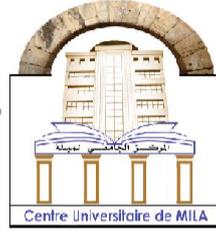


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



N° Ref :.....

**Centre Universitaire Abd alhafid Boussouf
Mila**

Département de génie civil et Hydraulique

Domaine : Sciences et de Technologie

Filière : Sciences et techniques

Spécialité : Hydraulique

**Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme MASTER
en Hydraulique Urbaine
Option : Hydraulique Urbaine**

**Contribution à la quantification du transport solide
et cartographie de l'érosion hydrique du sol par
l'utilisation du SIG et les réseaux de neurones.
De bassins versants Sébaou.**

Préparé par :

➤ MAUCHE Islam

Soutenu devant le jury :

Mr KEBLOUTI Mehdi

Mr BERHAIL Sabri

Mr MOUSSOUNI Abderzak

Mr ZEGHMAR Amer

Président

Examinateur

Encadreur

Co- Encadreur

Année universitaire : 2023/2024

Dédicace

Avant tous, je remercie « ALLAH » De m'avoir donné le courage et la volonté nécessaires pour atteindre mon travail.

J'ai l'honneur de dédie ce modeste travail à Ma famille Mouche et aux personnes Les plus chères au monde mes chers parents :

A mon père : Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est fruit de tes sacrifices qui tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A ma très chère mère : Tu es l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de Prier pour moi. A tous ceux que j'aime et à tous ceux qui m'aiment.

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes vifs remerciements aux encadreurs monsieur MOUSSOUNI Abderzak et monsieur ZEGHMAR Amer pour avoir contribué à l'élaboration de ce travail et pour leurs prestigieux conseils et leurs entière disponibilité.

Mes vifs remerciements vont à monsieur KEBLOUTI Mehdi d'avoir accepté d'honorer la présidence du jury.

Je remercie vivement monsieur BERHAIL Sabri d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail et d'apporter ces remarques enrichissantes.

Que mes parents, mon frère et toute la famille trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour leur soutien sans faille et leur grande patience, ainsi que la sollicitation de leur indulgence (ma famille en particulier) pour tout le temps que je n'ai pu leur consacrer et qui leur a été dérobé par le présent travail.

Un grand merci à tous mes amis et mes collègues, pour leurs soutiens à mon égard.

Il se peut que j'ai oublié quelques personnes qui m'ont aidé tout au long de ce travail. Qu'ils retrouvent ici mes meilleures reconnaissances et mes sincères et profondes excuses.

liste d'abréviation

Lmax	Altitude maximale
Lmoy	Altitude moyenne
Kc	Indice de compacité de Gravelius
I_g	Indice de pente globale
Dd	Densité de drainage
Ds	Dénivelée spécifique
A_{RUSLE}	la perte en sol moyenne annuelle
R	Facteur d'agressivité des précipitations
K	Facteur d'érodibilité des sols
P	Facteur pratique anti-érosive
LS	Facteur topographique
C	Facteur d'occupation des sols
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PMC	Le perceptron multicouche
RBF	Réseaux à fonctions radiales de base
RNN	Réseaux de neurones récurrents
RNFFRP	Réseaux de neurones feed-forward rétro propagation
RNA	réseaux de neurones Artificiels
FFBP	Feed forward back propagation
CFBP	Cascade forward back propagation
MLPNN	modèle perceptron multicouche
NSE et R²et RMSE	Les paramètres de performance

SOMMAIRE

Introduction générale	01
Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ÉROSION HYDRIQUE ET LE TRANSPORT SOLIDE	
I.1. Introduction	04
I.2. Différents type de l'érosion	04
I.2.1 L'érosion en nappe (érosion de surface)	05
I.2.2 L'érosion en masse	06
I.2.3 L'érosion linéaire (Griffes, rigoles et ravinement)	8
I.3. Les principaux facteurs érosifs	9
I.3.1. Agressivité des pluies	9
I.3.2. Vulnérabilité des roches et l'érodibilité des sols	9
I.3.3. La topographie	10
I.3.4 Le couvert végétal	10
I.3.5.Facteurs anthropiques	11
I.4. Approche et méthode de quantification de transport solide	11
I.4. 1.Approches qualitatives fondées sur l'expertise	11
I.4.2. Méthodes de quantification directe	12
I.4.3. Méthode d'application des équations du transport solide (empirique)	12
I.4.4. Modèles d'érosion	14
I.4.5. Modèles des pertes en sol	15
I.4.5. 1.Équation des pertes en sol modifiée (MUSLE)	16
I.4.5.2 Équation des pertes en sol révisée(RUSLE)	17
I.5. Mesure des transports solide	17
I.6.Type de transport solide	17
I.6.1. Transport solide en suspension	18
I.6.2. Le transport solide par saltation	18
I.6.3. Le transport solide par charriage	19
I.7. Aperçu de la situation de l'érosion hydrique dans le monde et en Algérie	19
I.8.Causes de l'érosion	20
I.9. Conséquence de l'érosion	20
I.9.1. Biodiversité	21
I.9.2. Désertification	21
I.9.3.La pollution des eaux	21
I.10. Méthodes de lutte contre l'érosion et le transport solide	21
I.10.1. Procédés agro techniques	22
I.10.2. Restauration des forets	22
I.10.3. Procédés hydrotechnique	22
I.11. Conclusion	22

Chapitre II: Présentation de la zone d'étude

II.1 .Introduction	24
II.2 Aperçu géographique	24
II.3. Caractéristiques topographiques de la zone d'étude	25
II.3.1. Altimétrie	25
II.3.2. Courbe hypsométrique	27
II.3.3. Analyse de la répartition spatiale des pentes	28
II.3.3.1. Indice de pente global I_g	29
II.4. Caractéristiques morpho métriques	30
II.4.1. Indice de compacité de Gravelius (K_c)	30
II.4.2. Longueur du rectangle équivalent (L)	31
II.5. Caractéristiques hydrographiques	31
II.5.1. Densité de drainage	32
II.6. Occupation du sol et de couvert végétal	32
II.7. Conclusion	34

Chapitre III : Cartographie et estimation des zones à risque d'érosion hydrique par l'utilisation du modèle RUSLE

III.1. Introduction	35
III.2. Données et Méthodologie	35
III.3. Modèle RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equatio	37
III.3.1. Facteur d'agressivité des précipitations (R)	37
III.3.2. Facteur d'érodibilité des sols (K)	40
III.3.3. Facteur pratique anti- érosive (P)	42
III.3.4. Facteur topographique (LS)	43
III.3.5. Facteur d'occupation des sols (C)	44
III.4. Détermination de la perte de sol	47
III.5. Conclusion	48

Chapitre IV : Modélisation de transport solide par les réseaux de neurones artificiels

IV.1. Introduction	50
IV.2. Historique	50
IV. 3Neurone biologique et neurone artificiel	51
IV. 3. 1. Le modèle neurophysiologique	51
IV. 3. 2. Neurone artificiel	52
IV. 4. Modélisation mathématique du neurone biologique	52
IV.5. Fonctions d'activation	53
IV.6. Modele des réseaux de neurones	54
IV.6.1. Le perceptron	54

