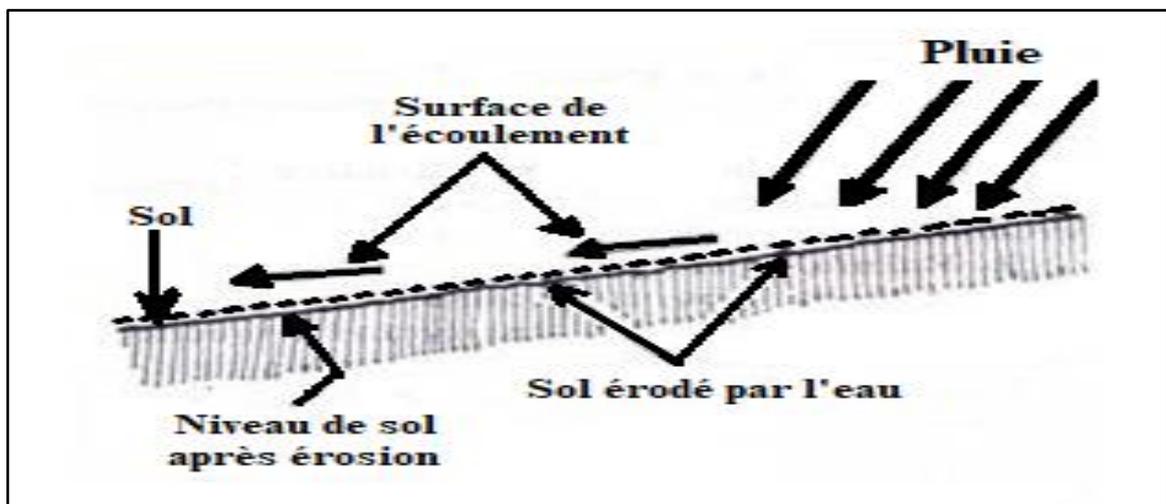


Figure I-12. L'érosion en nappe ([Julien, 2010](#)).

### I.2.3.3. Erosion linéaire

Lorsque le sol n'a plus la capacité d'absorber les précipitations, l'excédent ruisselle. Le ruissellement génère différentes formes d'érosion linéaire (ou érosion concentrée), elle résulte de l'arrachage des particules du sol par l'écoulement rapide de l'eau et se présente sous forme de rigoles, appelées ravines lorsqu'elles sont de grande taille (figure I-13). Elle peut apparaître lorsque l'érosion diffuse alimente les passages de roues des engins agricoles ou les lignes de travail du sol. On parle d'érosion en rigoles parallèles quand elle se manifeste sur un versant et d'érosion concentrée de talweg, quand elle génère des incisions dans le fond des vallons ([Antoni and Darboux, 2009](#)). Les processus d'érosion linéaire se manifestent moins sur les terrains cultivés et se manifestent plus dans les zones aux sols moins érodibles et couverts de végétation protectrice ([Figueiredo and Fonseca, 1997](#)).

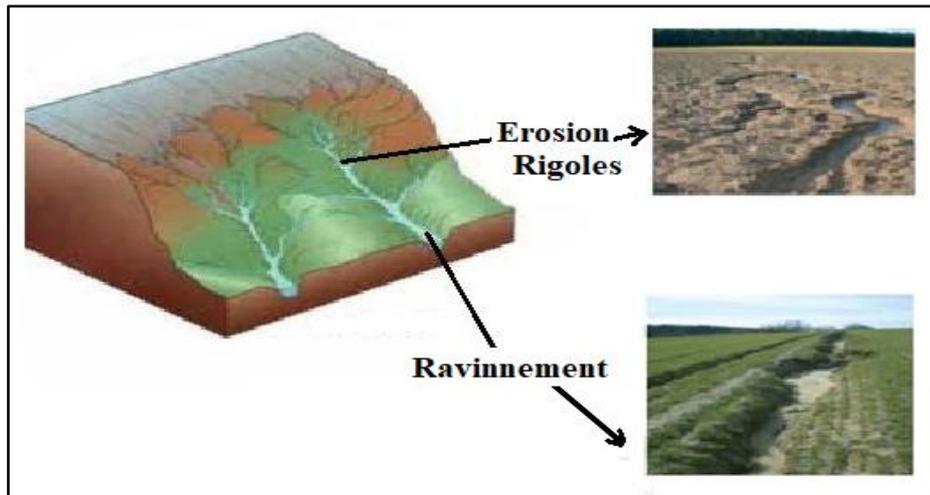
*i. Erosion en griffes et rigoles*

La plupart du temps, l'érosion fluviale est confinée à l'intérieur d'un canal ([Janicke, 2002](#)). L'érosion en rigoles est un aspect de l'érosion linéaire, elle se produit lorsqu'il y a des irrégularités à la surface du sol, souvent dues aux façons culturales. Les eaux se concentrent, coulent suivant les lignes de moindre résistance et le ruissellement acquiert une certaine énergie abrasive qui met en mouvement des particules facilement détachables ([Sabir, 1987](#)). Ce type d'érosion est caractérisée par une érosion en rigoles quasi parallèles, à forte densité mais de dimension et de profondeur modestes, et par une érosion diffuse sur les bandes d'inter rigoles ([Mabit et al., 2002](#)). Impacts de l'érosion des chenaux :

- Sur site
- l'approfondissement et l'élargissement des cours d'eau ;
- perte de terres productives ;
- dissection de paddock et problèmes d'accessibilité ;
- des valeurs de propriété réduites.
- Hors site :
- mauvaise qualité de l'eau ;
- perte d'habitat dans les cours d'eau (remplissage des piscines avec des sédiments) ;
- dommages aux infrastructures publiques ;
- transport accru des nutriments avec ruissellement.

*ii. Erosion en ravine*

L'énergie du ruissellement entraîne le ravinement, et l'humectation des sols peut provoquer des mouvements de masse sur les versants instables ([Roose, 1984b](#)). On peut appeler les ravins lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de centimètres (plus de 50 cm) ([Pinte, 2006](#)). Où la profondeur elle peut atteindre deux mètres ([Dahmani, 2012](#)). Cette érosion est considérée comme la phase la plus destructive de l'érosion hydrique, car elle intéresse les couches profondes du sol, allant jusqu'à la roche mère, elle s'accroît en largeur, en profondeur et en longueur. L'érosion en ravine est influencée par, type des marnes, la pente, l'exposition des versant, l'utilisation des sols, et certainement par l'intensité des pluies, la perméabilité des sols, et le couvert végétal ([Warda and El Houda, 2012](#)).



**Figure I-13.** Les formes d'érosion hydrique par Rigoles et Ravines ([Abdesslam, 2019](#)).

#### I.2.3.4. Erosion en masse

La cause des mouvements de masse (lents ou rapides) est à rechercher dans le déséquilibre entre d'une part, la masse de la couverture pédologique, de l'eau qui s'y trouve stockée et des végétaux qui la couvrent et d'autre part, les forces de frottement de ces matériaux sur le socle de roche altérée en pente sur lequel ils reposent (pente limites de 30 à 40 degrés = 65 %) ([Mansour, 2016](#)). Les mouvements de masse sont liés à des événements pluvieux exceptionnels mais leur déclenchement est souvent provoqué par une intervention humaine, Ce type d'érosion est lié aux massifs montagneux ([Faleh and Maktite, 2014](#)). Il existe de nombreuses causes de masse mouvement, y compris la déforestation, les conditions, dégagement de pente, climat (précipitations / dégel de glace), géologie (couches imperméables à l'eau et gonflement des argiles), des tremblements de terre et des éruptions volcaniques ([Guerra et al., 2017](#)). Il existe différents types de mouvements de masse (figure I-14) :

##### *i. Les glissements lents*

C'est un glissement plus ou moins lent des couches superficielles de la couverture pédologique, généralement sans décollement, qui s'observe assez généralement sur les pentes fortes grâce à la forme couchée des jeunes plants forestiers et à la forme en crosse de la base des arbres adultes.

##### *ii. Les glissements rapides*

Les glissements de terrain en planches sont des décollements d'une couche plus ou moins épaisse de sol, glissant sur un horizon plus compact (souvent de la roche altérée), servant de plan de glissement. Ce phénomène est très courant sur les schistes dont le pendage est parallèle à la topographie (pendage conforme) sur les gneiss et sur les marnes en voie d'altération.

**iii. Les versants moutonnés**

Formes molles apparaissant dans des conditions humides lorsque les horizons superficiels dépassent le point de plasticité et progressent lentement, comme une pâte dentifrice, entre la trame de racines qui retient l'horizon de surface et l'horizon compact imperméable que représente l'altérité des marnes ou des argilites par exemple.

**iv. Les coulées boueuses**

Ce sont des mélanges d'eau et de terre à haute densité ayant dépassé le point de liquidité et qui emportent à grande vitesse des masses considérables de boue et de blocs de roches de taille imposante. Lorsqu'elles viennent de se produire, elles se présentent sous forme d'un canal terminé par une langue de matériaux de texture très hétérogène (cône de déjection).

**v. Les glissements rotationnels en «coups de cuillère »**

Ce sont des glissements où la surface du sol et une partie de la masse glissent en faisant une rotation, de telle sorte qu'il apparaît une contrepenne sur le versant. Il s'agit souvent de toute une série de coups de cuillère, laissant au paysage un aspect moutonné. Au creux du coup de cuillère, on observe généralement une zone humide où croît une végétation adaptée à l'hydromorphie. Il arrive couramment qu'après des périodes très humides, il s'installe un ruissellement sur les bords de la contrepenne et ce ravinement fait progressivement disparaître la contrepenne, ne laissant qu'un creux dans le versant qu'il est difficile de dissocier d'un ravinement ordinaire ([Remmas, 2014](#)).

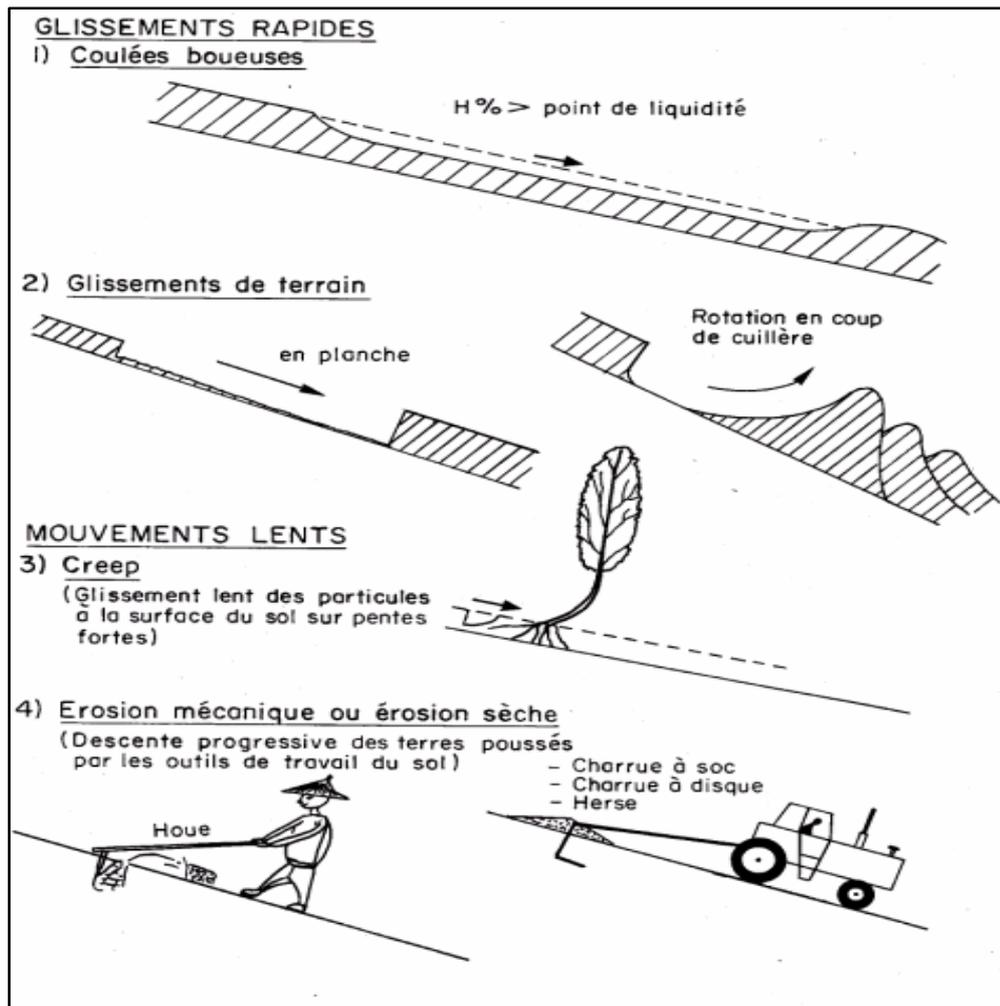


Figure I-14. Différentes formes d'érosion en masse (Roose and De Noni, 2004).

#### I.2.4. Transport Solide

L'érosion, le transport solide et la sédimentation sont la cause de la dégradation des sols agricoles, de l'alluvionnement des retenues et de nombreux dégâts dont les coûts sont considérables (Meddi et al., 1998). Le transport solide est un phénomène complexe (Hamid et al., 2011). La conséquence la plus dramatique de l'érosion des bassins versants et du transport solide est sans aucun doute l'envasement des barrages (Bouchelkia and Remini, 2003). Il s'agit de transport des matériaux solides par les cours d'eau concerne, les boues des particules fines jusqu'aux rochers les plus grossiers, que le courant peut entraîner (Ould kaddour, 2017). Le transport solide s'effectue selon trois modes différents (figure I-15), fonction de la taille des particules :

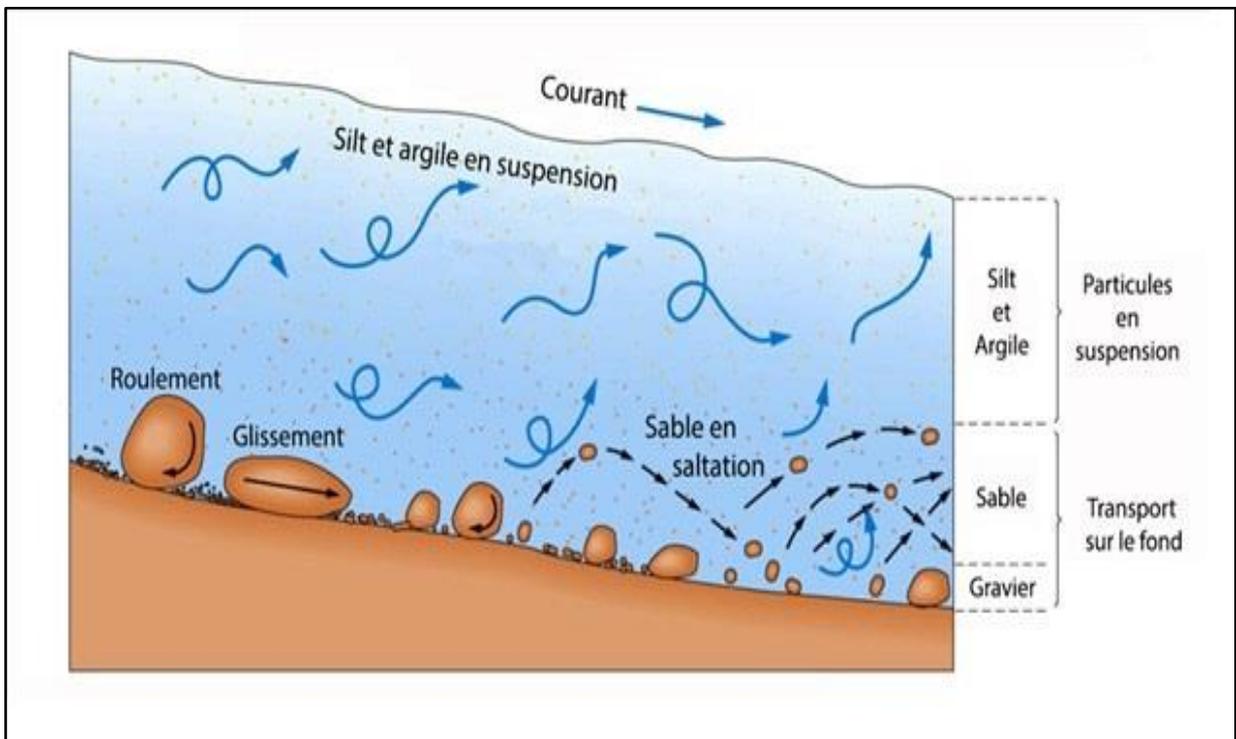
- suspension (transport sur de longues distances dans la masse de l'écoulement) ;
- saltation (mode intermédiaire, sauts sur de courtes distances) ;
- charriage (déplacement des particules au contact du fond) (Carlos, 1996).

### I.2.4.1. Le Transport Par Charriage

Le transport solide par charriage concerne plutôt les particules grossières, typiquement de diamètre supérieur à 0.5 mm ([Jodeau, 2004](#)). Déplacés par roulement, glissement et saltation ([Walid, 2004](#)), ces matériaux trop gros pour être mis en suspension compte tenu de leur densité et de la vitesse du courant ([Nouvelot, 1990](#)). Généralement le charriage concerne plus particulièrement les sables, graviers, galets et blocs ([Degoutte, 2006](#)). Les principaux facteurs transport solide par charriage sont le débit, pente, structure du lit, solides disponibles.

### I.2.4.2. Le Transport Par Suspension

La suspension est l'entraînement des sédiments fins par le courant turbulent, dans toute la section de l'écoulement ([Kerdoud and TATAR, 2018](#)). Ceci concerne les particules petites et légères, dans un écoulement suffisamment intense pour que la turbulence empêche la sédimentation des particules ([Lachaussée, 2018](#)). C'est souvent la seule fraction du débit solide qui puisse être mesurée sans trop de difficultés ([Nouvelot, 1990](#)). Où les mesures directes sur le mélange eau-sédiments fournissent une information sur la quantité de sédiments en suspension (concentration) et sur leurs caractéristiques physiques ([White, 1986](#)). Ce mode de transport concerne les particules relativement fines (argiles, limons et sables fins, etc...) ([Gharbi, 2016](#)).



**Figure I-15.** Les formes et mécanismes de transport solide. ([Modeste Meliho 2016](#)).

### **I.2.5. Facteurs de l'érosion hydrique**

Lorsque l'on aborde le thème de l'érosion des sols et de la dégradation des terres, il est important de considérer les quatre facteurs physiques de base qui conditionnent le régime érosif, à savoir : l'agressivité du climat particulièrement des précipitations, l'érodibilité des sols, la topographie (la raideur des pentes) et la nature et densité du couvert végétale ([Andilyat, 2016](#)). L'érosion hydrique est le résultat de l'interaction combinée ces facteurs naturels et des facteurs anthropiques ([King and Le Bissonnais, 1992](#)).

#### **I.2.5.1. Le climat**

Le climat est le premier facteur de génération de l'érosion ([Villemure, 2006b](#)). Sans précipitation atmosphérique il n'y a pas d'érosion hydrique. Les précipitations atmosphériques, principale cause de l'érosion hydrique, caractérisées par la hauteur de l'averse, son intensité et sa fréquence ([Koudded, 2013](#)). Les précipitations influencent aussi la production de végétation qui, à son tour, contrôle l'apparition de genèse et de l'évolution des sols ([OMM, 2005](#)).

#### **I.2.5.2. L'écoulement superficiel d'eau**

La pluviométrie peut déclencher des phénomènes de ruissellement et d'érosion, soit à cause d'une intensité trop élevée (un sol nu produit du ruissellement dès 1 mm/h), soit par l'accumulation des eaux lors d'une longue période pluvieuse ([Calais, 2013](#)). La texture fine du sol empêche l'infiltration de l'eau et permet le déclenchement du ruissellement ([Hassan et al., 2013](#)). Une surface de sol plus rugueuse freinera le phénomène de ruissellement car elle peut retenir une quantité plus importante d'eau avant le déclenchement du ruissellement ([M'seffar, 2009](#)). Par contre, le sol bien protégé facilite le ruissellement et limite les risques de ruissellement et d'érosion ([Modeste Meliho 2016](#)). généralement les ruissellements les plus élevés ont lieu à une époque où le sol est déjà très humide ([Chebbani et al., 1999](#)).

#### **I.2.5.3. Le sol**

La lithologie et la pédologie ont également une influence sur l'érosion, car le détachement des particules ou l'érodibilité du sol varie suivant ses propriétés physico-chimiques telles que la composition granulométrique (proportion des sables, limons et argiles), la stabilité structurale des agrégats, la porosité, la structure du sol en surface, la teneur en matière organique et la capacité de rétention d'eau du sol ([Hudson, 1993](#)). La texture est le principal facteur qui influence la susceptibilité du sol à l'érosion ([Vallée, 2009](#)). Les pertes de sol peuvent nuire à la qualité, à la structure, à la stabilité et à la texture du sol, toute modification de la texture du sol

peut à son tour nuire à la capacité de rétention d'eau du sol et exposer davantage celui-ci à des conditions extrêmes telles que la sécheresse ([J. Ritter, 2012](#)).

#### **I.2.5.4. Le couvert végétale**

Les facteurs intrinsèques au sol (pente, pédologie, infiltration ...) et les facteurs climatiques affectent directement le ruissellement mais restent insuffisants pour analyser l'érosion du sol ([Sabir, 1987](#), [Montoroi, 2012](#)). Cependant, la densité de la couverture est un facteur qui joue un rôle clé, dans le maintien de la résistance des sols, car plus le couvert végétal est dense plus la protection du sol est forte et plus faible est l'action des précipitations ([Mesrar et al., 2015](#), [Warda and El Houda, 2017](#)). Où la végétation permet de réduire l'érosion des sols par plusieurs mécanismes ([CROM, 2009](#)). Ainsi les zones caractérisées par une faible protection végétale montrent une forte potentialité de perte en sol ([Soti et al., 2005](#), [Dumas, 2010](#)). Le couvert végétal protège le sol de deux manières. D'une part, il augmente l'infiltration, améliore les propriétés (physiques, chimiques) du sol et maintient la cohésion des matériaux grâce au système racinaire. D'autre part, il brise l'énergie cinétique des gouttes de pluie et intercepte une partie des précipitations ([Moss and Green, 1987](#)).

#### **I.2.5.5. La topographie**

Les paramètres de l'érosion sont les différentes informations qui peuvent permettre de caractériser les facteurs de l'érosion, par exemple, la pente est un paramètre pouvant caractériser le facteur topographie ([Le Bissonnais et al., 2002](#)). La pente un des facteurs influençant le plus les pertes de sols par érosion hydrique ([Bleu and Antipolis, 2003](#)). À la fois par la pente elle-même, dont dépendent la vitesse d'écoulement superficiel, et par sa longueur, dont découlent l'accroissement de débit et la prise de vitesse ([Koussa and Bouziane, 2018](#), [Remmas, 2014](#), [Inoubli, 2016](#)). Des mesures réalisées sous pluies naturelles et simulées à l'échelle du mètre carré montrent que l'érosion par la pluie augmente considérablement lorsque la pente passe de 2 à 8% ([Chaplot and Le Bissonnais, 2000](#)). Même la microtopographie du terrain, de son côté, favorise la concentration du ruissellement ([Sorial and Lacharité, 1988](#)).

#### **I.2.5.6. Activités anthropiques**

L'érosion correspond au transfert de particules et d'agrégats sous l'action de deux agents : le vent et l'eau ([Téchené, 2010](#)). Bien que l'érosion hydrique soit un phénomène naturel, l'activité humaine peut en accélérer l'apparition ([Duchemin et al., 2001](#)). Le facteur anthropique reste toutefois le facteur le plus important ([Talbi, 1997](#)). En effet, l'homme peut être à l'origine du déclenchement et de l'accélération de l'érosion hydrique ([Roose, 1994](#)). Ceci est fait par diverses

sortes d'activités humaines, pratiques agricoles, exploitations forestières, pâturages, constructions de routes et de bâtiments, etc. ... tendent à modifier les phénomènes d'érosion, en accélérant souvent de façon considérable le rythme ([Montanarella et al., 2016](#)). Ces activités sont à l'origine de l'apparition et/ou l'augmentation de sol nu avec une superficie de 0,20% ([Ouedraogo et al., 2019](#)).

### **I.2.6. Méthodes de prévision des apports solides**

La dégradation des terres cause d'énormes problèmes socio-économiques et conséquences environnementales. Il existe plusieurs modèles pour prévoir la quantité des apports solides dans les bassins versants. La condition essentielle du suivi de l'érosion est de s'assurer que les données obtenues fournissent les informations spécifiques requises au niveau du site ([Industry-gov-aus, 2016](#)). Le surmonter défi d'érosion nécessite une méthodologie précieuse pour garantir une gestion durable des ressources naturelles (forêts, eau, sol et biodiversité) ([Ousmana et al., 2017](#)).

#### **I.2.6.1. Mesures de terrain**

La quantification des pertes de terres peut se faire par mesures directes sur le terrain grâce à l'installation d'une station de jaugeage ou station hydrologique à l'exutoire de la surface d'étude permettant de suivre les flux d'eau et de matières solides associées ([Ben slimane, 2013](#)).

##### *i. L'étude des débits solides*

L'érosion hydrique se produit lorsque les particules de sol sont détachées sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie et transportées par des écoulements superficiels peu profonds et s'accumulées sous forme de sédiments en aval. Le débit solide est la quantité (en kilogramme) de sédiment (particules, argiles, limons, sables, graviers, ...) transportée par un cours d'eau à une section donnée pendant une unité de temps (seconde) ([Benchettouh, 2019](#)). La mobilisation et le transport des matériaux solides par l'écoulement de l'eau représentent deux phénomènes distincts le débit solide moyen des sédiments en suspension ( $Q_s$ ) qui transitent par une section d'écoulement moyen et il est calculé par le produit de la concentration moyenne des sédiments en suspension ( $C_s$ ) et du débit liquide moyen ( $Q_l$ ) durant une période de temps donnée ([Moufida, 2017](#)). Cette méthode elle permet également, l'établissement des abaques ou modèles mathématiques permettant d'évaluer les apports solides annuels ([Meddi, 2015](#)).

### *ii. Parcelles expérimentales*

Après une longue phase de description des processus d'érosion, les chercheurs ont lancé des études de quantification de l'érosion à diverses échelles, de la parcelle d'une centaine de m<sup>2</sup> ou des micro-bassins de quelques hectares, à de grands bassins versants de milliers de km<sup>2</sup> ([Morsli, 2015](#)). Ces parcelles représentatives pour l'étude de l'érosion hydrique doivent être implantées dans les principales zones où l'on rencontre les sols et les climats générateurs d'érosion et doivent représenter les conditions particulières typiques de la zone (relief, sol, couvert végétal) ainsi que l'agriculture. Ce type de mesure d'érosion sur petites parcelles permet de bien pondérer les différents facteurs qui interviennent dans le phénomène, mais il ne s'agit que d'érosion en nappe ou en rigole, celle qui intéresse essentiellement les agronomes et les pédologues ([Roose and Lelong, 1976](#)). Ces facteurs sont la pluie, les états de surface du sol, la pente et le couvert végétal ([Mabit et al., 2002](#)).

### *iii. Les levés bathymétriques*

Une fois la crue arrivée au niveau des eaux calmes du réservoir, les matériaux grossiers se déposent dans la zone de remous en formant un delta en queue de la retenue, par contre les particules fines sont piégées dans la retenue et commencent à se déposer, se tasser, et à se consolider diminuant ainsi progressivement leur capacité de stockage en eau ([Remini and Remini, 2003](#)). La quantification de ces sédiments est déterminée par bathymétrie, alors que leur densité dépend de la texture, de l'épaisseur des dépôts, de la minéralogie, du niveau de l'eau dans la retenue et de l'âge des dépôts ([Albergel et al., 2003](#)).

Le premier levé bathymétrique réalisé après la première ou la deuxième année d'exploitation est un indicateur qui permet aux barragistes de connaître le degré d'envasement et de choisir les moyens techniques pour réduire les dépôts sédimentaire ([Remini and Benfetta, 2015](#)). La bathymétrie étant la mesure, par sondage, des profondeurs marines ou fluviales, un système de mesure a été mis au point s'appuyant sur le couplage entre un sondeur hydrographique et un GPS différentiel ([Massard, 2007](#)). On attribue aux volumes déversés une concentration moyenne de matières en suspension obtenue par échantillonnage ([Benchettouh, 2019](#)). L'incertitude majeure concernant cette méthode est celle de la densité apparente des sédiments qui est généralement estimée et non pas mesurée, et qui peut varier considérablement non seulement suivant la profondeur mais aussi d'un levé à un autre ([Morris and Fan, 1998](#)).

#### **iv. Les mesures topographiques**

Il s'agit de suivre l'évolution topographique de la surface du sol d'une parcelle de dimension donnée et préalablement délimitée pour éviter l'influence du voisinage. A partir de cette évolution topographique de la surface du sol et par un double intégration, sur la largeur et la longueur, on peut déterminer le volume de sédiments emporté par l'érosion. On peut utiliser soit un maillage de piquets ou perches graduées enfoncés et stabilisés dans le sol ; soit faire les relevés des hauteurs entre la surface du sol et une règle métallique horizontale ([Sabir, 1987](#)).

#### **I.2.6.2. La télédétection**

La cartographie numérique depuis les traitements d'images satellitaires jusqu'au système d'information géographique est de plus en plus utilisée ([Manoa, 2017](#)). L'acquisition de ces données satellites (Landsat TM ou Spot) est une technique et un outil couramment utilisés aujourd'hui, peut servir à la cartographie des risques érosifs ([Mabit et al., 2002](#)). La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la terre sans contact direct ([Journaux, 2014](#)). Elle englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information. ([Kergomard, 1990](#)). Le début de son développement a été conduit principalement par des usages militaires. Plus tard, les données de télédétection sont devenues largement utilisées pour des applications civiles ([Toumi, 2013](#)). Les images de télédétection destinées à l'observation fine de la surface terrestre, y compris les photographies aériennes traditionnelles, sont, sous forme numérique, intégrées aux Systèmes d'Information Géographique afin de le convertir en une base de données qui montre l'état de l'érosion des sols.

#### **I.2.6.3. La modélisation**

La modélisation en hydrologie correspond en général au bassin versant ([E. Ledoux, 2010](#)). On assiste au niveau mondial depuis le début des années 90 à un essor de modèles (empiriques et/ou déterministes) le plus souvent validés sous les conditions morfo-climatiques des États-Unis ([Mabit et al., 2002](#)). Cette démarche est simple d'utilisation mais nécessite une grande quantité de mesures ([Grangeon, 2012](#)). Les avantages de ces utilisations sont qu'elles sont en général considérées comme plus concrètes, plus réelles et plus faciles à comprendre ([White, 1986](#)). Les travaux de modélisation mathématique de l'érosion sont centrés sur les trois aspects les plus importants de l'érosion des versants :

- a. les capacités de transport et de détachement des sols par l'impact des gouttes de pluie ;
- b. les capacités de transport et de détachement des sols par le ruissellement ;
- c. l'interaction entre les capacités de transport et de détachement, déterminant les taux de transport solide et d'érosion ([Borges, 1993](#)).

La simulation de l'érosion et du ruissellement constitue une ébauche essentielle d'étude du phénomène d'érosion, dans cette optique plusieurs modèles ont été élaborés à savoir les modèles empiriques, les modèles déterministes et les modèles experts ([Hadir, 2010](#)).

*i. Les modèles empiriques*

Le modèle empirique USLE est basé sur des lois mathématiques appliquées en utilisant des facteurs calculés et déterminés à l'aide des observations sur terrain et des analyses aux laboratoires. Il reste le modèle mathématique le plus couramment employé pour prédire les pertes dues à l'érosion de surface ([Issa et al., 2016](#)). Ce modèle prévoit le taux annuel moyen d'érosion à long terme en fonction de l'érodabilité des pluies, du type de sol, de la topographie, de l'assolement et des pratiques de gestion des cultures ([El Garouani et al., 2003](#)). Le choix d'une méthode dépend de l'objectif visé que de la pertinence de cette méthode dans les conditions de la zone d'étude et de la faisabilité de son utilisation compte tenu des données disponibles ([Khemiri and Jebari, 2021](#)). Si ces modèles ont l'avantage de pouvoir évaluer les taux d'érosion sur de larges échelles spatiales, les limites principales résultent du manque de données et des incertitudes concernant les modes d'utilisation des terres et les propriétés du sol ([Bopp et al., 2019](#)).

*ii. Les modèles déterministes (physiques)*

Cette méthode de résolution des équations différentielles décrivant les phénomènes physiques connaît, depuis 1970 environ, une extension fantastique, qui va de pair avec le développement et l'accroissement de la puissance des micros ordinateurs ([Hamriche, 2013](#)). Ce sont les modèles qui tiennent compte de la variabilité spatiale de l'érosion et du dépôt dans un bassin versant. Ces modèles physiques représentent les processus d'érosion en intégrant des données issues des modèles numériques d'altitudes et distinguent l'érosion en zone de ruissellement concentré correspondant à la capacité de détachement ainsi que le transport et l'érosion en zone de ruissellement diffus. Les modèles à base physique permettent de représenter les principaux mécanismes de l'érosion. Ces modèles permettent aussi de prédire la répartition du transport solide et liquide pendant un événement pluvieux ([Touihri, 2013](#)). Ces approches effectuent également une modélisation de l'hydrologie et du transport fondée sur des hypothèses ou des descriptions simplificatrices des processus physiques ([J. Bourgois, 1997](#)). Il semble donc que

les modèles à base physique sont plus adéquats pour décrire et prévoir la réponse d'un système à échelle de temps et d'espace réduits, de manière à prendre en compte la complexité des processus. A l'inverse, les modèles empiriques sont mieux adaptés aux estimations de l'érosion à l'échelle régionale ([Chayma, 2016](#)).

#### **I.2.6.4. Traçage des sources de sédiments**

Le traçage des particules en générale repose sur un constat de la géochimie des isotopes radiogéniques concerne deux domaines principaux, la géochronologie et le traçage isotopique. La géochronologie consiste à dater des roches et à identifier différents événements de l'histoire de la Terre, alors que le traçage isotopique s'attache à utiliser les variabilités isotopiques induites au cours du temps par la désintégration des isotopes radiogéniques pour étudier l'origine, les proportions mais aussi la nature et l'intensité des processus d'altération et d'érosion (interactions eau-roches...) ([Le Gall, 2016](#)). La mesure de la redistribution spatiale de l'isotope depuis son introduction majeure dans l'environnement en 1963, permet de distinguer, de quantifier et de localiser les superficies érodées ([Mabit et al., 2002](#)). L'évaluation des pertes en sol est réalisée en appliquant des modèles d'interprétation qui permettent de convertir l'activité du l'isotope que en taux d'érosion ou de déposition du sol ([Zouagui et al., 2012](#)). Cette technique de traçage utilisée consiste aussi à comparer les caractéristiques des matières en suspension collectées dans la rivière durant une crue et la signature des sources potentielles de sédiments au sein du bassin.

Les radioéléments et les sédiments marqués doivent naturellement répondre à un certain nombre de conditions :

- Les matériaux marqués doivent se comporter sous l'action de l'eau de la même façon que les matériaux non marqués ;
- Ils doivent s'en distinguer par leur rayonnement dont l'activité doit pouvoir être détectée sans être dangereuse ;
- Si les éléments radioactifs sont fixés sur les sédiments, ils doivent l'être de façon solide car la mesure n'a de valeur que si l'activité n'est pas modifiée par des actions mécaniques ou chimiques au cours du transport des traceurs ;
- Les propriétés des traceurs ne doivent pas se modifier pendant la durée des expériences. Leur période doit être convenablement choisie en fonction de la durée de l'expérience et de l'intervalle de temps entre les mesures ;
- Les traceurs doivent enfin pouvoir être activés par des moyens simples ([Fournier, 1962](#)).

**I.2.6.5. L'application des formules****i. Formule de Cavrilovic**

$$W = T \times X \times \pi \sqrt{Z^3} \quad \text{Et } Wt = W \times S \dots \dots \dots (I.1)$$

Avec :

- $W$  : Perte en terre (m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/an) ;
- $Wt$  : Perte en terre moyenne sur le bassin versant (m<sup>3</sup>/an) ;
- $T$  : Coefficient de température ;
- $X$  : Pluie moyenne annuelle (mm) ;
- $S$  : Surface du bassin versant (km<sup>2</sup>) ;
- $Z$  : Coefficient de l'érosion relative qui est difficile à estimer.

**ii. Formule de Fournier**

$$As = \frac{1}{36} \times \left( \frac{Pm}{Pam} \right)^2 \times 2.65 \times \left( \frac{h}{S} \right)^2 \times 0.46 \dots \dots \dots (I.2)$$

Avec :

- $As$  : Apport solide spécifique moyen annuel (tonne/km<sup>2</sup>/an) ;
- $Pm$  : Précipitations moyennes mensuelles du mois le plus pluvieux (mm) ;
- $Pam$  : Précipitations moyennes annuelles (mm) ;
- $h$  : Dénivelée moyenne (m) ;
- $S$  : Superficie de bassin versant (km<sup>2</sup>).

**iii. Formule de Tixeront**

Cette formule est spécifique pour l'Algérie et la Tunisie.

$$As = 354 E^{0.15} \quad (\text{Pour les bassins Tunisiens}) \dots \dots \dots (I.3)$$

$$As = 92 E^{0.21} \quad (\text{Pour la région Est Algérien}) \dots \dots \dots (I.4)$$

$$As = 200 E \quad (\text{Pour la région Centre Algérien}) \dots \dots \dots (I.5)$$

**iv. Formule de Sogreah**

Basée sur les données de 30 bassins Algériens, la formule est :

$$As = \alpha E^{0.15} \dots \dots \dots (I.6)$$

Avec :

- $As$  : Apport solide spécifique (tonne/km<sup>2</sup>/an) ;
- $\alpha$  : Coefficient dépendant de la perméabilité du sol ;
- $E$  : Ecoulement annuel (mm).

v. **Formule de l'ANRH**

$$T_{ss} + 26.62IL + 5.07IP + 9.77CT - 593.59 \dots\dots\dots(I.7)$$

Où :

*T<sub>ss</sub>* : Transport solide spécifique moyen annuel (t/km<sup>2</sup>/an)

*IL* : Indice lithologique (%) ;

*IP* : Indice des précipitations (%) ;

*CT* : Coefficient de torrencialité = *Dd.F1*

*Dd* : Densité de drainage (km/km<sup>2</sup>) ;

*F1* : Fréquence des thalwegs élémentaires ;

Cette formule s'applique pour les conditions de *IL*>10% et *Pm*>300mm.

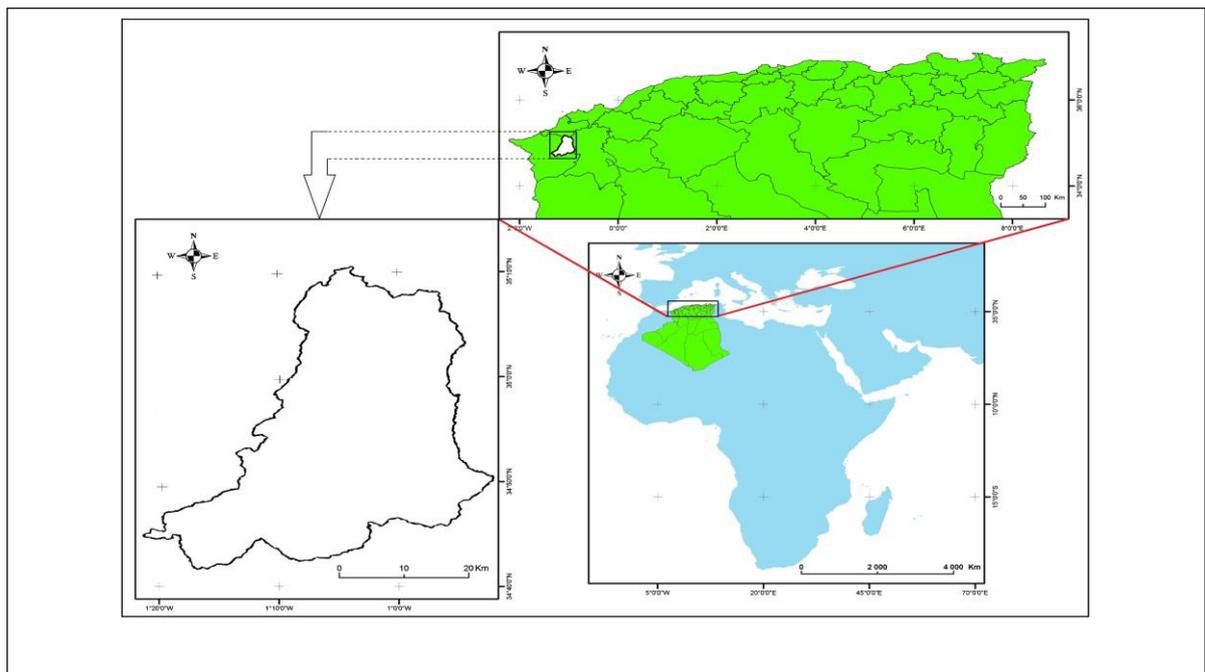


Chapitre II  
Présentation  
de la zone  
d'étude

## I. Présentation de la zone d'étude

### II.1. Situation de bassin versant Isser

La zone de cette étude se situe au nord-ouest de l'Algérie, dans le bassin versant Isser, à l'est de la wilaya de Tlemcen et en amont du barrage (Izdihar Sidi abdelli). S'étend entre  $34^{\circ} 42' 13.22''$  N et  $35^{\circ} 02' 29.32''$  N de latitude et  $1^{\circ} 21' 37.93''$  W et  $0^{\circ} 54' 29.92''$  de longitudes (figure II-1.). Il couvre une superficie de 1141,96 km<sup>2</sup>, avec un périmètre de 217,89 km, et est situé à une altitude allant entre 298 et 1610 m. L'indice de compacité du bassin versant est de 1,8, ce qui confirme la forme allongée du bassin.