IV.6.2. Le perceptron multicouche (PMC ou MPC)	55
IV.6.3. Réseaux à fonctions radiales de base	55
IV.6.4. Réseaux de neurones récurrents	56
IV.6.5. réseaux de neurones feed-forward rétro propagation (RNFFRP)	57
IV.7. Apprentissage pour les RNA	57
IV.7.1. Type d'apprentissage	57
IV.7.1.1 Apprentissage supervisé	58
IV.7.1.2. Apprentissage non supervisé	58
IV.7.1.3. Apprentissage Semi – Supervisée	58
IV.8. Architectures de réseaux de neurones Artificiels	58
IV.8.1. Réseaux statique (non bouclés)	59
IV.8.2. Réseaux dynamique (bouclés)	59
IV.9. Domaine d'application des réseaux de neurones	60
IV.9.1 L'application au traitement du signal	60
IV.9.2 L'application à la planification	60
IV.9.3 L'application au contrôle	60
IV.9.4 L'application au diagnostic	60
IV.10. Réseaux de neurones et les MATLAB	60
IV.10.1 Description de MATLAB	60
IV.11. Résultat et discussion	62
IV.11.1. Utilisation des modèles FFBP et CFBP	62
IV.11.2. Utilisation du modèle perceptron multicouche (MLPNN)	65
IV.12. Conclusion	67
Conclusion générale	69
Perspective	71

Liste des tableaux

Tableau II.1. Répartition de la surface partielle en fonction de l'altitude du bassin versant de Sébaou	28
Tableau II.2. Classes de type de relief du bassin versant de Sébaou	30
Tableau II.3 : Classification d'ORSTOM	32
Tableau II. 4. Paramètres morphologiques du bassin versant du Sébaou	33
Tableau III.1.: Les types, descriptions, sources et informations sur les données utilisées	36
Tableau III.2 : Valeurs des précipitations moyennes mensuelles et annuelles en (mm) et R pour la période (1982 -2002)	39
Tableau III.3.. Facteur de pratique de conservation (P) selon la pente du bassin versant	42
Tableau III.4. Perte annuelle de sol dans le bassin versant de Sébaou	47
Tableau IV.1 Fonctions de transfert f(x)	54
Tableau.IV.2. Paramètres de performance des modèles FFBP et CFBP	42
Tableau IV.3. Paramètres de performance des modèles MLPNN	67

Liste des Figures

Figure I.1. Les différents types d'érosion	5
Figure I.2. Parcelles agricoles affectées par une érosion en nappe	5
Figure I.3. Mouvement en masse sous Solufixion	6
Figure I.4. Types de glissement de terrain	7
Figure I.5. Coulée boueuse	7
Figure I.6. Erosion en rigole	8
Figure I.7. Ravinement	8
Figure I.8. Pourcentage de modèles utilisés pour évaluer la vulnérabilité à l'érosion des sols dans diverses recherches	15
Figure I.9. Les différents types du transport solide dans les cours d'eau	18
Figure I.10. Transport solide en suspension	18
Figure I.11. Modes de transport solide	19
Figure I.12. Transportsolideparcharriage	19
Figure II.1. Situation géographique et limites du bassin versant du L'oued Sébaou	25
Figure II.2. MNT du bassin de L'oued Sébaou (SRTM -30×30m)	26
Figure II.3. Classes d'altitudes au niveau du sous-bassin de l'oued Sébaou	26
Figure II.4. Classes d'altitudes au niveau du sous-bassin de l'oued Sébaou	27
Figure II.5. Classe des pentes au niveau du sous-bassin de l'oued Sébaou	29
Figure II.6. Courbe hypsométrique du Bassin versant de sebaou	29
Figure III.1. Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique	36
Figure III.2. Distribution des précipitations moyennes annuelles bassin Sebou.	38
Figure III.3 Érosivité des pluies (R)	39
Figure III.4. Code Structure(b)	41
Figure III.5. Code Structure(v)	41
Figure III.6. Facteur d'érodibilité des sols (K)	41
Figure III.7. Facteur pratique anti- érosive (P)	43
Figure III.8. Distribution des valeurs du facteur LS dans le bassin versant	44
Figure III.9. Facteur NDVI (a), Carte d'occupation du sol (b)	49

Figure III.10. Cartes annuelles de répartition des pertes en sol (RUSLE)	47
Figure IV.1. Schématisation d'un neurone biologique	52
Figure IV.2. Structure d'un Modèle neurone artificiel. (Hopfield, 1982).	53
Figure IV.3. Un perceptron multicouche contenant trois couches	55
Figure IV.4. Illustration d'un réseau de neurones à fonctions de base radiale (RBF)	56
Figure IV.5. Les réseaux de neurones récurrents(RNN)	56
Figure IV.6. Schéma bloc de l'apprentissage supervisé d'un réseau de neurone	58
Figure IV.7. Schéma bloc de l'apprentissage non supervisé d'un réseau de neurone	58
Figure IV.8. Réseau de neurone dynamique modèle hopfield	59
Figure IV.9. Interface MATLAB principale	61
Figure IV.10. Schéma du modèle neuronal dans MATLAB model(FFBP)	62
Figure IV.11. Schéma du modèle neuronal dans MATLAB model(CFBP)	62
Figure IV.12. Débit solide simulé vs débit solide mesuré par le modèle FFBP	63
Figure IV.13. Débit solide simulé vs débit solide mesuré par le modèle CFBP	63
Figure IV.14. Architecture du modèle MLPNN1	65
Figure IV 15. Droite de régression lors de training des différents modèles MLPNN	66
Figure IV.16. Droite de régression lors de validation des différents modèles MLPNN	66

Résumé :

L'érosion hydrique reste un problème majeur qui réduit en amont des bassins versants la productivité des terres cultivables par les pertes des sols, des engrais, des éléments nutritifs,... etc., et qui diminue en aval des bassins versants la durée de vie des barrages par la sédimentation accélérée dans leurs retenues. Cette érosion est causée par la réunion de plusieurs facteurs physico-climatiques à savoir la pluviométrie, le relief, les pratiques culturales, l'occupation et les caractéristiques des sols. Dans le bassin versant de l'oued Sébaou (nord-centre algérien) ces facteurs sont particulièrement favorables au déclenchement et à l'accélération du phénomène érosif.

La présente étude vise à évaluer les pertes en sol provoquées par le phénomène érosif et cartographier les secteurs potentiellement sensibles à l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Sébaou ; Pour ce faire, la version révisée de l'équation universelle de perte en sol (RUSLE) a été utilisée. L'application de cette dernière prend en considération cinq facteurs à savoir l'érosivité des pluies, la topographie, l'érodibilité du sol, le couvert végétal et les pratiques antiérosives. Le produit de ces facteurs sous un système d'information géographique (ArcGIS) à l'aide de l'équation mathématique du modèle RUSLE, nous a permis d'établir une carte des pertes en sol sur l'ensemble du bassin versant et de mettre en évidence les zones à sensibilité critique nécessitant des interventions urgentes.

Les résultats obtenus par l'application du modèle RUSLE montrent que la perte moyenne des sols par l'érosion hydrique de l'ordre de 12,95 t/ha/an au bassin versant de l'oued Sébaou dépasse la limite moyenne de tolérance des sols vis-à-vis de l'érosion hydrique (7 t/ha/an). Une partie importante de bassin, soit environ 38% de la superficie totale est marquée par un taux d'érosion inférieure à 7 t/ha/an, contre 6% des terres qui montrent une forte perte de sol (supérieur ou égal 30 t/ha/an) et environ 5% de perte en sol est très forte (supérieur ou égal 45 t/ha/an).

Le débit solide en suspension transportées par l'oued Sébaou a été modélisé par l'utilisation des réseaux de neurones (FFBP, CFBP et MLP) sous MATLAB sur la base des mesures instantanées des concentrations de MES et des débits liquides (Q) à l'échelle journalière. Les résultats obtenus indiquent que les modèles neuronaux ont fournis des simulations satisfaisantes selon les critères de performance le coefficient de corrélation, Nash-Sutcliffe (NSE) et l'erreur moyenne quadratique (RMSE).

Mots clés : Erosion du sol, Transport solide, réseau de neurone artificiel (RNA), Bassin versant Sebaou, SIG, RUSLE.

ملخص

يمثل التآكل المائي للتربة مشكلة كبيرة تقلل من إنتاجية الأراضي المزروعة بسبب ضياع التربة الزراعية، والنباتات، والعناصر المغذية،... وما إلى ذلك، مما يقلل من عمر طول الحياة الأحواض بسبب الترسب تتسارع في حافظاتها. ينجم هذا التآكل عن جمع العديد من العوامل الفيزيائية المناخية للتعرف على قياسات هطول الأمطار والتضاريس و طول المنحدرات وخصائص التربة. في الحوض المقابل لوادي سيباو (شمال وسط الجزائر) هذه العوامل مواتية بشكل خاص للتخفيف من حدة الظاهرة وتسريعها.

تهدف الدراسة الحالية إلى تقييم الأضرار الناجمة عن الظاهرة التآكلية ورسم الخرائط للقطاعات الحساسة للتآكل المائي نهر سيباو يؤخذ تطبيق هذه آخر العوامل في الاعتبار من أجل ذلك، تم استخدام النسخة المنقحة من المعادلة العالمية لمعرفة تآكل للتربة، والتضاريس، وقابلية تآكل والغطاء النباتي، والتطبيقات المضادة للتآكل. إن منتج هذه العوامل هو نظام، ونحن نسمح لك بإنشاء بطاقة من الأوراق RUSLE بمساعدة المعادلة الرياضية لنموذج (ArcGIS) معلومات جغرافية على مجموعة من الحوض المتنوع والعداد في دليل على انتقاد مناطق الحساسية التي تتطلب تدخلات عاجلة.

تشير إلى أن القدرة على التآكل المائي بمقدار 12.95 طن RUSLE النتائج التي تم الحصول عليها من خلال تطبيق نموذج / هكتار / في مقابل الوادي ستتجاوز الحد الأقصى المسموح به من التسامح. سولس مقابل التآكل المائي (7 طن/هكتار/سنة). جزء مهم من الحوض، حيث يتم تغطية 38% من السطح الإجمالي بطبقة من التآكل أقل من 7 طن/هكتار/سنة، مقابل 6% من الأرض التي تشكل حصناً قوياً من الشمس (أعلى أو 30 طن/سنة) هكتار) والبيئة 5% من (طاقة الشمس قوية للغاية) أعلى أو 45 طن/هكتار.

من (MLP وCFBP وFFBP) تم نقل الديون الصلبة المعلقة بواسطة وادي سيباو إلى استخدام شبكات الخلايا العصبية "I échelle" على (Q) والديون السائلة MES على قاعدة القياسات الفورية لتركيزات MATLAB خلال تشير النتائج إلى أن النماذج العصبية توفر محاكاة مرضية بناء على معايير الأداء ومعامل الارتباط وناش "Journalière". (RMSE) والخطأ التربيعي المتوسط (NSE) ساتكليف

، حوض فارسانت سيباو، (RNA) الكلمات المفتاحية: تآكل الشمس، النقل الصلب، شبكة الخلايا العصبية الاصطناعية SIG، RUSLE.

Abstract

Water erosion remains a major problem which reduces the productivity of arable land upstream of the watersheds through the loss of soil, fertilizers, nutrients, etc., and which reduces the lifespan of the watersheds downstream of the watersheds. dams by accelerated sedimentation in their reservoirs. This erosion is caused by the combination of several physico-climatic factors, namely rainfall, relief, farming practices, occupation and soil characteristics. In the watershed of Wadi Sébaou (north-central Algeria) these factors are particularly favorable to the triggering and acceleration of the erosion phenomenon.

This study aims to assess the soil losses caused by the erosion phenomenon and map the sectors potentially sensitive to water erosion in the watershed of Wadi Sébaou; To do this, the revised version of the universal soil loss equation (RUSLE) was used. The application of the latter takes into consideration five factors, namely rain erosivity, topography, soil erodibility, plant cover and anti-erosion practices. The product of these factors under a geographic information system (ArcGIS) using the mathematical equation of the RUSLE model, allowed us to establish a map of soil losses over the entire watershed and to put highlight areas of critical sensitivity requiring urgent interventions.

The results obtained by the application of the RUSLE model show that the average loss of soil through water erosion of the order of 12.95 t/ha/year in the Wadi Sébaou watershed exceeds the average tolerance limit of the soils against water erosion (7 t/ha/year). A significant part of the basin, approximately 38% of the total surface area, is marked by an erosion rate of less than 7 t/ha/year, compared to 6% of land which shows a strong loss of soil (greater than or equal to 30 t/ha/year). ha/year) and around 5% soil loss is very high (greater than or equal to 45 t/ha/year).

The suspended solid flow transported by Wadi Sébaou was modeled using neural networks (FFBP, CFBP and MLP) in MATLAB based on instantaneous measurements of MES concentrations and liquid flow rates (Q) at the same time. daily scale. The results obtained indicate that the neural models provided satisfactory simulations according to the performance criteria of the correlation coefficient, Nash-Sutcliffe (NSE) and the root mean square error (RMSE).

Keywords: Soil erosion, Solid transport, artificial neural network (ANN), Sebaou Varsant Basin, GIS, RUSLE.