**Figure II-1.** Carte de situation géographique de la zone d'étude.

#### II.1.1. Situation administrative

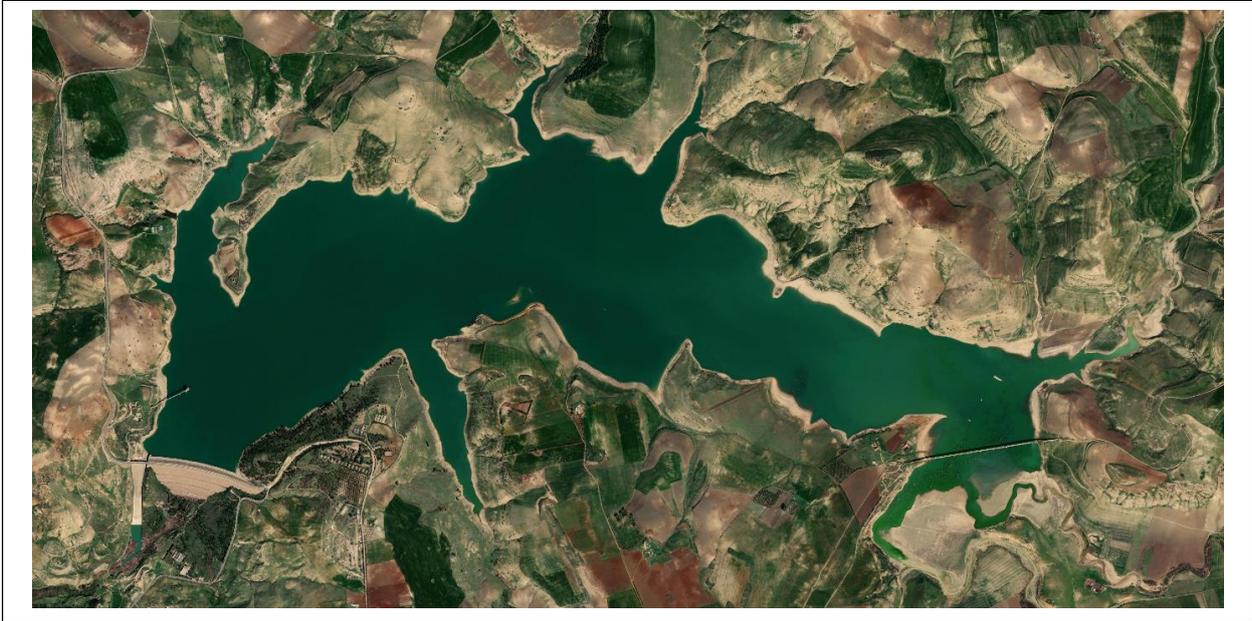
Le bassin versant se situe dans 3 wilayas Tlemcen, Sidi Bel Abbes, Aïn témouchent avec la somme de la surface de wilaya Sidi Bel Abbes et Aïn témouchent représente 10 % de la surface total du bassin (112.92 km<sup>2</sup>) et la wilaya de Tlemcen 90 % de la surface (1032.1 km<sup>2</sup>) (tableau.II-1). Le tableau suivant représente la répartition de la surface de chaque wilaya dans le bassin versant.

**Tableau.II-1.** La répartition de la surface de chaque wilaya dans le bassin versant.

Willaya	surface (km <sup>2</sup> )	pourcentage (%)
Tlemcen	1032.1	90
Sidi Bel Abbes + Ain Timouchent	112.92	10

### II.1.2. Le Barrage du bassin versant d'Isser Izdihar de Sidi Abdelli

Le barrage el Izdihar (figure II-2) est un barrage en terre à noyau mince avec un remblai en amont, ce situe au nord-ouest de l'Algérie dans la willaya de Tlemcen, avec une capacité de 110 Hm<sup>3</sup> et sa profondeur est environ 7m.



**Figure II-2.** Le lac du barrage el Izdihar.

### II.2. Géologie du bassin versant d'Isser

Le choix de ce bassin a été fait sur la base de plusieurs critères tels que la dégradation des sols, la diversité des processus d'agriculture et d'érosion, présence de marnes et lithologie ce qui présente beaucoup de risques d'érosion.

Les sols du bassin (figure II-3) ont une tendance généralement alcaline, que l'on peut subdiviser en quatre groupes :

- Les terrains de nature alluvionnaire, plats ou à faible pente sur lesquels se développent de florissantes cultures arboricoles et dont l'érodabilité est faible ;
- Les terrains calcaires brunifiés où se développent la forêt, des cultures arboricoles et parfois des cultures extensives ;
- Les terrains constitués par des roches calcaréo-gréseuses ou marno-gréseuses. Ces sols sont généralement de couleur rouge où l'on retrouve une forêt dégradée et des cultures extensives ;
- Les terrains squelettiques (grés calcaires, dolomies ou des carapaces calcaires). Ces sols occupant une grande partie du bassin sont généralement nus, à forte pente où l'on retrouve un couvert mort ou un maquis dégradé ([Bouanani, 2004](#)).

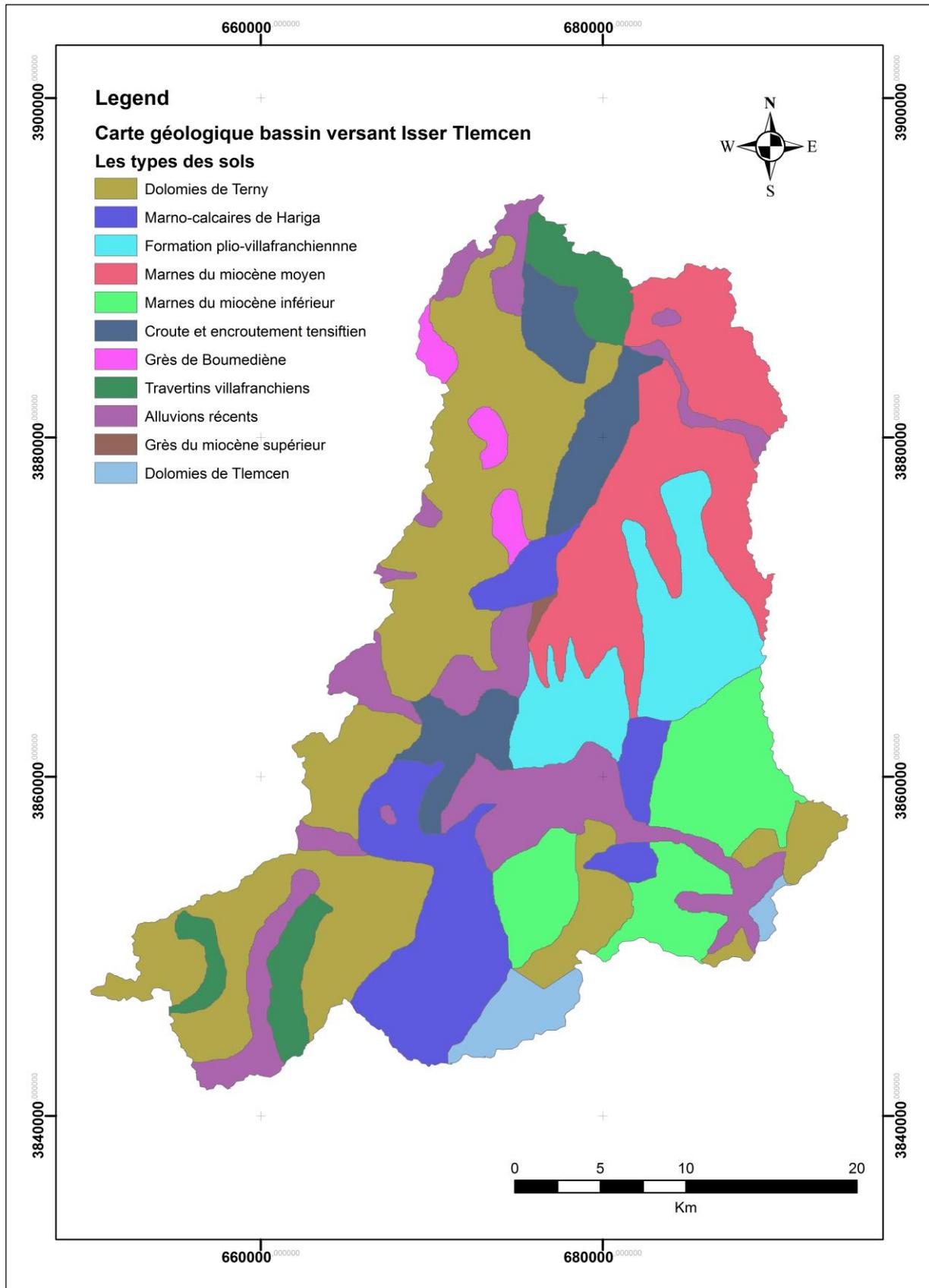
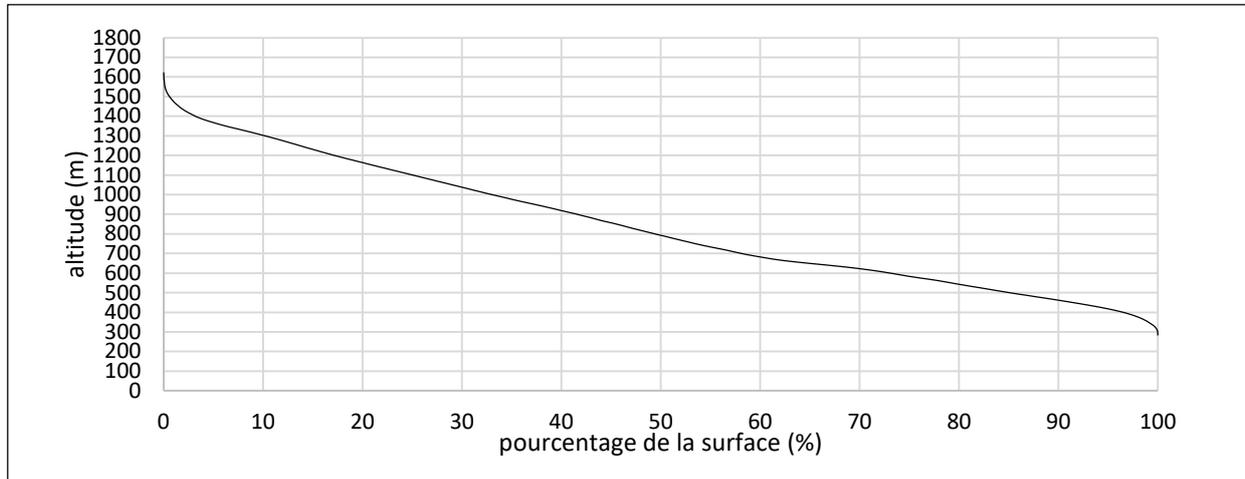


Figure II-3. Carte géologique du bassin versant d'Isser (Amélioré par Chikh Hamza 2019).

### II.3. La topographie du bassin versant

#### II.3.1. Répartition des surfaces et courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique (figure II-4) fournit une vue synthétique de la pente du bassin, ces courbes représentent la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude.



**Figure II-4.** Répartition hypsométriques des aires cumulées du sous bassin versant d'Isser.

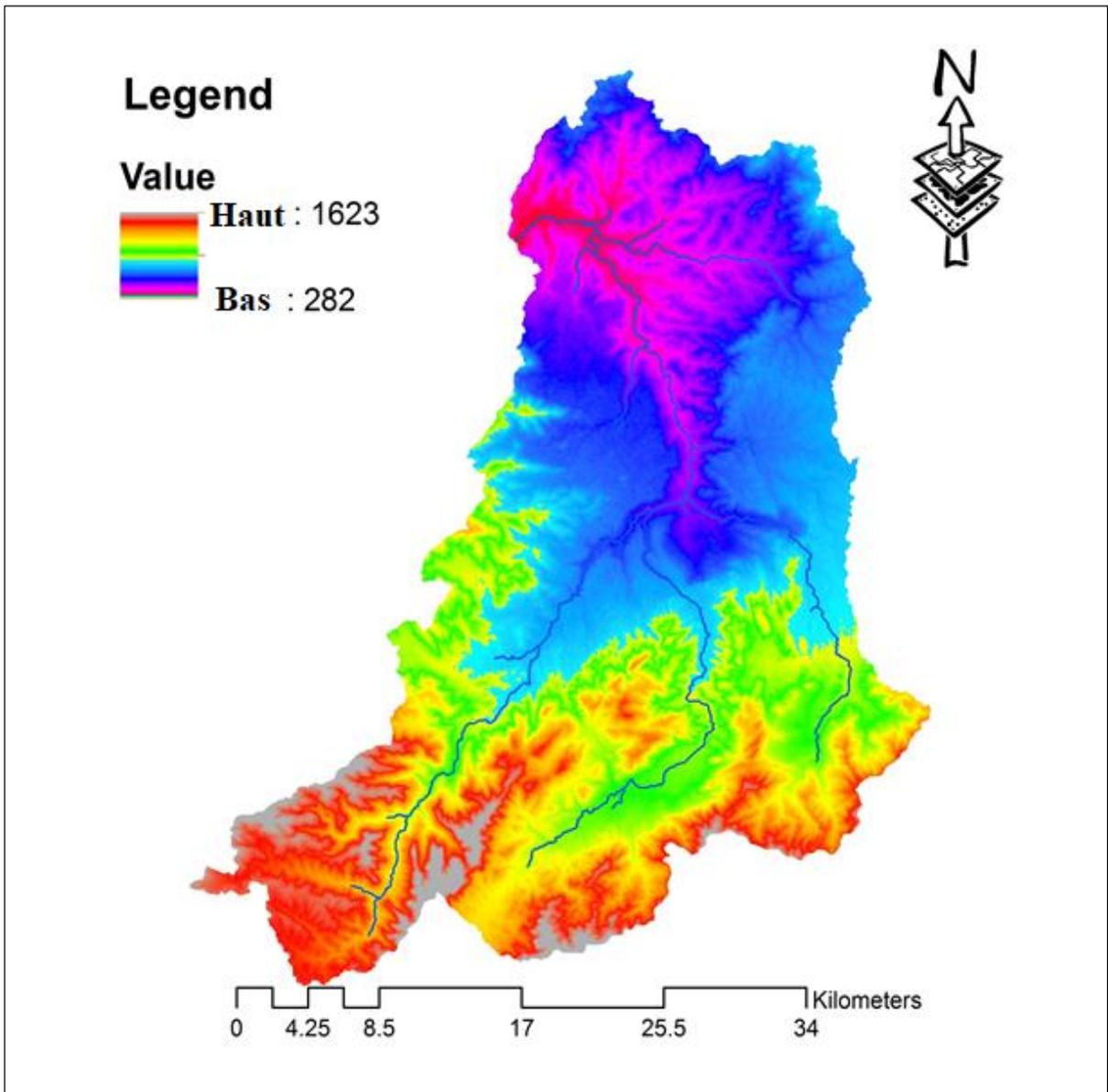
Les résultats de tableau II-2 et les courbes hypsométriques réalisées (figure II-4), montrent que les pentes sont moyennement faibles et la courbe hypsométrique du bassin est une courbe concave, cela explique que le bassin versant Isser est en état de vieillesse.

**Tableau.II-2.** Répartition hypsométriques des aires cumulées du sous bassin versant d'Isser.

tranche d'altitude (m)	% Ai cumulées
1600-1200	17
1200-1000	33
1000-800	50
800-600	74
600-400	97
400-282	100

#### II.3.2. Les pentes

L'analyse des caractéristiques du relief permet de déterminer la morphologie du bassin versant, sa réaction aux phénomènes météorologiques et son comportement hydrologique. De nombreux paramètres climatiques varient en fonction de l'hypsométrie et de la morphométrie du bassin versant (Mesrar, 2016). Selon le tableau II-3 et figure II-5 on remarque que la plus part du bassin 90 % à une pente entre 5 à 60 %.



**Figure II-5.** Carte des altitudes bassin versant Isser.

La partie sud du bassin renferme des pentes très fortes qui dépassent 30% (figure II-4) c'est la partie qui représente les monts de Tlemcen au niveau desquels se dégage l'Oued Isser. Cette classe de pente occupe une grande partie du sous bassin. Vers le centre, on rencontre des pentes qui s'adoucissent à moins de 10%, cette partie correspond aux plaines intérieures.

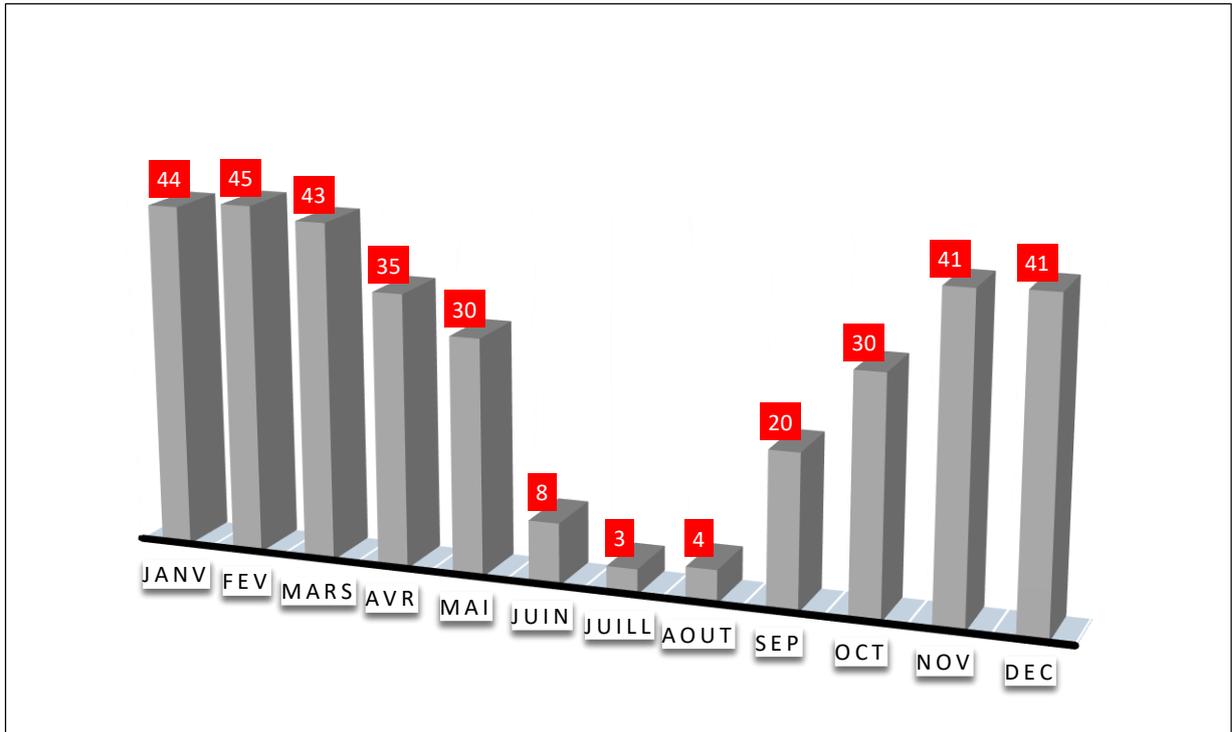
**Tableau.II-3.** Répartition hypsométriques des aires cumulées du sous bassin versant d'Isser.

pente(%)	surface (ha)	pourcentage de la surface (%)
0--5	9644.9283	8.58
5--15	42135.8503	37.49
15--30	38826.16	34.54
30--60	20099.2826	17.88
<60	1697.7278	1.51

## II.4. Climatologie du bassin versant

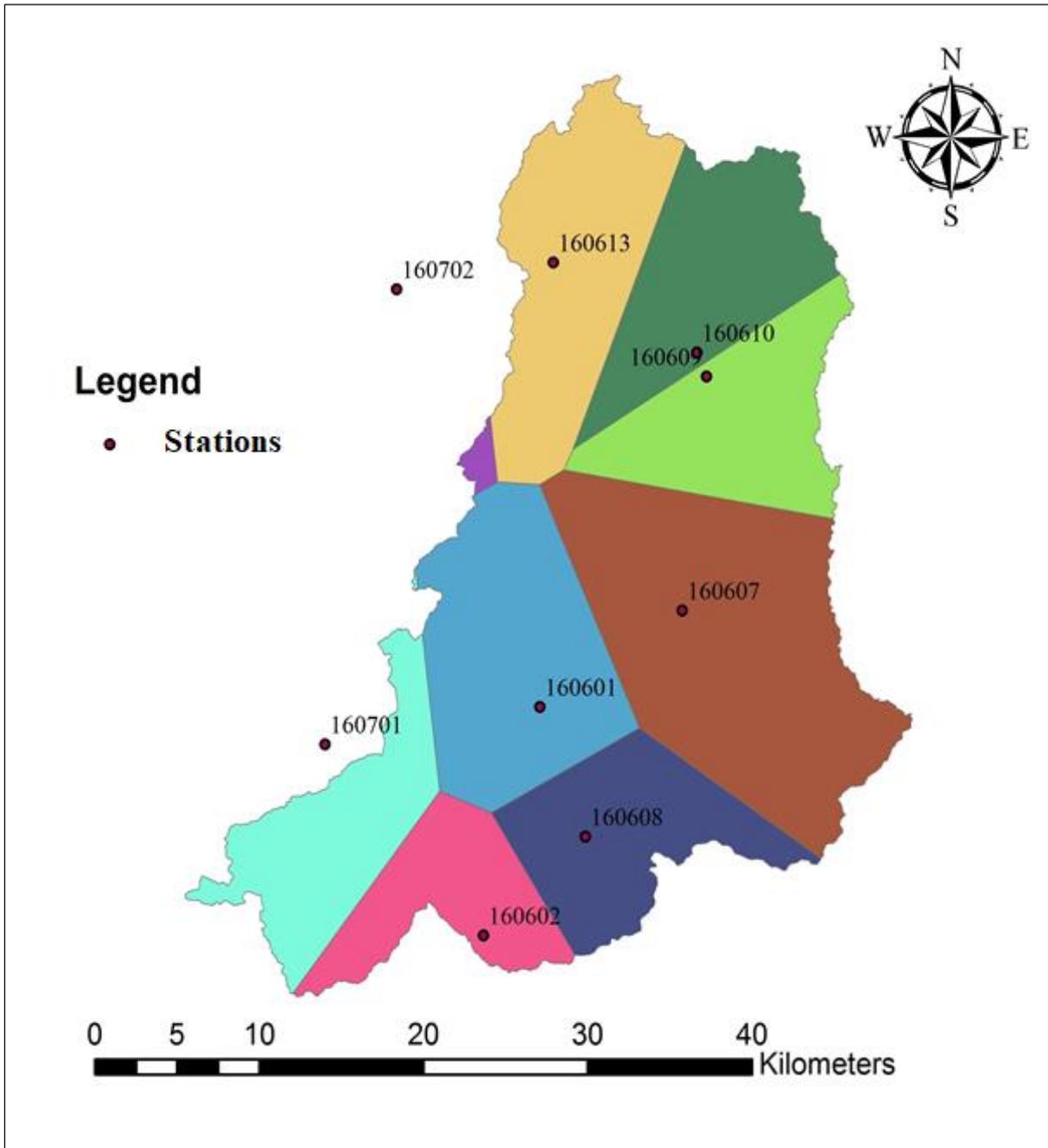
### II.4.1. Précipitation

La figure II-6 montre la précipitation moyenne inter-mensuelle dans le bassin versant du barrage d'Izdihar pendant la période de 30 ans. Les pluies les plus importantes dans le bassin versant sont enregistrées durant les mois de février avec une précipitation de 44.7 mm/ mois. Et Les pluies les plus faibles sont enregistré durant les mois de juin, juillet, aout avec une précipitation varie de 3.2 à 8.0 mm/ mois.



**Figure II-6.** Précipitation moyenne inter-mensuelle.

Le polygones de Thiessen, également appelées diagrammes de Voronoi, sont utilisées pour définir et délimiter des régions proximales autour de points de données individuels en utilisant des limites polygonales. La méthode de Thiessen est une méthode statistique dans laquelle la moyenne pondérée de précipitations mesurées dans des stations pluviométriques du bassin versant. Pour prendre une approche globale du climat du bassin versant on utilise la méthode des polygones de Thiessen (figure II-7.).



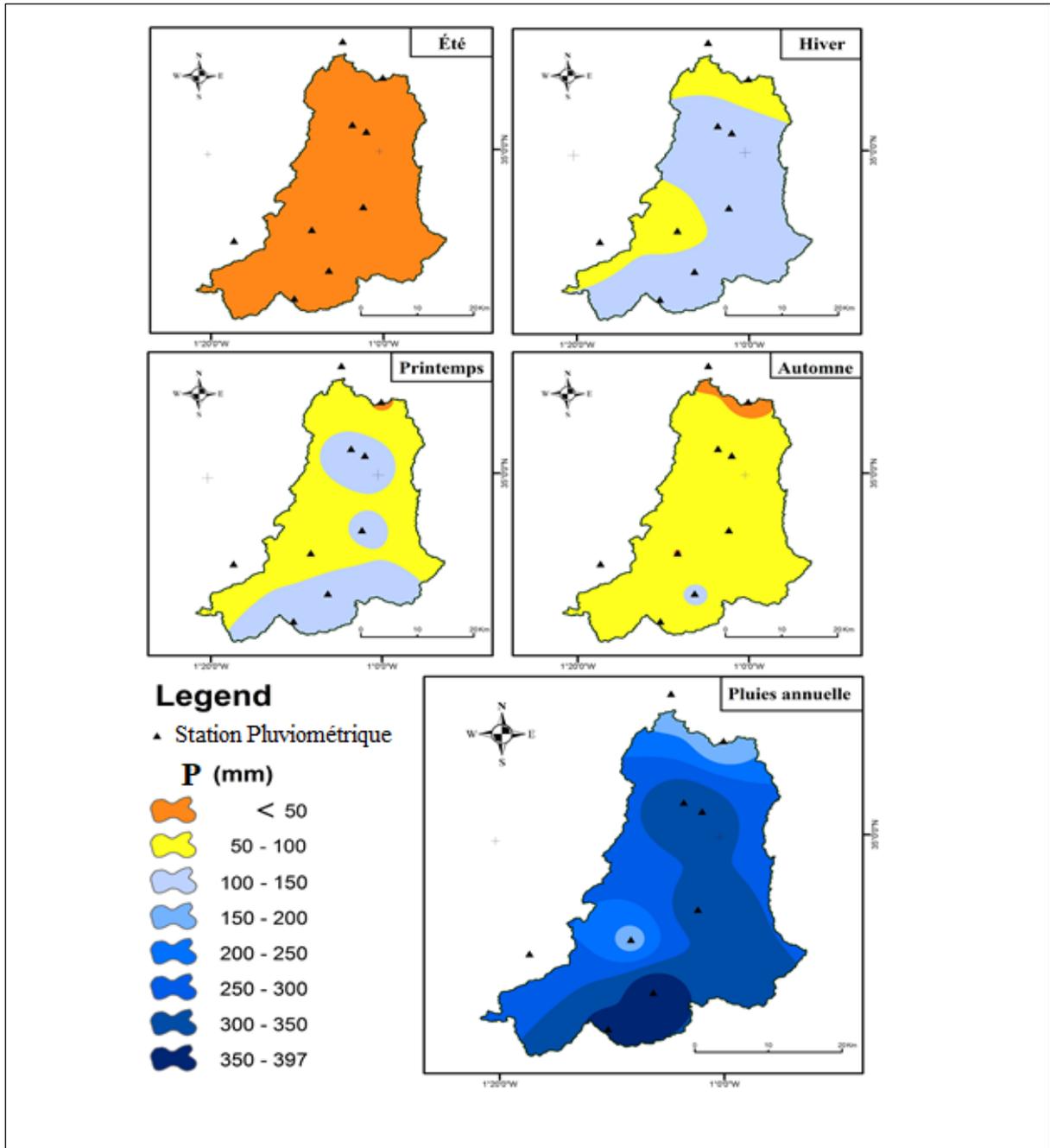
**Figure II-7.** L'application de la méthode de Thiessen sur le bassin versant Isser.

#### II.4.1.1. Analyse des précipitations du bassin versant de Isser

la région d'étude est caractérisé par un climat méditerrané semi-aride, il est bien connu par sa diversité spatio-temporelle ([Morsli et al., 2004](#)). Les précipitations annuelles moyennes varie de 154 à 397 mm (figure II-8.) et peut dépasser 1000 mm les années très humides. Cette zone se compose principalement de marne collines ([Mazour, 1992](#)).

### II.4.1.2. Distribution Spatiale Des Précipitations

Les valeurs moyennes des précipitations pour l'ensemble de la période étudiée (1974-2004) sont calculées pour chacune des 09 stations pluviométriques. Des cartes avec différentes échelles de temps (figure II-8) représentant les précipitations ont ensuite été produites sur la base de ces valeurs moyennes.



**Figure II-8.** Carte des précipitations cumulées annuelles et saisonnières (1974 - 2004)

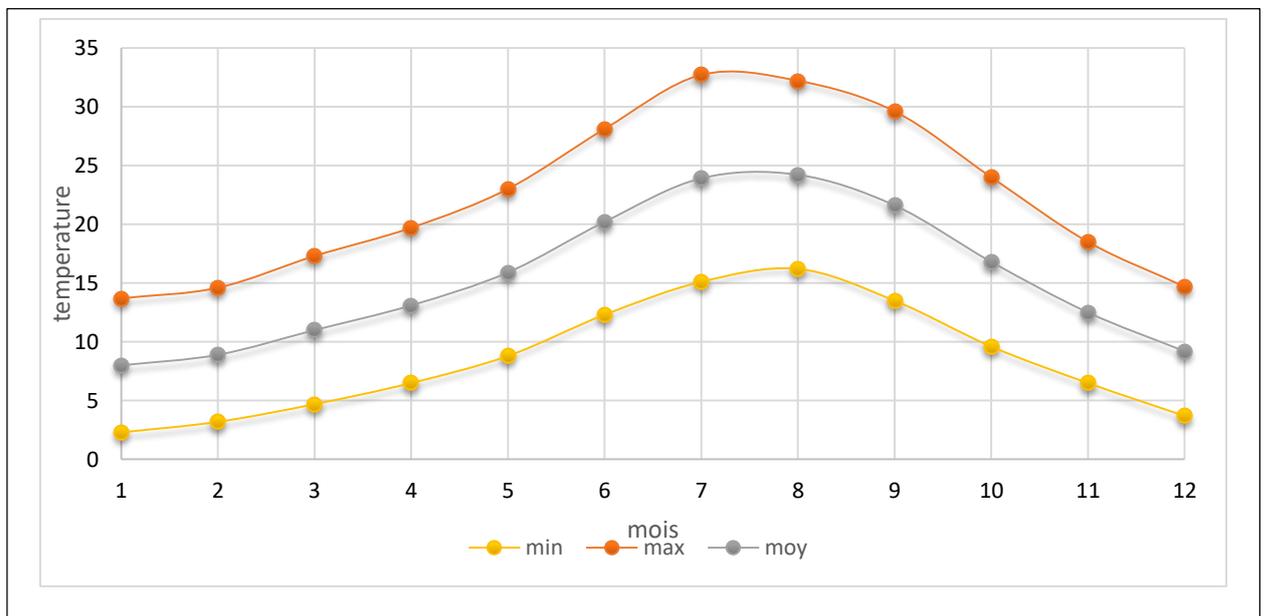
(chikh hamza A)

**II.4.2. La température**

La figure II-9 représente le médian journalier de la température minimal, moyenne et maximal dans le bassin versant dans la période 1969 – 1990. Au niveau du bassin versant, les températures moy, max, min atteignent leurs plus hauts niveaux durant les mois de Juin, Juillet, Aout et septembre avec une température max (28°-32°), moy (20.2°-24°) et min (12°-16°). Les températures les plus basses sont enregistrées durant les mois de novembre, décembre, janvier, février avec une température max (13,7°-18,5°), moy (8°-12,5°) et min (2,3°-6,5°) (tableau.II-4). Une baisse de température au-dessous de la moyenne annuelle qui commence à partir du mois d'Octobre jusqu'au mois d'Avril avec un minimum au mois de Janvier. La température moyenne annuelle au niveau des stations est de 15.4°C.

**Tableau.II-4.** Températures moyennes mensuelles et annuelles des deux stations climatiques Béni Bahdel et Chouly.

station	température	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	jui	juil	aou	annuelle
Chouly (1969 - 1990)	m	13.5	9.6	6.5	3.7	2.3	3.2	4.7	6.5	8.8	12.3	15.1	16.2	8.5
	M	29.6	24	18.5	14.7	13.7	14.6	17.3	19.7	23	28.1	32.7	32.2	22.3
	(M+m)/2	21.6	16.8	12.5	9.2	8	8.9	11	13.1	15.9	20.2	23.9	24.2	15.4



**Figure II-9.** Température moyenne inter-mensuelle.

**II.4.3. Diagramme ombrothermique de Gaussen**

La figure II-10 représenté la variation de température et la précipitation mensuelle dans une échelle standardisée avec  $P= 2T$ , pour déterminé la période sèche et humides fans la zone d'étude ([Bagnouls and Gaussen, 1957](#)).

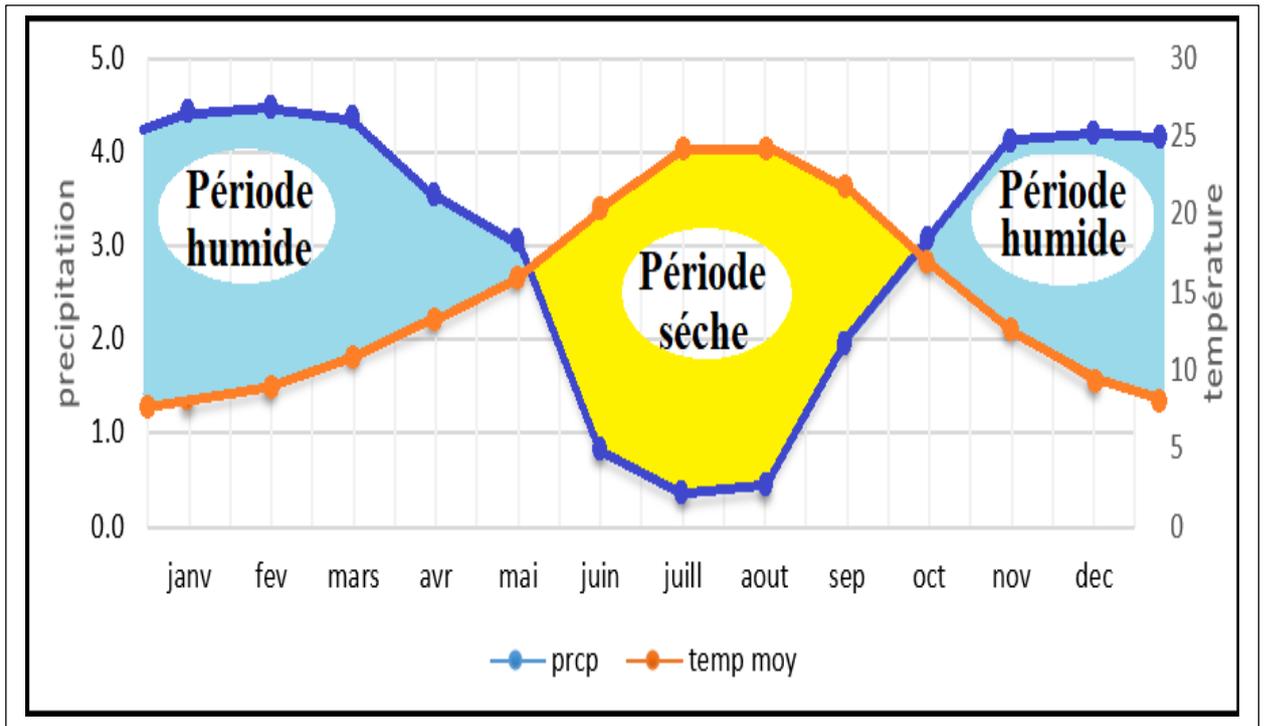


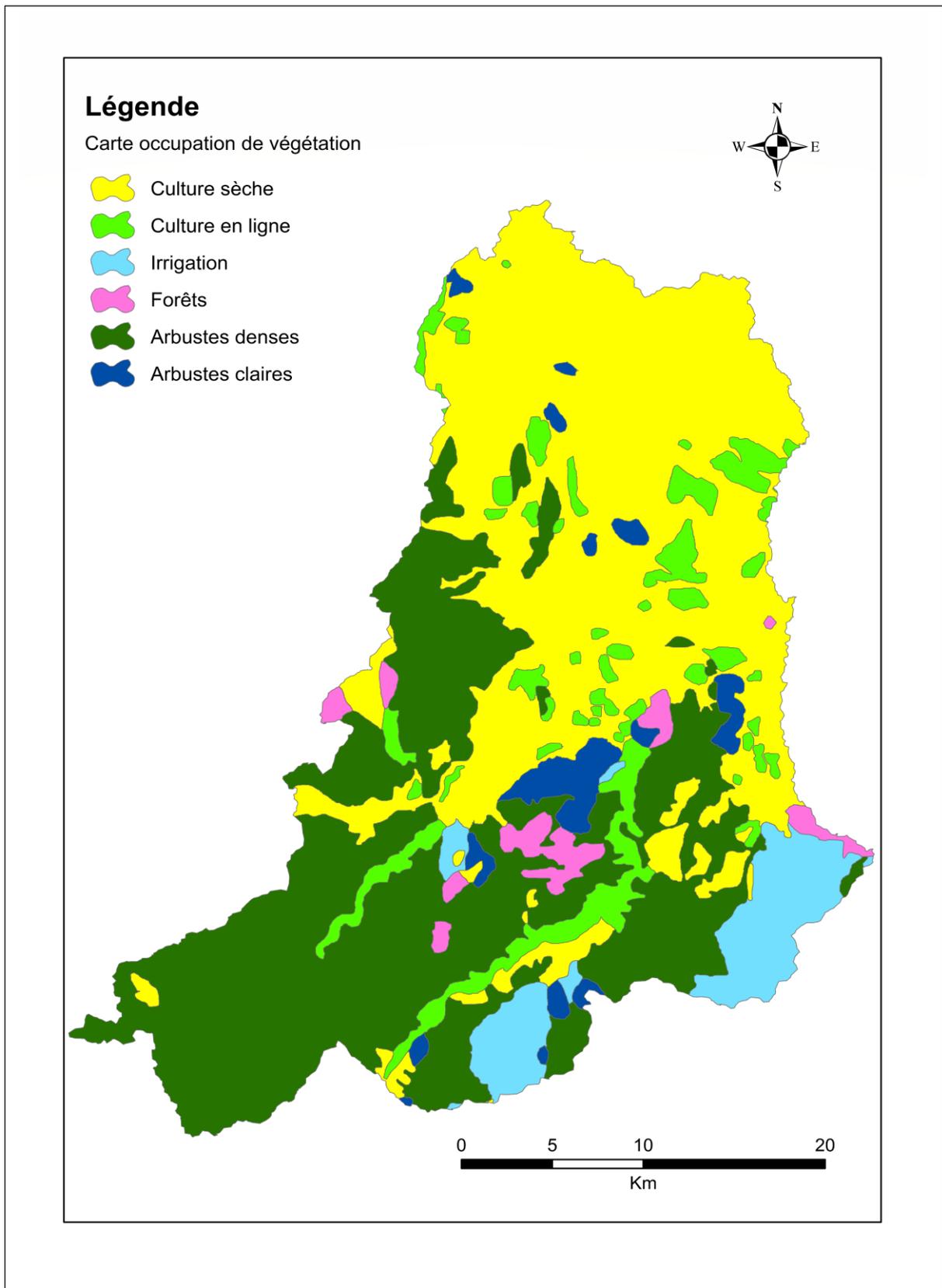
Figure II-10. Diagramme ombrothermique de Gaussen.

**II.5. Végétation et Agriculture**

La formation de végétation est très dégradée et se caractérise par de faibles taux de récupération et d'une mauvaise condition de régénération. La distribution du couvert végétal (tableau.II-5 et figure II-11) au niveau du bassin de l'Isser, la superficie occupée par un couvert insuffisant (couvert forestier dégradé ou mort) s'élève à 44837 ha soit 39.34% de la surface totale. Ce type de couvert végétal prolifère sur les terrains squelettiques parfois à forte pente (> 30%), localisés surtout au Sud. Ces zones sont responsables de la plus grande partie du transport solide vers la cuvette du barrage El Izdihar.

Tableau.II-5. Distribution du couvert végétal dans le bassin versant de l'Oued Isser.

occupation des sols	surfaces (ha)	% des surfaces
culture extensives	42369	23.19
couvert forestier dégradé	38888	34.12
couvert forestier normal	15307	13.43
arboriculture	10474	9.19
couvert mort	5949	5.22
prairies et terrains de pacage	1014	0.89



**Figure II-11.** Carte classique de la distribution végétale dans le bassin versant Isser (Amélioré par Chikh Hamza 2019).



Chapitre III

Matérielles

Et

Méthodes

### III. Matériel et méthode

#### III.1 Cartographie prédictive : potentiel d'érosion / risque d'érosion

##### III.1.1 Modèle PAP / RAC

La diversité de méthodologies et de démarches, bien souvent peu comparables les unes avec les autres étaient utilisées pour cartographier et mesurer les processus d'érosion dans les zones côtières méditerranéennes. C'est pourquoi la nécessité a été ressentie de développer une méthodologie consolidée et de la tester à travers des études de cas avant de la proposer pour usage général. C'est dans cet objectif que le projet de coopération entre le Centre d'Activités Régionales pour le Programme d'Actions Prioritaires (PAP/CAR) et le Plan d'action pour la Méditerranée (PNUE), en collaboration avec la Direction Générale de la Conservation de la Nature (DGCONA) du ministère espagnol de l'Environnement et la Division de la mise en valeur des terres et des eaux (AGL) a été mis en œuvre pour développer une méthodologie consolidée. Cette méthodologie a été testée et appliquée à travers des études de cas en Espagne, en Tunisie et en Turquie. A partir des résultats obtenus, une méthodologie de cartographie des états érosifs. La version finale de ce projet de coopération a été préparée sur la base des recommandations et suggestions réalisés en 1998 ([Griesbach et al., 1998](#)). La version finale été pris comme guide.

L'approche prédictive (modèle PAP/CAR) consiste, d'une part, à intégrer les principaux facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique qui sont la topographie, la lithologie et le couvert végétal, dans le but de réaliser une carte des états de l'érosion potentielle, Elle aboutit à la cartographie d'unités homogènes des états érosifs. Les paramètres spécifiques pris en compte pour la réalisation de la carte des états érosifs sont l'érodibilité des sols et la protection du sol par le couvert végétal.

L'organigramme (figure III-1) montre la description générale de la méthodologie pour la prédiction de l'érosion selon (PAP/CAR). Le produit de cette étape est la cartographie des états érosifs qui fournissant le potentiel et les tendances générales de l'érosion. Les résultats sont obtenus grâce à un traitement de données selon une séquence de 7 opérations différentes :

- *Opérations 1 et 2 : Elaboration des cartes des classes de pentes et de litho-faciès*
- L'établissement et la classification de la carte des pentes de la zone d'étude sont basés sur l'utilisation de SIG à partir d'un MNT de 28 m de résolution (USGS, 2014). La carte des

lithofaciès est préparée à partir des données géologiques. Cette carte permet d'identifier les différents types de roches ou de sédiments/sols de surface, classés selon leur degré relatif de cohésion et de résistance mécanique et technique à l'érosion.

□ *Opération 3 : Carte d'érodibilité*

• La carte d'érodibilité est le résultat de la superposition de la carte des pentes et de la carte des lithofaciès. Les polygones résultant de la superposition des deux cartes de référence sont classés suivant la matrice (M 1).