Introduction générale

L'érosion hydrique du sol est un phénomène très complexe, lié à des facteurs naturels et anthropiques difficilement maîtrisables, affecte beaucoup les terres arables et la capacité d'emmagasinement des barrages. En Algérie, l'érosion hydrique et le transport solide sont très caractéristiques, favorisées par des conditions topographiques, physiques, géomorphologiques, climatiques, hydrologiques et socio-économiques. Selon Touabia (1999) l'érosion spécifique moyenne annuelle en Algérie variant entre 2000 à 4000 t/km². Ces valeurs élevées ne sont que la conséquence de la dégradation de l'ensemble des bassins versants de l'Algérie du nord. Le ministère de l'Agriculture et du Développement rural en 2011 estimait à 50 millions d'hectares les surfaces menacées par la dégradation due à la désertification et l'érosion hydrique, soit plus de 20% de la superficie totale du pays qui dépasse les 238 millions d'hectares, en conséquence, 14 millions d'hectares de zones de montagne au Nord sont touchés par l'érosion hydrique, 32 millions d'hectares en zones steppiques sont directement affectés et/ou menacés par la désertification et 4,1 millions d'hectares de forêts soumises aux menaces des effets des changements climatiques (Mostephaoui et al., 2013). De nombreuses études ont été réalisées, des formules élaborées, par différents auteurs pour interpréter le problème avec plusieurs outils, afin d'arriver à une quantification du transport solide qui s'approche de la réalité. Malheureusement le problème est très difficile, complexe et loin d'être résolu avec les formules théoriques actuelles, vu l'écart quantitatif considérable entre chaque formule utilisée, ainsi que la différence constatée entre les quantités mesurées lors des envasements des barrages et les estimations faites pendant leurs conceptions. Cependant, on s'est orienté à la quantification de l'érosion et des apports solides dans les bassins versant et les oueds par l'utilisation d'une part, l'approche cartographie pour évaluer le taux d'érosion dans le bassin versant Sébaou, cette approche, les SIG, sont des outils performants pouvant servir à la collecte et à la combinaison des données (Puech, 1993). Ils se présentent de nos jours comme des outils complémentaires dans les systèmes interactifs d'aide à la décision (Roy et Bouyoussou, 1993). Pour ce faire, il est nécessaire de sélectionner les principaux facteurs de l'érosion du modèle RUSLE, d'utiliser des données cartographiques qui permettent de les visualiser et de choisir un modèle qui s'adapte le mieux à la région étudiée.

D'autre part, la modélisation de transport solide par les réseaux de neurones de la station hydrométrique de Baghlija afin de mieux prédire le taux des apports solides. Cette

méthode, de réseau de neurones, connue par sa puissance, son efficacité et sa réussite dans plusieurs domaines de recherche.

Dans cette optique, les objectifs de ce mémoire sont multiples, on cite :

- 1- Quantification des pertes en sol sur l'ensemble du bassin versant de Sébaou situé au Nord de l'Algérie, par l'utilisation du modèle empirique RUSLE sous un système d'information géographique (ArcGIS). Mettre en relief la nature et l'ampleur des facteurs et paramètres contribuant à la dégradation du sol par le modèle RUSLE du fait de la combinaison de plusieurs facteurs notamment l'érosivité des pluies R, l'érodibilité du sol K, les pratiques culturales P, facteur topographique, la pente et sa longueur LS et le couvert végétal C pour aboutir à des cartes de synthèse qui nous permettent de délimiter et d'identifier les zones érodées. Cela permet aux autorités responsables d'avoir un support de base pour l'élaboration d'un plan d'aménagements anti érosif, et d'identifier les zones de forte dégradation nécessitant des interventions urgentes.
- 2- Elaboration des modèles précis pour la prédiction des sédiments en suspension à l'exutoire du bassin versant de Sébaou au niveau de la station hydrométrique de Baghlia à l'échelle journalière, par la modélisation à l'aide des réseaux de neurones artificiels avec différents modèles à savoir FFBP (feedforward back propagation, CFBP (cascade forward backpropagation et MLPNN (perceptron multicouche).

Le manuscrit présenté est composé de quatre chapitres :

- ✓ Le premier est une synthèse bibliographique sur l'érosion hydrique du sol et le transport solide ; ce chapitre comprend un aperçu sur les processus et mécanisme de l'érosion hydrique du sol, les principaux facteurs, description du modèle RUSLE, méthode de quantification de transport solide et les causes et les conséquences de l'érosion.
- ✓ Le deuxième est consacré à une description générale de la zone d'étude ; permettant de présenter les caractéristiques morphologiques à partir d'un MNT (30m), occupation des sols et le type de sol de bassin étudié de l'oued Sébaou. Et ce pour présenter la résistance du milieu à l'érosion hydrique.
- ✓ Le troisième chapitre concerne la quantification de la perte en sol par l'érosion hydrique au bassin versant étudié par l'utilisation du modèle empirique RUSLE sous ArcGIS. Il est aussi consacré à la cartographie des différents indices intervenant

directement ou indirectement dans le processus érosif, et l'élaboration de la carte de la vulnérabilité à l'érosion hydrique sur l'ensemble du bassin versant.

- ✓ Le quatrième chapitre s'attache à la modélisation des transports solides en suspension à l'aide des réseaux de neurones artificiels de la station Baghlia dans le bassin Sébaou par l'utilisation de différents modèles, FFBP, CFBP et MLP, où seront comparés les différents résultats de simulation obtenus par ces modèles.
- ✓ Enfin, une conclusion générale qui récapitule l'essentiel des résultats obtenus dans les chapitres précédents.

I.1. Introduction

Le terme « érosion » provient du verbe latin « erodere » qui signifie « ronger » (Vanmaercke, et al., 2014). Il exprime l'usure de la surface du sol, sous l'effet imprévisible des facteurs météorologiques. En dépit des différents types d'érosion qui existent, nous nous intéresserons, dans ce présent travail, à l'érosion hydrique, phénomène qui existe dans notre planète depuis que les roches ont émergé et se sont trouvées en contact avec l'atmosphère (Lefkir, 2005).

En revanche, l'érosion hydrique ou fluviale est le détachement de la matière sous l'effet de l'énergie d'écoulement (ruissellement) qui est supérieure à la résistance des particules solides de la terre. Il existe dans la littérature plusieurs études intéressantes au sujet du phénomène des pertes des sols et de l'érosion hydrique.

Nous nous référons justement aux études les plus populaires pour affiner notre recherche bibliographique et à enrichir nos connaissances concernant la situation de la dégradation des sols en régions méditerranéennes et en particulier en Algérie.

Par ailleurs, les conclusions qui vont être tirées de cette recherche bibliographique serviront surtout à l'orientation de notre travail.

I.2. Différents type de l'érosion

On distingue trois principales formes d'érosion : L'érosion en nappe, linéaire et en masse (Bakker et al., 2007). Chaque forme d'érosion laisse son identité et sa trace dans le paysage. En effet, l'érosion en nappe, dite aussi l'érosion de surface, est observée dans les zones cultivées. En revanche, l'érosion linéaire ou en ravine, est observée dans les versants, elle déplace localement la partie profonde du sol. Le dernier type d'érosion concerne la mobilisation et l'arrachement de grandes quantités de terre. En conséquence, des glissements et/ou des coulées boueuses peuvent se déclencher et provoquer une modification irréversible du paysage (Figure I.1)