□ *Opérations 4 et 5 : Cartes d'occupation du sol et de couvert végétal*

• La carte d'occupation des sols (PAP/CAR) a été réalisée à partir d'une exploitation des données de télédétection (images satellitaires Landsat 8) téléchargées à l'USGS en 2016. Elle a subi une classification supervisée avec les logiciels ERDAS et ENVI. La carte de la densité de couvert végétal a été réalisée par le calcul de l'indice normalisé de végétation (NDVI) et leur classement a été réalisé sur la base des pourcentages et des recommandations de (PAP/CAR).

□ *Opération 6 : Carte de protection des sols*

• La carte de degrés de protection des sols est obtenue grâce à l'application de la matrice (M 2) et un assemblage entre la carte d'occupation des sols et de la densité de couvert végétal.

□ *Opération 7 : Carte des états érosifs*

• La carte des états érosifs est le produit final de la cartographie prédictive d'érosion selon (PAP/CAR), résultant de la superposition de la carte d'érodibilité et de la carte des degrés de protection des sols. La superposition se fait en appliquant la matrice (M 3).

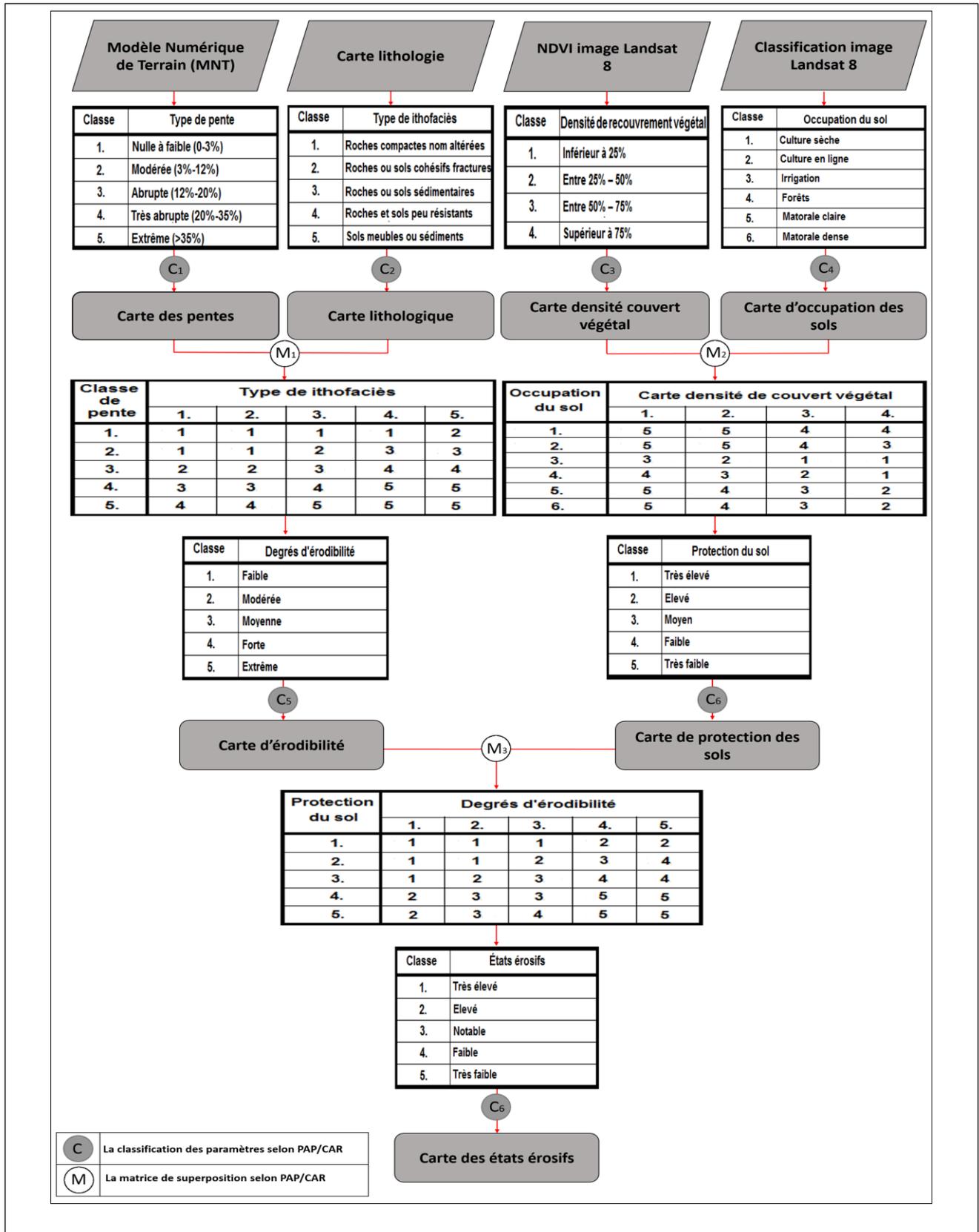


Figure III-1. Organigramme des étapes utilisées dans le modèle PAP / RAC.

## III.2. Cartographie quantitative

### III.2.1. Équation universelle révisée de perte de sol

Le modèle empirique de l'érosion du sol révisé (Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)) a été appliqué. Jusqu'à aujourd'hui, parmi les meilleures descriptions de l'influence quantitative des principaux facteurs d'érosion et la plus largement utilisé sur d'autres continents est l'équation universelle de perte de sol ([Roose, 1977](#), [Kubátová et al., 2009](#)). Malgré diverses tentatives de modélisation, on n'a pas encore trouvé un modèle physique plus robuste et applicable dans la majorité des pays où l'érosion est très préoccupante ([Roose and De Noni, 2004](#)). Cette équation qui a été établie par ([Wischmeier and Smith, 1978](#), [Wischmeier and Smith, 1958](#)) a ensuite été révisé par ([Renard, 1997](#)); et a été utilisé dans beaucoup de pays dans le monde. Il s'agit d'un fusionnement de cinq facteurs (figure III-3) qui ont une intervention directe dans l'érosion hydrique : le facteur climatique, la topographique, lithologique, la couverture des sols, et le facteur des pratiques de conservations mises en place. L'équation a été écrite sur la forme suivante :

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \dots \dots \dots (II.1)$$

Où A est le taux annuel moyen à long terme d'érosion des sols tonne par hectare et par an.

#### *i. Facteur R*

Le facteur R est une mesure de la quantité annuelle totale de pluie érosive varie selon l'énergie et l'intensité des pluies. Pour calculer ce paramètre, nous avons utilisé la formule alternative de Rango et Arnoldus (1987) au lieu de l'équation mère par le manque des données. Cette équation a été utilisée par de nombreux chercheurs ([Yjjou et al., 2012](#), [Markhi et al., 2015](#), [Rakotovao Andrianavah, 2015](#), [Modeste et al., 2016](#), [Gaubl et al., 2017](#)).

$$\text{Log } R = 1,74 \text{ Log } \sum_{i=1}^{12} (P_i^2 / P) + 1,29 \dots \dots \dots (II.2)$$

Où  $P_i$  est la moyenne des précipitations mensuelles (mm), et P la précipitation annuelle (mm). Nous nous sommes appuyés pour le calcul du facteur climatique sur 25 stations de mesures pluviométriques entourant notre région. Le nombre d'années de mesure est compris entre 10 et 96 ans, mais plus de 90% dépasse 30 ans.

#### *ii. Facteur K*

Indice d'érodibilité K est une mesure quantitative de la sensibilité ou de la résistance inhérente d'un sol à l'érosion, il dépend essentiellement de la texture, du taux de matières organiques, de

la stabilité des agrégats et de la perméabilité de la couche superficielle des sols ([Morsli et al., 2004](#)). L'équation initialement proposée par J.R.Williams (1995) pour le calcul du facteur K, a été adopté et a été largement utilisé par plusieurs chercheurs ([Chalov et al., 2017](#), [de Mello et al., 2017](#), [Kaffas and Hrissanthou, 2017](#), [Thuy and Lee, 2017](#)). Ce facteur s'exprime comme:

$$K = fcsand \times fcl - si \times forgc \times fhisand \dots \dots \dots (II.3)$$

Où fcsand, fcl-si, forgc et fhisand sont des facteurs qui contrôlent la sensibilité à l'érosion ; ce sont le facteur de sable grossier, le facteur d'argile et de limon, le facteur de carbone organique et le sable facteur, respectivement.

La carte géologique de la région et la FAO-ISRIC (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture -Base de données du Centre international d'information et de référence sur les sols) (2012) ont été utilisés pour extraire les caractéristiques du sol et établir la carte d'érodibilité. Des enquêtes sur le terrain ont été validé les données.

**iii. Facteur LS**

Le facteur topographique est une mesure des effets de l'angle et de la longueur de la pente, qu'ils influent sur le rendement total des sédiments ([Prasannakumar et al., 2012](#)). Plus la pente est élevée et longue plus l'érosion augmente. Le calcul du facteur (L) nécessite différentes équations ([Renard, 1997](#)). L'équations 4 ([Wischmeier and Smith, 1978](#)), l'équation 5 ([Foster et al., 1977](#)) et l'équation 6 ([McCool et al., 1989](#)) ont utilisé pour le calcul du facteur (L). Alors que les équations 7 et 8 ([McCool et al., 1987](#)) sont utilisé pour le calcul du facteur (S). Différents auteurs ont utilisé cette méthode ([Di Stefano et al., 2000](#), [Van Remortel et al., 2001](#), [Miller et al., 2003](#), [Winchell et al., 2008](#), [Lee and Won, 2012](#), [Naqvi et al., 2013](#)).

$$L = (\lambda / (72.6))^m \dots \dots \dots (II.4)$$

$$m = \beta / (1 + \beta) \dots \dots \dots (II.5)$$

$$\beta = (\sin \theta / 0.0896) / [3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56] \dots \dots \dots (II.6)$$

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03S < 9 \% \dots \dots \dots (II.7)$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.50S \geq 9 \% \dots \dots \dots (II.8)$$

Où

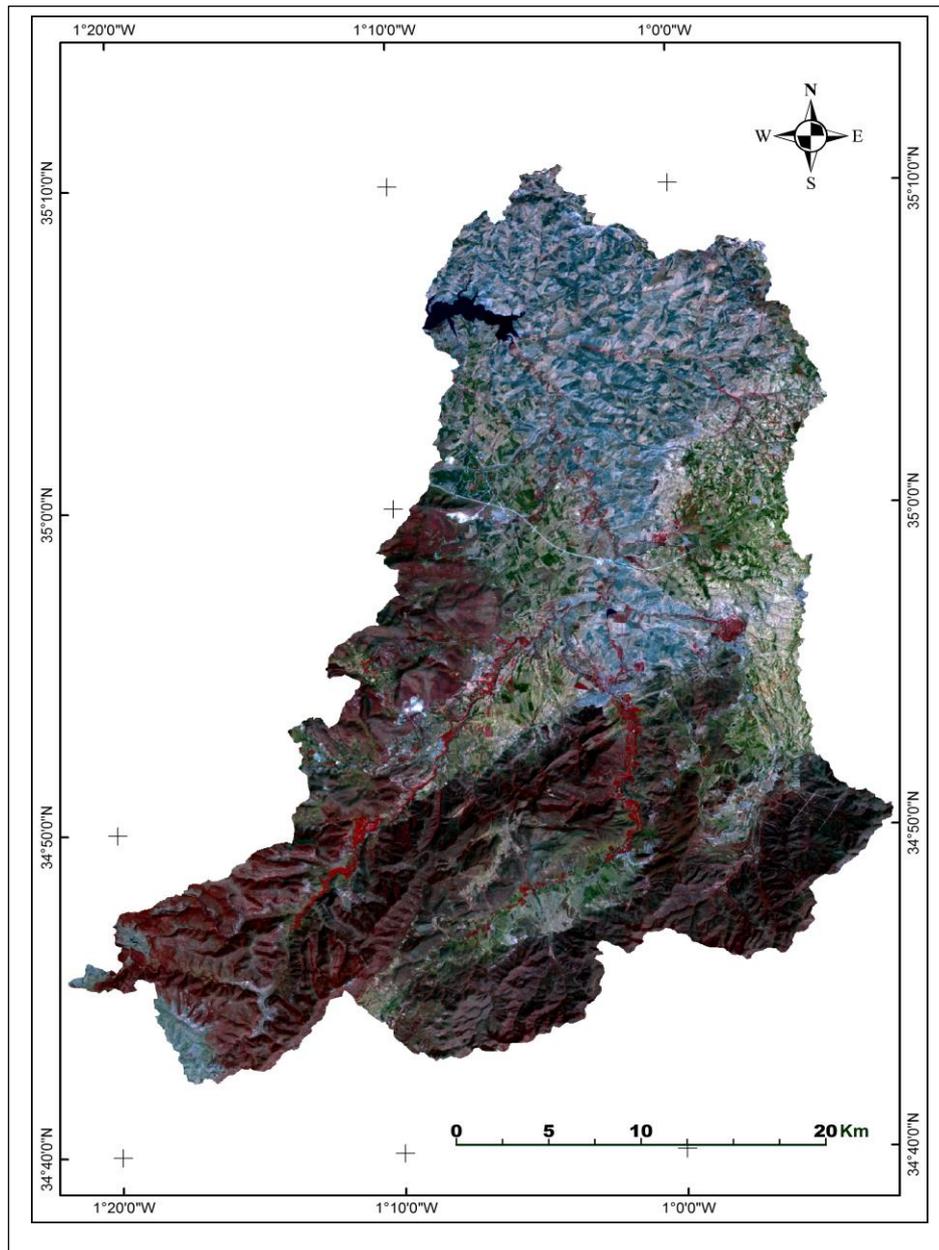
$L$  est le facteur de longueur de pente,  $S$  est la pente de pente facteur,  $\lambda$  est la longueur de la pente du champ (m),  $m$  est l'exposant sans dimension qui dépend de la pente, et  $\theta$  est l'angle d'inclinaison.

#### *iv. Facteur C*

La couverture végétale représenté par un facteur (C) est l'élément essentiel de la protection du sol contre l'érosion ([Rey et al., 2004](#), [Mostephaoui et al., 2013](#)). La variation de la valeur facteur C dépend de l'utilisation du sol et des informations relatives à la couverture végétation ([Pandey et al., 2007](#)). L'un des principaux objectifs de ce travail est de contribuer à la connaissance de l'impact de la couverture végétale sur l'érosion.

Suite à la variation de l'occupation du sol et à l'évolution du couvert végétal durant la saison des pluies et son interaction avec les techniques culturales, l'érosion est irrégulière à l'échelle annuelle ([Morsli, 2015](#)). La variation du couvert végétal durant les saisons qui est lié à la variation climatique saisonnière, crée un changement de la sensibilité à l'érosion. Ceci nous a mené à étudier la sensibilité à l'érosion pour les deux périodes séparément, à savoir la période humide et la période sèche.

Deux approches ont été utilisées pour l'élaboration des cartes d'occupation du sol et l'estimation du facteur C. La première approche est la cartographie classique avec la réalisation d'une carte d'occupation du sol que nous l'avons complétée par la classification numérique supervisée d'images satellitaires (Landsat 8) (figure III-2). Le logiciel ENVI a été utilisé pour le traitement d'images (assemblage des bandes, extraction de la zone d'étude, la classification). Cette méthode est basée sur la distribution spatiale des valeurs prédéterminées (tableau.III-1). Ces valeurs sont issus de plusieurs travaux de recherche ([Roose, 1986](#), [El Garouani et al., 2008](#), [Azaiez, 2015](#), [Preiti et al., 2017](#)).



**Figure III-2.** Image satellite (Landsat 8) de la zone d'étude.

Les études antérieures utilisent une seule carte de végétation à l'échelle de l'année. La nouveauté de cette œuvre réside dans le calcul du facteur C pour deux saisons différentes sur le point couverture du sol, saison sèche et saison humide. Le facteur couvert végétal change d'une saison à l'autre et par conséquent la sensibilité aux changements d'érosion. Si le changement du facteur C est pris en compte au cours de l'année, les résultats ne seraient pas fiables. Pour cela, il a été décidé de remplacer les valeurs prédéterminées (tableau.III-1) dans les cultures terre (facteur C = 0,28) pendant la période humide par les valeurs des terres non cultivées (facteur C = 0,75). Pendant la période sèche, la terre occupée par les céréales est désormais vide et peut donc être considéré comme similaire à des terres non cultivées. Cette procédure a permis différencier les sols en termes des périodes sèches et humides.

**Tableau.III-1.** Valeurs du facteur C pour chaque type d'occupation du sol.

Types d'utilisation des terres	Factor C
Terrains urbains	1.00
Terres non cultivées	0.75
Agriculture	0.28
Reboisement	0.15
Forêt claire	0.08
forêt	0.04

La seconde approche est basée sur le calcul de l'NDVI, ce qui est généralement utilisé dans les études environnementales et en particulier dans les travaux qui visent l'évaluation et la quantification des risques d'érosions ([Jain and Goel, 2002](#), [Lin et al., 2006](#), [Ouyang et al., 2010](#), [Vijith et al., 2012](#), [Elaloui et al., 2015](#), [El Morabet et al., 2016](#)). Le logiciel Arc-GIS est utilisé pour estimer l'indice de végétation NDVI et facteur C. Le calcul de l'NDVI avec l'équation 9 nécessite la bande rouge (RB) et la bande proche de l'infrarouge (NIRB) ([Rouse et al., 1974](#)). L'équation 10 ([Van der Knijff et al., 1999](#)), qui est utilisée dans le calcul du facteur C, a été utilisée par de nombreux chercheurs ([Andriamasimanana, 2011](#), [Khire and Agarwadkar, 2014](#), [Ferreira et al., 2015](#), [Belasri and Lakhouili, 2016](#), [Benchettouh et al., 2017](#)).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{BPIR} - \text{BR}}{\text{BPIR} + \text{BR}} \dots \dots \dots \text{(II.9)}$$

$$C = e^{\left(-\alpha \frac{\text{NDVI}}{\beta - \text{NDVI}}\right)} \dots \dots \dots \text{(II.10)}$$

Où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres qui déterminent la forme de la courbe de NDVI en fonction du facteur C. Selon Van der Knijff et al. (1999) ([Van der Knijff et al., 1999](#)), 2 et 1 sont les meilleures valeurs pour les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$ , respectivement, l'équation donnée, où NDVI est la différence normalisée de l'indice de végétation, RB est une bande rouge et NIRB est la bande proche infrarouge.

#### v. Facteur P

Représente les pratiques de soutien pour réduire le taux d'érosion tels que la culture en pente transversale, la culture en courbes de niveau, la culture en bandes alternantes, l'aménagement de terrasses et l'aménagement de voies. Plus la valeur P est faible, plus la pratique de conservation est efficace pour réduire l'érosion du sol ([Millward and Mersey, 1999](#)). Les enquêtes réalisées dans le terrain ont montré l'absence de ce type de pratique dans le bassin versant d'Isser. Le facteur P a été supposé être égal à 1,00 dans ce travail, cela a été le cas dans plusieurs études ([Nelson, 2002](#), [Kim et al., 2005](#), [Smith et al., 2007](#), [Kouli et al., 2009](#), [Kuo et al., 2016](#), [Abdo and Salloum, 2017](#)).

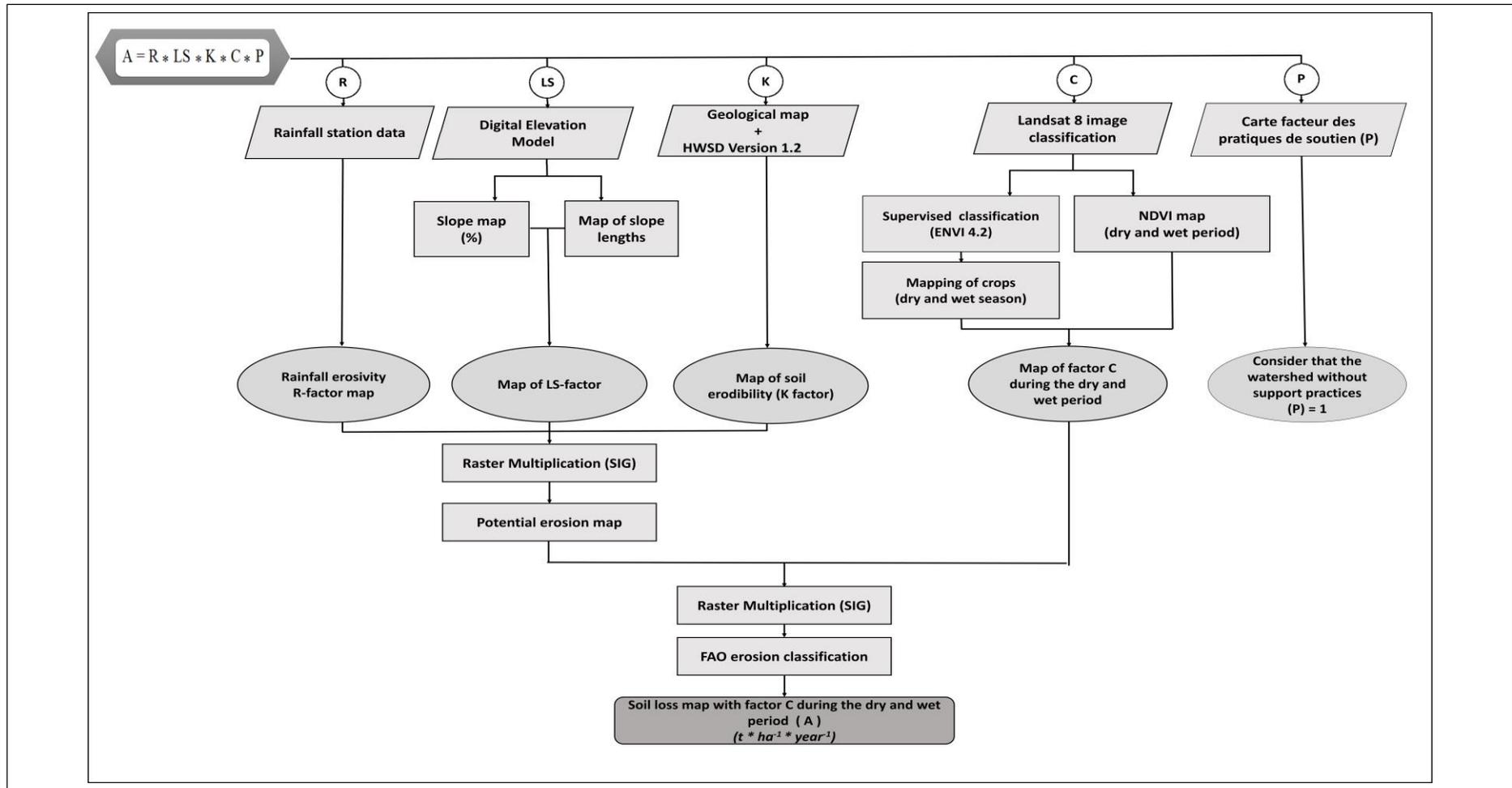


Figure III-3. Organigramme des étapes utilisées dans RUSLE.

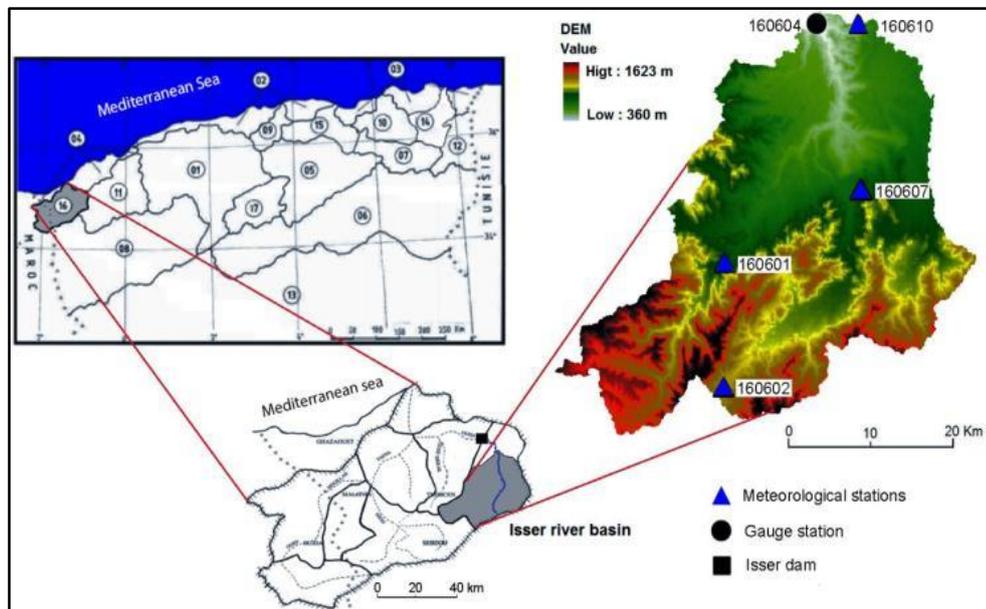
### III.2.2. Le modèle MUSEL (Modified Universal Soil Loss Equation)

La perte de sol présente un comportement saisonnier important, liés à l'intensité des précipitations et de la couverture végétale, ce qui a un impact sur le rendement des sédiments. C'est surtout pertinent dans les environnements méditerranéens, qui caractérisé par la forte variabilité des précipitations, les épisodes pluvieux intenses et des alternances de cycles de sécheresse sévère ([Meddi et al., 2009](#), [Tramblay et al., 2013](#), [Zettam et al., 2017](#)). Dans la région du Maghreb, des études antérieures ont mis en évidence la relation entre la dynamique érosive et les pratiques agricoles, l'érodibilité des roches et le ruissellement annuel ([Probst and Suchet, 1992](#)).

L'évaluation des taux réels de perte de sol et d'érosion tout au long des campagnes sur le terrain est généralement coûteuse et prend du temps ([Barthes and Roose, 2002](#)). En outre, la grande amplitude spatiale et temporelle de la variabilité de l'érosion des sols, notamment en milieu méditerranéen, limite les extrapolations des mesures sur site ([Millares and Moñino, 2018](#)). En revanche, les approches indirectes, tels que les modèles empiriques ou paramétriques, basés physiquement la modélisation hydrologique ou l'analyse de télédétection fournissent des informations précieuses sur les taux d'érosion et la perte potentielle de sol avec des coûts associés raisonnables ([Boultif and Benmessaoud, 2017](#), [Millares et al., 2019](#), [Sepuru and Dube, 2018](#)).

Le bassin versant d'Isser, situé dans la région de Tlemcen (nord-ouest de l'Algérie), une zone représentant des pentes marneuses dans l'ouest de l'Algérie et un site de l'activité érosive, fait l'objet de la présente enquête. Le MUSLE a été appliqué à de nombreux bassins différents autour le monde avec de bons résultats lorsque ses paramètres sont calibrés pour le site d'étude ([Sadeghi et al., 2014](#)). Cependant, l'étalonnage devrait répondre aux changements temporels si le domaine d'application présente des schémas saisonniers sur l'érosion-sédimentation, comme précédemment signalés pour les environnements méditerranéens ([Farguell and Sala, 2006](#), [Rovira and Batalla, 2006](#)). Dans la plupart des cas, cette dynamique n'a pas été analysée en profondeur lors de l'adaptation de modèle de prédiction paramétrique pour évaluer les contributions des sédiments. Pour ce faire, 17 années de données de surveillance des rivières ont été utilisées pour analyser les courbes d'évaluation, les boucles d'hystérésis et l'apport de sédiments en tenant compte des périodes sèches et humides. Calibration locale du modèle MUSLE pour chaque saison a également été réalisée.

L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Algérie (ANRH) a fourni les principales informations pour effectuer cette étude. Les mesures analysées ont été enregistrées entre 1988 et 2004 (tableau.III-2 et figure III-5). Les données de précipitations quotidiennes (figure III-5(a)) étaient disponibles à partir de quatre stations météorologiques (figure III-4) qui étaient équipées d'un équipement de base pour mesurer les précipitations par cylindre gradué, sauf pour la station de Sidi Bounakhla (code : 160610), qui comprenait des variables climatiques spécifiques telles que comme la vitesse du vent, l'humidité de l'air et la température. Pour le potentiel estimations de l'érosion des pentes du modèle USLE, Chikh et al.(2019) a complété cette information avec celle des 21 autres stations météorologiques pour estimer la distribution spatiale de facteur d'érosivité R.

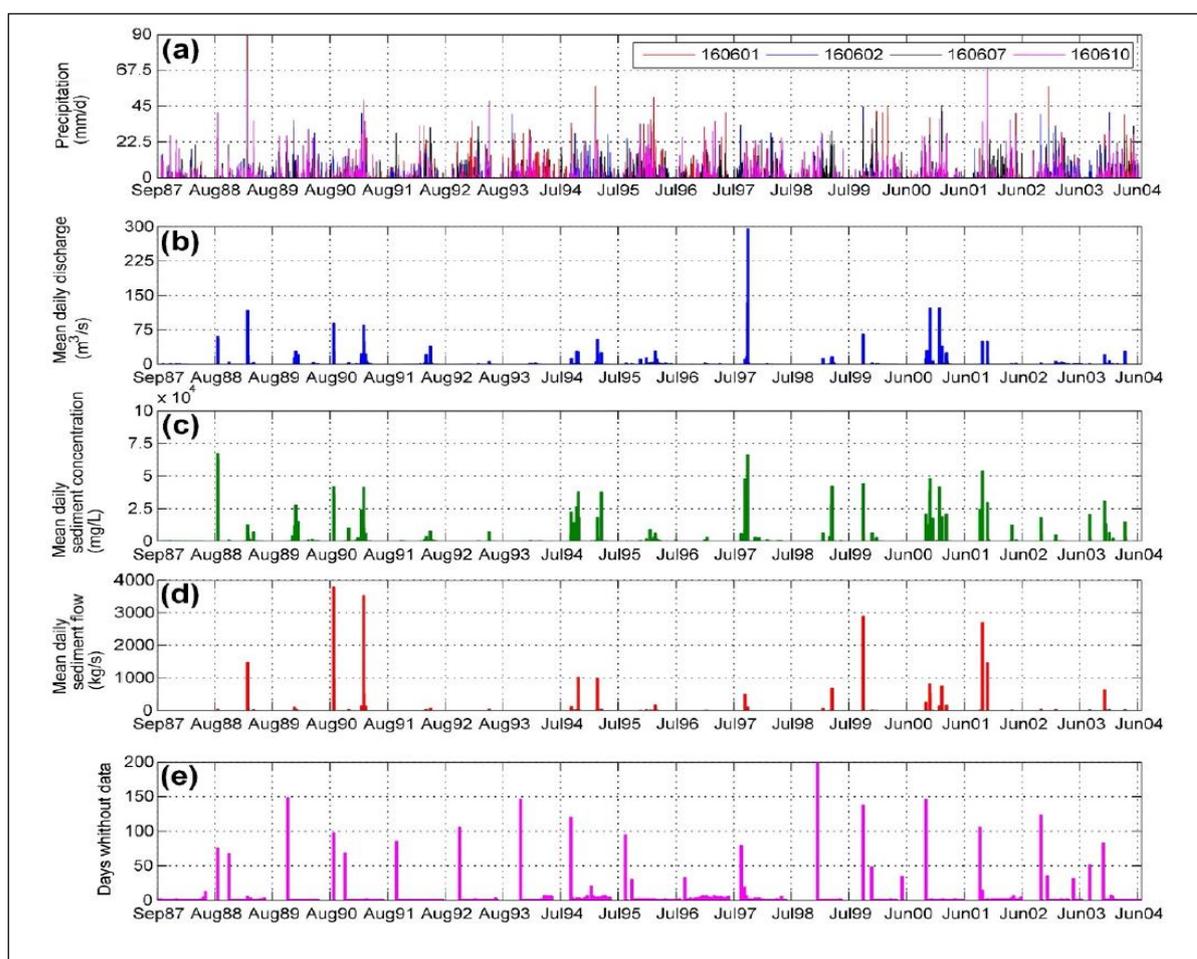


**Figure III-4.** Emplacement de la zone d'étude (MUSLE) ; Barrage d'Isser et stations météorologiques.

Les noms des stations et leur code sont comme suite : Chouly, code : 160601 ; Meurbah, code : 160602 ; Ouled Mimoun, code : 160607 ; Sidi Bounakhla, code : 160610. Le débit d'eau est obtenu à partir de la station hydrométrique du barrage de Sidi Abdelli (code : 160604). Les débits d'eau (figure III-5(b)) ont été obtenus à partir des mesures de la hauteur d'eau par un enregistreur des données automatisé. Ces hauteurs ont ensuite été converties en débit par la courbe hauteur/débit spécifique pour de la station de jaugeage dans le cours d'eau.

La matière solide en suspension (figure III-5(c, d)) a été déterminée suivant la méthodologie proposée par le ANRH et appliqué dans toutes les stations hydrologiques Algérie. Cette méthodologie est basée sur un échantillonnage manuel utilisant une bouteille de 1 L et est basé

sur une évaluation personnelle de régime d'écoulement et l'ampleur de l'événement. Pendant les inondations, des échantillons ont été prélevés à des intervalles de temps allant jusqu'à 30min. en fonction de l'augmentation de la vitesse du débit, tandis que dans des conditions stationnaires, les mesures étaient réalisées tous les jours ou tous les 2 jours à 12 h 00 (Terfous et al., 2001, Megnounif and Ghenim, 2013, Achite and Ouillon, 2016). La concentration de sédiments a ensuite été évaluée par filtration, peser l'échantillon après séchage dans un four à 105 ° C pendant 30 min. et en supposant que le ajout de solides dissous aux sédiments en suspension par évaporation était négligeable (Khanchoul et al., 2012b). Jours sans mesure en raison de l'absence les événements ou la campagne ayant échoué sont illustrés à la figure III-5(e).



**Figure III-5.** Données disponibles pour le site d'étude ; (a) Précipitations dans quatre stations météorologiques utilisées comme critères de sélection des événements et d'analyse des incertitudes ; (b) Débit mesures à la station de jauge Sidi Abdelli ; (c) Concentration et (d) débit de sédiments mesurés à la station de jauge, et (e) périodes sans données SSC et Q.

**Tableau.III-2.** Valeurs statistiques des variables mesurées pour la période 1988-2004. P : précipitations annuelles ; SSC : concentration de sédiments en suspension,  $Q_s$  : débit de sédiments ; Q : ruissellement. SD : écart type.

	P (mm) (annual)	SSC (g/l) (daily)	$Q_s$ (kg/s) (daily)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)(avg. daily)	Consecutive days without SSC and Q measurements
Mean	322.93	0.97	13.92	1.22	3.13
SD	61.23	5.16	164.24	9.33	10.87
Min	269.94	0.01	0.0001	0.004	1.00
Max	409.71	67.20	3782.43	295.40	197.00

Le Tableau III-2 montre les valeurs variables de la moyenne, de l'écart type (ET), valeurs maximales (max) et minimales (min), ainsi que les jours sans mesures. Comme observé, les valeurs minimales et maximales mettent en évidence l'importante variabilité de la SSC, écoulement et ruissellement des sédiments. Il est important de noter que l'événement intense enregistré en septembre 1997, avec un débit de près de 300 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, a été écartée de l'analyse car des erreurs de SSC ont été signalées.

La figure III-6 montre schématiquement la méthodologie suivie dans ce travail. Comme nous l'avons vu, les méthodes sont organisées sous deux échelles temporelles afin d'évaluer l'impact sur le rendement spécifique des sédiments SSY pendant périodes humides et sèches. Analyse distribuée du taux de livraison des sédiments SDR et de l'hystérésis des boucles à l'échelle des événements sont effectuées pour les deux périodes. Aussi, la contribution des sédiments basée sur le modèle paramétrique MUSLE est estimée à l'échelle de l'événement à partir d'une analyse saisonnière de télédétection. Ces approches sont décrites en détail dans les sections suivantes.

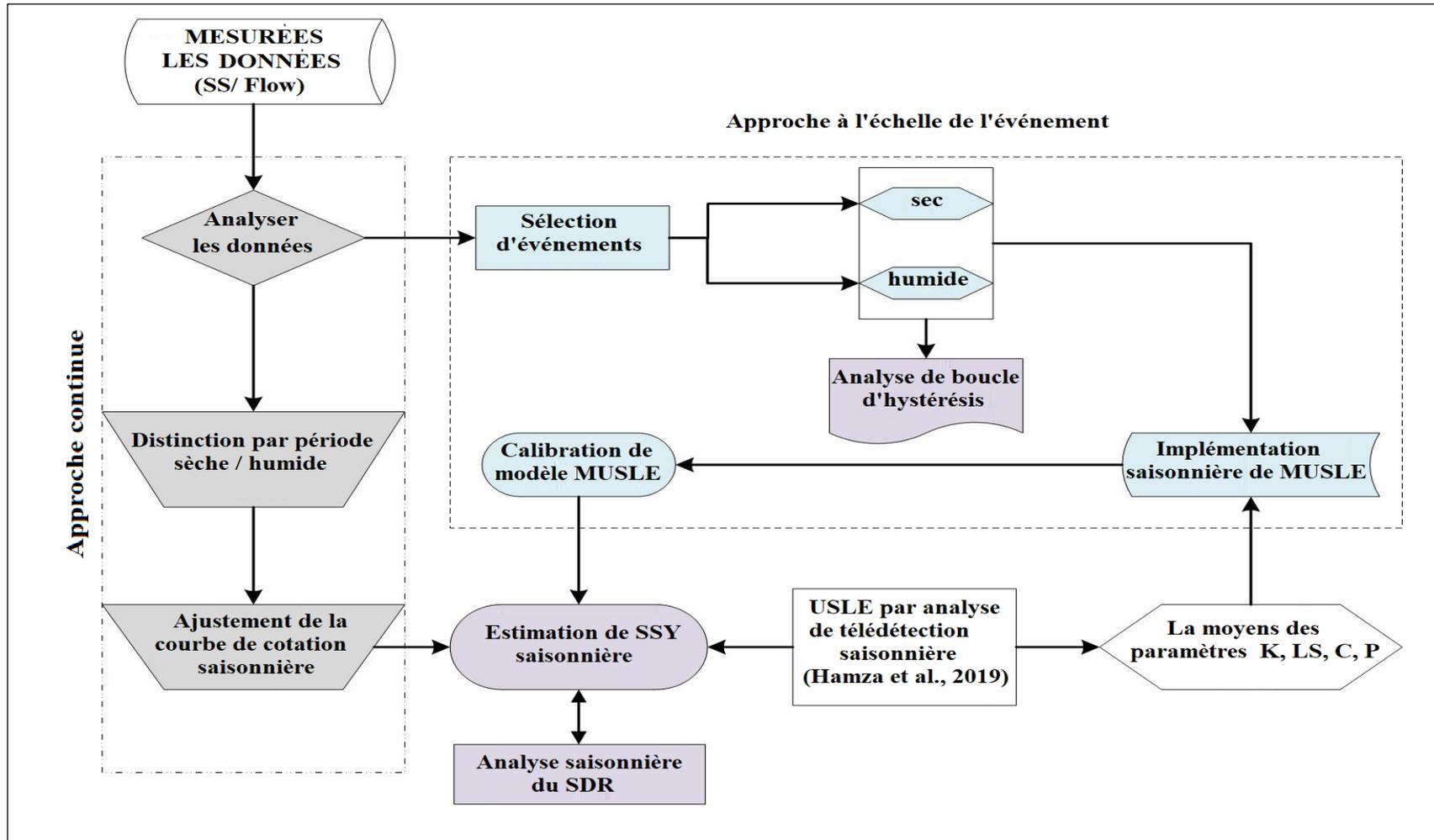


Figure III-6. Organigramme illustrant la méthodologie développée pour ce travail.

### **III.2.2.1. Analyse basée sur des mesures en continu**

Les données disponibles de la concentration de sédiments en suspension SSC (g / L), débit de sédiments,  $Q_s$  (kg/s), et le débit liquide ( $m^3 / s$ ). Ces données sont analysés en prendre en compte la fréquence, les périodes consécutives sans données mesurées et l'écart moyen, maximum, minimum des mesures. Périodes de saisons humides et sèches, définies comme Novembre – mars et avril – octobre, respectivement, sont identifiés et sélectionnés à partir des documents historiques. Périodes plus de 3 jours sans données sont exclus pour les calculs. Les lacunes des précipitations de longue période sont analysées pour évaluer la sensibilité d'estimations SSY liées à ces lacunes.

L'approche continue comprend l'ajustement des courbes de notation pour chaque période au moyen de la relation potentielle  $SSC = \alpha Q^\beta$ , où  $\alpha$  et  $\beta$  sont les paramètres optimisés utilisés pour ajuster cette relation. Le coefficient de détermination,  $R^2$ , et le coefficient de corrélation,  $\rho$ , sont utilisés pour valider chaque ajustement et la relation statistique entre SSC et Q. Le calcul de SSY pour toute la période d'étude est obtenu par la suite en considérant la saisonnalité et en la comparant avec les estimations basées sur une seule courbe de notation ajustée pour l'ensemble période.

### **III.2.2.2. Analyse basée sur l'échelle des événements**

L'approche à l'échelle des événements comprend (1) la sélection des événements pluvieux Pour les périodes sèches et humides, (2) les analyse des boucles d'hystérésis pour les événements les plus importants et, (3) l'étalonnage régional du modèle MUSLE pour chaque période.

### **III.2.2.3. Analyse des données et sélection des événements**

Les événements de sédiments en suspension sont sélectionnés pour les périodes humides et sèches, compte tenu des régimes pluviométriques, du ruissellement processus et dynamique des sédiments en suspension, en appliquant les critères suivants :

#### ***i. Séparation des événements.***

Les événements pluvieux sont séparés en utilisant une adaptation de la méthodologie mise en œuvre par Rahman et al. (2002) et Svensson et al. (2013) dans la zone d'étude. Ceci est basé en considérant des événements où la pluviométrie moyenne n'a pas dépassé un seuil de  $2 \text{ mm j}^{-1}$ , avec des intensités inférieures à  $0,5 \text{ mm h}^{-1}$ .

**ii. Entité événementielle.**

Prend en compte seulement les événements avec des valeurs SSC supérieures de 100 mg/L et qui connut une augmentation minimale des événements de 30 kg/s et des contributions totales de 500 kg, sont envisagées afin délimiter l'étude à une contribution significative pour les estimations SSY.

**iii. Relation pluie-ruissellement.**

Afin d'éviter les interférences (événements de débit de base, influence anthropique, ...) un coefficient de ruissellement qui reliant la quantité de ruissellement à la quantité de précipitations pendant un événement a été sélectionnée supérieur à 0,1. Ce coefficient défini comme paramètre sans dimension.

A partir de ces critères, le débit maximum de l'hydrogramme,  $Q_p$  (m<sup>3</sup>/s), le volume de ruissellement,  $V_q$  (m<sup>3</sup>) et la masse totale des sédiments sortants,  $St$  (t), sont estimés pour chaque un événement. De plus, la contribution de ces événements est comparée avec les résultats de rendement spécifique des sédiments SSY.