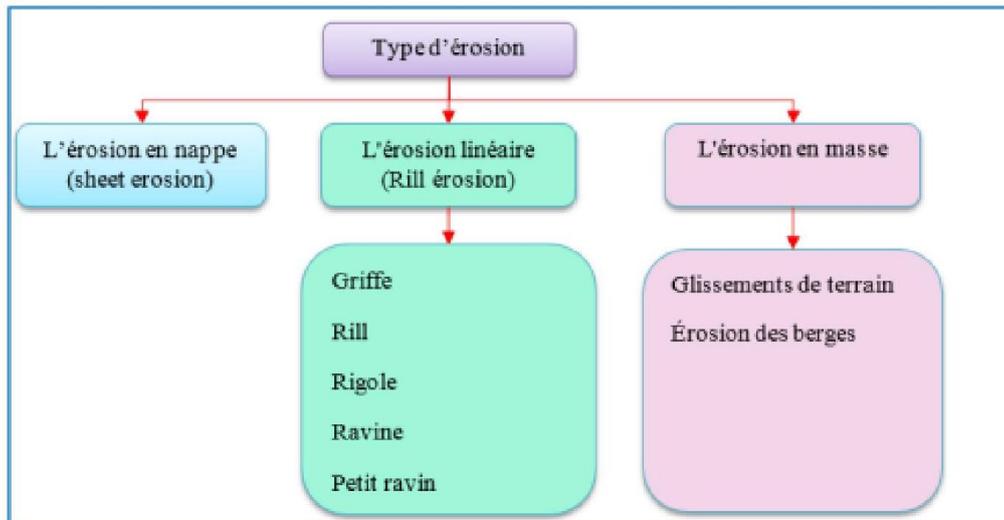


Figure I.1. Les différents types d'érosion (Kassoul et al., 1997).

I.2.1 Erosion en nappe (érosion de surface)

L'érosion en nappe ou de surface est caractérisée par une eau de ruissellement sans griffes ou rigoles visibles (Ben Slimane... 2013). Ce phénomène est observé sur les pentes faibles, en sommet des versants où l'eau ne peut pas se concentrer. Sous l'effet de l'impact des gouttes de pluies (effet Splash), les particules solides sont arrachées et transportées. Au niveau des parcelles cultivées, l'érosion en nappe décape la partie superficielle, la plus fertile du sol (Figure I.2).



Figure I.2. Parcelles agricoles affectées par une érosion en nappe (Ellison, 1947)

Dans un premier temps, c'est l'impact des gouttes qui va arracher les particules. La battance des gouttes de pluie répartie des gouttelettes dans toutes les directions. Seulement, sous l'effet de la gravité les gouttelettes auront une vitesse plus importante en aval qu'en amont. La vitesse résultante des gouttelettes sera dirigée depuis l'amont vers l'aval. A partir de là, il y

aura formation de flaques d'eau et justement une flaque non infiltrée entraînera un ruissellement en nappe. L'érosion en nappe dépend de :

- L'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement,
- L'énergie cinétique des pluies qui détachent les particules,
- La durée des pluies et/ou l'humidité des sols avant l'arrivée de l'averse.

I.2.2 Erosion en masse

L'érosion en masse ou bien les mouvements de masse sont des accidents de tailles variées, de quelques mètres à quelques kilomètres parfois. Ils se produisent soit par solifluxion soit par glissement de terrain ou par des coulées boueuses.

a) Solifluxion

Est une lente descente d'une pellicule superficielle du versant (solifluxion pelliculaire) ou de loupes de solifluxion souvent de taille métrique et quelque fois décamétrique (Giffort et Hawkins, 1978 et 1979).

Ce phénomène affecte, en général, les versants constitués de marnes et d'argiles qui sont très plastiques surtout ceux ayant des pentes moyennes et abruptes (Figure I.3).



Figure I.3. Mouvement en masse sous Solufixion [Anonyme 1]

Les versants ayant subits une solifluxion présentent en général un paysage chaotique. Il s'agit d'une succession de replats et de contre-pentes abruptes isolant des dépressions fermées.

b) Glissements

Les glissements des terrains sont souvent liés à un sapement de l'Oued aux pieds des versants constitués de roches tendres. Même sur des formations dures, des glissements peuvent intervenir, surtout quand le soubassement du versant est constitué d'un matériau meuble (Figure I.4).

On distingue d'après la trajectoire de la masse déplacée plusieurs types de glissements : en plan, en masse ou bien des glissements rotationnels.

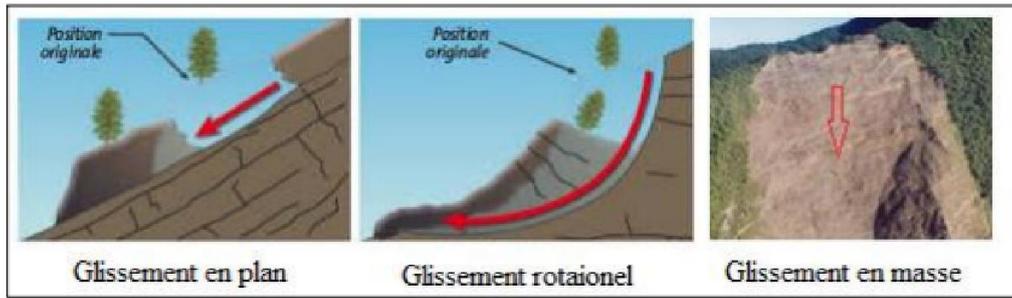


Figure I.4. Types de glissement de terrain. (Joannon, 2005)

c) Coulées boueuses

Les coulées boueuses sont des écoulements de matériel solide ayant franchi la limite de liquidité et dont la vitesse dépend de la viscosité. Elles sont constituées de mélange d'eau et de terre. Les matériaux mobilisés par les coulées de boue sont généralement très hétérogènes (argile, sable, rochers) (Jules, 2022). Cette charge très importante en matériaux solides (environ 1/4 d'eau et 3/4 de matériau solide), leur confère une grande capacité érosive et destructive notamment, du fait de la présence de blocs charriés au sein même de la coulée. Elles peuvent s'écouler dans le lit des torrents et éventuellement s'étaler sur les cônes de déjection torrentiels générant ainsi une menace importante pour les vies ou les installations humaines. Toutefois, elles peuvent s'arrêter « en masse », laissant des dépôts d'épaisseur importante de l'ordre du mètre (Figure I.5).



Figure I.5. Coulée boueuse (Arabi & Roose, 1989)

Les coulées se produisent dans des matériaux meubles et lorsque la teneur en eau augmente considérablement, avec une perte brutale de cohésion, en provenance du corps ou du pied d'un glissement. Dans un contexte morphologique, les zones de colluvions, de glissements actifs

ou anciens et de dépôts anthropiques favorisant d'importantes concentrations d'eau (talwegs, lit de rivière) sont des sites potentiels d'apparition de coulées de boue.

I.2.3 Erosion linéaire (Griffes, rigoles et ravinement)

L'érosion linéaire se produit généralement sous l'effet d'un écoulement concentré. Ce dernier se développe sur des sols ayant perdues leur capacité d'infiltration ou de stockage de l'eau. Le ruissellement concentré entraîne en aval un tassement du sol (notamment en surpâturage) et provoquent une dégradation linéaire de la structure superficielle du sol.

L'érosion linéaire peut apparaître en 3 formes distinctes : en Griffes, rigoles ou ravinement. Lorsque l'écoulement creuse des formes d'incision en petits canaux de quelques centimètres de profondeur on parle donc de « griffes » (Le Bissonnais et al., 2002). En revanche, lorsque ces canaux dépassent les 10 cm de profondeur cela correspond à des « rigoles » (Figure I.6). D'autre part, on distingue une forme d'érosion intermédiaire appelée « nappe ravinant », quand les creux d'incision restent entre 10 à 20 cm de profondeur mais que leur largeur atteint plusieurs mètres. Les creux dépassant les 50 cm de profondeur, et en particulier lorsqu'ils ne sont plus effaçables par les techniques culturales, ceci représente des « ravines » (Figure I.7). Le ruissellement concentré provoque également le sapement des berges des oueds et leur surcreusement en cas de fortes crues. Le ravinement dépend de l'énergie du ruissellement, laquelle est proportionnelle au volume ruisselé et au carré de sa vitesse (Malet et Maquaire, 2004) Les principaux paramètres contrôlant le développement des ravines sont l'intensité de la pluie, la superficie drainée en amont, la pente, la lithologie et le couvert végétal.



Figure I.6. Erosion en rigole.



Figure I.7. Ravinement (Zekri, 2021)

I.3. Principaux facteurs érosifs

L'identification et la connaissance des facteurs générateurs des processus érosifs en amont des cours d'eau est une démarche indispensable pour la bonne estimation de la dégradation spécifique. Ces facteurs sont nombreux selon la littérature mais sont souvent d'ordre climatique et physique :

I.3.1. Agressivité des pluies

Les averses intenses jouent manifestement un rôle important dans le déclenchement des processus géomorphologiques relevant de l'érosion hydrique et ce en deux façons :

- Au point de contact avec le sol, les gouttes de pluie contribuent au rejaillissement de particules de terre, surtout lorsque l'intensité de pluie est plus forte. En revanche, l'impact des gouttes de pluie modifie l'état de surface du sol, entraînant la formation du phénomène de battance qui réduit la perméabilité de la surface du sol.

- L'intensité des pluies conditionne le déclenchement du ruissellement superficiel par la saturation momentanée des pores du sol (Ouvry et al., 2010). Toutefois, l'intensité n'est pas tout s'il se produit un épisode pluvieux à la suite de précipitations prolongées et/ou répétées, ceci se transforme fréquemment vers un facteur d'agressivité potentielle du milieu et confère une rythmicité saisonnière à certaines manifestations de la dynamique érosive.

Dans la littérature, il existe plusieurs indices d'érosivité du climat mais celui-ci est le plus fréquent dans les études hydrologiques :

$$R = E_g \times I_{30} = \sum (E_u \cdot h_i) \times I_{30} \text{ (m.t.m/ha.h); } E_u = 210 + 0,89 \log_{10} \dots I.1 \text{ (Probst and Suchet 1992)}$$

Où : E_g est l'énergie cinétique globale en (m. Tonnes/ha) qui peut être représentée par l'énergie unitaires (E_u) et des hauteurs d'eau précipitées (h) ; I_{30} : intensité maximale en 30 min (mm/h).

I.3.2. Vulnérabilité des roches et l'érodibilité des sols

L'érodibilité signifie la sensibilité d'un sol nu à l'érosion pluviale. Ceci dépend de ses qualités intrinsèques : texture, structure, teneur en matière organique et la perméabilité (Snelder et Bryan, 1995).

Par ailleurs, l'expérience des chercheurs ainsi que plusieurs études hydrogéologiques et lithologiques ont montrées que les formations meubles et les roches cohérentes sont directement érodables, dès lors que les conditions favorables seront réunies (couvert végétal absent ou clairsemé, entrée en action d'un agent d'érosion, topographie, ...etc.). C'est le cas par exemple des marnes et les argiles qui sont très érodables]. En revanche, les roches

compactes et dures tel que les calcaires ou les affleurements de grès ne pourront être érodés que si le matériel est préparé par altération et à travers les fissures et les diaclases (Wischmeier et Smith, 1965).

I.3.3. Topographie

L'inclinaison et la longueur de la pente sont les principaux éléments topographiques qui interviennent dans les phénomènes de l'érosion. Le degré d'inclinaison d'une pente favorise le déplacement des particules détachées vers l'aval par effet de splash. Il en est de même pour le ruissellement et le transport des particules, surtout sur un sol nu. Sur des versants fortement inclinés, le ruissellement se concentre et peut devenir la cause principale de l'érosion, surtout en zone méditerranéenne (Tixeront, 1960).

Une étude estime que les pertes en terre croient de façon exponentielle avec le degré de la pente. Nous mettons en lumière aussi le surpâturage qui provoque le tassement des sols, qui diminue la perméabilité, et accroît donc le ruissellement superficiel de l'eau. D'autres parts, l'élevage pastoral dégrade la végétation et favorise ainsi, la désertification.

I.3.4. Couvert végétal

Le couvert végétal agit dans le sens de retarder l'érosion du sol. Ce rôle peut être direct, la végétation faisant obstacle au ruissellement et protégeant les sols. Il peut également être indirect, le couvert végétal assurant une amélioration du bilan hydrique et des propriétés physiques du sol. Il dépend aussi du stade de développement de la végétation [Anonyme 2]. Il protège le sol contre l'érosion par l'interception et le retard de la chute des gouttes des pluies sur la surface du sol permettant ainsi la dissipation de son énergie cinétique, ce qui diminue l'effet "splash". Elle favorise également l'infiltration de l'eau et le maintien du sol grâce à son système racinaire, et son développement en surface freine le ruissellement par rapport au sol nu. La présence ou l'absence du couvert végétal à la surface du sol détermine son comportement hydrologique. En effet, la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol, le ruissellement et le transport solide sont corrélés positivement avec le taux de recouvrement de la végétation.

Les forêts et surtout les couvertures herbacées sont plus efficaces pour fournir une protection du sol qu'une couverture de plantes cultivées ou une jachère. C'est le manque de végétation qui crée la condition permettant l'érosion. L'existence d'une litière protège également les sols de l'érosion. La dynamique de la croissance du couvert végétal est très variable en fonction du type de plante mais aussi des techniques culturales (densité et date de plantation, fertilisation) et du climat (précipitations et éclaircissement). La combinaison entre cette dynamique de

croissance et la dynamique des pluies va donc déterminer l'importance des risques d'érosion (Bouguerra, 2014).

I.3.5. Facteurs anthropiques

Certaines activités humaines provoquent l'accélération de rythme naturel de l'érosion hydrique par l'action de surpâturage et la déforestation qui provoque le tassement des sols, diminue sa perméabilité et favorise le ruissellement de l'eau, L'intensification de l'agriculture et La croissance démographique et l'urbanisation.