**III.2.2.4. Analyse de boucle d'hystérésis**

Parmi les événements sélectionnés, ceux qui ont un débit d'eau plus élevé sont pris en compte pour l'analyse en boucle d'hystérésis du sec et du mouillé périodes. On suppose que les événements les plus importants, avec processus pluviométriques pertinents, marquent la dynamique des sédiments le transport et les relations versant - fleuve. Le sens des boucles d'hystérésis donnent un aperçu des sources de sédiments et la mécanique de la livraison des sédiments en suspension ([Jansson, 2002](#)). On distingue cinq types de boucles: à valeur unique, dans le sens horaire, dans le sens antihoraire, à valeur unique plus une boucle et huit ([Williams, 1989](#)).

La boucle à valeur unique présente le flux de décharge de sédiments synchronisé avec un apport continu de sédiments ([López-Tarazón and Estrany, 2017](#)). Le sens horaire est souvent liée à des sources de sédiments dans le chenal ou à des sédiments est proche de la sortie de captage ([Walling and Webb, 1982](#), [Asselman et al., 2003](#), [De Girolamo et al., 2015](#), [Pietroń et al., 2015](#)). Des boucles dans le sens inverse des aiguilles d'une montre indiquent des sources de sédiments éloignées, des processus d'érosion des pentes dominantes ou des différences dans le temps de déplacement des eaux et les vagues des sédiments. ([Williams, 1989](#), [Kurashige, 1993](#), [Seeger et al., 2004](#), [De Girolamo et al., 2015](#)). Les boucles en huit sont liées aux basses conditions d'humidité du sol et événements pluvieux de forte intensité pendant l'été ([Zabaleta et al., 2007](#)).

### III.2.2.5. Calibrage saisonnier du modèle MUSLE

Le modèle MUSLE est utilisé pour calculer le potentiel de flux d'érosion des sols à l'échelle l'événement dans de nombreux bassins le monde ([Sadeghi and Mizuyama, 2007](#), [Pandey et al., 2009](#), [Zhang et al., 2009](#), [Arekhi et al., 2011](#), [Kumar et al., 2015](#)). le modèle paramétrique est une version modifiée de l'USLE ([Wischmeier and Smith, 1978](#)), calibré à partir d'environ 778 tempêtes individuelles dans 18 bassins de 15 à 1500 ha. Les équations de base et générales du modèle sont les suivantes.

$$S_y = a(V_q Q_p)^b \overline{KLS\overline{C}\overline{P}} \dots \dots \dots (III.1)$$

Où a et b sont des coefficients régionaux, avec des valeurs de 11,8 et 0,56, respectivement ([Renard, 1997](#)). Les autres facteurs les équations K, LS, C et P sont les valeurs moyennes des distributions des paramètres USLE. Le facteur d'érosion K représente la susceptibilité d'un sol à éroder, généralement lié aux propriétés du sol telles que la teneur en matière organique, la texture du sol, la structure du sol et perméabilité. Le facteur topographique (pente et longueur de pente) représente l'association de la pente, S, et de la longueur, Le la pente et est généralement obtenu à partir de modèle d'élévation numérique (DEM). Les valeurs moyennes de ces facteurs ont été estimées à partir des cartes générées lors d'une enquête précédente ([Chikh et al., 2019](#)). L'estimation de facteur des pratiques du sol P, est associé à d'importantes sources d'incertitude liée à la difficulté de prédire comment la microtopographie affecte l'hydraulique et les voies d'écoulement ([Renard et al., 1991](#)). Dans cette étude, Pis est supposé égal à 1,00, comme signalés précédemment ([Wang et al., 2003](#), [Smith et al., 2007](#), [Oliveira et al., 2015](#), [Kuo et al., 2016](#)).

Le modèle MUSLE dépend de plusieurs facteurs qui présentent une grande variabilité spatiale et temporelle de différents points de vue: régime pluviométrique, relief du bassin et géologie, l'hétérogénéité édaphique, outre l'influence anthropique ([Prado-Hernández et al., 2017](#)). En ce sens, Williams (1975) a indiqué que l'étalonnage des paramètres a et b est essentiel pour représenter correctement la dynamique érosive de la zone d'étude.

En outre, plusieurs études ont mis en évidence la nécessité de l'étalonnage pour tenir compte des conditions locales ([Avanzi et al., 2008](#), [Noor et al., 2012](#), [Sadeghi et al., 2013](#), [Cariello et al., 2014](#), [Prado-Hernández et al., 2017](#)) et l'influence du SDR ([Chen and Mackay, 2004](#)) des études bassin. À partir d'une étude comparative mondiale, Sadeghi et al. (2014) effectué une analyse exhaustive de 49 bassins et délimitées valeurs du coefficient a et de l'exposant b entre

0,001 et 6,38 et 0,081 et 1,12 respectivement, ce qui indique le large plage de valeurs d'étalonnage.

Dans ce travail, la calibration des paramètres MUSLE originaux est envisagée, ainsi que l'ajustement d'un facteur FM, qui nous permet d'évaluer l'écart de l'aversion originale du modèle. À cette fin, le processus de l'étalonnage évalue la meilleure valeur de Nash – Sutcliffe coefficient d'efficacité du modèle (NSE), qui est généralement utilisé pour évaluer les relations prédictives des modèles hydrologiques ([Nash, 1970](#)), qui est comme suit :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \dots \dots \dots (III.2)$$

Où

O<sub>i</sub> représente les valeurs observées, S<sub>i</sub> sont les valeurs simulées valeurs, S représente la moyenne des valeurs observées et n est le nombre d'échantillons.

#### III.2.2.6. Estimation et comparaison du taux d'érosion

Les deux approches basées sur des calculs continus et à l'échelle des événements du flux de sédiments sont analysés en termes de variabilité saisonnière du rendement en sédiments. De plus, la comparaison entre le flux de sédiments estimé et l'érosion potentielle nous a permis d'analyser le taux de livraison des sédiments (SDR), défini comme le rapport entre le rendement estimé des sédiments et l'érosion brute sur un bassin versant ([Julien, 2010](#)). Cette valeur représente l'efficacité du transport des sédiments de réseau de drainage du bassin et est généralement associé avec différents paramètres tels que la superficie, le bassin moyen pente, son relief ou la densité du réseau de drainage ([Bagarello, 1991](#) ). Pour estimer le taux de livraison des sédiments (SDR), la perte potentielle de sol estimée précédemment avec le modèle MUSLE ([Chikh et al., 2019](#)) est comparée aux débits des sédiments mesurés en aval de bassin versant. Ces informations sont également utilisées pour calibrer modèle SDR distribué proposé par Borselli et al. (2008) :

$$SDR = \frac{SDR_{max}}{1 + e^{\frac{IC_0 - IC_i}{\lambda}}} \dots \dots \dots (III.3)$$

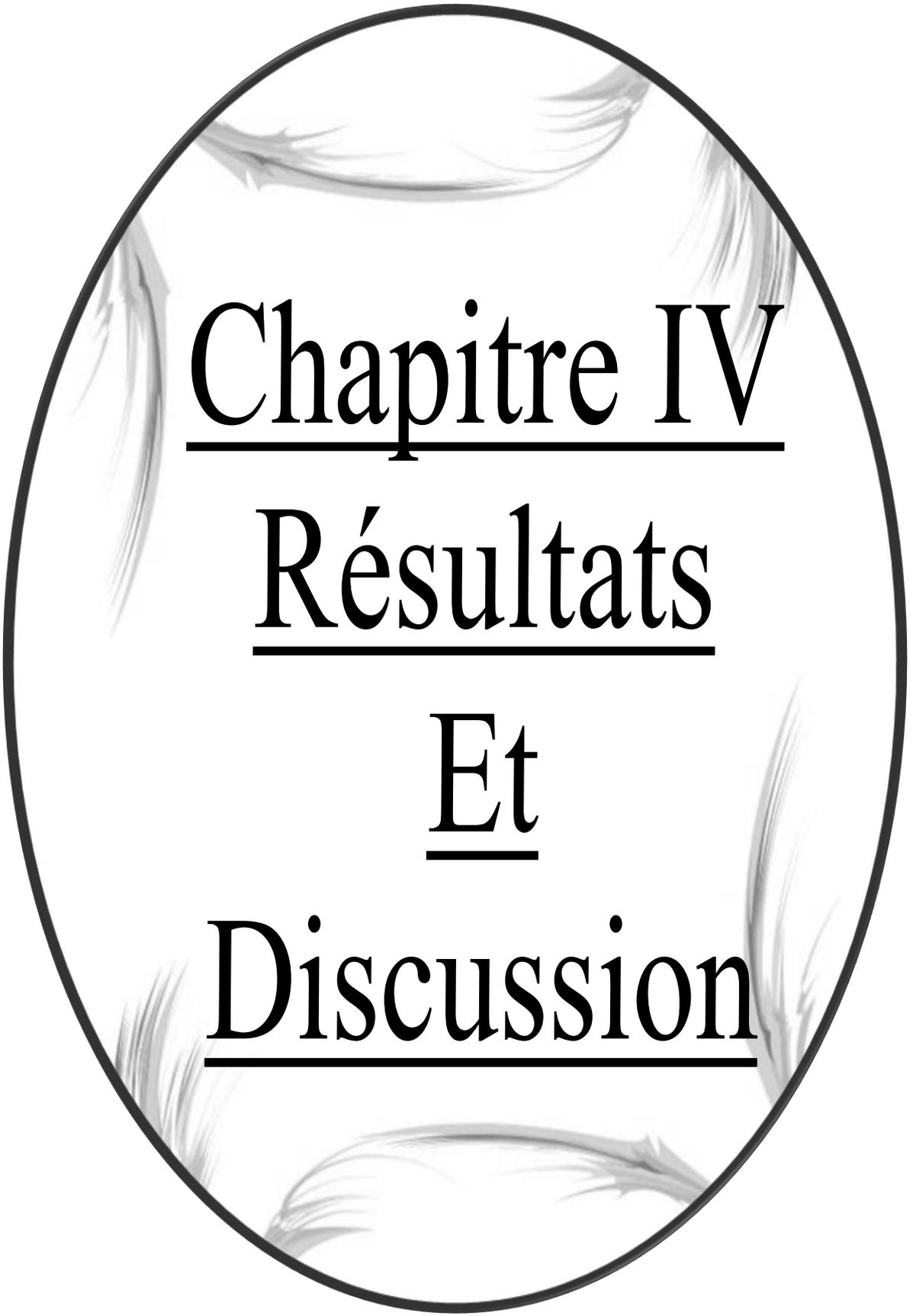
Où

$SDR_{max}$  est le SDR théorique maximum, réglé sur un valeur moyenne de 0,8 ([Vigiak et al., 2012](#)),  $IC_0$  et  $\lambda$  sont des paramètres d'étalonnage et la métrique du paysage ou la connectivité indice,  $IC_i$ , est défini comme:

$$IC_i = \log_{10} \left( \frac{\overline{S_c} \overline{C_c} \sqrt{A_c}}{\sum_i \frac{d_i}{C_i S_i}} \right) \dots \dots \dots (III. 4)$$

Où

$C_c$  est le facteur C moyen du modèle USLE, à condition par les analyses de télédétection, de la pente ascendante superficie,  $A_c$  (m<sup>2</sup>);  $S_c$  est le gradient de pente moyen (mm – 1) de la zone contributive en amont;  $d_i$  est la longueur du chemin d'écoulement le long selon la direction de la pente la plus raide descendante; et  $C_i$  et  $S_i$  sont le facteur C et le gradient de pente deuxième cellule, respectivement. Un code de langage Python de programmation est développé qui utilisée DEM et les paramètres C et S sont l'entrée de la base des calculs des valeurs moyennes cumulées de paramètres C pour la longueur du trajet d'écoulement de l'amont jusqu'à l'aval.



Chapitre IV

Résultats

Et

Discussion

## IV. Résultats et discussion

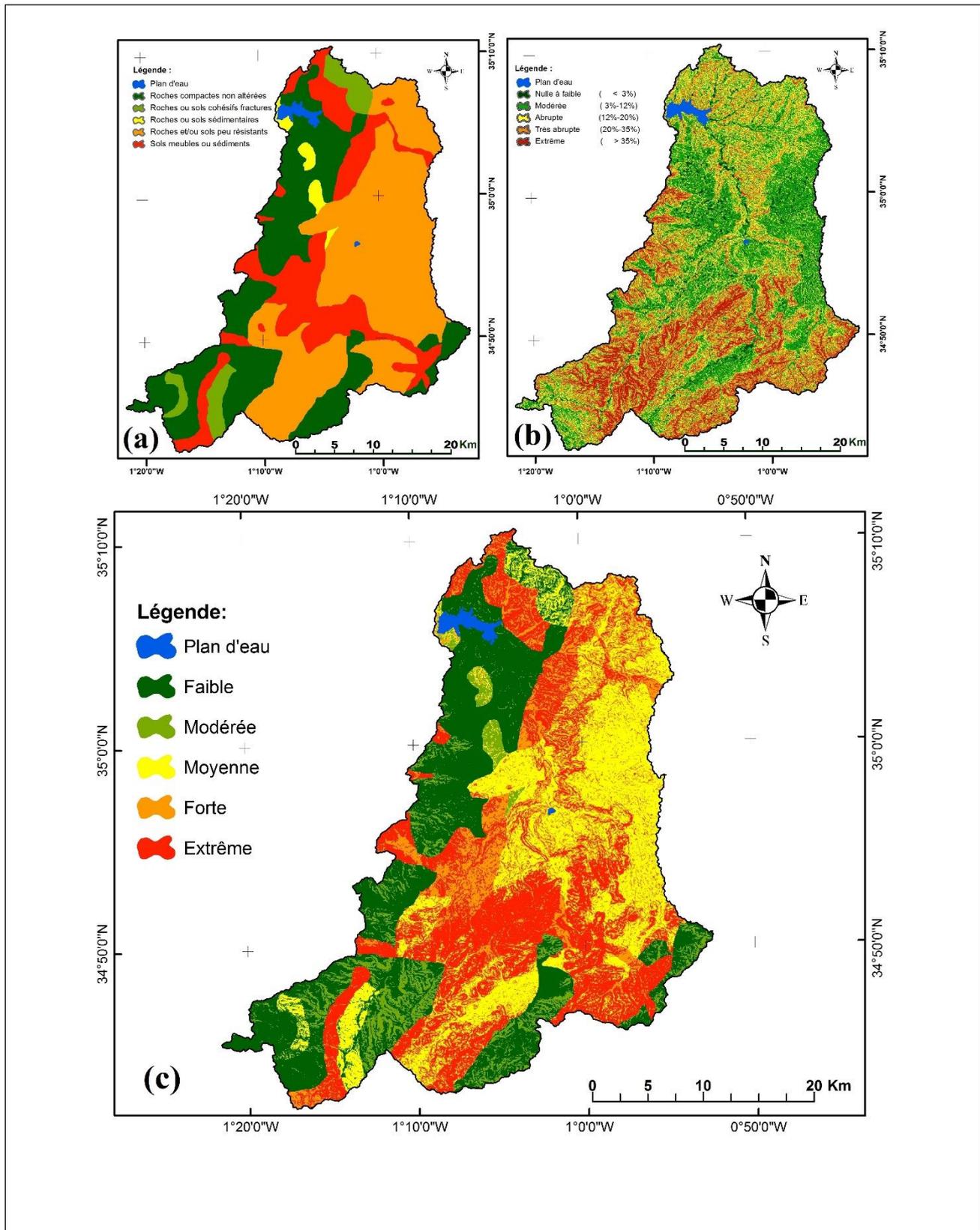
### IV.1. Résultats qualitativement de l'érosion à l'aide du PAP / RAC méthode

l'évaluation et la cartographie de la sensibilité des sols d'érosion hydrique repose généralement sur des observations ou des mesures ponctuelles ([Le Bissonnais et al., 2008](#)), ceci nous amène à la recherche sur des indicateurs de sensibilité qui facilitent la localisation spatio-temporelle de ces risques ([Blavet et al., 2008](#)). La méthodologie adoptée de PAP/CAR combinant l'état physique des sols (topographie et litho-faciès) et la protection de ces sols (couverture et densité végétale) permet une bonne estimation de la susceptibilité des terrains à l'érosion.

#### IV.1.1. Carte d'érodibilité

Les résultats obtenus montrent que les pentes faibles (<3%) et les pentes modérées représentent respectivement 7,02% et 31,60% de la superficie totale du bassin versant d'Isser. Alors que les pentes abruptes et très abruptes représentent respectivement 23,50 % et 24,86 %. Une superficie de 14876,66 hectares (13,03% de la superficie totale) est considérée comme de zones de pentes extrêmes (> 35 %) (figure IV-1.b).

La carte des lithofaciès (figure IV-1.a) montre que 43,76% du bassin est couvert par des roches sédimentaires faiblement ou modérément compactés. Ceci ne fait qu'augmenter la sensibilité à l'érosion, les prédictives de PAP/CAR considère ce type de roche comme une faible résistance. La classe 1 (30,44%) est représentée par des roches compactes non altérées (conglomérats fortement cimentés, croûtes et affleurements de grès ferrugineux). Les roches meubles et non cohésifs de la classe 2 représente 19,66 %. Quant à la classe 3, elle ne représente que 1,65 %, soit 1883,54 hectares. Les classes 4 et 5 considérées comme les moins résistantes à l'érosion couvrent 63,42%, ceci montre la sensibilité de la zone à l'érosion.



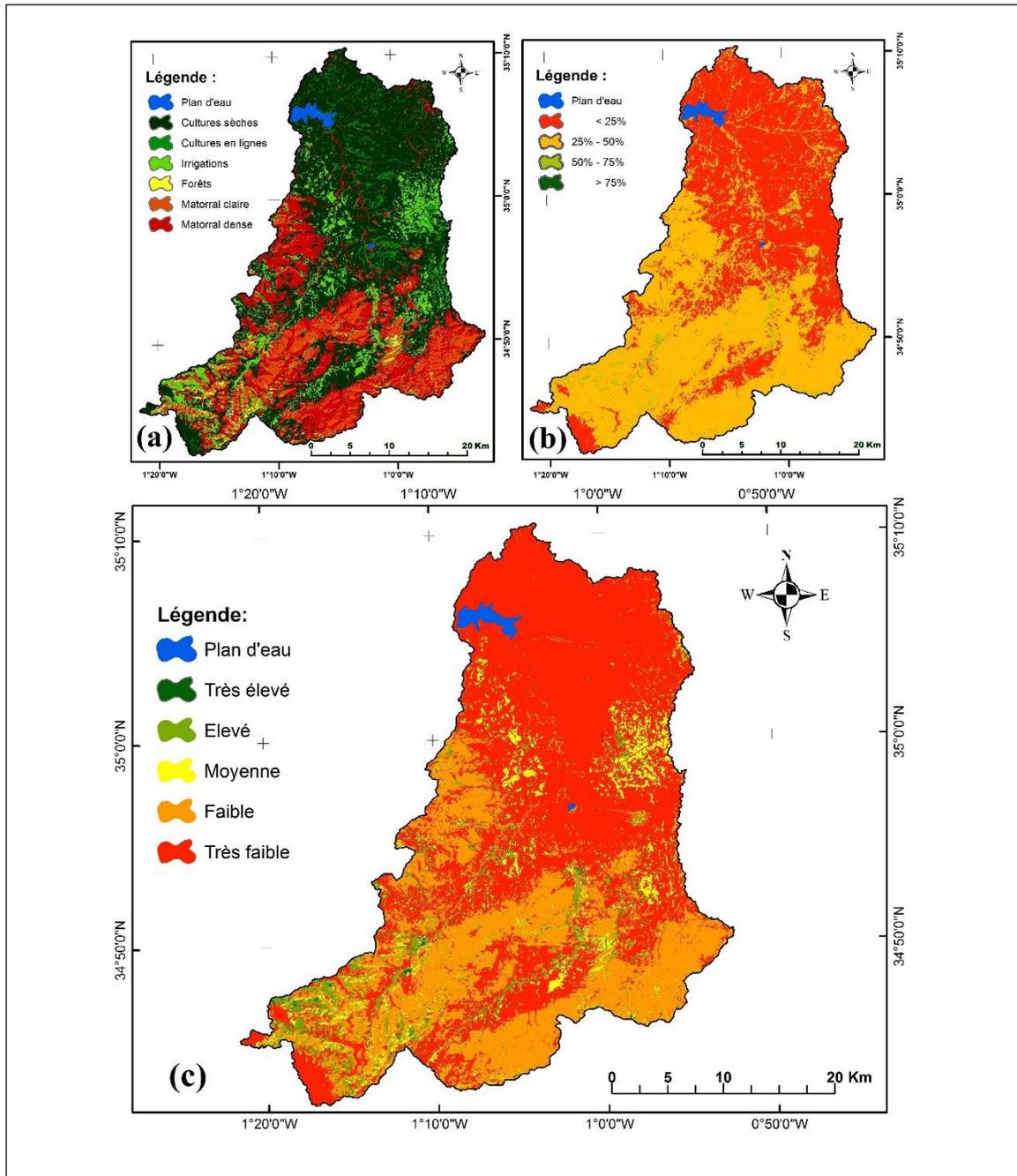
**Figure IV-1.** (a) Une carte Lithofacies (PAP / CAR) ; (b) Carte des pentes (PAP / CAR) ; (c) Carte d'érodibilité (PAP / CAR).

La carte d'érodibilité selon PAP/CAR (figure IV-1.c), montre que près d'un quart de la zone présente une érodibilité extrême (classes 5) et 17,15 % une érodibilité forte (classes 4). Ceci peut s'expliquer par la coïncidence des roches meubles et les fortes pentes. Les zones caractérisées par des matériaux peu résistants et des pentes moyennes (classe 3) présentent une érodibilité moyenne, 23,09 % de la zone. La classe 1 et 2, caractérisées par des matériaux résistants moyennement résistants et des pentes moyennes, représentent une érodibilité faible à moyennement faible avec 26,09 % et 7,71 %.

#### **IV.1.2. Carte de protection des sols**

Pour l'élaboration de la carte de degré de protection des sols pour le bassin Isser (figure IV-2-c), il était nécessaire d'étudier la couverture végétale. La connaissance de la répartition (figure IV-2-a) et de la densité de la végétation (figure IV-2-b) est une étape nécessaire pour illustrer le niveau de protection dans la zone.

La carte (figure IV-2-a) montre deux types de couvertures végétales : les cultures et les couvertures végétales naturelles. Les espaces cultivés sont représentés par des cultures sèches (céréaliculture (50,53a%), des cultures en lignes (10,21%) et des cultures irriguées (4,58%)). Ce type de couverture (65,32%) qui n'est pas permanent occupe les zones de grandes potentialités agricoles (disponibilité d'eau et terrains moins accidentés). Les autres classes 4, 5 et 6, elles représentent les différents types de couverture végétale naturelle (couvertures permanentes) et sont comme suit : les matorrals denses et matorrals claires avec 34,68 %, et les forêts denses qui ne couvrent que 1,68 %. Le taux des forêts a été réduit par les défrichements et les incendies.

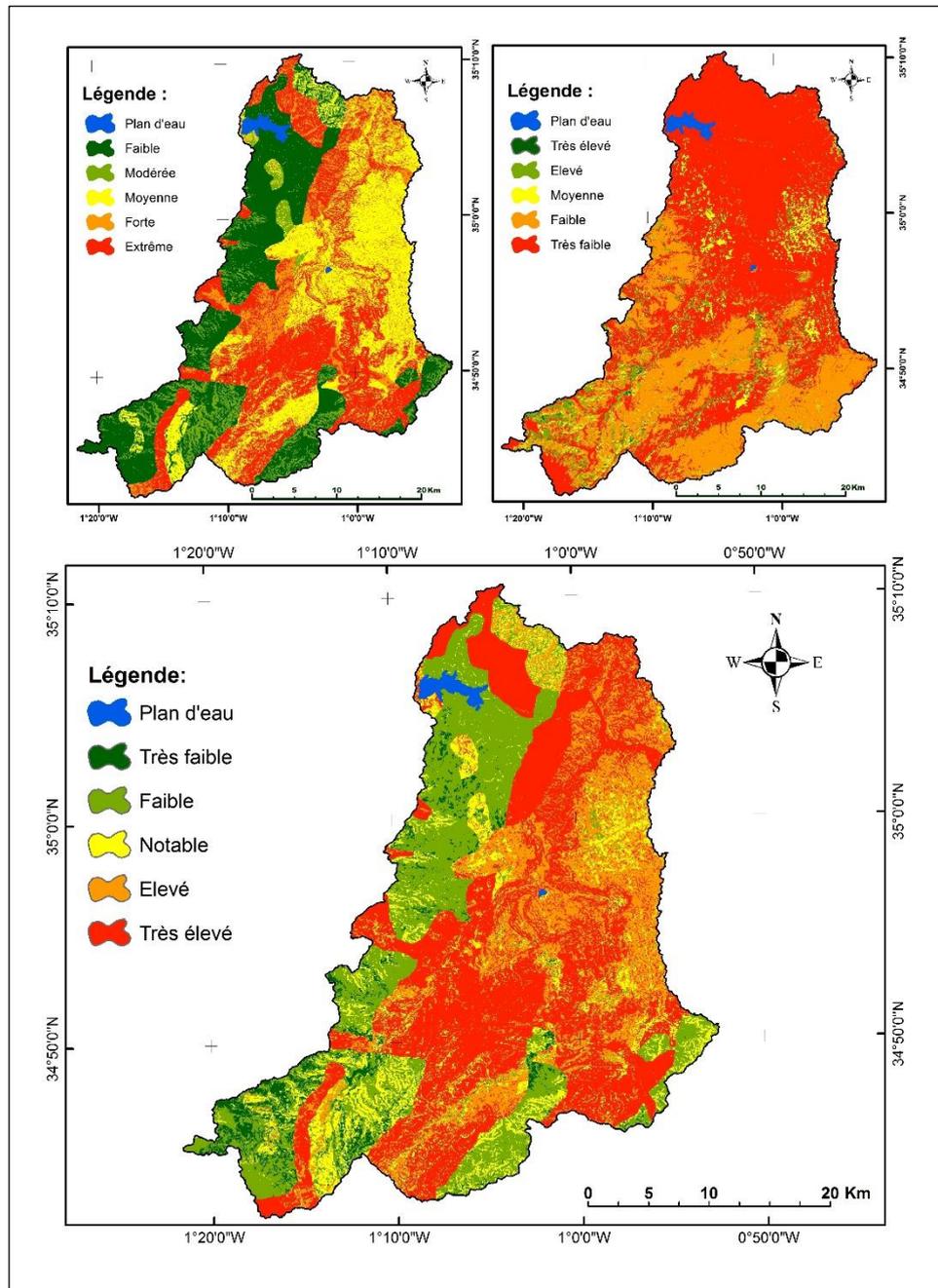


**Figure IV-2.** (a) Carte d'utilisation des terres (PAP / CAR) ; (b) Carte de couverture terrestre (PAP / CAR) ; (c) Carte de protection des sols (PAP / CAR).

Les zones de faible protection couvrent 87,5 % de la superficie total du bassin, cela indique que la zone d'étude est décrite comme très mal protégé. Les zones de protection moyenne à élever ne couvrent que 12,5 % de la zone. Ceci peut être expliqué par la dominance des cultures saisonnières et le taux faible et de l'état des couvertures permanentes de densité généralement faible. Les terres de fortes pentes et de faible couverture végétal sont très affectées par l'érosion ([Morsli et al., 2013](#)). La couverture végétal a une influence majeure sur le ruissellement et l'érosion ([Roose, 1984a](#)).

**IV.1.3. Carte d'état de l'érosion**

Pour extraire la carte des états érosifs d'après PAP/CAR, nous avons combiné la carte de protection des sols et la carte d'érodibilité. La superposition de la carte d'érodibilité (a) et de protection des sols (b) illustre la sensibilité de la zone à l'érosion (carte des états érosifs (figure IV-3-c)).



**Figure IV-3.** La carte d'érodibilité (a) ; la carte de protection des sols (b) ; Carte de l'état de l'érosion (PAP / CAR) (c).

Les zones potentiellement les plus vulnérables à l'érosion (classe élevée et classe très élevée) selon la carte des états érosifs (figure IV-3), couvrent 60,24 % de la superficie totale du bassin et sont situés au centre et à l'Est du bassin versant. Ces espaces correspondent aux zones de roches tendres et non cohérentes, caractérisées par une végétation non permanente et faiblement couvrante. Les fortes pentes et la lithologie augmentent la vulnérabilité à l'érosion dans le bassin d'Isser ([Boughalem et al., 2013](#)).

Les zones d'un degré de danger moindre, les classes de risque d'érosion faible (22,98 %) à très faible (4,15 %), correspondent aux zones de bonne protection et de roches compactes et non altérées, ces espaces sont moyennement protégés et faiblement érodés.

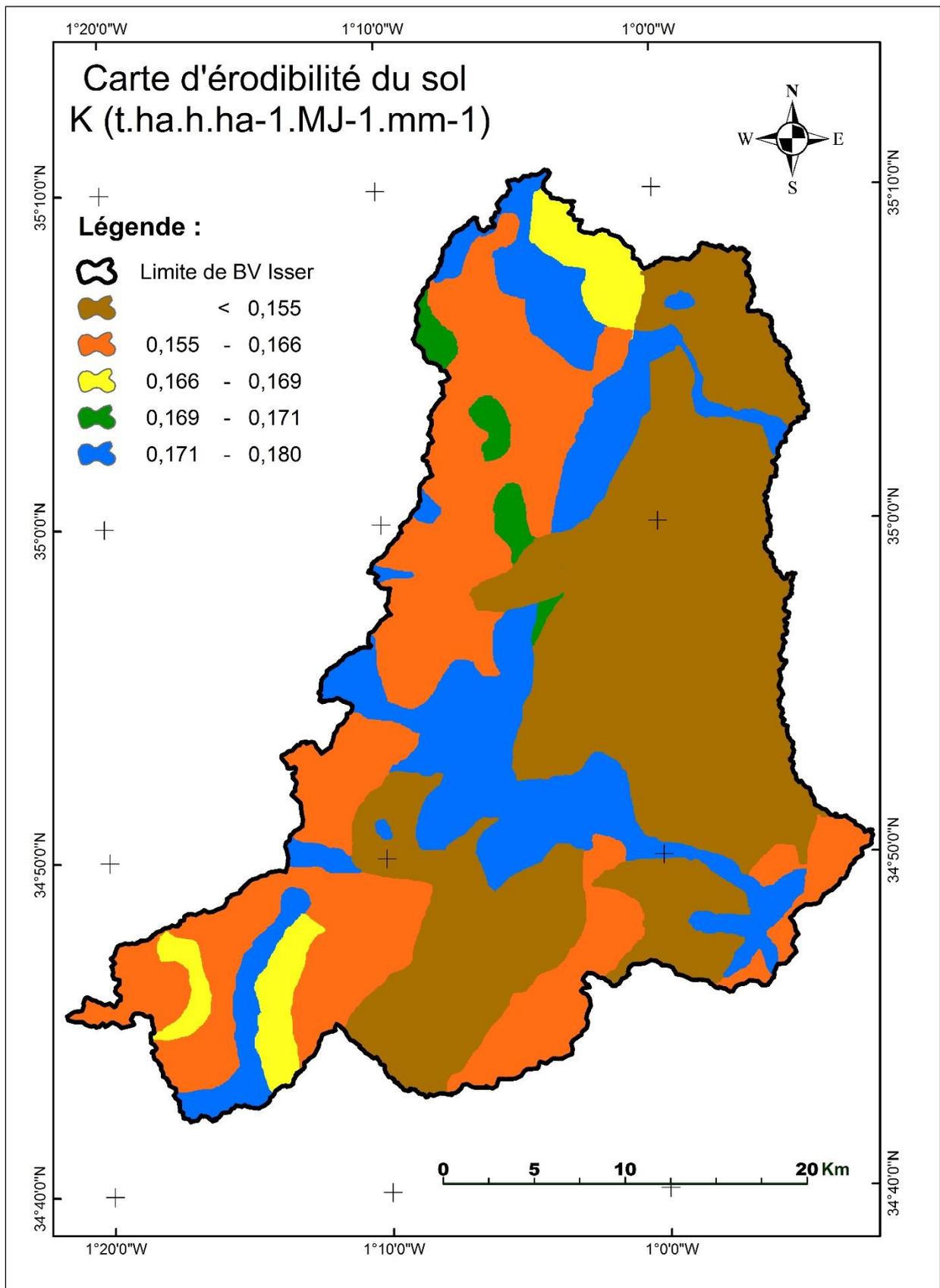
La carte des états érosifs issue de la combinaison des principaux facteurs qui influencent directement la vulnérabilité des sols, a fourni des informations sur l'état érosif de la zone et a permis d'identifier les sites de production de sédiments.

## IV.2. Résultats de l'évaluation de l'érosion des sols par la RUSLE modèle

### IV.2.1. Cartes révisées du facteur d'équation universel de perte de sol

#### *i. Facteur K*

L'indice d'érodibilité K (figure IV-4) est compris entre 0,15 et 0,18  $t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$  dans le bassin versant Isser avec une moyenne de 0,16 ( $t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ ). Selon ([Dumas, 1965](#)), notre région est moyennement érodible. Les marnes qui couvrent 43,76 % de la superficie totale possèdent l'un des plus faibles potentiels d'érodibilité ( $K < 0,15$ ). Les marnes riches en argile saturée en calcium et souvent caillouteux sont résistants à l'érosion en nappe ([Roose et al., 1993](#)). Les résultats obtenus par Morsli (1996) montrent une corrélation significative entre l'indice d'instabilité (Is) et le rapport L/A ( $r = 0,88$ ) et entre le taux d'argile et les taux d'agrégats stables ( $r = 0,9$ ), ceci montre le rôle déterminant de la texture sur la stabilité structurale et plus particulièrement de l'argile des marnes. En réalité, si les sols marneux sont résistants à l'énergie des pluies, une fois réhydratés, ils deviennent sensibles aux forces de cisaillement qui arrachent le sol au fond et sur les flancs des griffes et des rigoles. L'érodibilité des dolomies, des travertins et des grès est respectivement de 0,16 et de 0,171  $t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ . Les alluvions qui sont souvent associés à des vallées et des rivières, elles prennent la plus grande valeur de facteur K (0,18).



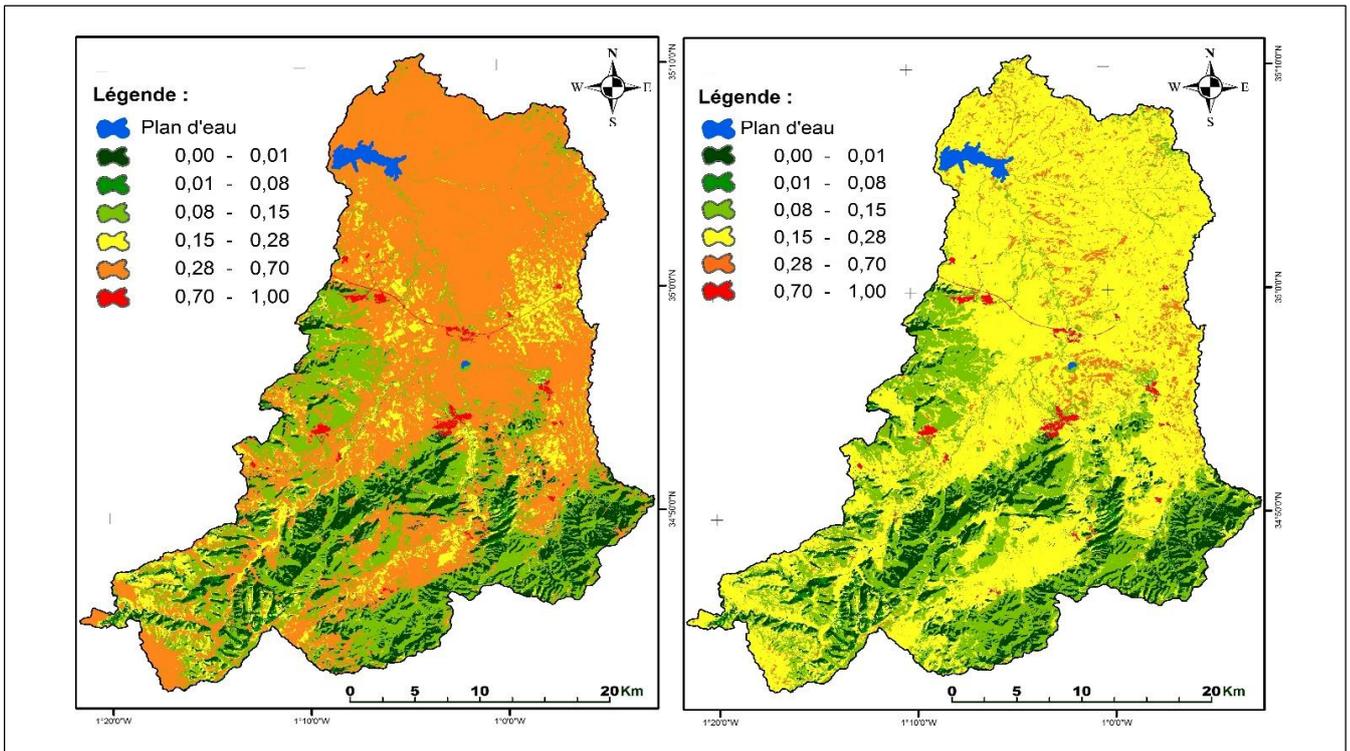
**Figure IV-4.** Carte de l'érosion du sol (facteur K) dans le bassin versant d'Isser.

**ii. Facteur C**

Le couvert végétal constitue un moyen pour la lutte contre l'érosion ([Chappell et al., 2018](#)). Pour les mêmes précipitations, ([Santos et al., 2017](#)) a constaté qu'après le changement de la couverture végétale, le taux des sédiments a été augmenté au moins dix fois. Le Nord-Ouest algérien est caractérisé par un climat méditerranéen humide (octobre à avril) et sec en été (mai à septembre) ([Ramdani et al., 2009](#)). La céréaliculture qui occupe les sols d'octobre à juin est la principale culture dans le sud du bassin méditerranéen ([Hannachi et al., 2017](#)). En conséquence, on constate une variation de l'érosion à l'échelle annuelle, liée à la variation du couvert végétal durant les saisons des pluies (variation climatique). En conséquence, la sensibilité à l'érosion est différente d'une saison à une autre.

Les résultats obtenus, par l'approche d'étude de deux périodes séparément et l'adoption de deux méthodes d'étude, ont montré l'utilité de cette approche dans la compréhension de l'impact de la variation du facteur C durant les saisons sur la sensibilité à l'érosion.

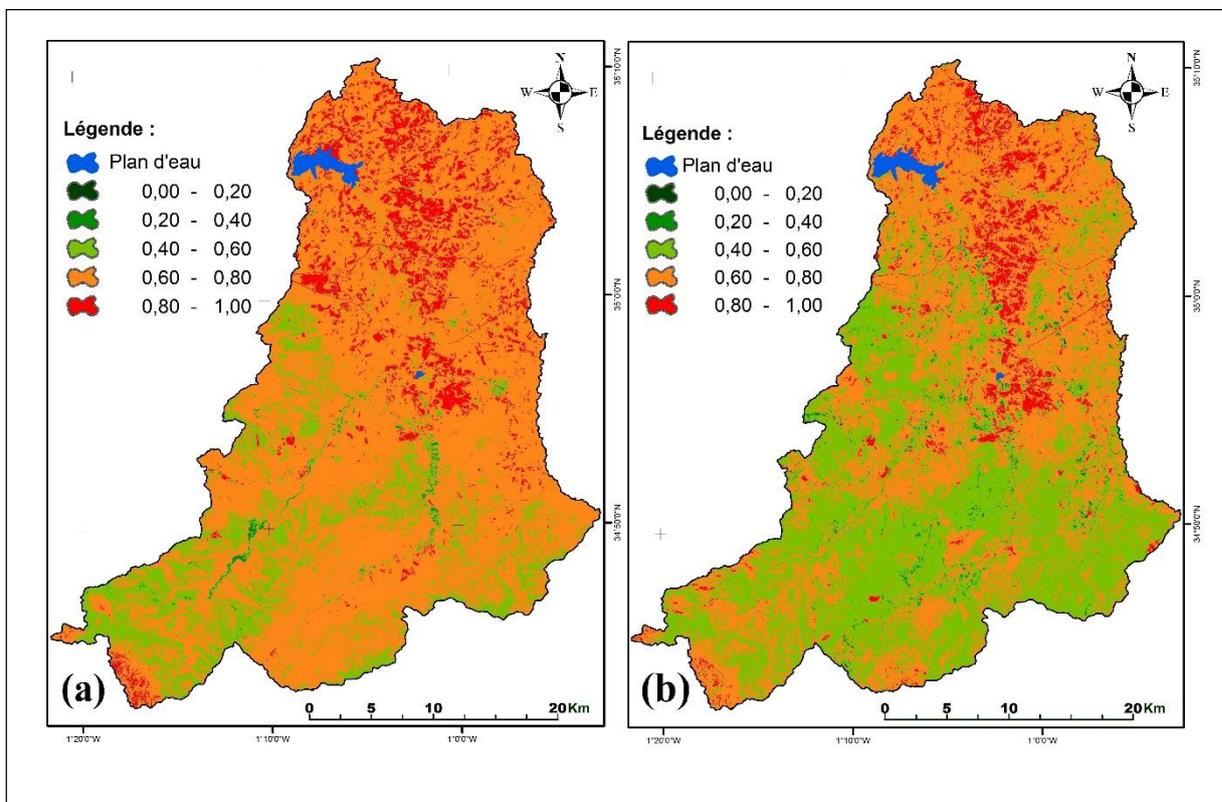
La première approche a permis de déterminer la couverture végétale avec une classification supervisée d'image satellitaire. Les cartes de la distribution de facteur C (figure IV-5 a et b) pour les deux périodes, à avoir la période sèche et la période humide, montrent que la couverture du sol par le couvert végétal change d'une saison à l'autre ce qui induit une différence de sensibilité à l'érosion. Durant la période sèche, 59,55 % des terrains sont considérés comme terrains nus où le facteur C est égal à 0,7, alors qu'en période humide, une grande partie de ces terrains considérés comme nus en période sèche, sont cultivés en céréale (82,59 % de la surface des terrains nus sont cultivés). Et par conséquent le facteur C est passé de 0,7 à 0,28 pour ces terrains cultivés, en modifiant la sensibilité de la zone à l'érosion.



**Figure IV-5.** (a) Carte du facteur C pendant la période sèche ; (b) Carte du facteur C pendant la période humide.

Pour les autres occupations de sol (forêts, terrains urbanisés), le facteur C ne change pas, il est respectivement de 1 pour l'urbain (1,27%), de 0,15 pour le reboisement (22,62%), de 0,08 pour les forêts claire (10,37 %) et de 0,04 pour les forêts (1,68%).