I.4. Approche et méthode de quantification de transport solide

Il est essentiel de repérer les zones à risque d'érosion du sol afin de planifier et de mettre en place des mesures SWC efficaces afin de diminuer l'érosion du sol (Demmak, 1982). Il existe deux méthodes principales pour repérer les zones à risque d'érosion du sol : une approche qualitative qui utilise des connaissances spécialisées ; une approche quantitative qui repose sur des mesures et des modèles d'érosion. Les méthodes employées sont très différentes et s'avèrent riches d'enseignements lorsqu'elles sont croisées : ces méthodes sont classées comme suit :

I.4.1. Approches qualitatives fondées sur l'expertise

Les méthodes qualitatives consistent à identifier de manière relative les zones à risque d'érosion du sol en se basant sur les connaissances de l'expert. Pour évaluer les risques d'érosion des sols et ses facteurs de contrôle, ces méthodes utilisent des enquêtes qui rassemblent l'ensemble des données sur les pertes de sol dans une zone (Pandey et al., 2021). L'évaluation mondiale des sols induits par l'homme dégradation (GLASOD) est un exemple d'approche qualitative basée sur des connaissances spécialisées. GLASOD avait pour objectif de fournir des renseignements sur l'érosion du sol et de sensibiliser les décideurs et les gouvernements à l'échelle mondiale à l'importance de préserver les sols, afin de développer un plan adéquat et de définir des priorités pour l'avenir des investissements.

L'étude GLASOD apporte des informations essentielles. Selon Bridges et (Rose, 1994), les données concernant la variation spatiale et la gravité de la dégradation des sols sont basées sur les réponses d'experts provenant de différentes régions du monde. Son principal atout réside dans sa capacité à être appliquée à toutes les échelles, qu'il s'agisse du niveau local ou mondial, de manière facile et rapide. Toutefois, les comparaisons entre les pays basés sont difficiles à faire. En ce qui concerne cette question, GLASOD se base exclusivement sur l'opinion d'un expert, qui ne prend pas en compte toutes les mesures sur le terrain, et certains

experts n'ont même pas reproduit le questionnaire. Il reste incertain quant à sa fiabilité et à sa reproductibilité.

I.4.2. Méthodes de quantification directe

Les méthodes traditionnelles pour évaluer l'érosion des sols se concentrent sur la mesure de l'érosion des sols à partir de terrains. Sur les réelles mesures cette méthode offre le meilleur. Le taux précis de perte de sol. Toutefois, ils sont onéreux et exigent pendant une période prolongée et fournir des informations spécifiques sur le site, qui peuvent être utilisées exclusivement sur cet endroit de plus, il est inaccessible. Afin de prendre des mesures à tous les endroits du détroit il faut également du temps pour prendre des mesures répétées afin de se développer une base de données adéquate afin de garantir que les données ne sont pas affectées par quelques années de précipitations inhabituelles et d'événements extrêmes. Il est essentiel de prendre des mesures à long terme afin d'évaluer. (A. Amour..2010). Cette méthode basée sur la concentration de la matière en suspension débute par le prélèvement en un point unique soit sur le bord, soit au milieu de l'Oued au moyen d'un flacon de 1 litre l'échantillonnage s'effectue lors d'une crue suivant des intervalles de temps variables en fonction du régime de l'Oued Ainsi, en étiage ou lorsque le débit est constant au cours de la journée, il est possible d'effectuer un à deux prélèvements au cours de journée (Allili, 2015).

En période de crue, le nombre des prélèvements dépend des deux phases de l'événement :

- Un prélèvement est effectué durant la montée des eaux lorsque la montée est lente et toutes les quarts d'heures et demis heures lorsque la montée est rapide.
- En période de décrue, on prélève un échantillon toutes les heures durant les six premières heures et toutes les deux heures en suite L'espacement dans le temps des prélèvements des concentrations accroît au fur et à mesure qu'on s'éloigne du pic de la crue. Le traitement des matières en suspension prélevées, se fait au laboratoire par décantation, filtrage avec un filtre de type Laurent ($\emptyset = 32$ cm) et séchage à l'étuve à 110°C durant 30 minutes et enfin la pesée les débits solides (Q_s) en Kg s^{-1} sont déduits du produit des deux paramètres: débit et concentration.

I.4.3. Méthode d'application des équations du transport solide (empirique)

Nombreuses formules de transport solide sont utilisées pour estimer le taux d'apports solides. Dans des conditions d'écoulement bien précises, toutes ces formules donnent une évaluation du débit solide total ou du débit solide de charriage.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ÉROSION HYDRIQUE ET LE TRANSPORT SOLIDE

Pour la prévision à l'aide de ces formules, il faut disposer des données du terrain sur l'hydraulique du chenal et matériaux du lit, qui sont des facteurs primordiaux. Le type de données disponibles est très souvent déterminant pour choisir une équation.

A. Formule de Fournier (1960)

Selon l'équation (I.2), la formule de Fournier est basée sur la nature des précipitations et les caractéristiques morphologiques de l'UW étudiée.

$$Es = \left(\frac{1}{36}\right) * \left(\frac{Pm}{36}\right)^{2.65} * \left(\frac{H^2}{s}\right)^{0.46} \dots I.2 \text{ (Fournier, 1960)}$$

Avec Es = Érosion spécifique annuelle moyenne en (t/km²/an); Pm = Pluie mensuelle du mois le plus pluvieux (mm); Pa = Pluie annuelle moyenne (mm); H = Altitude moyenne (m) ; S = Superficie du bassin versant (Km²).

B. Formule de Tixeront

La formule de Tixeront est basée sur la corrélation entre le paramètre de la plaque d'écoulement (Le) et la perméabilité (α), sachant qu'elle est calculée sur la base des apports liquides annuels moyens. Selon Tixeront (1960) il y a 32 bassins en Algérie et 9 bassins en Tunisie, avec une durée allant de 2 à 22 ans.

$$qs = \alpha \times Le \dots I.3 \text{ (Sogreah, 1969)}$$

Avec qs = Erosion annuelle moyenne (t/km²/an) ; Le = Le débit d'eau (mm); α : Paramètre caractérisant la perméabilité du bassin versant, qui varie de 8,5 à 3200.

C. Formule d'ANRH (1970)

Cette formule exprime la dégradation spécifique des bassins Algériens en fonction, des indices de précipitations, la lithologie et la torrentialité des cours d'eaux.

$$Tss = 26,62Ie + 5,071IP + 9,77Ct - 593,59(T/km^2/an) \dots (I.4) \text{ (ANRH 1970)}$$

Ou Tss = transport solide spécifique annuel moyen (T/Km² .an); Ie = indice lithologique (%); IP = indice de précipitation (%) ; Ct = coefficient de torrentialité. Ct = Dd. F1 ; Dd = La densité de drainage calculé par la formule suivant :

$$Dd = \frac{\sum_{l=1}^N LI}{N} \dots (I.5) \text{ (Benachour, 2016)}$$

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ÉROSION HYDRIQUE ET LE TRANSPORT SOLIDE

Avec LI = longueur de tous les flux d'ordre « 1 » (km); F1 = nombre de thalwegs/fréquence de surface des thalwegs élémentaires. Cette formule est applicable dans les conditions suivantes :

Ie > 10% et IP > 300

La technique de Graviovic (EPM) a été utilisée pour évaluer la perte moyenne de sol ($m^3 km^{-2} an^{-1}$).