La deuxième approche pour l'estimation du facteur C repose sur l'utilisation de NDVI ; ce facteur est calculé pour les deux périodes (sec et humide). Deux images satellitaires sont utilisées pour le développement de la carte du facteur C, à savoir la carte du 06 septembre 2016 (sèche période) et celle du 14 mars 2016 (période humide). La répartition des cartes de facteur C (figure IV-6 a et b) pour les deux périodes indiquent que le facteur C change à la suite de la modification de la couverture des terres d'une saison à l'autre. Les résultats suggèrent qu'il y'a des zones sensibles à très sensibles (facteur C compris entre 0,6 et 1) qui représentaient 57,04% de la surface humide totale a augmenté à 83,17% dans la période sec. Cela montre que la période sèche reste la plus sensible à l'érosion due à la réduction de la couverture du sol.

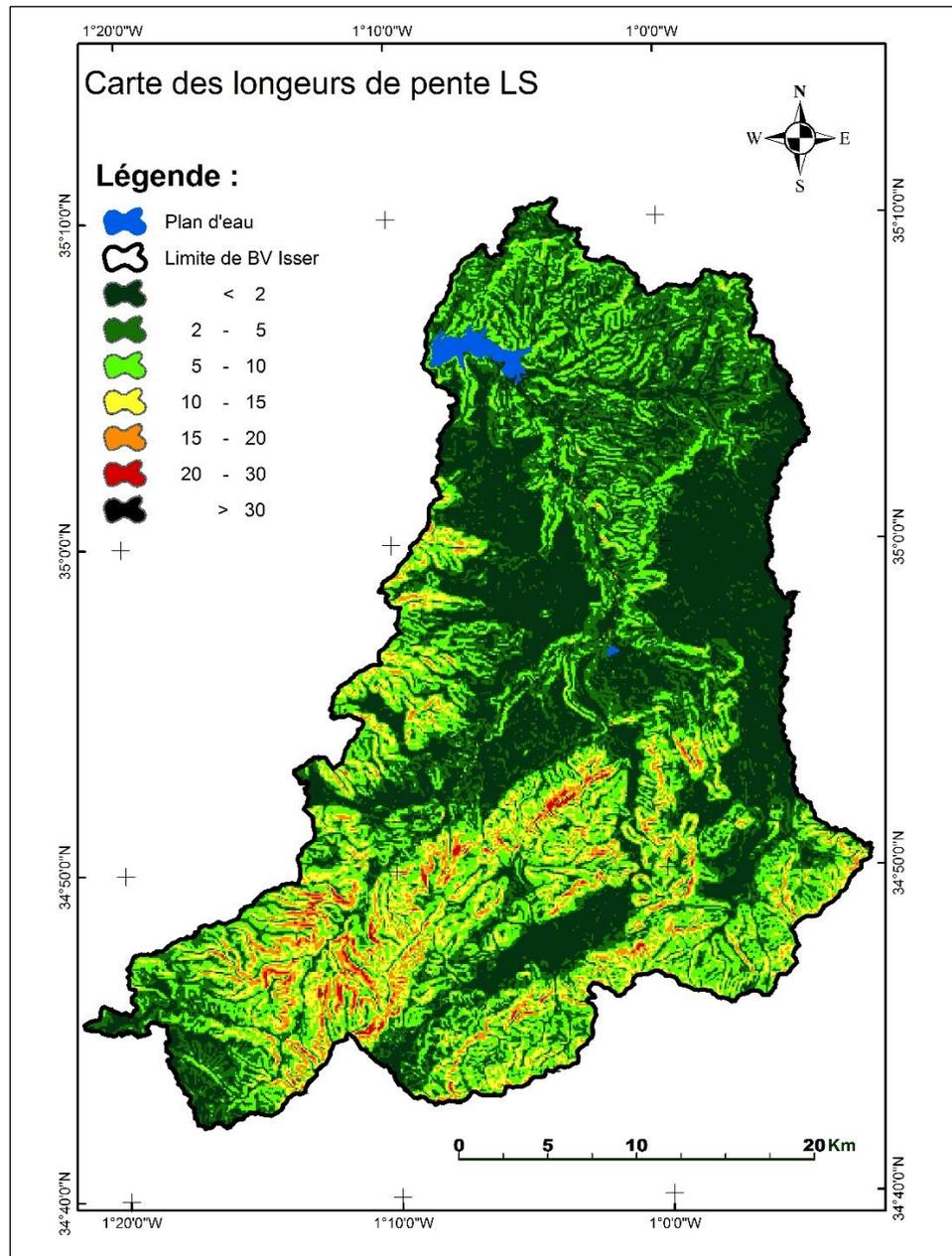


**Figure IV-6.** (a) Carte du facteur C-NDVI pendant la période sèche ; (b) Carte du facteur C-NDVI pendant la période humide.

En comparant les deux méthodes utilisées (classique et NDVI), on peut clairement noter que la deuxième méthode montre plus de domaine sensible que le premier. Zones sensibles à très sensibles représentent 83,17% du total en période sèche lors de l'utilisation du Méthode NDVI, alors qu'ils ne dépassent pas 65% par la méthode conventionnelle. Les résultats trouvés par la méthode NDVI sont plus proche des résultats obtenus par de nombreux chercheurs.

### iii. Facteur LS

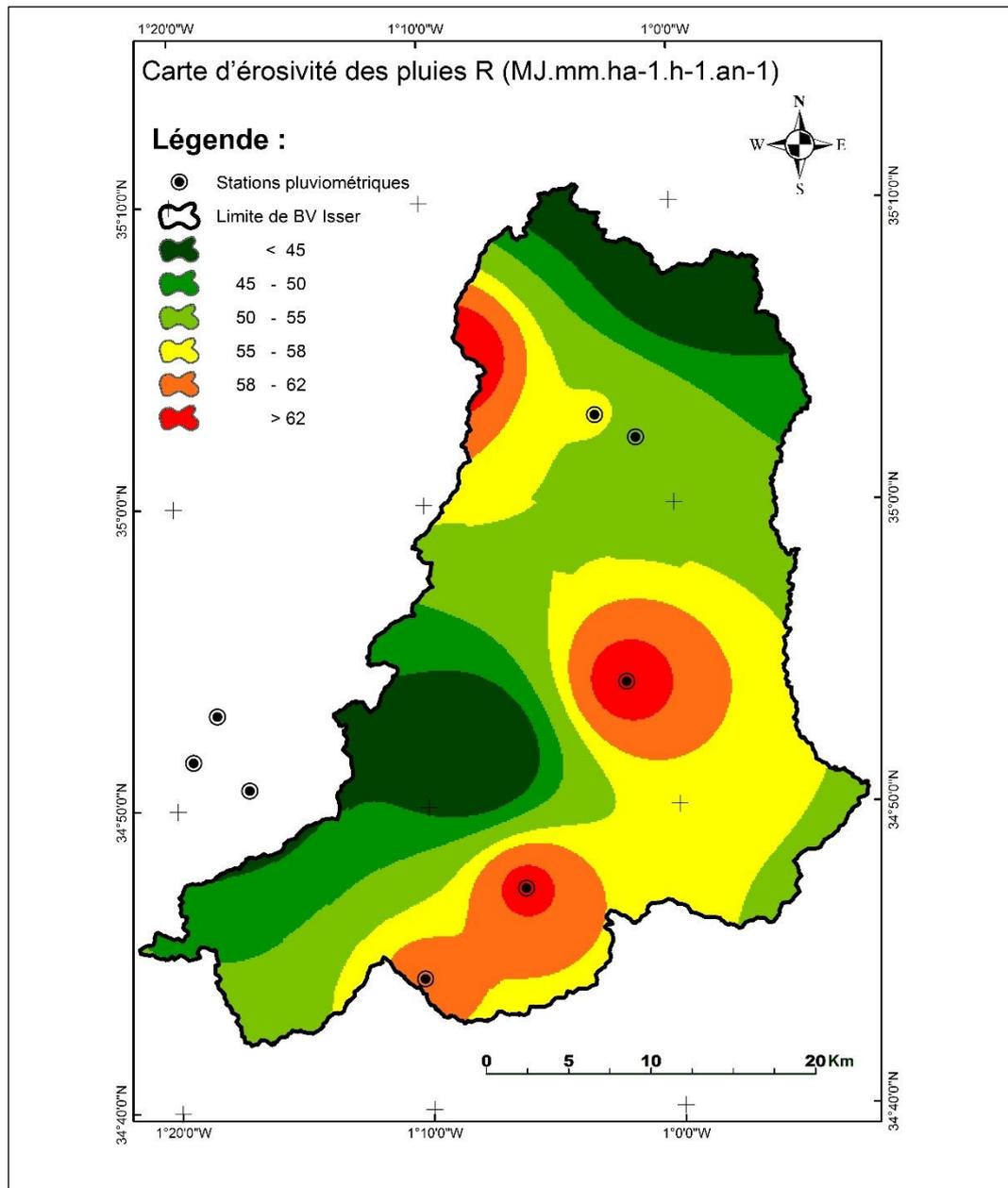
La carte de facteur topographique (LS) (figure IV-7) est élaborée sur la base du modèle numérique de terrain. Le facteur LS varie entre 0,03 et 39,16 ce qui indique une différence dans le statut topographique de la zone. Généralement, le bassin versant d'Isser est considéré comme un bassin de pentes modérées car sur 38,62 % de la superficie du bassin, les pentes ne dépassent pas 12%. Les valeurs du LS ne dépassent pas 10 pour 85,97 % de la superficie du bassin. Alors que 3,97 % de territoire de bassin ont des valeurs plus de 15.



**FigureIV-7.** Carte de distribution des valeurs de LS factor dans le bassin versant d'Isser.

**iv. Facteur R**

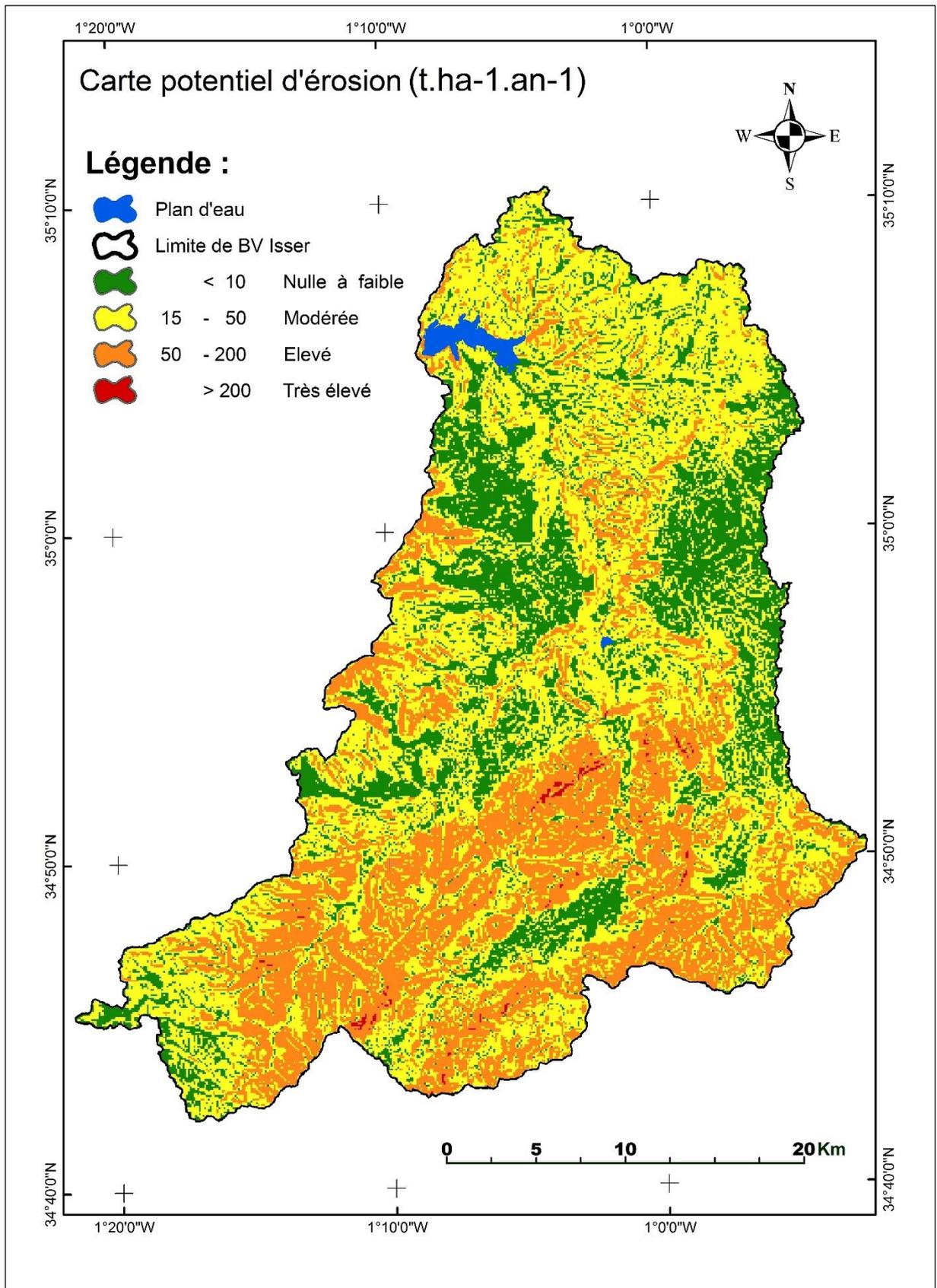
L'énergie de la pluie a un impact majeur sur la dégradation des surfaces ([Habi et al., 2009](#)). Pourtant, elles sont considérées dans les régions méditerranéennes beaucoup moins agressives que les pluies tropicales ([Roose et al., 2012](#)). Les valeurs calculées de l'agressivité climatique dans le bassin versant Isser varient entre 25,58 et 79,59 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> (figure IV-8). Sur 41,97 % de la superficie du bassin, la valeur de R est de 45 à 50 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, et seulement 7,62 % de territoire est caractérisé par des valeurs de plus de 55. Les valeurs de R varient de 20 à 100 dans le Nord-ouest algérien ([Roose et al., 2012](#), [Zekri and Clerc, 2002](#)). Il y a donc une situation paradoxale. D'une part, les climats méditerranéens sont réputés agressifs : paysages très dégradés, versants ravinés et inondations catastrophiques très fréquentes, mais d'autre part, beaucoup d'auteurs ([Touaibia et al., 2000](#), [Gomer and Vogt, 2000](#), [Roose, 1996](#), [Mazour, 1992](#), [Gomer, 1992](#)) constatent de modestes indices d'agressivité des pluies dans cette région en comparaison avec les pluies des régions tropicales humides où  $R_{usa}$  varie entre 500 et 1200 ([Roose, 1972](#), [Roose, 1994](#)). Cela semble indiquer que les séries de pluies saturantes, les pluies exceptionnelles, les systèmes de gestion, les sols et leur interaction sont à l'origine des phénomènes catastrophiques plus que l'agressivité des pluies orageuses.



**Figure IV-8.** Carte de distribution des valeurs de facteur LS dans le bassin versant d'Isser.

#### IV.2.2. Carte du potentiel érosif

Les chercheurs qui ont développé l'équation de la perte de sol ([Wischmeier and Smith, 1978](#)) ont montré que l'érosion hydrique (érosion en nappe) qui se produirait dans un domaine particulier peut être calculer par le produit de RKLS. A partir de cette équation, nous avons déduit le risque d'érosion par la multiplication des cartes par option calculatrice raster dans l'ARCGIS. La classification de la FAO (1980) a été utilisée pour extraire l'érosion et son potentiel. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure IV-9.



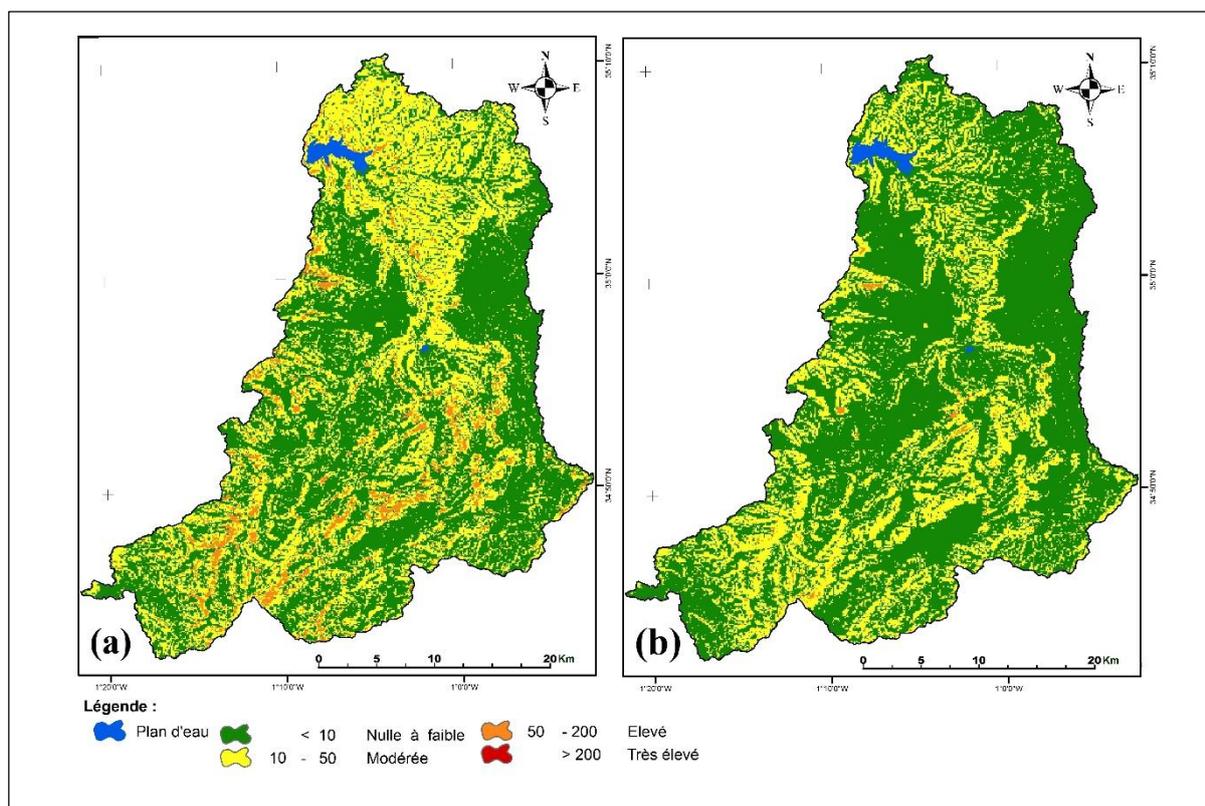
**Figure IV-9.** Carte d'érosion potentielle dans le bassin versant d'Isser.

### IV.2.3. Cartes des pertes de terres

La superposition des couches rasters de chacun des facteurs de l'érosivité des précipitations, de l'érodibilité des sols, de la topographie, de la couverture végétale avec l'utilisation de l'ArcGIS, a généré des cartes de distribution d'érosion.

Vu l'impact du couvert végétal et sa dynamique le long de l'année (variation entre la période humide et sèche), le facteur C a été calculé pour les deux périodes séparément et par les deux méthodes (Classic et NDVI).

Les cartes (figure IV-10-a et IV-11-a)) représentent le taux d'érosion des terres pour la période sèche où les terres sont moins couvertes. Alors que les cartes (figures. IV-10-b et IV-11-b) montrent le taux d'érosion pour la période humide, période où le sol est entièrement couvert par la végétation, surtout par la céréaliculture.

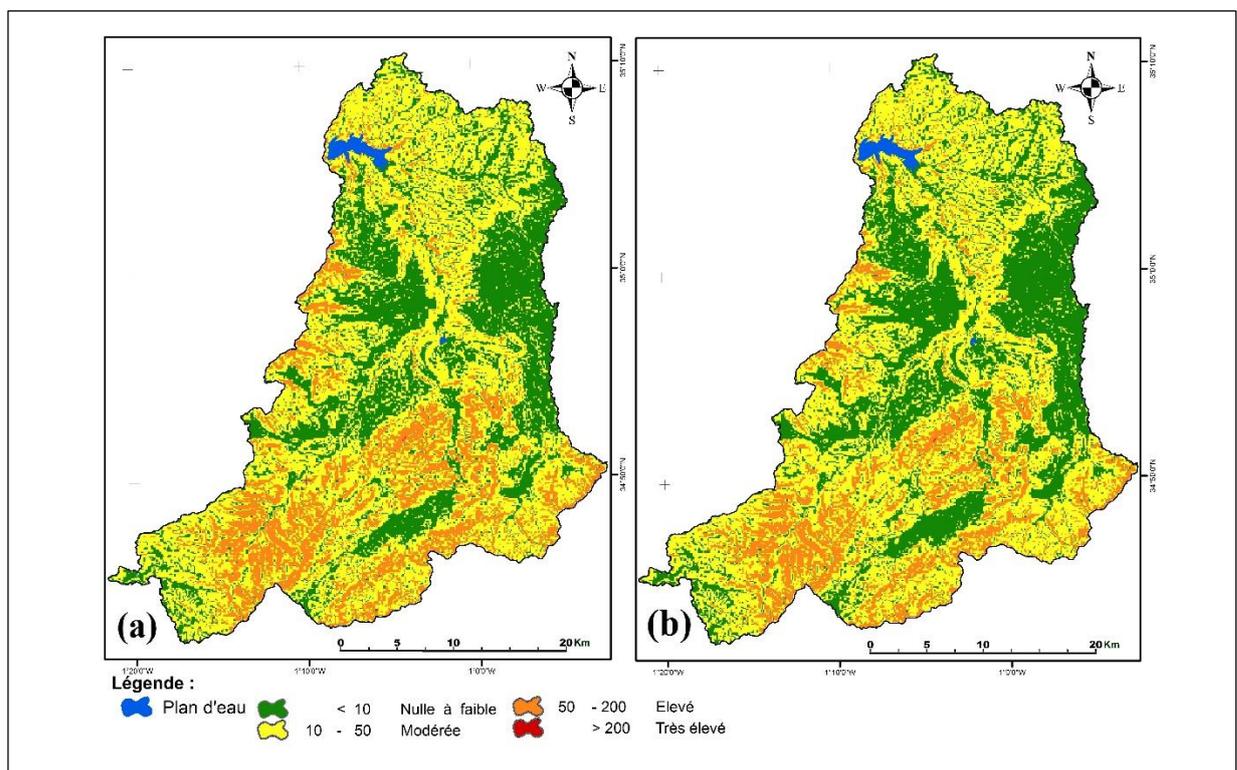


**Figure IV-10.** (a) Carte de perte de sol avec le facteur C a pendant la période sèche ; (b) pendant la période humide.

Les résultats montrent une variation spatiale et temporelle des pertes en terre. Les variations spatiales sont liées à la variation des facteurs d'érosion dans l'espace. La variation temporelle est liée principalement à la variation du couvert végétal qui reste lié au mode de gestion des terres. Le système de gestion des terres est lié au climat. Les résultats montrent en général que

les pertes en terre sont relativement élevées sur les espaces où les facteurs d'érosion sont défavorables (pentes fortes, agressivité élevée, roches tendres, couvert végétal faible). En comparant les deux périodes, il est clair qu'il y a une augmentation des taux des pertes en terre lorsque le couvert végétal diminue.

La perte moyenne des terres dans le bassin versant d'Isser est de  $14 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , perte calculée durant la période où la majorité des terres sont nues (période où les sols ne sont pas cultivés, laissant le sol nu). Les pertes dans le bassin sont estimées à  $1\,597\,491 \text{ t/an}$ . Alors que la perte en terre, calculée durant la période où la majorité des terres sont couvertes (période où les sols sont couverts par les cultures, facteur C élevé), elle est de  $7,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  et où la perte totale du bassin est de  $910\,245 \text{ t/an}$ . La différence entre les deux périodes de calcul est de 43%. Ceci montre l'utilité du calcul pour les deux périodes séparément pour les zones cultivées. Cette méthode est très utile pour la lutte antiérosive, elle permet non seulement d'identifier les espaces sensibles mais aussi les périodes critiques.



**Figure IV-11.** (a) Carte de perte de sol avec le facteur C-NDVI a pendant la période sèche ;  
(b) pendant la période humide.

La même chose a été observée par l'utilisation de l'NDVI, la différence entre les deux périodes de calcul est de 14 % (images satellitaires de mars (période humide) et de septembre (période sèche)).

En comparant les deux méthodes (classique et l'utilisation de l'NDVI), nous constatons qu'il y a une différence dans les pertes en terres annuelles. Ces dernières ont été estimées à 3 millions de tonnes par an pour la période sèche, calculé par l'utilisation NDVI, alors qu'elle est de 1,6 million de tonnes par an avec l'utilisation de la méthode conventionnelle (classique). Probablement la différence des deux approches est due à la précision de l'utilisation de l'NDVI, qui a été mentionnée par plusieurs auteurs ([Karaburun, 2010](#), [González and Rodríguez, 2013](#), [Sulistyo, 2016](#), [Jeppesen et al., 2017](#), [Křížová and Kumhálová, 2017](#)), alors que la méthode classique qui basé sur des valeurs issus de plusieurs travaux de recherche nécessite probablement encore une validation locale. L'approche NDVI est beaucoup plus précis et la plus utilisée dans les études de végétation ([Borgogno-Mondino et al., 2018](#)) que le conventionnel.

Les résultats obtenus indiquent que l'approche qui utilise le NDVI reste relativement plus appropriée par rapport à la méthode classique. La méthode classique est basée sur les données rapportées par plusieurs recherches menées en Amérique où les conditions climatiques et environnementales sont différentes ; cependant, cela nécessite toujours une validation locale. D'autre part, l'équation du facteur C utilisée dans l'approche NDVI a été développé en Italie ([Van der Knijff et al., 1999](#)), qui est un pays de climat méditerranéen ; ce pays a beaucoup de similitudes avec notre zone d'étude, ce qui pourrait expliquer la différence entre les deux approches.

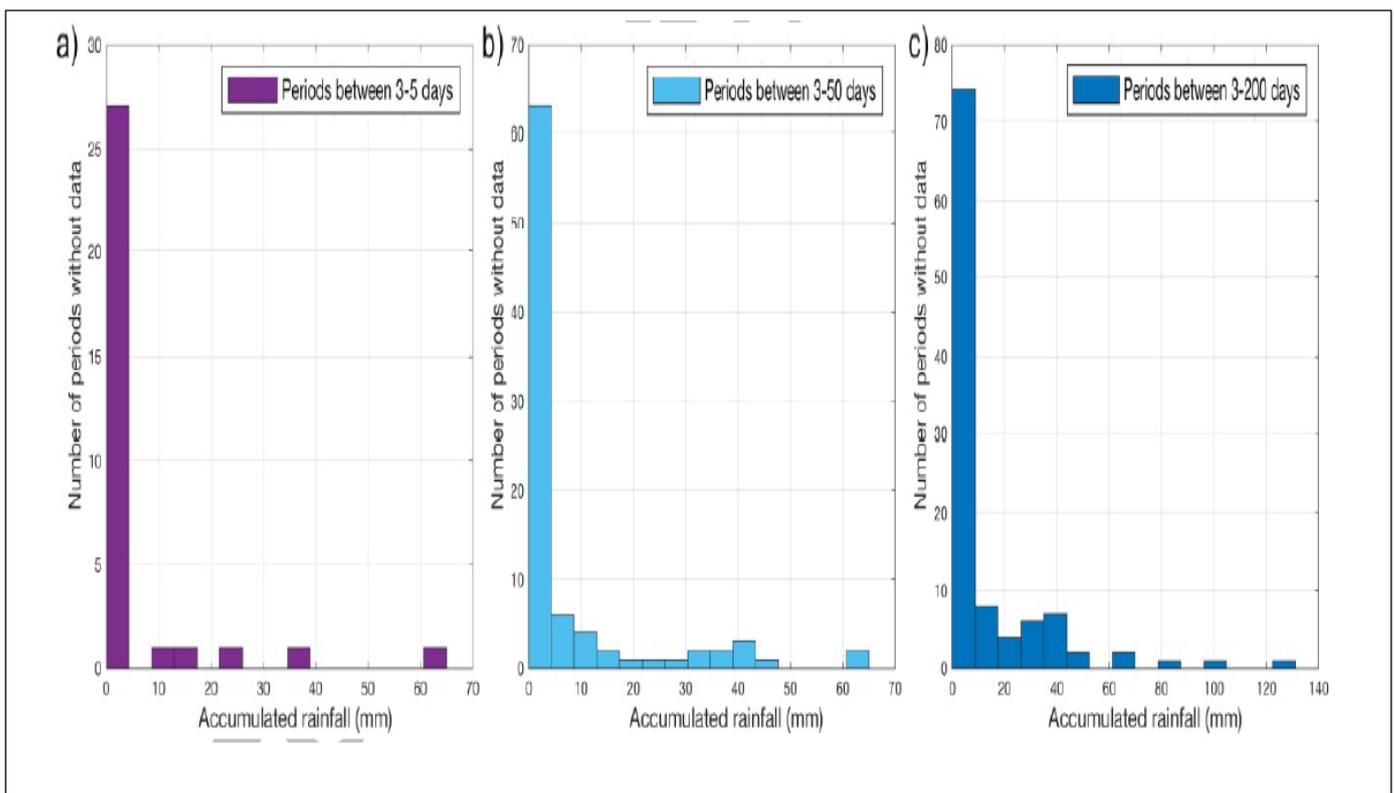
### **IV.3. Résultats de l'évaluation de l'érosion des sols par MUSEL modèle**

#### **IV.3.1. Résultats d'analyse des données**

A partir de 17 ans des mesures, la continuité et la fréquence de l'acquisition des données mesurées séparent clairement les variables météorologiques et hydrologiques. La pluie présentée des données continues quotidiennes sans lacunes, tandis que les séries des données de la concentration des sédiments en suspension SSC et Q ont montré des discontinuités importantes. Pour ce cas, les périodes dépassant 3 jours sans mesure ont été écartées pour les analyses.

En examinant les séries de données historiques, 106 lacunes ont été observées avec 2623 jours dépassant le seuil de 3 jours de données continues (43% de l'ensemble de la période). Parmi

ceux-ci, 73% correspondent à des périodes de plus de 50 jours consécutifs sans mesure, avec un total de 18 écarts. L'analyse des précipitations accumulées pendant ces périodes (figure IV-12) présente différents intervalle de temps sans mesures (2–5, 3–50 et 3–200 jours). Comme observé, la survenue d'événements pertinents avec des précipitations cumulées de plus de 35 mm et des intervalles compris entre 3 et 5 jours, est limitée à deux événements. Des intervalles longs sans données jusqu'à 197 jours, présentaient sept périodes avec des précipitations accumulées supérieures à 40 mm et des valeurs comprises entre 25 et 45 mm  $j - 1$ . Le pourcentage des jours sans pluie ou avec des valeurs cumulées inférieures à 5 mm pendant les lacunes était de 70%. Par conséquent, cette étude était basée sur 1958 échantillons de d'écoulement sédimentaire SSC et de ruissellement représentant 3522 jours (9,65 ans). Un total de 1836 jours de SSC est supposé sans contributions significatives et jusqu'à 787 jours sans mesure de la concentration des sédiments en suspension (SSC) ont été estimés, à partir de laquelle jusqu'à sept événements pluviométriques d'intensité significative ont été enregistrés.

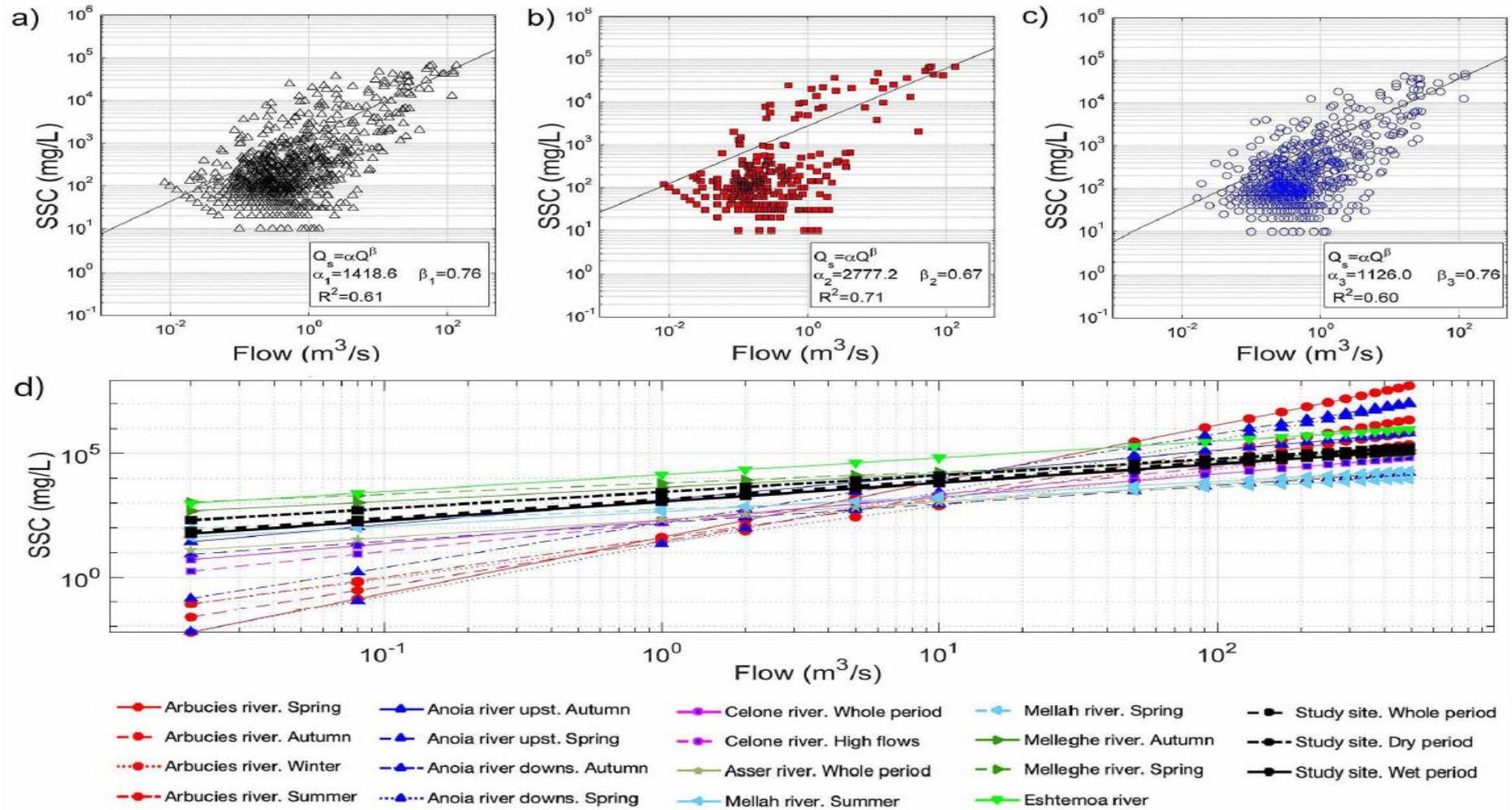


**Figure IV-12.** Précipitations cumulées par rapport au nombre de périodes sans mesures SSC et Q pour différentes intervalle temporelles : (a) 3 à 5 jours, (b) 3 à 50 jours et 3 à 200 jours.

### IV.3.2. Résultats de la relation pluie-ruissellement

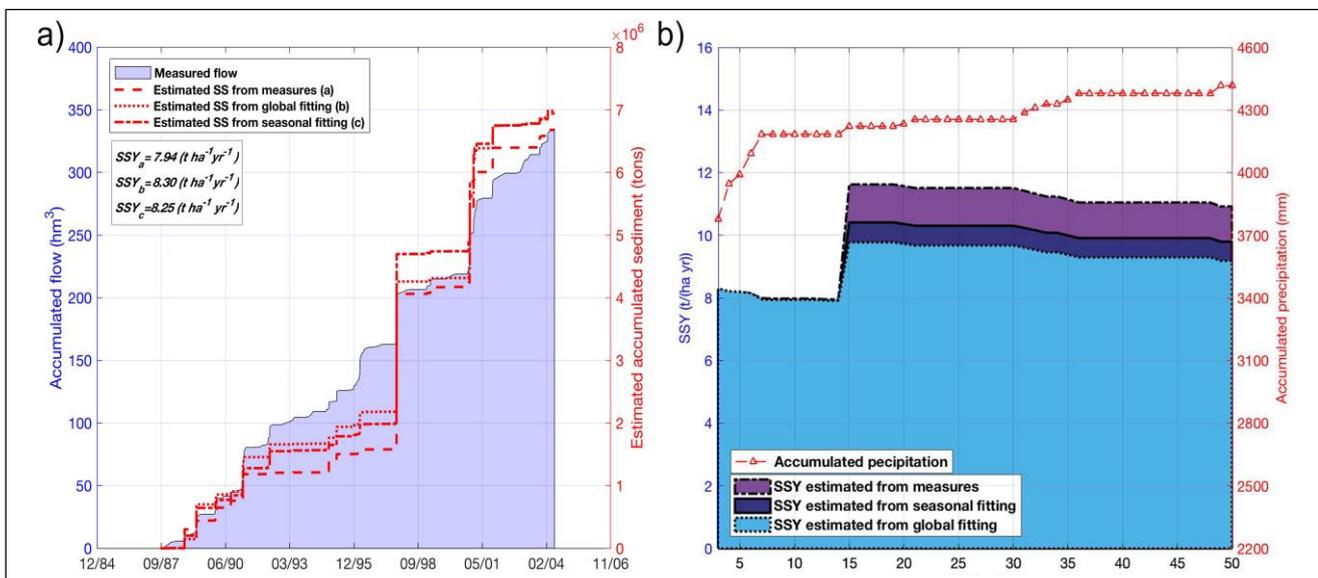
À partir des données analysées, la relation entre SSC et Q (figure IV-13 (a – c)), montre une bonne corrélation basée sur l'approche continue sur toute la période, avec  $\alpha = 126$ ,  $\beta = 0,76$ ,  $R^2 = 0,60$  et  $\rho = 0,74$ ; et pour les périodes sèches et humides, avec des valeurs respectives de 2777,2, 0,67, 0,71 et 0,80, et 1418,6, 0,76, 0,6 et 0,75. De plus, la relation dans les trois cas présentait des valeurs p de 0,05, ce qui confirme la corrélation statistique significative entre SSC et Q. La figure IV-13 (d) présente la comparaison des données saisonnières ajustées dans le site d'étude avec d'autres études dans la région méditerranéenne. Comme observé, la zone d'étude a une dynamique très similaire, dans la plage supérieure, aux autres rivières méditerranéennes ([Farguell and Sala, 2006](#), [De Girolamo et al., 2015](#), [Selmi and Khanchoul, 2016](#)), et en dessous des valeurs d'épisodes des crues à la rivière Eshtemoa ([Alexandrov et al., 2007](#)). Comme le montre la figure IV-13 (d), le nord-est une partie de la péninsule ibérique présente des variations beaucoup plus importantes de la relation SSC-Q, comme indiqué par Batalla et Sala (1994) et Farguell et Sala (2006). Dans le bassin de l'Isser, des différences significatives ont été observées entre les valeurs des paramètres ajustés pour les périodes humides et sèches. Le coefficient  $\alpha$  ajusté pour la période sèche est presque le double de celui de la période humide, tandis que le coefficient  $\beta$  est plus élevé en période humide, et a la même valeur dans l'analyse de la relation des échantillons pendant toute la période. (figure IV-13 (a)). Il est important de mentionner que le nombre d'échantillons en période humide (1393) est considérablement plus élevé que celui en période sèche (468), ce qui explique sa prédominance dans l'analyse globale. Ces résultats mettent en évidence la force érosive des événements pendant la période sèche et la variation légèrement plus grande de SSC dans le débit d'eau pendant les périodes humides.

Il est important de noter la relation entre ces résultats et d'autres bassins voisins dans le nord-ouest de l'Algérie. Les ajustements obtenus ici sont conformes à la dynamique des transport sur la Mellegue ([Selmi and Khanchoul, 2016](#)) et tous deux bien supérieurs à ceux rapportés pour le Mellah Rivière ([Khanchoul et al., 2009](#)). Cela met en évidence la grande variabilité dans les processus d'érosion et de transport en Méditerranée environnements.



**Figure IV-13.** Relation entre le SSC et le débit d'eau des échantillons mesurés pour (a) toute la période, et (b) les périodes sèches et (c) humides. (d) La comparaison avec d'autres environnements méditerranéens est présentée sur la base les sources suivantes : Fleuve Arbucies: ([Batalla and Sala, 1994](#)). ([Farguell and Sala, 2006](#), [De Girolamo et al., 2015](#), [Mano et al., 2009](#)):([Khanchoul et al., 2009](#), [Selmi and Khanchoul, 2016](#), [Alexandrov et al., 2007](#)).

L'ajustement potentiel de cette relation nous a permis d'estimer SSY sur la base des mesures disponibles du débit d'eau, de la masse des contributions de SSC, les périodes sans lacunes (avec un total de 9,65 ans) de la zone du site d'étude. La figure IV-14 (a) montre le flux des sédiments accumulé estimé à partir de la relation ajustée des mesures, de la relation ajustée potentielle pour toute la période et de la relation ajustée potentielle en distinguant les périodes sèches et humides. Le résultat fournit une plage de SSY comprise entre 7,94 et 8,25 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, en comparant les calculs à partir des données et modèles potentiels basés sur la saisonnalité. Cette gamme est très similaire (8,3 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) lorsque toute la période est considérée et la saisonnalité n'est pas prise en compte.



**Figure IV-14.** (a) Débit d'eau cumulé et débit de sédiments provenant des mesures et des estimations de la courbe d'évaluation. Impulsions d'événements significatifs et leurs impacts sur le transport des sédiments est clairement identifiés ; (b) Valeurs résultantes de SSY obtenues en considérant l'augmentation des intervalles temporelles sans mesures SSC et Q, en supposant conditions stationnaires d'écoulement.

La figure IV-14 (b) montre les effets d'une prise en compte moins restrictive des conditions stationnaires, ou périodes sans mesures, sur estimation de SSY. Comme observé, pour les trois scénarios analysés, la valeur de SSY augmente jusqu'à des maxima de 10,3, 11,7 et 9,8 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> sous des approches saisonnières, basées sur des mesures et l'approches globales, respectivement. À son tour, les précipitations accumulées ont augmenté avec le nombre élevé des jours. Ce qui montre l'occurrence d'événements signalés au cours de ces lacunes, comme indiqué précédemment, l'incertitude croissante de ces estimations.

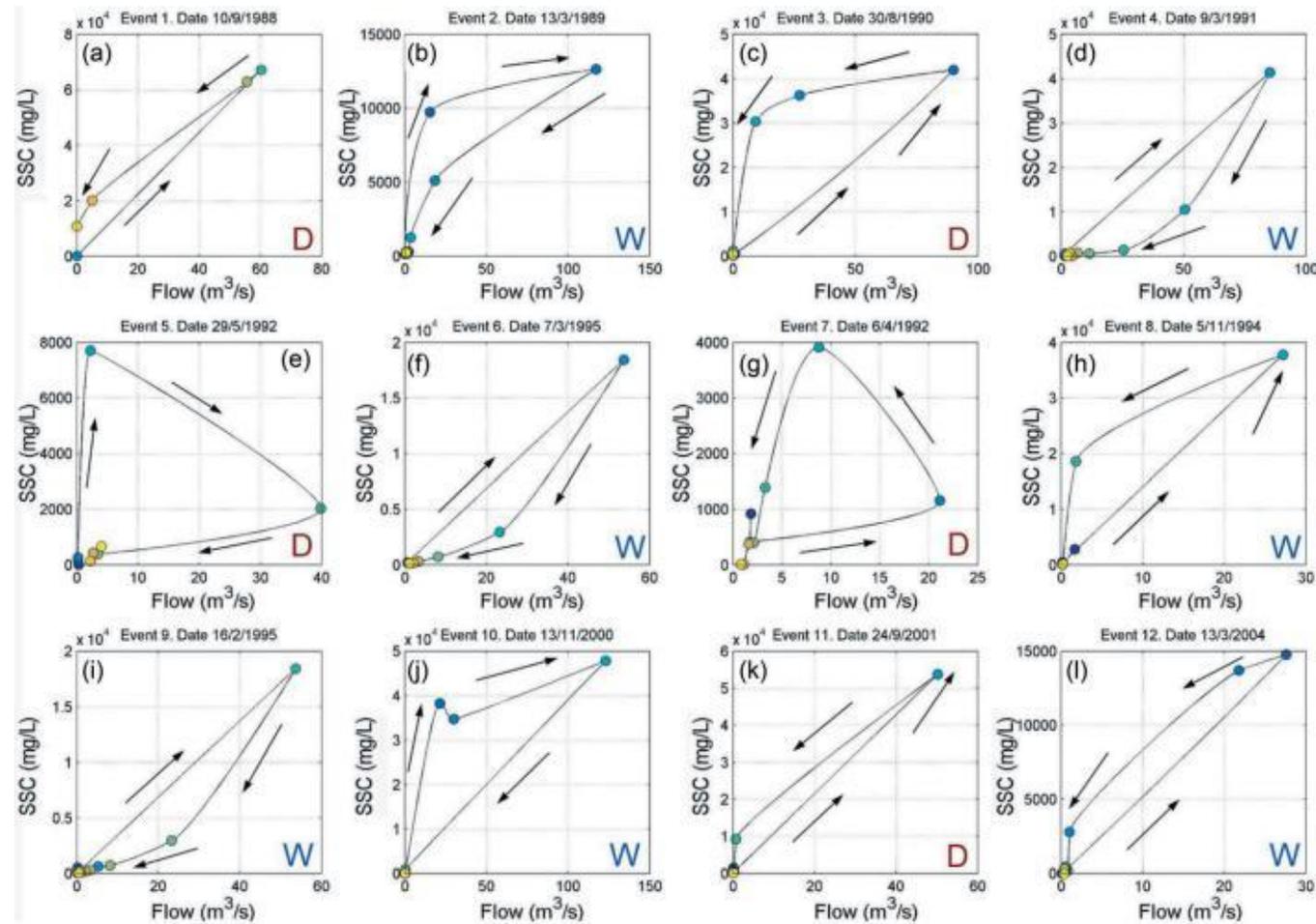
Considérant les résultats de SSY pour chaque saison séparément, des valeurs de 4,3 et 13,2 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> sont obtenues pour les périodes humides et sèches, respectivement, d'après les mesures et courbe de notation. Cette fourchette pourrait varier si l'on considère l'influence d'événements extrêmes comme celui de 300 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, rejeté en ce travail en raison d'erreurs de mesure.

Ces différences saisonnières ont déjà été signalées à Chikh et coll. (2019), qui ont signalé des taux d'érosion potentiels avec RUSLE approches associées aux changements de la couverture végétale au cours de chaque saison. Si nous considérons de tels résultats basés sur la télédétection analyse, la SSY varie de 23,5 à 25 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> (pour les et périodes humides et sèches, respectivement). Ainsi, le SDR résultant peut être estimé respectivement à 0,2 et 0,52. Dans les deux cas, ces valeurs sont plus élevés que ceux rapportés précédemment dans les relations basées sur des relations de SDR ([Ferro and Minacapilli, 1995](#), [Lu et al., 2006](#)). Cela met en évidence l'efficacité du transport des sédiments, en particulier pendant les périodes sèches. L'absence de mesures correctives, représentée par l'USLE de facteur P et la dynamique de la couverture terrestre pourraient expliquer l'extraordinaire efficacité des transports dans la zone d'étude.

### IV.3.3. Résultats d'analyse de boucle d'hystérésis

Parmi tous les événements intenses, 12 ont été sélectionnés pour l'analyse. La figure IV-15 et le tableau IV-1 montrent les résultats de la boucle d'hystérésis et un résumé de la période et de la saison de chaque événement. Comme montré, les événements sélectionnés en période humide (2, 4, 6, 8, 9, 10 et 12) principalement présenté des boucles dans le sens des aiguilles d'une montre, sauf pour les événements 8 et 12, dont les dates sont proches de la saison sèche. En revanche, la plupart des événements de la période sèche (1, 3, 5, 7 et 11) présentés dans le sens antihoraire bouclent, à l'exception de l'événement 5. Ces résultats coïncident avec les modèles saisonniers décrits dans les travaux (par exemple Zabaleta et al.2007). Si nous considérons la distribution annuelle dans laquelle ces 12 événements ont été sélectionnés, un certain cycle, similaire à celui décrit par Rovira et Batalla (2006), est identifié. Ce comportement cyclique pourrait être séparé en deux phases : (1) une phase de «préparation des sédiments», en hiver et en été, et (2) une phase de sédiments transport et épuisement au printemps et en automne. Durant cette seconde phase, lors du transport des sédiments, les événements sélectionnés à la fin de l'hiver et au printemps se sont déroulés principalement dans le sens des aiguilles d'une montre, sauf pour les événements 7 et 12, avec de faibles pics de décharge de 23 et 28 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, respectivement. Ce résultat pourrait être lié à une rapide réponse des sédiments accumulés

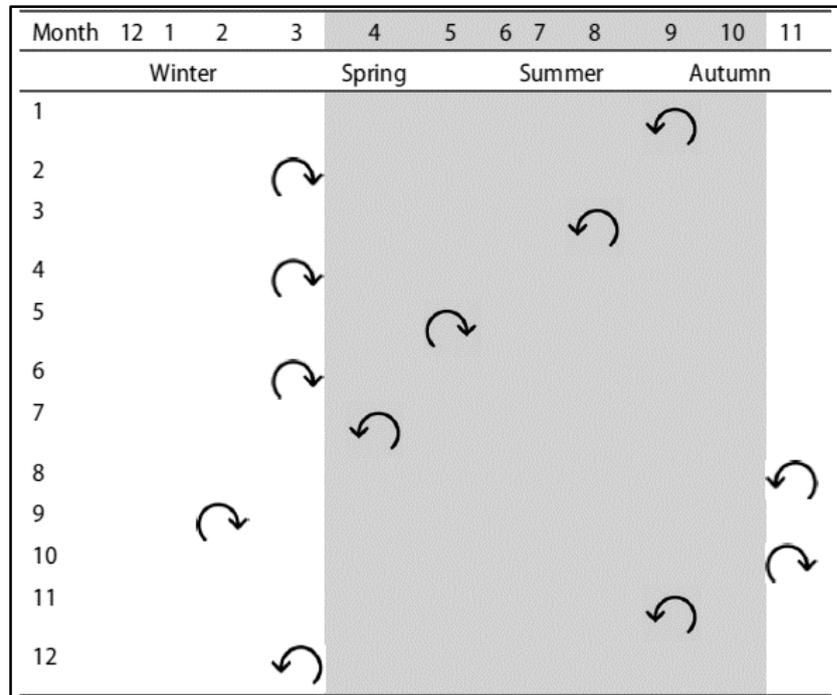
dans le chenal, comme précédemment décrit ([Lenzi and Marchi, 2000](#), [Jansson, 2002](#)). Les événements mesurés à la fin de l'été et à l'automne, principalement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, présentaient des pics considérablement plus élevés concernant le débit des sédiments (4–7 104 mg L<sup>-1</sup>). Cela pourrait être associé à des apports de sédiments provenant de tout le bassin versant, à des épisodes de pluies intenses ou à l'érodabilité des pentes plus élevées ([Seeger et al., 2004](#), [Abdelwahab et al., 2014](#)).



**Figure IV-15.** Courbes d'hystérésis pour les 12 événements les plus importants pour lesquels des données étaient disponibles dans les données historiques. D et W se réfèrent respectivement aux périodes sèches et humides. (La direction de la boucle du bleu foncé au jaune).

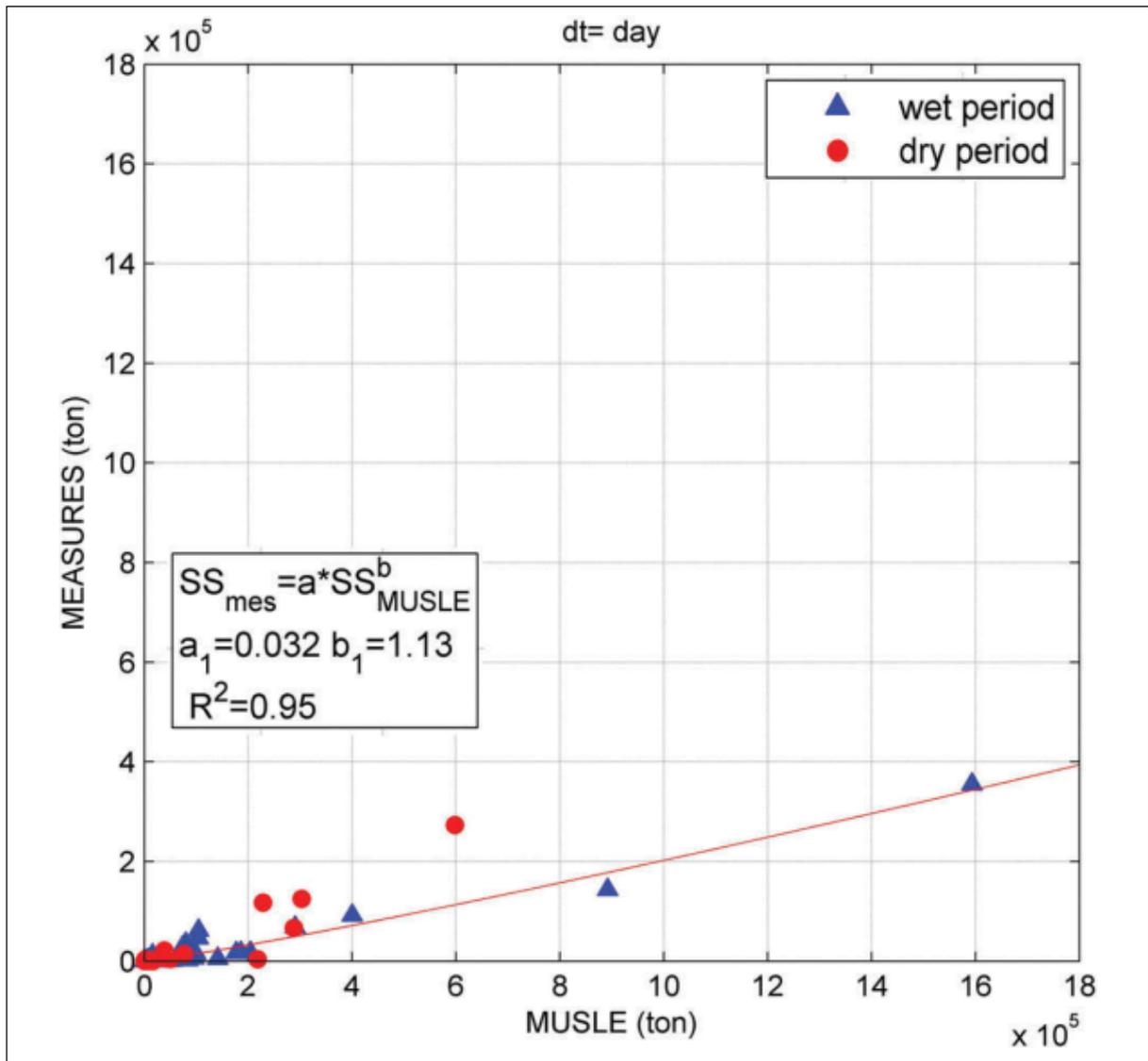
**Tableau.IV-1.** Résumé des saisons et du sens de la boucle d'hystérésis pour les événements sélectionnés. Les zones ombrées indiquent la période sèche et non ombragée la période humide. Les symboles

et indiquent respectivement le sens horaire et anti-horaire.



#### IV.3.4. Résultats de la calibration modèle MUSLE

Le volume d'eau ( $V_q$ ) et le débit maximal ( $Q_p$ ) pour chaque événement sélectionné ont été évalués. La figure IV-16 montre les résultats en comparant la masse totale obtenue par modélisation avec MUSLE et les valeurs mesurées pour chaque événement. Comme observé, la masse totale calculée par le modèle MUSLE est fortement corrélée avec la masse de sédiments sortants des événements sélectionnés ( $R^2 = 0,95$ ). Malgré cela, une nette surestimation du modèle MUSLE est observé lorsque le coefficient d'origine  $a$  et l'exposant  $b$  est utilisé, comme a déjà été signalé ([McConkey et al., 1997](#), [Sadeghi and Mizuyama, 2007](#), [Arekhi et al., 2011](#)). Les valeurs de ces paramètres, ainsi que pour le facteur global FM, qui affecte la version originale du modèle MUSLE, ont été calibrés sur la base des informations des événements sélectionnés.



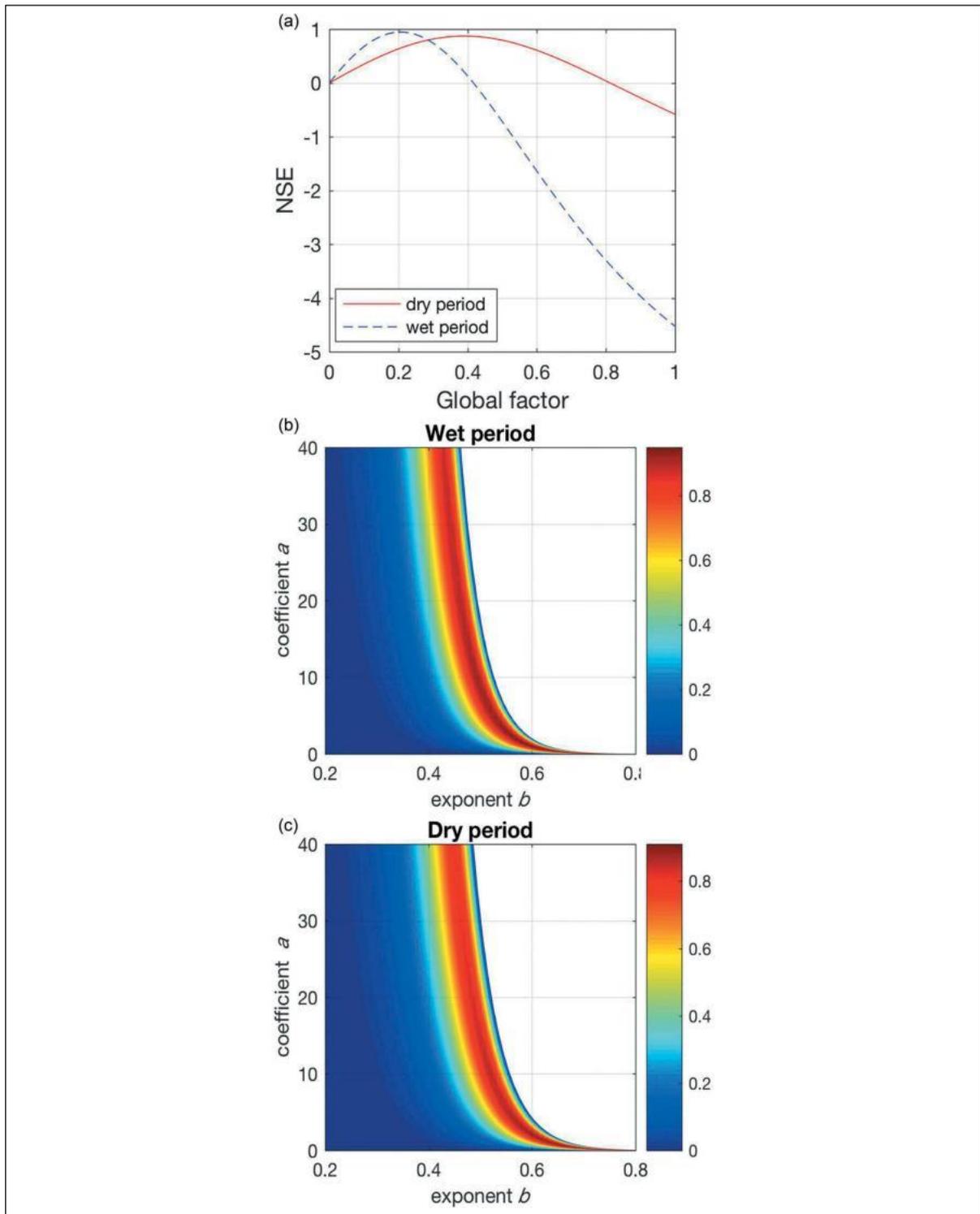
**Figure IV-16.** Relation entre la contribution estimée des sédiments mesurée pour chaque événement et celle estimée avec le modèle MUSLE pour les périodes humides (bleu triangle) et les périodes sèches (point rouge).

La figure IV-17 (a) montre les valeurs de NSE pour les résultats FM, en distinguant les périodes humides et sèches. Les figure IV-17 (b) et (c) montre les valeurs NSE obtenues pour le coefficient a et exposant b pour les périodes humides et sèches, respectivement, dans lequel les plages de valeurs optimales des deux paramètres sont clairement identifié. Le tableau IV-2 résume ces résultats sur la base des valeurs maximales de NSE.

**Tableau IV-2.** Les résultats des paramètres du modèle MUSLE calibrés dans la zone d'étude.

		<i>a</i>	<i>b</i>	$F_M$	NSE
Wet period	MUSLE original optimized	11.8	0.56	0.20	0.95
	MUSLE optimized	0.43	0.64	1	0.95
Dry period	MUSLE original optimized	11.8	0.56	0.39	0.87
	MUSLE optimized	0.05	0.79	1	0.91

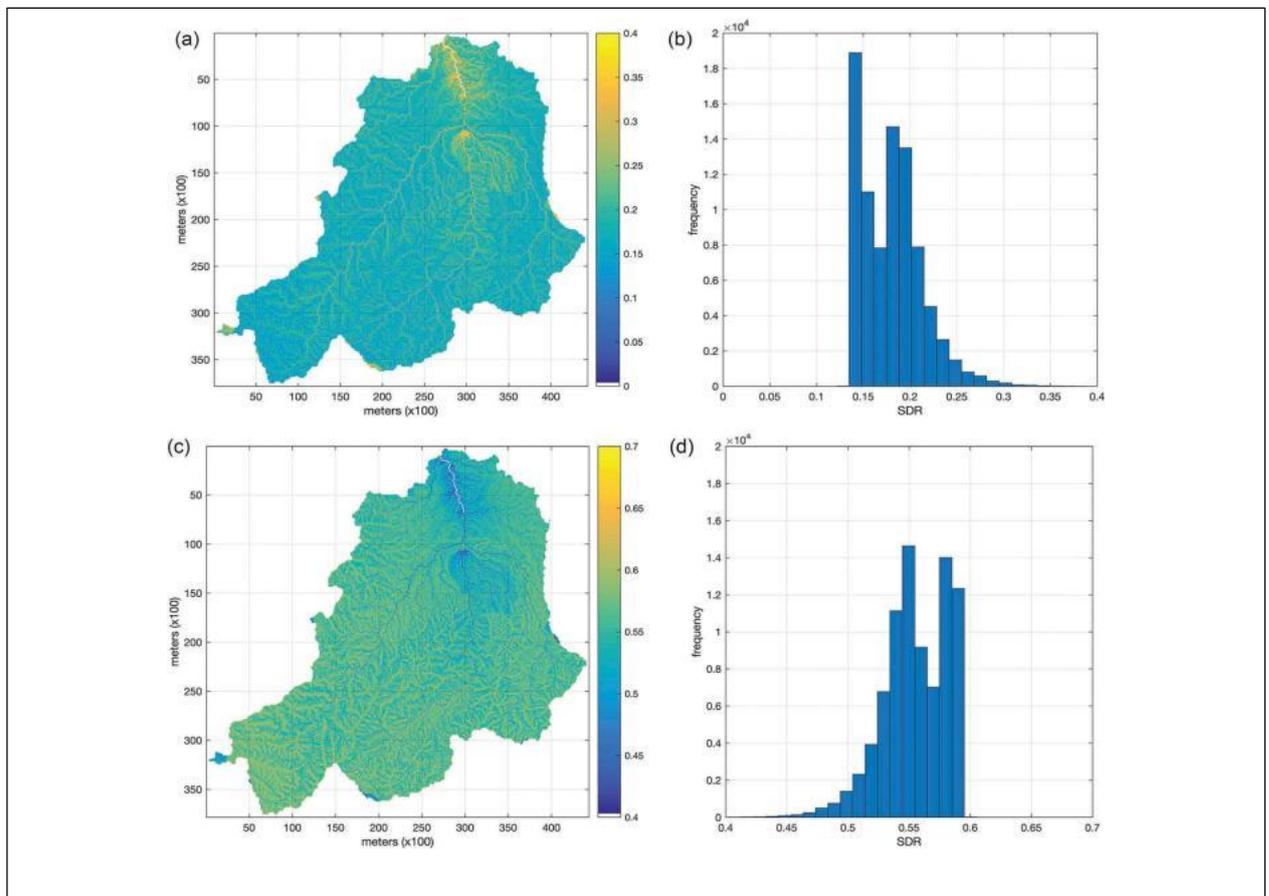
Comme la figure IV-17 (a), les valeurs optimales de  $F_M$  sont 0,2 et 0,4 pour les périodes humides et sèches, respectivement, ce qui met en évidence la surestimation significative du modèle en périodes humides et sèches, estimées respectivement à 80% et 60%. Ces résultats indiquant l'importance de l'écoulement des sédiments à l'échelle des événements dans la période sèche malgré sa fréquence plus faible. Les paramètres d'étalonnage MUSLE (figure IV-17 (b, c)) prennent en charge ces différences avec un déplacement vers des valeurs inférieures de l'exposant  $b$  dans la période humide par rapport à la période sèche. Cela implique une capacité de rendement des sédiments plus faible pour les événements survenant dans le période humide par rapport à celles de la période sèche, ce qui correspond aux résultats obtenus dans cette recherche. Le coefficient  $a$  présenté une très large gamme de valeurs optimales dans les deux cas, allant de 0,01 à 20, supérieur à la fourchette de valeurs estimée par Sadeghi et al. (2014) à partir d'une comparaison de 49 articles. Au contraire, la plage de valeurs la plus courte de l'exposant  $b$ , entre 0,4 et 0,7, était proche de la valeur moyenne estimée dans cette recherche.



**Figure IV-17.** (a) Performance mesurée par les valeurs NSE du facteur global de correction MUSLE, FM, pour les périodes humides et sèches. (b) Période humide et (c) période sèche.

### IV.3.5. Comparaison et résultats des taux d'érosion

La figure IV-18 montre les valeurs distribuées de SDR obtenues suivant la méthodologie proposée par Borselli et al. (2008). Comme observé, il y a un contraste notable entre les périodes humides et sèches pour les paramètres d'étalonnage de  $\lambda = 3,8$ , avec  $IC0 = 0,5$ , pour les périodes humides, valeurs similaires à celles rapportées par Vigiak et al. (2012) et  $\lambda = 6,3$  avec  $IC0 = 0,5$  pour les périodes sèches. Le signe de  $\lambda$  représente une augmentation continue ( $\lambda > 0$ ) ou une diminution ( $\lambda < 0$ ) SDR avec le réseau hydrographique. Sur cette base, les résultats de l'étalonnage indiquent une inversion d'efficacité de transport de sédiments entre les rivières et les pentes pendant les périodes de sécheresse, où cours d'eau ont tendance à avoir une efficacité de transport moindre que les pentes. Cet effet pourrait être lié à des différences de conditions de saturation du profil des pentes et les cours d'eau entre les saisons, qui affectent les processus de ruissellement.



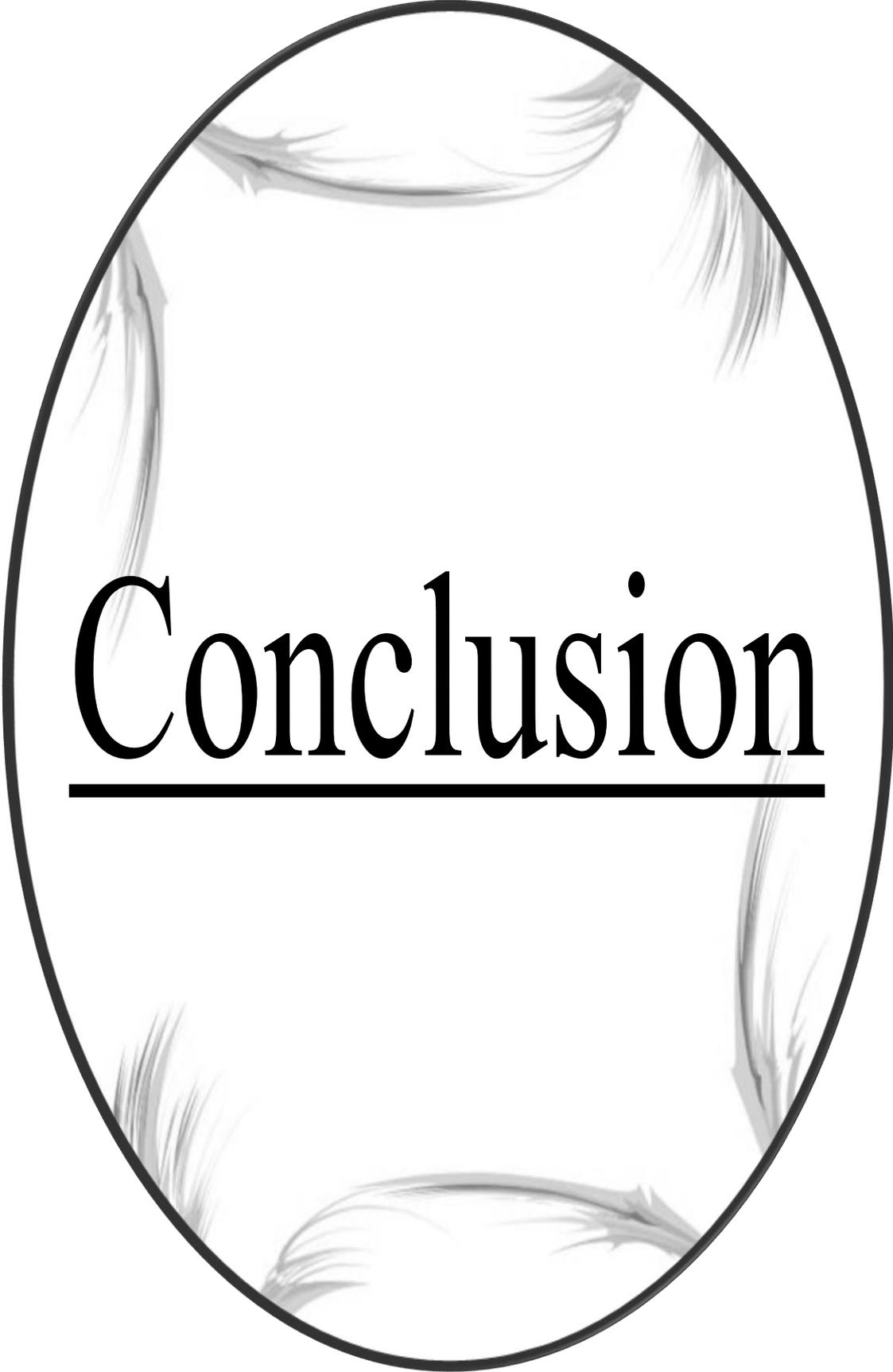
**Figure IV-18.** Valeurs distribuées de SDR, obtenues en mettant en œuvre la méthodologie de Borselli et al. (2008), et histogrammes associés pour: (a) - (b) humides et (c) - (d) secs

D'après ces résultats, bien que la valeur moyenne du SDR en les périodes sèches soit plus élevée, l'efficacité le long du réseau de drainage est similaire ou supérieur en période humide, ce qui correspond aux valeurs de  $\beta$  obtenues à partir des ajustements de la courbe de notation. Il est important de mettre en évidence la haute sensibilité de  $\lambda$  vis-à-vis de  $IC0$ , qui peut être considéré comme indépendant du paysage ([Vigiak et al., 2012](#)).

À l'échelle de l'événement, un total de 25 et 59 événements de pluie ont été sélectionnés pour les périodes sèches et humides, respectivement. Pour chaque événement, nous avons calculé le flux de sédiments et les contributions totales du débit. Parmi ceux-ci, seuls les plus grands événements ont été choisis pour analyse d'hystérésis, par ordre décroissant du débit de pointe, ceux qui n'ont pas présenté un minimum de 4 jours de mesures consécutives. On suppose qu'intense les événements dominant l'érosion et la dynamique des transports dans le zone d'étude.

Ces résultats, qui correspondent aux schémas de dégradation des sols décrits pour la zone d'étude, soutiennent également les différences entre les périodes analysés à partir des courbes de notation et des valeurs SDR (le taux de livraison des sédiments) distribuées. Les sédiments sortants des 84 événements pluvieux étaient proches à  $1,58 \times 10^6$  t, ce qui représente les 23,7% des valeurs estimées pour toute la période, avec la durée comprise entre 1 et 4 journées. Si l'on considère les 10 plus grands événements quotidiens, 6 en périodes humides et 4 en période sèche, leur masse totale représentait la 34,6% des contributions pendant la période d'étude. Ce pourcentage est proche de la valeur moyenne obtenue par González-Hidalgo et al. (2010). Si l'on considère les 10 plus grands événements quotidiens, 6 en périodes humides et 4 en période sèche, leur masse totale représentait 34,6% des contributions pendant la période d'étude. Ce pourcentage est proche de la valeur moyenne obtenue par González-Hidalgo et al. (2010) si l'on considère les dix plus grands événements de 1314 bassins à travers les États-Unis.





# Conclusion





## V. CONCLUSION

Les résultats de cette étude ont fourni une riche information concernant la spatialisation et la quantification de l'érosion potentielle. L'utilisation du système d'information géographique (SIG), du modèle (équation) universelle révisée et modifié de la perte de sol (RUSLE et MUSEL) ainsi que du Programme d'Actions Prioritaires du Centre d'Activités Régionales (PAP /CAR) avec l'utilisation de la télédétection a permis d'aborder plusieurs sujets à la fois pour la compréhension du risque et de l'ampleur de l'érosion hydrique.

La méthodologie PAP / RAC, adoptée dans cette étude, en considérant l'état physique du terrain (topographie et lithofaciès) et la protection du sol (densité de la végétation couverture); a permis une bonne estimation de la sensibilité des terres à l'érosion. La carte de l'état de l'érosion, qui dérive de la carte d'érodibilité et de la carte de protection des sols, illustre bien la sensibilité de la zone à l'érosion. Cette carte montre clairement que les zones potentiellement les plus vulnérables à l'érosion (forte classe et très haute classe), qui couvrent 60,24% du total de la zone du bassin, correspondent à des zones de roches tendre et non cohérentes, caractérisées par une couverture végétale temporaire et médiocre.

Les résultats obtenus par l'équation universelle de perte de sol révisée (RUSLE) montrent l'existence de variations spatiales et temporelles des pertes de sol. Les variations spatiales sont liées à la variation des facteurs d'érosion dans l'espace. Cependant, la variation temporelle est essentiellement liée à la variation de la couverture végétale qui est liée au mode de gestion des terres et au climat. Les pertes de sols sont relativement élevées dans les zones caractérisées par des pentes raides, de forte agressivité sur le sol, des roches tendres et molles et de faible couvert végétal. Les résultats liés aux pertes annuelles de terres, obtenues par les deux méthodes (classique et NDVI), se révèlent différents. La différence entre les deux approches est probablement due au fait que le NDVI est plus précise. D'autre part, la méthode classique qui est basé sur des valeurs tirées de plusieurs travaux de recherche probablement a encore besoin d'une validation locale. Cette différence de résultats a été observé par plusieurs auteurs.

En comparant les résultats obtenus pour les périodes humides et sèches, on constate qu'il y a une différence dans les pertes de sol. L'utilisation des deux méthodes (PAP/RAC et RUSLE), ont bien montré cette différence entre les deux périodes. Ceci montre bien la nécessité d'étudier les deux périodes séparément surtout dans les zones cultivées. Cette méthode est intéressante pour lutter contre l'érosion des sols, elle permet non seulement d'identifier les zones sensibles à l'érosion mais aussi les périodes critiques d'érosion.

## Conclusion

La comparaison des résultats de la cartographie des zones d'érosion potentielle, en utilisant la méthode PAP / CAR et le Produit RKLS (méthode RUSLE), montre que les résultats sont un peu différents. En effet, la méthode PAP / CAR indique que les terrains présentant un risque d'érosion élevé à très élevé représentent 60,24% de terres. Cependant, la méthode RUSLE (produit RKLS) montre que ces terres qui ont un degré élevé à très élevé de risque d'érosion, ne dépassent pas 39,35% du total de terrain. Les mêmes résultats ont été observés pour les zones à faible taux d'érosion (27,13% pour PAP / CAR et 12,82% pour RUSLE). Cette différence entre les résultats est probablement due à la divergence des méthodes utilisées dans la détermination du niveau de risque d'érosion potentiel et le mode de classification.

L'utilisation du MUSLE a permis d'estimer la perte de sol attribuée à la saisonnalité à travers l'analyse des données de 17 ans de suivi des sédiments en suspension. Des variations de l'érosion et de la dynamique de transport pendant les périodes sèches et humides ont été observées. Les courbes SSC – Q ajustées ont montré une bonne relation et une bonne corrélation, présentant une dynamique de transport similaire par rapport aux autres zones méditerranéens, surtout pendant la saison sèche. La relation obtenue, nous a permis de faire une estimation plus contrastée de SSY, évaluée entre 8 et 8,3 t/ha/ an à partir des mesures et de l'ajustement de la courbe de notation basées sur des approches globales ou saisonnières. L'analyse nous a permis également d'identifier des différences significatives saisonnières de SSY, estimées à 4,3 et 13 t/ha/an pour les périodes humides et sèches respectivement. Cette différence de dynamique érosive est fonction du changement de la couverture végétale lors de chaque saison. De plus, ces résultats nous ont permis de comparer la livraison des sédiments, estimé à 0,2 et 0,55 pour les saisons humides et sèches respectivement. Analyse de la SDR montre une augmentation de l'efficacité des transports, dans les pentes pendant les saisons sèches et dans le réseau des canaux pendant les périodes humides.

À l'échelle des événements, la sélection des événements pluviométriques pertinents nous a permis de comparer aussi la saisonnalité sur le transport des sédiments dynamique. L'étude des 12 plus grands événements disponibles dans les périodes sèches et humides a confirmé les différences dans les boucles d'hystérésis liées à la saisonnalité. Ces résultats sont en concordance avec ceux trouvés en régions méditerranéennes et dans d'autres environnements. Pour les périodes sèches, la plupart des événements sélectionnés présentaient des boucles antihoraire, alors que les périodes humides présentent des boucles dans le sens horaire. Ces résultats pourraient être liés aux sédiments stockés dans le chenal pendant des épisodes pluvieux répétées et d'intensité modérée pendant les périodes humides. Les taux d'érosion relativement

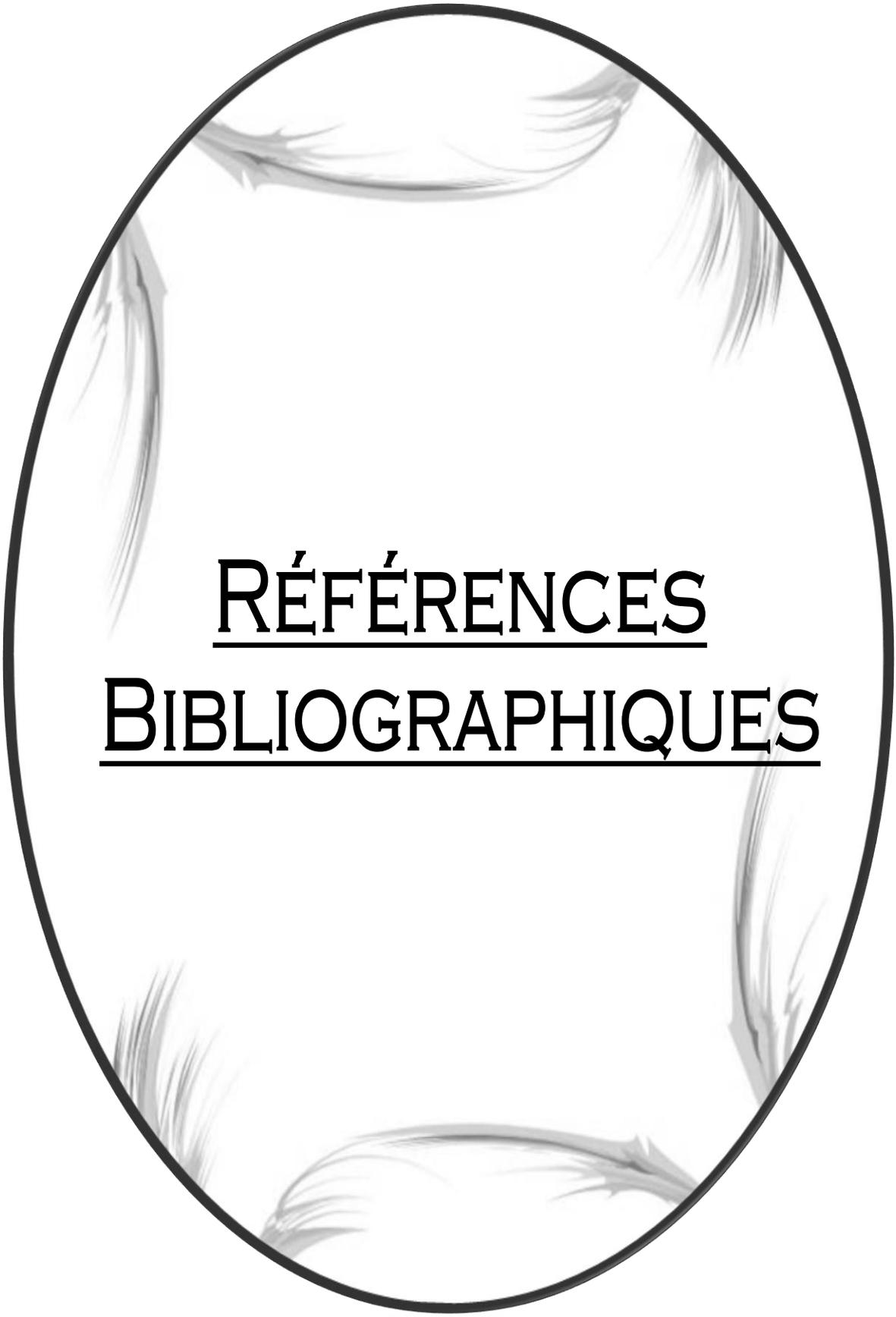
## Conclusion

élevée sur les versants pentus pendant les périodes sèches sont liés au faible taux de couvert végétal.

La contribution totale des 84 événements sélectionnés représente 25% du SSY estimé. Si nous considérons les 10 plus grands événements journaliers, leur quantité totale de sédiments correspondait à une fraction de 34,6% de la production totale de sédiments, ce qui est faible par rapport à d'autres environnements méditerranéens. L'application du modèle MUSLE avec ses paramètres d'origine ont montré une surestimation de la contribution des sédiments à la fois des périodes sèches et humides, 60% et 80% respectivement. L'étalonnage du Modèle a permis d'obtenir les valeurs du coefficient « a » et de l'exposant « b » pour les périodes sèches et humides. Ceci a montré la gravité des événements survenus pendant la période sèche. Ces résultats mettent en évidence l'importance de la saisonnalité des processus d'érosion et du transport des sédiments, ce qui est particulièrement pertinent dans les environnements méditerranéens où les futurs scénarios climatiques basés sur les modèles de circulation atmosphérique générale prévoient une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements en période sèche.

Pour conclure on peut dire que les différentes méthodes utilisées ont apporté des éléments utiles à la compréhension de l'ampleur et à l'identification des zones sensibles. Les résultats obtenus par les différentes approches ont abouti à des résultats convergents. Un certain nombre de perspectives peut être envisagé concernant le travail présenté, il serait intéressant d'étudier de manière plus précise l'évolution de la sensibilité des terrains dans l'espace et dans le temps. Le traitement des images satellitaires à haute résolution et un suivi temporel à l'échelle saisonnière avec des satellites de grande répétitivité temporelle pourrait fournir plus de renseignements.





RÉFÉRENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES



## Références

- ABDELLAOUI, A., LAI, R. & BOUGHALEM, M. 2014. GEMAS: une application Visual C# pour la gestion automatisée du découpage de l'espace en mailles régulières géoréférencées. *Revista de geomorfologie vol*, 16, 25-35.
- ABDELWAHAB, O. M., BINGNER, R. L., MILILLO, F. & GENTILE, F. 2014. Effectiveness of alternative management scenarios on the sediment load in a Mediterranean agricultural watershed. *Journal of Agricultural Engineering*, 45, 125-136.
- ABDESSLAM, K. H. 2019. *Estimation et modélisation des transports solides, utilisation du SIG pour la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique. Application au bassin versant du barrage Meffrouche. Université abou bakr belkaid tlemcen- faculté de technologie. Thèse de doctorat.*
- ABDO, H. & SALLOUM, J. 2017. Mapping the soil loss in Marqya basin: Syria using RUSLE model in GIS and RS techniques. *Environmental Earth Sciences*, 76, 114.
- ACHITE, M. & MEDDI, M. 2005. Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'oued Mina (nord-ouest algérien). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 18, 37-56.
- ACHITE, M. & OUILLON, S. 2007. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). *Journal of hydrology*, 343, 187-202.
- ACHITE, M. & OUILLON, S. 2016. Recent changes in climate, hydrology and sediment load in the Wadi Abd, Algeria (1970–2010). *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 1355-1372.
- ALBERGEL, J., MOUSSA, R. & CHAHINIAN, N. 2003. Les processus hortonien et leur importance dans la genèse et le développement des crues en zones semi-arides. *Houille Blanche*, 65-73.
- ALEXANDROV, Y., LARONNE, J. B. & REID, I. 2007. Intra-event and inter-seasonal behaviour of suspended sediment in flash floods of the semi-arid northern Negev, Israel. *Geomorphology*, 85, 85-97.
- ALGUI, T. & CHEZAL, L. 1996. Dégradation physico-chimique des sols comme manifestation des processus opérant à l'interface «milieu naturel population». *Ecole Supérieure d'Agriculture de Mograne*, N°11.
- AMAMRA, A. 2017. Bilan des flux de matières particulaires et dissoutes du bassin versant de l'oued kébir-Est. . *Université badji mokhtar - Annaba faculté des sciences département de biologie*, , Thèse de doctorat.
- ANDILYAT, M. 2016. Apport de la géomatique sur l'identification des impacts du changement climatique aux comores : cas de la naissance d'une mangrove après élévation du niveau de la mer sur l'île de Ngazidja. . *3ème Edition du Colloque International des utilisateurs du SIG*, Oujda. Publication de séminaire.
- ANDRIAMASIMANANA, R. 2011. Analyses de la dégradation du lac Kinkony pour la conservation du Complexe des Zones Humides Mahavavy-Kinkony, Région Boeny, Madagascar. *Madagascar Conservation & Development*, 6.
- ANTONI, V. & DARBOUX, F. 2009. L'érosion des sols. *Manuscrit publié dans [http://www.alimentation-sante.org/documentation/terre\\_table/](http://www.alimentation-sante.org/documentation/terre_table/).*
- ARABI, M. & ROOSE, E. Water and soil fertility management (GCES). A new strategy to fight erosion in Algerian mountains. 7th ISCO Conference Pro, 1992. 341-347.
- ARAR, A. & CHENCHOUNI, H. 2014. A "simple" geomatics-based approach for assessing water erosion hazard at montane areas. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 1-12.

## Références Bibliographiques

- AREKHI, S., NIAZI, Y. & KALTEH, A. M. 2012. Soil erosion and sediment yield modeling using RS and GIS techniques: a case study, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 5, 285-296.
- AREKHI, S., SHABANI, A. & ALAVIPANAH, S. K. 2011. Evaluation of integrated KW-GIUH and MUSLE models to predict sediment yield using geographic information system (GIS)(Case study: Kengir watershed, Iran). *African Journal of Agricultural Research*, 6, 4185-4198.
- ASCE, T. C. O. H. H. O. M. G. D. O. Hydrology handbook. 1996. American Society of Civil Engineers.
- ASSELMAN, N. E., MIDDELKOOP, H. & VAN DIJK, P. M. 2003. The impact of changes in climate and land use on soil erosion, transport and deposition of suspended sediment in the River Rhine. *Hydrological Processes*, 17, 3225-3244.
- AUERSWALD, K., FISCHER, F. K., KISTLER, M., TREISCH, M., MAIER, H. & BRANDHUBER, R. 2018. Behavior of farmers in regard to erosion by water as reflected by their farming practices. *Science of the Total Environment*, 613, 1-9.
- AVANZI, J. C., SILVA, M. L., CURI, N., MELLO, C. R. D. & FONSECA, S. 2008. Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma microbacia hidrográfica nos Tabuleiros Costeiros brasileiros. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12, 563-569.
- AZAIÉZ, N. 2015. La dynamique géomorphologique actuelle dans le bassin versant de l'oued El Meleh Bou el Ajraf (Tunisie Centre- Orientale) : cartographie et essai de quantification de l'érosion hydrique *Doctorat en géographie* Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis. Tunisie.
- BADREDDINE, B., MOHAMMED, H., BOUTKHIL, M. & AHMED, A. 2021. Assessment of erosion: use of nuclear techniques and conventional methods—case of the Fergoug watershed, Algeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 1-17.
- BAGARELLO, V., FERRO, V., AND GIORDANO, G., 1991 Contribution to the evaluation of the Williams outflow factor and the solid yield coefficient for some Sicilian watersheds (Contributo alla valutazione del fattore di deflusso di Williams e del coefficiente di resa solida per alcuni bacini idrografici siciliani). *Rivista Di Ingegneria Agraria*, 4, 238–251.
- BAGNOULS, F. & GAUSSEN, H. Les climats biologiques et leur classification. *Annales de géographie*, 1957. JSTOR, 193-220.
- BARTHES, B. & ROOSE, E. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 47, 133-149.
- BATALLA, R. J. & SALA, M. 1994. Temporal variability of suspended sediment transport in a Mediterranean sandy gravel-bed river. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 224, 299-306.
- BATJES, N. 1996. Global assessment of land vulnerability to water erosion on a ½ by ½ grid. *Land Degradation & Development*, 7, 353-365.
- BEAULIEU, R., BREUNE, I. & GUILLOU, M. 2007. Diagnostic et solutions de problèmes d'érosion au champ et de drainage de surface. *Problèmes d'érosion au champ et de drainage de surface — diagnostic et solutions*. Agriculture et Agroalimentaire Canada. Québec. Fiche technique.
- BELASRI, A. & LAKHOULI, A. 2016. Estimation of soil erosion risk using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and geo-information technology in Oued El Makhazine watershed, Morocco. *Journal of Geographic Information System*, 8, 98.
- BEN BACHIR, M. 2012. *Les effets de l'humidité initiale du sol sur la distribution des particules par le splash*. Thèse de doctorat.

## Références Bibliographiques

- BEN SLIMANE, A. 2013. *Rôle de l'érosion ravinatoire dans l'envasement des retenues collinaires dans la Dorsale tunisienne et le Cap Bon*. Montpellier, SupAgro. Thèse de doctorat.
- BEN SLIMANE, A., RACLOT, D., EVRARD, O., SANAA, M., LEFEVRE, I. & LE BISSONNAIS, Y. 2016. Relative contribution of rill/interrill and gully/channel erosion to small reservoir siltation in Mediterranean environments. *Land Degradation & Development*, 27, 785-797.
- BENCHETTOUH, A. 2019. *L'érosion hydrique dans les régions marneuses du Tell oranais: cas des bassins versant du barrage Saada (Relizane) et Kramis (Mostaganem)*. Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis. Thèse de doctorat.
- BENCHETTOUH, A., KOURI, L. & JEBARI, S. 2017. Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE/GIS techniques and practices conservation suggested for reducing soil erosion in Wadi Mina watershed (northwest, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 79.
- BENKHALED, A. & REMINI, B. 2003. Analyse de la relation de puissance: débit solide-débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrane (Algérie). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 16, 333-356.
- BLANCO, H. & LAL, R. 2008. *Principles of soil conservation and management*, LIVRE/ Vol. 167169. New York: Springer.
- BLAVET, D., DE NONI, G., LE BISSONNAIS, Y., LÉONARD, M., LAURENT, J.-Y., ASSELINE, J. & ROOSE, E. 2008. Génèse de l'érosion en milieu viticole méditerranéen à sols bruns calcaires: modalités, déterminants et indicateurs potentiels.
- BLEU, P. & ANTIPOLIS, S. 2003. Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens méditerranéens. ISBN : 2-912081-13-0, Etude bibliographique.
- BOARDMAN, J. 1998. An average soil erosion rate for Europe: myth or reality? *Journal of Soil and Water Conservation* 53, 46-50.
- BOPP, M.-C., GRASSELLY, D., COLLEU, S., LESCOURRET, F., BERGÈRE, D., DEMANGE, E., GUÉRIN, A., GUILLERMIN, P., HUTIN, C. & LAURENS, F. 2019. *Les services rendus par les cultures fruitières*. CTIFL; INRA; Groupement d'Intérêt Scientifique Fruits. Thèse de doctorat.
- BORGES, A. L. 1993. *Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du Sud*. Thèse de doctorat. Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- BORGOGNO-MONDINO, E., LESSIO, A., TARRICONE, L., NOVELLO, V. & DE PALMA, L. 2018. A comparison between multispectral aerial and satellite imagery in precision viticulture. *Precision Agriculture*, 19, 195-217.
- BORSELLI, L., CASSI, P. & TORRI, D. 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75, 268-277.
- BOUANANI, A. 2004. Hydrologie, Transport solide et Modélisation: Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie). *Thèse de doctorat, Univ. Tlemcen, Algérie*.
- BOUCHELKIA, H. & REMINI, B. 2003. Quantification du transport solide dans le bassin versant algérien du Chellif. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, p. 45-p. 56.
- BOUCHETATA, A. & BOUCHETATA, T. 2006. Propositions d'aménagement du sous-bassin-versant de l'oued Fergoug (Algérie) fragilisé par des épisodes de sécheresse et soumis à l'érosion hydrique. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 17, 415-424.
- BOUET, C., LABIADH, M. T., BERGAMETTI, G., ATTOUI, B., LAURENT, B., MARTICORENA, B., RAJOT, J. & KHATTELI, H. 2015. Quantification de l'érosion éolienne dans le sud tunisien. *Revue des régions arides*, 151-171.

## Références Bibliographiques

- BOUGHALEM, M., MAZOUR, M., GRECU, F., ABDELLAOUI, A. & HAMIMED, A. 2013. Evaluation par analyse multicritères de la vulnérabilité des sols à l'érosion: cas du bassin versant de l'Isser-Tlemcen-Algérie. *Analele Universității București*, 5-26.
- BOUGUERRA, S.-A. 2018. *Quantification Et Modelisation Du Transport Solide En Climat Semi-Aride, Cartographie Du Risque D'érosion Hydrique Au Moyen D'un Sig: Cas Des Deux Bassins Versants Oued Boukiou Et Oued Boumessaoud (NW De L'algerie)*. Université de Tlemcen- Thèse de Doctorat.
- BOUHADEB, C. 2019. *Evaluation du transport solide au niveau du bassin versant de Oued Bounamoussa et ses incidences sur l'envasement du barrage de Cheffia (Nord-Est algérien)*. Université de Batna 2. Thèse de doctorat.
- BOUKRIM, S., LAHRACH, A., MIDAOU, A., BENJELLOUN, F., BENABDELHADI, M., LAHRACH, H. & ABDEL-ALI, C. 2016. Cartographie De L'érosion Qualitative Des Sols Du Bassin Versant De L'aoudour (Rif-Maroc). *European Scientific Journal*, 12.
- BOULTIF, M. & BENMESSAOUD, H. 2017. Using climate-soil-socioeconomic parameters for a drought vulnerability assessment in a semi-arid region: Application at the region of El Hodna, (M'sila, Algeria). *Geographica Pannonica*, 21, 142-150.
- BOUROUBA, M. 1997. Les variations de la turbidité et leurs relations avec les précipitations et les débits des oueds semi-arides de l'Algérie orientale. *Bull. ORSTOM*, 17, 345-360.
- BOUROUBA, M. 1998. Phénomène de transport solide dans les Hauts Plateaux Orientaux. Cas de l'Oued Logmane et oued Leham dans le bassin de la Hodna. *Rev. Sci. Technol*, 9, 5-11.
- BROOKS, K. N., FFOLLIOTT, P. F. & MAGNER, J. A. 2012. *Hydrology and the Management of Watersheds*, Une publication de John Wiley & Sons, Inc. livre., John Wiley & Sons.
- CALAIS, C. A. D. R. D. N.-P. D. 2013. Guide de l'érosion des sols. *service communication et offres de service - VM201300015*
- CARIELLO, B., BLANCO, C., GOMIDE, I., BARBOSA, A. & SANTOS, D. 2014. Application and Calibration of the Modified Universal Soil Loss Equation to estimate the sediment yield in a small Amazon catchment. *Sylwan Journal*, 347.
- CARLOS, O. 1996. Transports solides : modèles et conditions d'application en région PACA. *Rapport BRGM R39474, décembre 1996, X pages*.
- CHALOV, S., GOLOSOV, V., TSYPLENKOV, A., THEURING, P., ZAKERINEJAD, R., MÄRKER, M. & SAMOKHIN, M. 2017. A toolbox for sediment budget research in small catchments. *Geography, Environment, Sustainability*, 10, 43-68.
- CHAPLOT, V. & LE BISSONNAIS, Y. 2000. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 25, 145-153.
- CHAPPELL, A., WEBB, N. P., GUERSCHMAN, J. P., THOMAS, D. T., MATA, G., HANDCOCK, R. N., LEYS, J. F. & BUTLER, H. J. 2018. Improving ground cover monitoring for wind erosion assessment using MODIS BRDF parameters. *Remote Sensing of Environment*, 204, 756-768.
- CHARLIER, J.-B. 2007. *Fonctionnement et modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultivé en milieu volcanique tropical*. UM2- Thèse de doctorat. .
- CHAYMA, C. 2016. Modelisation de l'érosion hydrique par le modele seagis. cas du bassin versant du barrage siliana. . *Universite de tunis el manar faculte des sciences de Tunis*, , departement de geologie. Mastere de recherche en sciences de laterre.
- CHEBBANI, R., DJILLI, K. & ROOSE, E. 1999. Étude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. *Bulletin ORSTOM, Réseau Erosion*, 19, 85-95.
- CHEGGOUR, A. 2008. Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisation par des SIG: Application au

## Références Bibliographiques

- bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas, Maroc -Haut Atlas, Maroc, Cady Ayyad, Marrakesh- Thèse de doctorat.
- CHEN, E. & MACKAY, D. S. 2004. Effects of distribution-based parameter aggregation on a spatially distributed agricultural nonpoint source pollution model. *Journal of Hydrology*, 295, 211-224.
- CHIKH, H. A., HABI, M. & MORSLI, B. 2019. Influence of vegetation cover on the assessment of erosion and erosive potential in the Isser marly watershed in northwestern Algeria—comparative study of RUSLE and PAP/RAC methods. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1-23.
- CROM, M. L. 2009. Lutte contre l'érosion dans la communauté rurale de Yene, Sénégal. Éléments d'information et propositions. *Rapport de stage d'année optionnelle au sein de l'association G.A.I.A.*
- DAHMANI, A. 2012. Contribution à l'étude de l'érosion et du ruissellement des sols rouges dans les monts de Tlemcen: utilisation de simulation de pluies- Université Abou bakr belkaid-tlemcen Faculte de sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre et de l'univers département des sciences agronomiques et des forets-Magister.
- DE BAETS, S., POESEN, J., KNAPEN, A., BARBERÁ, G. G. & NAVARRO, J. 2007. Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff. *Plant and Soil*, 294, 169-183.
- DE GIROLAMO, A., PAPPAGALLO, G. & PORTO, A. L. 2015. Temporal variability of suspended sediment transport and rating curves in a Mediterranean river basin: The Celone (SE Italy). *Catena*, 128, 135-143.
- DE MELLO, K., RANDHIR, T. O., VALENTE, R. A. & VETTORAZZI, C. A. 2017. Riparian restoration for protecting water quality in tropical agricultural watersheds. *Ecological Engineering*, 108, 514-524.
- DE PAZ, J.-M., SÁNCHEZ, J. & VISCONTI, F. 2006. Combined use of GIS and environmental indicators for assessment of chemical, physical and biological soil degradation in a Spanish Mediterranean region. *Journal of environmental management*, 79, 150-162.
- DE PLOEY, J., KIRKBY, M. J. & AHNERT, F. 1991. Hillslope erosion by rainstorms—a magnitude-frequency analysis. *Earth surface processes and landforms*, 16, 399-409.
- DEGOUTTE, G. 2006. *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières: hydraulique et morphologie fluviale appliquées*, Lavoisier.
- DELUSCA, K. 1999. Estimation de l'érosion hydrique des sols a l'aide de l'Equation Universelle de Perte de Sol assistee d'un systeme d'information géographique: Le cas du bassin versant de la ravine Balan, Haiti (French text).
- DEMMAK, A. 1982 Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale-Thèse de Doctorat.
- DESMARTEAU, R. H., SAIVES, A.-L. & SCHIEB-BIENFAIT, N. 2006. Globe-trotters et globalistes: les chemins de l'internationalisation des PME de biotechnologie. *accepté au Congrès CIFEPME (Congrès International Francophone Entrepreneurariat et PME) à Fribourg, Suisse en octobre.*
- DI STEFANO, C., FERRO, V. & PORTO, P. 2000. Length slope factors for applying the revised universal soil loss equation at basin scale in southern Italy. *Journal of agricultural engineering research*, 75, 349-364.
- DINGMAN, S. L. 2015. *Physical hydrology*, Waveland press.
- DREGNE, H. 1990. Erosion and soil productivity in Africa. *Journal of soil and Water Conservation*, 45, 431-436.

## Références Bibliographiques

- DUCHEMIN 2000. Approche géomatique pour simuler l'érosion hydrique et le transport des sédiments à l'échelle des petits bassins versants. *Water Quality Research Journal*, 2001, vol. 36, no 3, p. 435-473.
- DUCHEMIN, M., LACHANCE, M., MORIN, G. & LAGACÉ, R. 2001. Approche géomatique pour simuler l'érosion hydrique et le transport des sédiments à l'échelle des petits bassins versants. *Water Quality Research Journal*, 36, 435-473.
- DUDAL, R. 1980. *Soil Conservation Problems and Prospects*, John Wiley and sons. 576 p.
- DUMAS, J. 1965. Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. *Cahiers Orstom: Serie Pédologie, Paris*, 3, 307-333.
- DUMAS, P. 2010. Méthodologie de cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion appliquée à la région de Dumbéa à Païta-Bouloupari (Nouvelle-Calédonie). *Les Cahiers d'Outre-Mer. Revue de géographie de Bordeaux*, 63, 567-584.
- E. LEDOUX, S. R. 2010. Etat des lieux sur la modélisation hydrologique et hydrogéologique et applicabilité dans le cadre de projets européens. *Rapport : R100705ELED*, Ecoles des Mines de Paris et Société des Eaux de Volvic.
- EBLIN, S. G., YAO, A. B., ANOH, K. A. & SORO, N. 2017. Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle aux risques d'érosion hydrique des sols de la région d'Adiaké, sud-est Côtier de la côte d'ivoire. *Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 30, 197-216.
- EL GAROUANI, A., CHEN, H., LEWIS, L., TRIBAK, A. & ABHAROUR, M. 2008. Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du sig idrisi au nord-est du Maroc. *Téledétection*, 8, 193-201.
- EL GAROUANI, A., MERZOUK, A. & OZER, A. 2003. Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique au pré-Rif marocain. *IAHS PUBLICATION*, 380-388.
- EL HAFID, D. & AKDIM, B. 2018. Quantification de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrée dans un SIG. *Cas du bassin versant de l'oued Isly (Maroc Oriental). European Scientific Journal*.
- EL MORABET, R., OUADRIM, M. & ZHAR, E. 2016. Vegetation et dynamique de surface dans le bassin versant aval d'oued Tansift. «Bassin versant Talmezt-Nord Essaouira». *Lucrările Seminarului Geografic "Dimitrie Cantemir"*, 43, 115-124.
- ELAHCENE, O., TERFOUS, A., REMINI, B., GHENAIM, A. & POULET, J.-B. 2013. Study of sediment dynamics in the Wadi Bellah watershed (Algeria). *Hydrological Sciences Journal*, 58, 224-236.
- ELALOUI, A., MARRAKCHI, C., FEKRI, A., MAIMOUNI, S. & ARADI, M. 2015. Mise en place d'un modèle qualitatif pour la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique dans la chaîne atlasique: Cas du bassin versant de la tessaoute amont.(haut atlas central, Maroc). *European Scientific Journal*, 11.
- ESLAMIAN, S. 2014. *Handbook of engineering hydrology: fundamentals and applications*, CRC Press.
- FALEH, A. & MAKTITE, A. 2014. Cartographie des zones vulnérables à l'érosion hydrique à l'aide de la méthode PAP/CAR et SIG en amont du barrage Allal el fassi, moyen Atlas (Maroc). *Papeles de geografia*, 71-82.
- FARGUELL, J. & SALA, M. 2006. Seasonal trends of suspended sediment concentration in a Mediterranean basin (Anoia River, NE Spain). *Soil erosion and sediment redistribution in river catchments*, 85-107.
- FERREIRA, V., PANAGOPOULOS, T., CAKULA, A., ANDRADE, R. & ARVELA, A. 2015. Predicting soil erosion after land use changes for irrigating agriculture in a large reservoir of southern Portugal. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 40-49.

## Références Bibliographiques

- FERRO, V. & MINACAPILLI, M. 1995. Sediment delivery processes at basin scale. *Hydrological Sciences Journal*, 40, 703-717.
- FIGUEIREDO, T. D. & FONSECA, F. 1997. Les sols, les processus d'érosion et l'utilisation de la terre en montagne au Nord-Est du Portugal: Approche cartographique sur quelques zones du Parc Naturel de Montesinho. *Bulletin Réseau Erosion*, 205-217.
- FOSTER, G., MEYER, L. & ONSTAD, C. 1977. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. *Transactions of the ASAE*, 20, 683-0687.
- FOURNIER, F. 1962. Mesure de l'érosion principes de base et incidence de l'instrumentation nouvelle sur l'établissement des réseaux de mesure. *Bureau Interafricain des sols*, 57, 343-356.
- GADIGA, B. L. & MARTINS, A. K. 1999. The use of revised universal soil loss equation (RUSLE) as a potential technique in mapping areas vulnerable to soil erosion in the upper Yedzaram catchment of Mubi- International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181.
- GARCÍA-RUIZ, J. M., NADAL-ROMERO, E., LANA-RENAULT, N. & BEGUERÍA, S. 2013. Erosion in Mediterranean landscapes: changes and future challenges. *Geomorphology*, 198, 20-36.
- GARCÍA-RUIZ, J. M., BEGUERÍA, S., LANA-RENAULT, N., NADAL-ROMERO, E. & CERDÀ, A. 2017. Ongoing and emerging questions in water erosion studies. *Land Degradation & Development*, 28, 5-21.
- GARCIA, M. Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice. 2008. American Society of Civil Engineers.
- GAUBI, I., CHAABANI, A., MAMMOU, A. B. & HAMZA, M. 2017. A GIS-based soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE)(Lebna watershed, Cap Bon, Tunisia). *Natural Hazards*, 86, 219-239.
- GHANAM, M. La désertification au Maroc-Quelle stratégie de lutte. 2nd FIG Regional Conference Marrakech, 2003. 2-5.
- GHARBI, M. 2016. *Etudes des crues et du transport sédimentaire associé-Application au bassin versant de la Medjerda. 2016. Thèse de doctorat.*
- GHENIM, A. 2008. Étude des écoulements et des transports solides dans les régions semi-arides méditerranéennes. *Thèse de doctorat, Univ. Abou-Bekr Belkaid, Algérie.*
- GHENIM, A., SEDDINI, A. & TERFOUS, A. 2008. Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'Oued Mouilah (nord-ouest Algérien)/Temporal variation of the specific sediment yield of the Wadi Mouilah basin (northwest Algeria). *Hydrological sciences journal*, 53, 448-456.
- GHENIM, A., TERFOUS, A. & SEDDINI, A. 2007. Étude du transport solide en suspension dans les régions semi-arides méditerranéennes: cas du bassin-versant de l'oued Sebdou (Nord-Ouest algérien). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 18, 39-44.
- GOLOBIČ, M. & BRESKVAR ZAUCER, L. 2010. Landscape planning and vulnerability assessment in the Mediterranean. *Regional Activity Centre for the Priority Actions Programme, Split, Croatia.*
- GOMER, D. & VOGT, T. 2000. Modélisation basée sur la physique du ruissellement de surface et de l'érosion des sols dans des conditions semi-arides méditerranéennes - l'exemple d'Oued Mina, Algérie. Dans: *l'érosion du sol*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2000. p. 59-78.
- GOMER, R. 1992. *Field emissions and field ionization-American Inst. of Physics- ISBN/ 978-1-56396-124-3.*
- GONZALEZ-HIDALGO, J., BATALLA, R., CERDÀ, A. & DE LUIS, M. 2010. Contribution of the largest events to suspended sediment transport across the USA. *Land Degradation & Development*, 21, 83-91.

## Références Bibliographiques

- GONZÁLEZ, M. E. P. & RODRÍGUEZ, M. P. G. 2013. Aplicaciones de la teledetección en degradación de suelos. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*.
- GOUTTE-LIMA, M., DE CARVALHO, J. C. & DA FROTA, C. A. 2008. Étude des caractéristiques géotechniques et d'érodabilité des sols de la ville de Manaus (Brésil). *Revue Française de Géotechnique*, 3-13.
- GRANGEON, T. 2012. *Etude multi-échelle de la granulométrie des particules fines générées par érosion hydrique: apports pour la modélisation*. Université de Grenoble.
- GRIESBACH, J., RUIZ SINOGA, J., GIORDANO, A., BERNEY, O. & GALLART, F. 1998. Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones cotières méditerranéennes- Éditeur: Split (Croatie) PAP / CAR Le degré: 72 p. Éditeur: PAP / VOITURE ISBN: 953-6429-21-7.
- GUERRA, A. J. T., FULLEN, M. A., JORGE, M. D. C. O., BEZERRA, J. F. R. & SHOKR, M. S. 2017. Slope processes, mass movement and soil erosion: A review. *Pedosphere*, 27, 27-41.
- GUIDOUM, A., NEMOUCHI, A. & HAMLAT, A. 2014. Modeling and mapping of water erosion in northeastern Algeria using a seasonal multicriteria approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 3925-3943.
- GUITON, M. 1994. *Ruissellement et risque majeur, crue centennale en milieu urbanisé. Etudes de cas: le Grand-Bornand, Nîmes, Paris et Vaison-la-Romaine. 1994. Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*.
- GUPTA, S. K. 2011. *Modern hydrology and sustainable water development*, John Wiley & Sons, Livre.
- HABI, M., MORSLI, B. & MEDDI, M. 2009. Contribution à la connaissance du comportement hydrodynamique des sols argileux par l'utilisation de la simulation de pluies. Publication de colloque International Sols Non Saturés et Environnement UNSA Tlemcen 09.
- HADIR, S. 2010. Modélisation du ruissellement et de l'érosion par le modèle STREAM dans le bassin versant de l'Oued Saboun, Rif occidental-Maroc. *Rabat (MAR) ; Rabat : IAV ; IRD 174 p. multigr. Dipl: Ing. d'Etat en Agron.*
- HALLOUZ, F., MEDDI, M., MAHÉ, G., ALIRAHMANI, S. & KEDDAR, A. 2018. Modeling of discharge and sediment transport through the SWAT model in the basin of Harraza (Northwest of Algeria). *Water Science*, 32, 79-88.
- HAMID, B., FADILA, B. & BOUALEM, R. 2011. Quantification du transport solide en suspension par analyse statistique: cas du bassin versant de mouillah quantification of suspended sediment yield by statistical analysis: the case of mouillah watershed. . *Le Journal de l'Eau et de l'Environnement*, 10, 29-41.
- HAMMOUDA, N. 2010. Evolution de l'occupation des sols et de l'érosion dans le bassin versant Tleta (Rif occidental, Maroc). *Rabat : IAV ; IRD, 119 p. multigr. Dipl.: Ing. d'Etat en Agron. .*
- HAMRICHE, H. 2013. *Etude de l'évolution de certaines grandeurs physiques d'un barrage en terre (Cas du barrage de Koudiet Medaouar)*. Université de Batna 2. Thèse de doctorat.
- HANNACHI, A., FELLAHI, Z., RABTI, A., GUENDOUCZ, A. & BOUZERZOUR, H. 2017. Combining ability and gene action estimates for some yield attributes in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum). *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9, 1519-1534.
- HASSAN, H. E. H., TOUCHART, L. & FAOUR, G. 2013. La sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique dans l'ouest de la Bekaa au Liban. *M@ ppemonde 13*, No 109.
- HEUSCH, B. 1970. L'érosion du pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du pré-Rif occidental. Inist-CNRS ; BRGM Base de données PASCAL

## Références Bibliographiques

- HILI, A., EL KHALKI, Y. & GARTET, J. 2016. Application of directives PAP/RAC and GIS for mapping forms of erosion and land movements in the watershed of Oued Sahb Laghrik (Northwest Taza, Morocco). *MAPPING APPROACH. Arabian Journal of Earth Sciences*, 3, 17-25.
- HUDSON, N. 1993. *Field measurement of soil erosion and runoff*, Food & Agriculture Org- Vol. 68. ISSN 0253-2050.
- INDUSTRY-GOV-AUS 2016. ÉVALUATION DES PERFORMANCES : SUIVI ET AUDIT- Programme des bonnes pratiques pour le développement durable de l'industrie minière. *Commonwealth Copyright Administration, Robert Garran Offices, National Circuit, Canberra ACT 2600*.
- INOUBLI, N. 2016. *Ruissellement et érosion hydrique en milieu méditerranéen vertique: approche expérimentale et modélisation*. Montpellier SupAgro et l'Institut National Agronomique de Tunisie. Thèse de Doctorat.
- ISSA, L. K., LECH-HAB, K. B. H., RAISSOUNI, A. & EL ARRIM, A. 2016. Cartographie quantitative du risque d'érosion des sols par approche SIG/USLE au niveau du bassin versant Kalaya (Maroc Nord Occidental). *J Mater Environ Sci*, 7, 2778-2795.
- J. BOURGOIS, P. M. 1997. ETAT DE L'ART DE LA SIMULATION DES TRANSFERTS DE POLLUANTS DANS LES SOLS. *RAPPORT FINAL*, ETUDE N° 95-0504/1A.
- J. RITTER, I. 2012. L'érosion du sol — Causes et effets. *Centre d'information agricole :1 877 424-1300*.
- JAIN, S. K. & GOEL, M. 2002. Assessing the vulnerability to soil erosion of the Ukai Dam catchments using remote sensing and GIS. *Hydrological Sciences Journal*, 47, 31-40.
- JANICKE, S. 2002. Stream channel and floodplain erosion-water & rivers commission-report No. RR18.
- JANSSON, M. B. 2002. Determining sediment source areas in a tropical river basin, Costa Rica. *Catena*, 47, 63-84.
- JEPPESEN, J. H., JACOBSEN, R. H., JØRGENSEN, R. N., HALBERG, A. & TOFTEGAARD, T. S. 2017. Identification of high-variation fields based on open satellite imagery. *Adv. Anim. Biosci*, 8, 388-393.
- JODEAU, M. 2004. Etude expérimentale des mécanismes de transport solide par charriage torrentiel. Mémoire de DEA.
- JOHN, E. 1997. Introduction to Hydraulics and Hydrology with Applications for Stormwater Management Delmar Thompson Learning. *Edition John E. Gribbin- ISBN 1-4180-3295-6-Livre*.
- JOURNAUX, L. 2014. Analyse du bocage par imagerie de télédétection: Comparaison à l'analyse manuelle- Institut national supérieur des sciences agronomiques de l'alimentation et de l'environnement. GIDE de Comité de pilotage du Réseau Bocages de Bourgogne du 2015.
- JULIEN, P. Y. 2010. *Erosion and sedimentation*, Cambridge university press- Livre. ISBN 978-0-521-83038-6.
- KAFFAS, K. & HRISSANTHOU, V. Annual sediment yield prediction by means of three soil erosion models at the basin scale. Proceedings of the 10th World Congress of EWRA "Panta Rhei", Athens, Greece, 2017. 5-9.
- KARABURUN, A. 2010. Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed. *Ozean Journal of applied sciences*, 3, 77-85.
- KARAMOUZ, M., NAZIF, S. & FALAHI, M. 2012. *Hydrology and hydroclimatology: principles and applications*, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an infnrma husinpss- CRC Press / Livre.
- KATEB, Z., BOUCHELKIA, H., BENMANSOUR, A. & BELARBI, F. 2019. Hydrological modelling using the SWAT model based on two types of data from the watershed of

## Références Bibliographiques

- Beni Haroun dam, Algeria. *Journal of Water and Land Development*. No. 43 (X–XII) p. 76–89. DOI: 10.2478/jwld-2019-0065.
- KATEB, Z., BOUCHELKIA, H., BENMANSOUR, A. & BELARBI, F. 2020. Sediment transport modeling by the SWAT model using two scenarios in the watershed of Beni Haroun dam in Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-17.
- KEDDAR, A. 2011. *Impact des aménagements hydrauliques sur le transport solide dans une région semi aride: cas du bassin des Isser, Algérie*, Editions universitaires européennes.
- KERDOUD, S. & TATAR, H. 2018. Quantification du transport solide en suspension et sa variabilité temporelle dans le bassin versant de l'oued kebir hammam. *Sciences & Technologie. D, Sciences de la terre*, 43-53.
- KERGOMARD, C. 1990. La télédétection aérospatiale: une introduction. *Cours de télédétection, Ecole Normale Supérieure Paris*.
- KHANCHOUL, K., ALTSCHUL, R. & ASSASSI, F. 2009. Estimating suspended sediment yield, sedimentation controls and impacts in the Mellah Catchment of Northern Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 2, 257-271.
- KHANCHOUL, K., BOUKHRISSE, Z. & MAJOUR, H. 2012a. Statistical modelling of suspended sediment transport in the Cherf drainage basin, Algeria. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 1, 13-17.
- KHANCHOUL, K., BOUKHRISSE, Z. E. A., ACIDI, A. & ALTSCHUL, R. 2012b. Estimation of suspended sediment transport in the Kebir drainage basin, Algeria. *Quaternary International*, 262, 25-31.
- KHEIR, R. B., CERDAN, O. & ABDALLAH, C. 2006. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology*, 82, 347-359.
- KHEMIRI, K. & JEBARI, S. 2021. Évaluation de l'érosion hydrique dans des bassins versants de la zone semi-aride tunisienne avec les modèles RUSLE et MUSLE couplés à un Système d'information géographique. *Cahiers Agricultures*, 30, 7.
- KHIRE, M. & AGARWADKAR, Y. 2014. Qualitative analysis of extent and severity of desertification for semi-arid regions using remote sensing techniques. *International Journal of Environmental Science and Development*, 5, 238.
- KIM, J. B., SAUNDERS, P. & FINN, J. T. 2005. Rapid assessment of soil erosion in the Rio Lempa Basin, Central America, using the universal soil loss equation and geographic information systems. *Environmental Management*, 36, 872-885.
- KING, D. & LE BISSONNAIS, Y. 1992. Rôle des sols et des pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux. Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 78, 91-105.
- KOOREVAAR, P., MENELIK, G. & DIRKSEN, C. 1983. *Elements of soil physics*, Elsevier.
- KOSMAS, C., DANALATOS, N., CAMMERAAT, L. H., CHABART, M., DIAMANTOPOULOS, J., FARAND, R., GUTIERREZ, L., JACOB, A., MARQUES, H. & MARTINEZ-FERNANDEZ, J. 1997. The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena*, 29, 45-59.
- KOUDDED, M. 2013. *Cartographie des risques d'érosion hydrique des sols au moyen du système d'information géographique-Cas du bassin versant de l'oued Fergoug*. Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis/ Thèse de doctorat.
- KOULI, M., SOUPIOU, P. & VALLIANATOS, F. 2009. Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *Environmental Geology*, 57, 483-497.
- KOUSSA, M. & BOUZIANE, T. 2018. Apport du SIG à la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique dans la région de Djelfa, Algérie. *Journal Scientifique Libanais*, 19, 31-46.

## Références Bibliographiques

- KŘÍŽOVÁ, K. & KUMHÁLOVÁ, J. 2017. Comparison of selected remote sensing sensors for crop yield variability estimation. *Agronomy Research* 15(4), 1636–1645, 2017/<https://doi.org/10.15159/AR.17.016>.
- KUBÁTOVÁ, E., JANEČEK, M. & KOBZOVÁ, D. 2009. Time variations of rainfall erosivity factor in the Czech Republic. *Soil and Water Research*, 4, 131-141.
- KUMAR, P. S., PRAVEEN, T. & PRASAD, M. A. 2015. Simulation of sediment yield over un-gauged stations using MUSLE and fuzzy model. *Aquatic Procedia*, 4, 1291-1298.
- KUO, K. T., SEKIYAMA, A. & MIHARA, M. 2016. Determining C factor of universal soil loss equation (USLE) based on remote sensing. *International Journal of Environmental and Rural Development*, 7, 154-161.
- KURASHIGE, Y. 1993. Mechanism of suspended sediment supply to headwater rivers and its seasonal variation in west central Hokkaido, Japan. *Japanese-Journal of Limnology*, 54, 305–315. doi:10.3739/rikusui.54.305.
- LACHAUSSÉE, F. 2018. *Érosion et transport de particules au voisinage d'un obstacle*. Université Paris-Saclay- Thèse de doctorat.
- LAHLOU, A. 1996. Environmental and socio-economic impacts of erosion and sedimentation in North Africa. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 236, 491-500.
- LAL, R. 1995. Erosion-crop productivity relationships for soils of Africa. *Soil Science Society of America Journal*, 59, 661-667.
- LAL, R. 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment international*, 29, 437-450.
- LE BISSONNAIS, Y., RACLOT, D., ANDRIEUX, P., MOUSSA, R., LOUCHART, X. & VOLTZ, M. 2008. Effets d'échelle et variabilité de l'érosion entre parcelle et bassin versant en région de vignoble méditerranéen (France). Actes de la session VII organisé e par le Ré seau E-GCES de l'AUF au sein de la confé rence ISCO de Marrakech (Maroc)-325-330.
- LE BISSONNAIS, Y., THORETTE, J., BARDET, C. & DAROUSSIN, J. 2002. L'érosion hydrique des sols en France. *Rapport INRA, IFEN*, 106.
- LE GALL, M. 2016. Traçage des sources de sédiments à l'amont des hydrosystèmes agricoles: apport de la géochimie élémentaire, du rapport Sr/Sr et des radionucléides. *France Université Paris-Saclay (ComUE). Thèse de doctorat*.
- LEE, J. S. & WON, J. Y. 2012. Suggestion of cover-management factor equation for mountain area in RUSLE. *Journal of korean society of hazard mitigation*, 12, 79-85.
- LENOBLE, A. 2003. *Le rôle du ruissellement dans la formation des sites préhistoriques: approche expérimentale*. Bordeaux 1- Thèse de doctorat.
- LENZI, M. A. & MARCHI, L. 2000. Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). *Catena*, 39, 267-282.
- LI, G.-L., ZHENG, T.-H., FU, Y., LI, B.-Q. & ZHANG, T. 2017. Soil detachment and transport under the combined action of rainfall and runoff energy on shallow overland flow. *Journal of Mountain Science*, 14, 1373-1383.
- LI, S., LOBB, D. A., LINDSTROM, M. J. & FARENHORST, A. 2007. Tillage and water erosion on different landscapes in the northern North American Great Plains evaluated using <sup>137</sup>Cs technique and soil erosion models. *Catena*, 70, 493-505.
- LIN, W.-T., LIN, C.-Y. & CHOU, W.-C. 2006. Assessment of vegetation recovery and soil erosion at landslides caused by a catastrophic earthquake: a case study in Central Taiwan. *Ecological Engineering*, 28, 79-89.
- LÓPEZ-TARAZÓN, J. A. & ESTRANY, J. 2017. Exploring suspended sediment delivery dynamics of two Mediterranean nested catchments. *Hydrological Processes*, 31, 698-715.

## Références Bibliographiques

- LU, H., MORAN, C. J. & PROSSER, I. P. 2006. Modelling sediment delivery ratio over the Murray Darling Basin. *Environmental Modelling & Software*, 21, 1297-1308.
- M'SEFFAR, J. 2009. *L'érosion des sols agricoles en Estrie, causes et conséquences*. Université de Sherbrooke. Thèse de doctorat.
- MAAMAR KOUADRI, K. 2012. *Développement d'outils spatiaux et cartographie des risques d'érosion hydrique des sols dans le Tell Oranais*. Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis. Thèse de doctorat. .
- MABIT, L., LAVERDIÈRE, M. R. & BERNARD, C. 2002. méthodes et études de cas dans le Nord de la France. *Cahiers agricultures*, 11, 195-206.
- MACKAY, R. & HEWITT, J. L'agriculture écologiquement durable au Canada: Série sur les indicateurs agroenvironnementaux-Rapport n 3.
- MANO, V., NEMERY, J., BELLEUDY, P. & POIREL, A. 2009. Assessment of suspended sediment transport in four alpine watersheds (France): influence of the climatic regime. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23, 777-792.
- MANOA, R. R. 2017. Modelisation De l'érosion Hydrique Par Le Modele Empirique Rusle Dans Le Bassin Versant Du Lac Itasy. . *Centre National De Recherche Sur l'environnement 39, Rue Rasamimanana Fiadanana 101 Antananarivo, Madagascar*.
- MANSOUR, B. M. 2016. Etude de l'érosivité des pluies sur le bassin de la Soummam par le biais de SIG et télédétection. *MEMOIRE DE MASTER*.
- MARKHI, A., LAFTOUHI, N.-E., SOULAIMANI, A. & FNIGUIRE, F. 2015. Quantification et evaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle rusle et déposition intégrés dans un sig. Application dans le bassin versant n'fis dans le haut atlas de marrakech (maroc). . *European Scientific Journal*, 11-29.
- MASSARD, E. 2007. Incertitudes de mesures bathymétriques: évaluation, validation et application sur les levés bathymétriques de la Seudre et sur les bancs ostréicoles du Bassin de Marennes-Oléron. *Rapport de stage d'année optionnelle au sein de l'association G.A.I.A.*
- MAUGNARD, A., BIELDERS, C., BOCK, L., COLINET, G., CORDONNIER, H., DEGRÉ, A., DEMARCIN, P., DEWEZ, A., FELTZ, N. & LEGRAIN, X. 2013. Cartographie du risque d'érosion hydrique à l'échelle parcellaire en soutien à la politique agricole wallonne (Belgique). *Etude et Gestion des Sols*, 20, 127-141.
- MAZOUR, M. 1992. Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant d'Isser, Tlemcen, Algérie. *Bulletin-réseau Erosion*, 300-313.
- MAZOUR, M. & ROOSE, E. 2002. Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans les bassins versants du Nord-ouest de l'Algérie. *Bull Réseau Erosion*, 21, 320-330.
- MCCONKEY, B., NICHOLAICHUK, W., STEPPUHN, H. & REIMER, C. 1997. Sediment yield and seasonal soil erodibility for semiarid cropland in western Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 77, 33-40.
- MCCOOL, D., BROWN, L., FOSTER, G., MUTCHLER, C. & MEYER, L. 1987. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 30, 1387-1396.
- MCCOOL, D. K., FOSTER, G. R., MUTCHLER, C. & MEYER, L. 1989. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 32, 1571-1576.
- MCCRAY, J. E. 2007. Hydrology: An Introduction: (Wilfried Brutsaert). Association of Environmental & Engineering Geologists.
- MEDDI, M. 1999. Etude du transport solide dans le bassin versant de l'oued Ebda (Algérie). *Zeitschrift für Géomorphologie*, 167-183.
- MEDDI, M. 2015. CONTRIBUTION A L'ETUDE DU TRANSPORT SOLIDE EN ALGERIE DU NORD. *Larhyss Journal, ISSN* , , 1112-3680.

## Références Bibliographiques

- MEDDI, M., KHALDI, A. & MEDDI, H. 1998. Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du nord. *IAHS PUBLICATION*, 393-398.
- MEDDI, M., TALIA, A. & MARTIN, C. 2009. Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 61-84.
- MEDDI, M., TOUMI, S. & ASSANI, A. A. 2016. Spatial and temporal variability of the rainfall erosivity factor in Northern Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 282.
- MEGHRAOUI, M., HABI, M., MORSLI, B., REGAGBA, M. & SELADJI, A. 2017. Mapping of soil erodibility and assessment of soil losses using the RUSLE model in the Sebaa Chioukh Mountains (northwest of Algeria). *Journal of water and land development*, 34, 205-213.
- MEGNOUNIF, A. & GHENIM, A. 2013. Influence des fluctuations hydro-pluviométriques sur la production des sédiments: Cas du bassin de la Haute Tafna. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 26, 53-62.
- MEGNOUNIF, A. & GHENIM, A. N. 2016. Rainfall irregularity and its impact on the sediment yield in Wadi Sebdou watershed, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 267.
- MEGNOUNIF, A., TERFOUS, A. & BOUANANI, A. 2003. Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (Nord-Ouest Algérien). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 16, 369-380.
- MEGNOUNIF, A., TERFOUS, A., GHENAIM, A. & POULET, J. 2007. Key processes influencing erosion and sediment transport in a semi-arid Mediterranean area: the Upper Tafna catchment. *Algeria Hydrol. Sci. J.*, 52, 1271-1284.
- MEGNOUNIF, A., TERFOUS, A. & OUILLOU, S. 2013. A graphical method to study suspended sediment dynamics during flood events in the Wadi Sebdou, NW Algeria (1973–2004). *Journal of hydrology*, 497, 24-36.
- MESRAR, H. 2016. Modélisation, quantification et définition des facteurs contrôlant le risque de l'érosion hydrique. Cas du bassin versant de l'oued Sahla, Rif central, Maroc. *Thèse de doctorat-Laboratoire : LGRN*.
- MESRAR, H., SADIKI, A., NAVAS, A., FALEH, A., QUIJANO, L. & CHAAOUAN, J. 2015. Modélisation de l'érosion hydrique et des facteurs causaux, Cas de l'oued Sahla, Rif Central, Maroc. *Z Geomorphol*, 59, 495-514.
- MILLARES, A., CHIKH, H., HABI, M., MORSLI, B., GALVE, J., PEREZ-PEÑA, J. & MARTÍN-ROSALES, W. 2020. Seasonal patterns of suspended sediment load and erosion-transport assessment in a Mediterranean basin. *Hydrological Sciences Journal*, 65, 969-983.
- MILLARES, A., DÍEZ-MINGUITO, M. & MOÑINO, A. 2019. Evaluating gully effects on modeling erosive responses at basin scale. *Environmental Modelling & Software*, 111, 61-71.
- MILLARES, A. & MOÑINO, A. 2018. Sediment yield and transport process assessment from reservoir monitoring in a semi-arid mountainous river. *Hydrological Processes*, 32, 2990-3005.
- MILLER, J. D., NYHAN, J. W. & YOOL, S. R. 2003. Modeling potential erosion due to the Cerro Grande Fire with a GIS-based implementation of the Revised Universal Soil Loss Equation. *International Journal of Wildland Fire*, 12, 85-100.
- MILLWARD, A. A. & MERSEY, J. E. 1999. Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. *Catena*, 38, 109-129.
- MIMIKOU, M. A., BALTAS, E. A. & TSIHRINTZIS, V. A. 2016. *Hydrology and water resource systems analysis*, CRC Press.
- MODESTE, M., ABDELLATIF, K., NADIA, M. & ZHANG, H. 2016. Cartographie Des Risques De L'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Révisée Des Pertes En Sols,

## Références Bibliographiques

- La Teledetection Et Les Sig Dans Le Bassin Versant De L'ourika (Haut Atlas, Maroc). *Eur Sci J*, 12.
- MODESTE MELIHO , A. K., ABDENEBI ZINE EL ABIDINE 2016. Etude de la sensibilité à l'érosion hydrique dans le bassin versant d'ourika (haut atlas, maroc). *1st AMSR Congress and 23rd APDR Congress 'Sustainability of Territories in the Context of Global Changes'*, ISBN 978-989-8780-04-1.
- MONTANARELLA, L., PENNOCK, D., MCKENZIE, N., ALAVIPANAH, S. K., ALEGRE, J., ALSHANKITI, A., ARROUAYS, D., AULAKH, M. S., BADRAOUI, M. & COSTA, I. D. S. B. 2016. Etat des Ressources en Sols dans le Monde (Résumé technique). Food and agriculture organization of the united nations- (Résumé technique)." (2016): 92-p.
- MONTOROI, J.-P. Rôle des sols sur la génèse des inondations. Publications du symposium européen sur les problèmes actuels de la protection contre les inondations de mars, 2012.
- MORRIS, G. L. & FAN, J. 1998. *Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*, McGraw Hill Professional.
- MORSLI, B. 1996. *Caractérisation, distribution et susceptibilité à l'érosion des sols de montagne-Cas des monts de Beni-Chougrane*. Thèse de Magister INA El Harrach Alger.
- MORSLI, B. 2015. *Ruissellement et érosion en zone de montagne: analyse des facteurs conditionnels cas des monts de Beni chougrane-Algérie. 2015. Thèse de doctorat*.
- MORSLI, B., HABI, M. & MEDDI, M. 2013. Dynamique de l'érosion en zone méditerranéenne algérienne: facteurs explicatifs de variation du ruissellement et de l'érosion sous différentes occupations du sol. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 26, 89-105.
- MORSLI, B., MAZOUR, M., MEDEDJEL, N., HAMOUDI, A. & ROOSE, E. 2004. Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie. *Sécheresse*, 15, 96-104.
- MOSS, A. & GREEN, T. 1987. Erosive effects of the large water drops (gravity drops) that fall from plants. *Soil Research*, 25, 9-20.
- MOSTEPHAOUI, T., MERDAS, S., SAKAA, B., HANAFI, M. & BENAZZOUZ, M. 2013. Cartographie des risques d'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol à l'aide d'un système d'information géographique dans le bassin versant d'El hamel (Boussaâda) Algérie [Mapping of water erosion by the application of the universal equation of loss of ground using a geographic information system in the catchment area of El Hamel (Boussaada) Algeria]. *Journal algérien des régions arides. Nspécial*, 131-147.
- MOUFIDA, B. 2017. *Evaluation de l'aptitude aux écoulements et risque d'érosion dans le Haut cours de la Medjerda par Modélisation*. Thèse de doctorat. Université Mustapha Ben Boulaid Batna 2 institut des science de la terre et de l'univers.
- NAIMI, M., TAYAA, M. & OUZIZI, S. 2005. Cartographie des formes d'érosion dans le bassin-versant de Nakhla (Rif occidental, Maroc). *Sécheresse*, 16, 79-82.
- NAQVI, H. R., MALLICK, J., DEVI, L. M. & SIDDIQUI, M. A. 2013. Multi-temporal annual soil loss risk mapping employing revised universal soil loss equation (RUSLE) model in Nun Nadi Watershed, Utrakhand (India). *Arabian journal of geosciences*, 6, 4045-4056.
- NASH, J. 1970. River flow forecasting through conceptual models, I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 398-409.
- NAULIN, H. & TRIPLET, A. 2003. Guide technique de la lutte contre l'érosion des sols en Caps et Marais d'Opale-Parc naturel régional des caps et marais d'opale: GUIDE technique.

## Références Bibliographiques

- NELSON, R. G. 2002. Resource assessment and removal analysis for corn stover and wheat straw in the Eastern and Midwestern United States—rainfall and wind-induced soil erosion methodology. *Biomass and Bioenergy*, 22, 349-363.
- NOOR, H., FAZLI, S. & ALIBAKHSHI, S. M. 2012. Prediction of storm-related sediment-associated contaminant loads in a watershed scale. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 12, 183-189.
- NORD, G. 2006. *Modélisation à base physique des processus de l'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle*. Thèse de doctorat. Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- NOUVELOT, J.-F. 1990. Erosion mécanique, transport solide, sédimentation dans le cycle de l'eau. *Orstom, Grenoble*.
- OJHA, C. S. P., BERNDTSSON, R. & BHUNYA, P. 2008. *Engineering hydrology*, Oxford university press New Delhi, India- Livre volume 440.
- OLDEMAN, L. R., HAKKELING, R. & SOMBROEK, W. G. 1990. *World map of the status of human-induced soil degradation: an explanatory note*, International Soil Reference and Information Centre.
- OLIVEIRA, J. D. A., DOMINGUEZ, J. M. L., NEARING, M. A. & OLIVEIRA, P. T. 2015. A GIS-based procedure for automatically calculating soil loss from the universal soil loss equation: Gius-m. *Applied Engineering in Agriculture*, 31, 907.
- OMM 2005. Le climat et la dégradation des sols informations climatologiques – conservation des ressources – gestion viable des terres. *Organisation météorologique mondiale*, ISBN 92-63-20989-8.
- OUEDRAOGO, B., KABORE, O. & KABORE, M. 2019. Cartographie quantitative de l'érosion des sols par approche SIG/RUSLE dans la Commune de Karangasso vigué (Burkina Faso). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13, 1638-1653.
- OULD KADDOUR, R. 2017. *Etude de la relation charge solide-débit liquide Oued Sikkak*. Thèse de doctorat.
- OUSMANA, H., EL HMAIDI, A., ESSAHLAOUI, A., BEKRI, H. & EL OUALI, A. 2017. Modélisation et cartographie du risque de l'érosion hydrique par l'application des SIG et des directives PAP/CAR. Cas du bassin versant de l'Oued Zgane (Moyen Atlas tabulaire, Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de La Terre*, 39, 103-119.
- OUYANG, W., HAO, F., SKIDMORE, A. K. & TOXOPEUS, A. 2010. Soil erosion and sediment yield and their relationships with vegetation cover in upper stream of the Yellow River. *Science of the Total Environment*, 409, 396-403.
- PANDEY, A., CHOWDARY, V. & MAL, B. 2007. Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing. *Water resources management*, 21, 729-746.
- PANDEY, A., CHOWDARY, V. & MAL, B. 2009. Sediment yield modelling of an agricultural watershed using MUSLE, remote sensing and GIS. *Paddy and Water Environment*, 7, 105-113.
- PIETRONÍ, J., JARSJÖ, J., ROMANCHENKO, A. O. & CHALOV, S. R. 2015. Model analyses of the contribution of in-channel processes to sediment concentration hysteresis loops. *Journal of Hydrology*, 527, 576-589.
- PIMENTEL, D., ALLEN, J., BEERS, A., GUINAND, L., LINDER, R., MCLAUGHLIN, P., MEER, B., MUSONDA, D., PERDUE, D. & POISSON, S. 1987. World agriculture and soil erosion. *BioScience*, 37, 277-283.
- PIMENTEL, D., HARVEY, C., RESOSUDARMO, P., SINCLAIR, K., KURZ, D., MCNAIR, M., CRIST, S., SHPRITZ, L., FITTON, L. & SAFFOURI, R. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267, 1117-1123.

## Références Bibliographiques

- PIMENTEL, D. & KOUNANG, N. 1998. Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems*, 1, 416-426.
- PINTE, K. 2006. Diagnostic de l'érosion sur le bassin versant de la baie du Robert en Martinique. *Institut national agronomique paris-grignon Agronomist dissertation-Memoire master*.
- PIRNENTEL, D., HARVEY, C., RESOSUDANNO, F., SINCLAIR, K., MCNAIR, M., CRIST, S., SGPRITZ, L., FITTON, L., SAFFOURI, R. & BLAIR, R. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267, 1117-1123.
- POTTER, T. D. & COLMAN, B. R. 2003. *Handbook of weather, climate, and water*, Wiley-Interscience.
- PRADO-HERNÁNDEZ, J. V., RIVERA-RUIZ, P., LEÓN-MOJARRO, B. D., CARRILLO-GARCÍA, M. & MARTÍNEZ-RUIZ, A. 2017. Calibración de los modelos de pérdidas de suelo usle y musle en una cuenca forestal de México: Caso El Malacate. *Agrociencia*, 51, 265-284.
- PRASANNAKUMAR, V., VIJITH, H., ABINOD, S. & GEETHA, N. 2012. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geoscience Frontiers*, 3, 209-215.
- PREITI, G., ROMEO, M., BACCHI, M. & MONTI, M. 2017. Soil loss measure from Mediterranean arable cropping systems: Effects of rotation and tillage system on C-factor. *Soil and Tillage Research*, 170, 85-93.
- PROBST, J.-L. & SUCHET, P. A. 1992. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydrological Sciences Journal*, 37, 621-637.
- PROSDOCIMI, M., CERDÀ, A. & TAROLLI, P. Soil water erosion on Mediterranean vineyards. A review based on published data. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2015. 4034.
- RAHMAN, A., WEINMANN, P. E., HOANG, T. M. T. & LAURENSEN, E. M. 2002. Monte Carlo simulation of flood frequency curves from rainfall. *Journal of Hydrology*, 256, 196-210.
- RAKOTONANAHARY, T. C., RANDRIAMBOAVONJY, J. C., RAJOELISON, L. G. & RABENILALANA, F. M. 2008. "Etude des relations entre la pluie, le sol, le relief, la couverture végétale et l'érosion dans la région de Mandraka." Ecole supérieure des sciences agronomiques  
departement des eaux et forets-(2008): 106.
- RAKOTOVAO ANDRIANAVAH, M. 2015. *Carte paléontologique de Madagascar: inventaire et mise en valeur du patrimoine paléontologique*. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- RAMDANI, M., ELKHIATI, N. & FLOWER, R. 2009. Lakes of Africa: North of Sahara.
- RANGO, A. & ARNOLDUS, H. 1987. Aménagement des bassins versants. *Cahiers techniques de la FAO*, 9.
- RAWAT, K. S., MISHRA, A. K. & BHATTACHARYYA, R. 2016. Soil erosion risk assessment and spatial mapping using LANDSAT-7 ETM+, RUSLE, and GIS—a case study. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 288.
- REMINI, B. & BENFETTA, H. 2015. Le barrage réservoir de gargar est-il menacé par l'envasement? *Larhyss journal p-issn 1112-3680/e-issn 2521-9782*, 175-192.
- REMINI, B. & BENSALIA, D. 2016. Siltation of dams in arid regions algerian examples. *Larhyss journal p-issn 1112-3680/e-issn 2521-9782*, 63-90.

## Références Bibliographiques

- REMINI, B., BENSALIA, D. & NASROUN, T. 2015. Impact of sediment transport of the Chellif River on silting of the Boughezoul reservoir (Algeria). *Journal of Water and Land Development*, 24, 35-40.
- REMINI, B. J. L. J. 2017. Une nouvelle approche de gestion de l'envasement des barrages. 31, 51-81.
- REMINI, W. & REMINI, B. 2003. La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*.
- REMMAS, H. 2014. *Contribution l'étude et la cartographie des zones sensibles l'érosion hydrique du sous bassin versant de Oued Saida. 2014. Thèse de doctorat.*
- RENARD, K. G. 1997. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)- United States Government Printing- Handbook number 703.*
- RENARD, K. G., FOSTER, G. R., WEESIES, G. A. & PORTER, J. P. 1991. RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of soil and Water Conservation*, 46, 30-33.
- REY, F., BALLAIS, J.-L., MARRE, A. & ROVÉRA, G. 2004. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes rendus géoscience*, 336, 991-998.
- ROCHE, M. 1963. Hydrologie de surface. *Livre-Gauthier-Villars et ORSTOM, Paris, France.*
- ROOSE, E. 1972. Comparaison des causes de l'érosion et des principes de lutte antierosive en région tropicale humide, tropicale sèche et méditerranéenne. *Atti Giornées d'Etude du Génie Rural a Florence (Italia)*, 418-41.
- ROOSE, E. 1977. Use of the universal soil loss equation to predict erosion in West Africa-Soil erosion: prediction and control-Soil Conservation Society of America Ankeny, IA:21 p:60-74.
- ROOSE, E. 1984a. Causes et facteurs de l'érosion hydrique sous climat tropical: conséquences sur les méthodes antiérosives. *Machinisme Agricole Tropical*, 4-18.
- ROOSE, E. 1984b. "Causes et facteurs de l'érosion hydrique sous climat tropical: conséquences sur les méthodes antiérosives." *LIVRE Machinisme Agricole Tropical* 87 (1984): 4-18.
- ROOSE, E. 1986. Runoff and erosion before and after clearing depending on the type of crop in western Africa. *Land clearing and development in the tropics* (R. Lal, ed.), 317-330.
- ROOSE, E. 1994. *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)-Rome : FAO, (70), 438 p. (Bulletin Pédologique de la FAO ; 70). ISBN 92-5-203451-X.*
- ROOSE, E. 1996. Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes. *Bulletin du Réseau Erosion*, 16, 87-97.
- ROOSE, E., ARABI, M., BRAHAMIA, K., CHEBBANI, R., MAZOUR, M. & MORSLI, B. 1993. Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. *Cahiers Orstom, série pédologie*, 28, 289-308.
- ROOSE, É. & DE NONI, G. 2004. Research on water erosion in Africa. Review and perspectives. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15, 121-129.
- ROOSE, E. & LELONG, F. 1976. Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique Tropicale. Études sur petites parcelles expérimentales de sol. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, 18, 365-74.
- ROOSE, É., SABIR, M., ARABI, M., MORSLI, B. & MAZOUR, M. 2012. Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antierosive au Maghreb. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 43-69.
- ROOSE, É., SABIR, M. & LAOUINA, A. 2010. *Gestion durable des eaux et des sols au Maroc: valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*, IRD Editions.

## Références Bibliographiques

- ROUSE, J., HAAS, R. H., SCHELL, J. A. & DEERING, D. W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA special publication*, 351, 309.
- ROVIRA, A. & BATALLA, R. J. 2006. Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: The Lower Tordera (NE SPAIN). *Geomorphology*, 79, 58-71.
- RUSHTON, K. R. 2004. *Groundwater hydrology: conceptual and computational models*, Livre John Wiley & Sons : ISBN 0-470-5004-3.
- SAADAOU, M. 1995. Érosion et transport solide en Tunisie. Mesure et prévision du transport solide dans les bassins versants et de l'envasement dans les retenues des barrages. *Ministère de l'Agriculture, Direction des Ressources en Eau, Rapport Int*, 30.
- SABIR, M. 1987. «Ressources en eau et aménagement. L'érosion hydrique et sa quantification. Mémoire de DEA. ORSTOM/Université Paris XI, Orsay.
- SADEGHI, S., GHOLAMI, L. & KHALEDI DARVISHAN, A. 2013. Suitability of MUSLT for storm sediment yield prediction in Chehelgazi watershed, Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 58, 892-897.
- SADEGHI, S., GHOLAMI, L., KHALEDI DARVISHAN, A. & SAEIDI, P. 2014. A review of the application of the MUSLE model worldwide. *Hydrological Sciences Journal*, 59, 365-375.
- SADEGHI, S. & MIZUYAMA, T. 2007. Applicability of the Modified Universal Soil Loss Equation for prediction of sediment yield in Khanmirza watershed, Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 52, 1068-1075.
- SADIKI, A. & MESRAR, H. 2012. Modélisation et cartographie des risques de l'érosion hydrique: cas du bassin versant de l'oued Larbaa, Maroc. *Papeles de geografía*, 179-188.
- SALHI, C., TOUAIBIA, B. & ZEROUAL, A. 2013. Les réseaux de neurones et la régression multiple en prédiction de l'érosion spécifique: cas du bassin hydrographique Algérois-Hodna-Soummam (Algérie). *Hydrological sciences journal*, 58, 1573-1580.
- SANTOS, J. C. N. D., ANDRADE, E. M. D., MEDEIROS, P. H. A., GUERREIRO, M. J. S. & PALÁCIO, H. A. D. Q. 2017. Land use impact on soil erosion at different scales in the Brazilian semi-arid. *Revista Ciência Agronômica*, 48, 251-260.
- SEDDIK, H. A. 2016. Estimation de l'érosion hydrique au maghreb et l'application sur le bassin versant oued trouch. *Ecole nationale supérieure d'hydraulique-arbaoui abdellah-departement aménagement et génie hydraulique-memoire de master*.
- SEEGER, M., ERREA, M.-P., BEGUERIA, S., ARNÁEZ, J., MARTÍ, C. & GARCÍA-RUIZ, J. 2004. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. *Journal of Hydrology*, 288, 299-311.
- SELMİ, K. & KHANCHOUL, K. 2016. Sediment load estimation in the Mellegue catchment, Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 31, 129-137.
- SEPURU, T. K. & DUBE, T. 2018. An appraisal on the progress of remote sensing applications in soil erosion mapping and monitoring. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 9, 1-9.
- SERBAH, B. 2011. Etude et valorisation des sédiments de dragage du barrage Bakhadda Tiaret.
- SHABAN, A. & KHAWLIE, M. Geoenvironmental assessment of riparian zones under extreme climatic events: a case study of representative rivers in Lebanon. Mediterranean rivers and riparian zones-processes and management symposium, Zaragoza, Spain, 1998.
- SHARP, J. J. & SAWDEN, P. G. 2013. *BASIC hydrology*, Library of congress cataloging in publication data ISBN 0-408-01363-X, Elsevier.

## Références Bibliographiques

- SHUKLA, M. 2011. *Soil hydrology, land use and agriculture: measurement and modelling*, Cabi/ Livre- ISBN-13: 9781845937973.
- SLIM, S. & JEDDI, F. B. 2011. Protection des sols des zones montagneuses de Tunisie par le sulla du Nord (*Hedysarum coronarium* L.). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 22, 117-124.
- SMITH, S., BULLOCK, S., HINOJOSA-CORONA, A., FRANCO-VIZCAÍNO, E., ESCOTO-RODRÍGUEZ, M., KRETZSCHMAR, T., FARFAN, L. & SALAZAR-CESENA, J. 2007. Soil erosion and significance for carbon fluxes in a mountainous Mediterranean-climate watershed. *Ecological Applications*, 17, 1379-1387.
- SOGREAH 1967. Étude générale des aires d'irrigation et d'assainissement agricole en Algérie. *Dossier. Alger : Ministère de l'Agriculture et de la Réforme agraire.*, Mémoire de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine, Bordeaux, France, N°22.
- SOLIMAN, M. M. 2010. *Engineering hydrology of arid and semi-arid regions*, CRC Press- Livre taylor and francis group/ ISBN-13:978-1-439-1557-1.
- SORIAL, M. & LACHARITÉ, M. 1988. *Les projets d'infrastructures routières et l'érosion des sols. Livre No. RTQ-88-28. 1988.*
- SOTI, V., BOTTA, A., BÉGUÉ, A., DESPINOY, M. & COLIN, F. 2005. Contribution de la télédétection au suivi de la sensibilité des sols à l'érosion à l'échelle d'un bassin versant (île de La Réunion). *Revue internationale de géomatique*, 15, 439-459.
- STEPHENSON, D. 1981. *Stormwater hydrology and drainage*, Elsevier/ Livre ISBN 0-444-41998-5 (Vol.14).
- SULISTYO, B. The effect of choosing three different C factor formulae derived from NDVI on a fully raster-based erosion modelling. In : IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2016. p. 012030., 2016.
- SVENSSON, C., KJELDEN, T. R. & JONES, D. A. 2013. Flood frequency estimation using a joint probability approach within a Monte Carlo framework. *Hydrological sciences journal*, 58, 8-27.
- TACHI, S. E., OUERDACHI, L., REMAOUN, M., DERDOUS, O. & BOUTAGHANE, H. 2016. Forecasting suspended sediment load using regularized neural network: Case study of the Isser River (Algeria). *Journal of Water and Land Development*, 29, 75-81.
- TADRIST, N. 2004. *Le Transport solide dans L'oued el Hachem et l'impact des lachers du barrage boukourdane sur l'hydraulique de L'oued et la nappe*. Blida. Thèse de doctorat.
- TADRIST, N. & DEBAUCHE, O. 2016. Impact de l'érosion sur l'envasement des barrages, la recharge des nappes phréatiques côtières et les intrusions marines dans la zone semi-aride méditerranéenne: cas du barrage de Boukourdane (Algérie). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 20, 453-467.
- TALBI, M. 1997. Action anthropique et dégradation de l'environnement aride: la désertification en Tunisie du Sud-Est. *Méditerranée*, 86, 25-31.
- TE CHOW, V., MAIDMENT, D. & MAYS, L. 1962. Applied hydrology. *Journal of Engineering Education*, 308, 1959.
- TÉCHENÉ, F. 2010. Érosion des sols et qualité de l'eau en vallée de la Lèze. *MASTER 2 Rapport de stage « Fonctionnement des Écosystèmes et Anthropisation », parcours professionnel.*
- TERFOUS, A., MEGNOUNIF, A. & BOUANANI, A. 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 14, 173-185.
- TERFOUS, A., MEGNOUNIF, A. & BOUANANI, A. 2003. Détermination des dégradation spécifiques dans trois bassins versant des régions méditerranéennes algériennes. *Hydrology of the Mediterranean and semiarid regions. IAHS Publ*, 278, 366-372.

## Références Bibliographiques

- THUY, H. T. & LEE, G. 2017. Soil loss vulnerability assessment in the Mekong River basin. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, 18, 37-47.
- TOUAIBIA, B. 2010. Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. *Sécheresse*, 21, 333-335.
- TOUAIBIA, B., DAUTREBANDE, S., GOMER, D. & AIDAOU, A. 1999. Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales: bassin versant de l'Oued Mina. *Hydrological sciences journal*, 44, 973-986.
- TOUAIBIA, B., GOMER, D. & AIDAOU, A. 2000. Estimation de l'index d'érosion de Wischmeier dans les micro bassins expérimentaux de l'Oued Mina en Algérie du Nord. *Bull. Réseau Erosion*, 20, 478-484.
- TOUBAL, A. K., ACHITE, M., OUIILLON, S. & DEHNI, A. 2018. Soil erodibility mapping using the RUSLE model to prioritize erosion control in the Wadi Sahouat basin, North-West of Algeria. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 1-22.
- TOUIHRI, N. 2013. Application du modèle SEAGIS pour l'évaluation des risques d'érosion dans le bassin versant des collines du lac de M'Richet el Anze (Bargou, Siliana) (INIS-TN - 195). Tunisie- Mémoire de Projet de Fin d'Etudes.
- TOUMI, S. 2013. *Application des techniques nucléaires et de la télédétection à l'étude de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Mina*. Thèse de Doctorat Es-Sciences, L'école nationale supérieure d'hydraulique.
- TOURÉ, A. A., TIDJANI, A. D., RAJOT, J.-L., BOUET, C., GARBA, Z., MARTICORENA, B. & AMBOUTA, K. J.-M. 2018. Quantification des flux d'érosion éolienne au cours d'une transition champ-jachère au Sahel (Banizoumbou, Niger). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 125-142.
- TRAMBLAY, Y., EL ADLOUNI, S. & SERVAT, E. 2013. Trends and variability in extreme precipitation indices over Maghreb countries. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 3235-3248.
- VALLÉE, M. 2009. *Variabilité spatio-temporelle des régimes d'érosion hydrique dans neuf bassins versants en milieu agricole*. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.
- VAN DER KNIJFF, J., JONES, R. & MONTANARELLA, L. 1999. *Soil erosion risk assessment in Italy- european commission directorate general jrc joint research centre space applications institute european soil bureau. Etude. LIVRE Citeseer*.
- VAN REMORTEL, R. D., HAMILTON, M. E. & HICKEY, R. J. 2001. Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data within Arclinfo grid. *Cartography*, 30, 27-35.
- VISSMAN, W., LEWIS, G. L., KNAPP, J. W. & HARBAUGH, T. E. 1989. Introduction to hydrology. *Livre/ No 551.48 V678 2003 Contenido: <http://bibliotecas.uchile.cl/documentos/20160120-0227737965.pdf>*.
- VIGIAK, O., BORSELLI, L., NEWHAM, L., MCINNES, J. & ROBERTS, A. 2012. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology*, 138, 74-88.
- VIJITH, H., SUMA, M., REKHA, V., SHIJU, C. & REJITH, P. 2012. An assessment of soil erosion probability and erosion rate in a tropical mountainous watershed using remote sensing and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 5, 797-805.
- VILLEMURE, N. 2006a. Spatialisation des facteurs de l'érosion en nappe pour une gestion durable des sols en afrique de l'ouest à l'aide des sig et du modèle RUSLE2. *Université du québec à montréal/ Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en sciences de l'environnement*.
- VILLEMURE, N. 2006b. spatialisation des facteurs de l'érosion en nappe pour une gestion durable des sols en afrique de l'ouest à l'aide des sig et du modèle RUSLE 2.

## Références Bibliographiques

- VRIELING, A. 2007. *Mapping erosion from space* Université de Wageningen. 3Sn - ISBN 9789085045878 - 151/ Mémoire, préparé en interne, <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/43377>.
- WALID, R. 2004. Le transport solide : Estimation et mesure. Synthèse technique.
- WALL, G., COOTE, D., PRINGLE, E. & SHELTON, I. 2002. RUSLE-CAN Équation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada. *Manuel pour l'évaluation des pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada. Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, No de la contribution AAC2244F*, 117.
- WALLING, D. 1984. The sediment yields of African rivers. *IAHS-AISH publication*, 265-283.
- WALLING, D. 2000. Recent advances in the use of environmental radionuclides in soil erosion investigations. *Department of Geography, University of Exeter, Exeter, UK/ IAEA-SM-363/89*.
- WALLING, D. E. & WEBB, B. 1982. Sediment availability and the prediction of storm-period sediment yields. *Recent developments in the explanation and prediction of erosion and sediment yield*, 137, 327-337.
- WANG, G., GERTNER, G., FANG, S. & ANDERSON, A. B. 2003. Mapping multiple variables for predicting soil loss by geostatistical methods with TM images and a slope map. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69, 889-898.
- WANG, Y., ZHANG, J., ZHANG, Z. & JIA, L. 2016. Impact of tillage erosion on water erosion in a hilly landscape. *Science of the Total Environment*, 551, 522-532.
- WARD, A. D. & TRIMBLE, S. W. 2003. *Environmental hydrology/ Livre No ISBN 1-56670-616-5.*, Crc Press.
- WARDA, H. & EL HOUDA, S. N. 2012. Rôle de la Végétation sur la stabilité de l'érosion hydrique et qualité des sols sur les piémonts nord du Dahra Ouest de Mostaganem Commune de Sidi Ali- Master en Sciences Agronomiques.
- WARDA, H. & EL HOUDA, S. N. 2017. Rôle de la Végétation sur la stabilité de l'érosion hydrique et qualité des sols sur les piémonts nord du Dahra Ouest de Mostaganem Commune de Sidi Ali. *Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem\_Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Agronomiques*.
- WHITE, W. R. 1986. Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants. *Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture 7, France*, 92-3-202014-g.
- WILLIAMS, G. P. 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology*, 111, 89-106.
- WILLIAMS, J. 1995. The EPIC model. In: Singh VP (ed) *Computer models of watershed hydrology*, . *chapter 25.*, Water Resources.
- WILLIAMS, J. R. 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. *Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources*, 40, 244-252.
- WINCHELL, M., JACKSON, S., WADLEY, A. & SRINIVASAN, R. 2008. Extension and validation of a geographic information system-based method for calculating the Revised Universal Soil Loss Equation length-slope factor for erosion risk assessments in large watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, 63, 105-111.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 39, 285-291.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. 1978. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning-N ° 537. Département de l'agriculture, de la science et de l'éducation, 1978.-537*.

## Références Bibliographiques

- YANG, D., KANAE, S., OKI, T., KOIKE, T. & MUSIAKE, K. 2003. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological processes*, 17, 2913-2928.
- YJJOU, M., BOUABID, R., EL HMAIDI, A. & ESSAHLAOU, A. 2012. Caractérisation topographique et climatique via le SIG du bassin versant du haut Oum Er-Rbia en amont du barrage El Hansali (SW du Moyen Atlas, Maroc). *Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research*, 3, 104-109.
- ZABALETA, A., MARTÍNEZ, M., URIARTE, J. A. & ANTIGÜEDAD, I. 2007. Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country. *Catena*, 71, 179-190.
- ZALIDIS, G., STAMATIADIS, S., TAKAVAKOGLU, V., ESKRIDGE, K. & MISOPOLINOS, N. 2002. Impacts of agricultural practices on soil and water quality in the Mediterranean region and proposed assessment methodology. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88, 137-146.
- ZEKRI, N. & CLERC, J. P. 2002. Étude statistique et dynamique de la propagation d'épidémies dans un réseau de petit monde. *Comptes Rendus Physique*, 3, 741-747.
- ZETTAM, A., TALEB, A., SAUVAGE, S., BOITHIAS, L., BELAIDI, N. & SÁNCHEZ-PÉREZ, J. M. 2017. Modelling hydrology and sediment transport in a semi-arid and anthropized catchment using the SWAT model: The case of the Tafna river (northwest Algeria). *Water*, 9, 216.
- ZEZIN, A., MIKHEIKIN, S., ROGACHEVA, V., ZANSOKHOVA, M., SYBACHIN, A. & YAROSLAVOV, A. 2015. Polymeric stabilizers for protection of soil and ground against wind and water erosion. *Advances in colloid and interface science*, 226, 17-23.
- ZHANG, G. H., LIU, B. Y., NEARING, M., HUANG, C. H. & ZHANG, K. L. 2002. Soil detachment by shallow flow. *Transactions of the ASAE*, 45, 351.
- ZHANG, Y., DEGROOTE, J., WOLTER, C. & SUGUMARAN, R. 2009. Integration of modified universal soil loss equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk. *Land Degradation & Development*, 20, 84-91.
- ZOUAGUI, A., BENMANSOUR, M., AMENZOU, N., NOUIRA, A., SABIR, M., BENJELLOUN, H., MARAH, H. & BENKADAD, A. 2012. Application de la technique de <sup>137</sup>Cs à l'estimation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Moulay Bouchta, Rif occidental, Maroc. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 1, 53-58.
- ZOUBIRI, M. 2018. Gestion et conservation de l'eau et du sol a travers le bassin versant isser - wilaya de tlemcen : techniques traditionnelles. . *Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen*, , 211p. .
- ZUMR, D., MÜTZENBERG, D. V., NEUMANN, M., JEŘÁBEK, J., LABURDA, T., KAVKA, P., JOHANNSEN, L. L., ZAMBON, N., KLIK, A. & STRAUSS, P. 2019. Experimental Setup for Splash Erosion Monitoring—Study of Silty Loam Splash Characteristics. *Sustainability*, 12, 1-1.

يهدف هذا العمل إلى تقييم خسائر التربة الناتجة عن الانجراف المائي والمساهمة في معرفة تأثير الغطاء النباتي لمستجمع المياه يسر- الواقع في شمال غرب الجزائر. ولهذه الغاية تم باستعمال (RUSLE) ومعادلة فقدان التربة العالمي (PAP / RAC) استخدام بحث نموذجي: نموذج معادلة فقدان برنامج الإجراءات ذات الأولوية من طرف مركز النشاط الإقليمي من أجل استخراج مستوى الحماية لهذا المستجمع المائي. تقرر استعمال نظريتين لتقدير العامل. الأولى النظرية الكلاسيكية والثانية تعتمد على حساب (GIS) نظام المعلومات الجغرافية توضيح المناطق الأكثر عرضة للتآكل والتي (NDVI) مؤشر الغطاء النباتي بالفرق الطبيعي في فترتين (جاف ورطب). تظهر خريطة حالة التآكل والتي استخرجت باستعمال النموذج تغطي 60 من المساحة الاجمالية للحوض. نتائج الغطاء النباتي (العامل) من خلال الطريقة التقليدية في الفترة الجافة تظهر فقدان متوسط التربة قدر ب (14 طن / هكتار - سنة واحدة) بينما ينخفض هذا المعدل في الفترة الرطبة إلى (7.9 طن / هكتار - سنة واحدة). حسب المقارنة نتائج العامل في الموسم الجاف هي (25,23 طن / هكتار - سنة واحدة) مع فقدان سنوي للتربة قد يصل إلى 3 مليون طن

لتقييم المخططات الموسمية لحمولة الرواسب وتفاعلها مع التآكل والنقل تمت دراسة بيانات الرصد تحرك مياه الحوض إلى واد يسر- (شمال غرب الجزائر) لمدة 17 عاما والمقارنة على الأحداث. النتائج تظهر عدة مؤشرات المرودية ونقل الرواسب بين الفترتين الجافة والرطبة. بلغ المعدل (8 طن / هكتار - سنة واحدة) من خلال تحليل مستمر مع قيم قُدرت ب 13 و4,3 طن / هكتار - سنة واحدة) في الفترتين الجافة والرطبة على التوالي. أبرزت تقديرات معدل نقل التربة قيما أعلى خلال فترات الجفاف وهيمنة عملية الانجراف المائي. في هذا جاذبية الترسيبات خلال الفترة الجافة (MUSLE) الحدث أكدت الحلقات التخلفية هذه الأنماط الموسمية في إطار حركة النقل وأبرزت معايرة نموذج القياس

قدمت هذه الدراسة التقديرات النوعية والكمية اللازمة لتطوير الإدارة البيئية؛ سمحت أيضا بالتحكم بمختلف التأثيرات على هذا الحوض من جهة ومن جهة أخرى أظهرت النتائج المتحصل عليها ضرورة الموسمية في عمليات التآكل والنقل ذات الأهمية الخاصة من حيث التنبؤات المناخية المتغيرة

الكلمات المفتاحية: الانجراف المائي, تآكل محتمل, الرواسب المعقولة, NDVI, RAC/PAP, MUSLE, MUSLE, RUSLE.

## Français

Le présent travail vise à évaluer les pertes de sol dues à l'érosion hydrique et à contribuer à la connaissance de l'impact des couvertures végétales du bassin versant d'Isser situé au nord-ouest de l'Algérie. À cette fin, deux modèles prédictifs ont été utilisés, à savoir le programme d'actions prioritaires par le modèle du Centre d'activités régionales (CAR / PAP) et la perte de sol universelle révisée modèle d'équation (RUSLE), utilisant le système d'information géographique (SIG). Pour illustrer le niveau de protection dans ce bassin versant, il a été décidé d'utiliser deux approches pour l'estimation du facteur C ; la première est la méthode classique et la seconde consiste à calculer l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) sur deux périodes (sèche et humide). La carte des états érosifs, qui a été obtenue en utilisant le modèle PAP / RAC, montre les zones qui sont potentiellement les plus vulnérables à l'érosion et qui couvrent plus de 60% de la superficie totale du bassin. Les résultats pour le couvert végétal (facteur C) par la méthode conventionnelle pendant la période sèche présentent une perte moyenne de terres égale à 14 (t ha - 1 an - 1), alors que ce taux diminue à 7,9 (t ha - 1 an - 1) pendant la période humide. Selon l'approche NDVI, les résultats du facteur C pour la saison sèche sont de 25,53 (t ha - 1 an - 1) avec une perte annuelle de terres pouvant atteindre 3 millions de tonnes.

Pour évaluer les schémas saisonniers de la charge de sédiments en suspension et ses interactions érosion-transport, 17 ans les données de surveillance des cours d'eau du bassin de la rivière Isser (nord-ouest de l'Algérie) ont été étudiées, et les approches à l'échelle des événements. Les résultats montrent des différences significatives dans le rendement et le transport des sédiments processus entre les périodes sèches et humides. Un taux de 8 t ha - 1 an - 1 a été estimé par analyse continue, avec des valeurs de 4,3 et 13 t ha - 1 an - 1 pour les périodes humides et sèches, respectivement. Estimations du taux de livraison du sol a souligné des valeurs plus élevées pendant les périodes sèches et la dominance des processus d'érosion des versants. A l'événement l'échelle, les boucles d'hystérésis ont confirmé ces schémas saisonniers dans la dynamique des transports. L'étalonnage du modèle MUSLE a mis en évidence la gravité des précipitations pendant la période sèche.

Cette étude a fourni les estimations qualitatives et quantitatives nécessaires au développement de la gestion environnementale ; il permet également de contrôler les différents impacts sur ce bassin versant. D'autre part les résultats obtenus soulignent l'importance de la saisonnalité dans les processus d'érosion et de transport avec une pertinence particulière en termes de climat changé les prévisions.

Mots clés :RUSLE;MUSLE;PAP / RAC; NDVI; Algérie; Cartographie; Érosion potentielle; Calibration; Charge suspendue; Saisonnalité.

## Anglais

The present work aims to assess the soil losses due to water erosion and to contribute to the knowledge of the impact of the vegetation cover of the Isser watershed located in the north-west of Algeria. To this end, two predictive models were used, namely the Priority Actions Program by the Regional Activity Center (PAP / RAC) model and the Revised Universal Soil Loss Equation Model (RUSLE), using the geographic information system (GIS). To illustrate the level of protection in this watershed, it was decided to use two approaches for estimating factor C; the first is the classic method and the second is to calculate the vegetation index by normalized difference (NDVI) over two periods (dry and wet). The erosion state map, which was obtained using the PAP / RAC model, shows the areas which are potentially the most vulnerable to erosion and which cover more than 60% of the total basin area. The results for plant cover (factor C) by the conventional method during the dry period show an average loss of land equal to 14 (t ha - 1 year - 1), while this rate decreases to 7.9 (t ha - 1 year - 1) during the wet period. According to the NDVI approach, the C factor results for the dry season are 25.53 (t ha - 1 year - 1) with an annual loss of land of up to 3 million tonnes.

To assess the seasonal patterns of suspended sediment load and its erosion-transport interactions, 17-year monitoring data from rivers in the Isser river basin (north-western Algeria) were studied, and event-scale approaches. The results show significant differences in the yield and transport of sediment processes between dry and wet periods. A rate of 8 t ha - 1 year - 1 was estimated by continuous analysis, with values of 4.3 and 13 t ha - 1 year - 1 for wet and dry periods, respectively. Estimates of the soil delivery rate highlighted higher values during dry periods and dominance of slope erosion processes. At the scale event, the hysteresis loops confirmed these seasonal patterns in transport dynamics. Calibration of the MUSLE model highlighted the severity of precipitation during the dry period.

This study provided the qualitative and quantitative estimates necessary for the development of environmental management; it also makes it possible to control the various impacts on this watershed. On the other hand the results obtained underline the importance of seasonality in the processes of erosion and transport with particular relevance in terms of climate changed forecasts.

Keywords: RUSLE; MUSLE; PAP / RAC; NDVI; Algeria; Cartography; Potential erosion; Calibration; Suspended load; Seasonality.