D. Formule de Graviovic

Gavrilovic a développé cette technologie dans les bassins versants de la rivière Morava en Serbie en 1962 (ANRH, 1970). Selon l'équation suivante, la méthodologie générale repose sur la création de six couches thématiques qui représentent des facteurs EPM tels que les précipitations, la température, l'érodabilité des sols, la protection des sols (végétation), l'indicateur d'érosion existant et les pentes.

$$W = T \times H \times \sqrt{Z^2} \dots \dots \dots (I.6) \text{ (Heusch, 1988)}$$

Où W = Érosion annuelle moyenne des sols ($m^3 .km^{-2} .an^{-1}$) ; T = le coefficient de température, calculé par (Eq. 1.7).

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10}} + 0.1 \dots \dots \dots (I.7) \text{ (Al-Juboori, 2022)}$$

Où t0 = la Température annuelle moyenne (C°) ; H = Pluviométrie annuelle moyenne ($mm.an^{-1}$) ; Z = Coefficient d'intensité de l'érosion. Le coefficient d'érosion (Z) est calculé par (Eq. 1.8).

$$Z = X_a \times Y \times (\varphi + \sqrt{J_a}) \dots \dots \dots (I.08) \text{ (Walter, 2000)}$$

Où Y = Coefficient d'érodabilité du sol ; Xa = Coefficient de protection du sol contre les influences liées aux phénomènes atmosphériques ; φ = Indicateur d'érosion existant qui exprime le type d'évolution des processus d'érosion visible dans le bassin versant ; Ja = Indice de pente (%).

I.4.4. Modèles d'érosion

Les représentations mathématiques des modèles d'érosion des sols sont employées par plusieurs chercheurs. Ils ont utilisé un système simplifié pour décrire les processus d'érosion complexes pour estimer les taux de perte de sol. Dans différentes conditions, il est possible de

planifier et d'évaluer la performance de SWC (Angima, 2003). De plus, il est crucial de réaliser une modélisation de l'érosion du sol pour : prédire l'érosion du sol, la compréhension des méthodes de gestion et de leur interaction, l'évaluation des actions réalisées sur le terrain et en dehors de l'endroit les répercussions sur l'efficacité du sol et la qualité de l'eau (Pandey et al., 2021). Les modèles d'érosion des sols permettent d'estimer de manière précise les taux de dégradation des sols. Différents modèles d'érosion présentent des capacités de prédiction variées. Les objectifs ont été mis en place trois raisons principales justifient la modélisation de l'érosion des sols. On les a employés en tant qu'outil de prédiction de taux de perte en sol, fournir des informations sur l'évolution spatio-temporelle (où et lorsqu'il y a une érosion du sol, les modèles peuvent servir d'outils pour mise en évidence des mécanismes d'érosion et de leurs relations.

I.4.5. Modèles des pertes en sol

Il existe de nombreux modèles pour estimer l'érosion hydrique à différentes échelles spatio-temporelles. Le modèle USLE avec ses deux versions MUSLE et RUSLE est largement utilisé à travers le monde. Plusieurs études ont été effectuées pour déterminer son paramètre (Bouguerra, 2014).

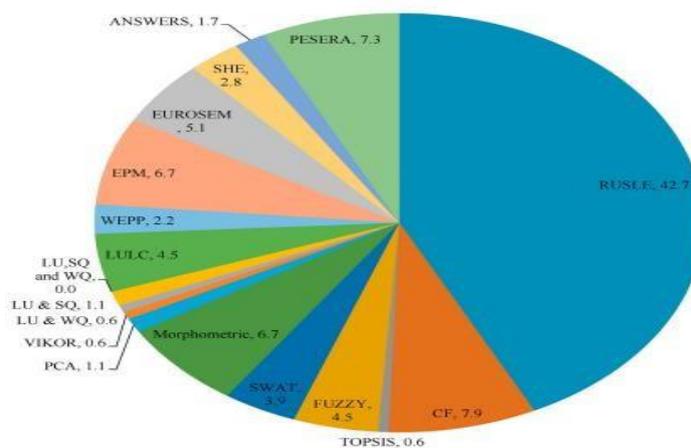


Figure I.8. Pourcentage de modèles utilisés pour évaluer la vulnérabilité à l'érosion des sols dans diverses recherches (Pandey et al., 2021)

Le modèle Wischmeier : WISCHMEIER et SMITH ont mis en évidence l'action des différents facteurs qui jouent un rôle dans l'érosion par la formule qu'ils ont proposée et qui sert de référence internationale (Universal loss equation) :

$$A = R \times K \times SL \times C \times P \dots\dots (I.09) \text{ (Zeghmar et al., 2024).}$$

A : les pertes en terre exprimées en tonnes par ha d'une parcelle expérimentale durant un épisode pluvieux ou sur une année. Mesurées sur deux 2 échantillons de boue de 1 litre après passage à l'étuve = 90° C).

R : l'indice d'érosivité des pluies. Il correspond à l'énergie cinétique de pluies que multiplie I30 (intensité maximale des pluies durant 30 minutes exprimée en mm/h).

K : le facteur de sensibilité du sol à l'érosion => facteur d'érodibilité. Il est fonction des propriétés intrinsèques du sol notamment des matières organiques, de la texture, de la perméabilité et de la structure de l'horizon. Il s'échelonne de 0,7 pour les sols les plus fragiles (les limons silteux) à 0,001 pour les sols les plus stables. Le protocole de WISCHMEIER le mesure sur des parcelles nues de référence de 22,2 m de long et des pentes de 9 %. Le sol, travaillé dans le sens de la pente, ne doit plus recevoir de matières organiques depuis trois ans. $2 L/100 (0,76 + 0,53 S + 0,0076 \square L)$ Le facteur SL se calcule aussi à partir de l'équation de WISCHMEIER

SL : le facteur topographique, Se traduisant l'angle d'inclinaison de la pente (en %) et L, la longueur de pente en pieds (1m = 3,2809 pieds). Les abaques établis selon le principe de l'Universal los équation (Khanchoul, 2008) permettent de calculer le facteur topographique qui varie de 0,1 à 5 dans les situations de pente faible et qui peut atteindre plus de 25 dans les conditions de fortes pentes des montagnes du Burundi.

C : le couvert végétal. Il inclue le niveau de production et les techniques culturales qui y sont associées. C'est un facteur frein plus ou moins efficace à l'énergie des gouttes de pluies suivant la mise en valeur du sol. Une végétation permanente (prairie ou forêt) ne découvrant le sol à aucun moment est nettement préférable à une agriculture plus exposée laissant le sol dénudé pendant une longue période. Il correspond au rapport entre l'érosion observée sur la parcelle cultivée ou forestée et l'érosion enregistrée sur sol nu. Il s'échelonne de 1 sur sol nu et 0,001 sous forêt ombrophile.

P : l'indice qui rend compte de l'efficacité des pratiques purement antiérosives (buttage continu, haie herbacée...) .C'est un facteur frein au ruissellement. Il correspond au rapport entre l'érosion d'une parcelle cultivée et celle d'une parcelle d'une même culture aménagée.

I.4.5.1. Équation des pertes en sol modifiée (MUSLE)

Le modèle MUSLE est la version modifiée du modèle USLE qui évalue l'érosion hydrique pendant la crue A_{MUSLE} en fonction de cinq facteurs d'érosion

$$A_{musle} = \alpha(Qqp)^\beta * K * LS * C * P \dots \dots \dots I.10 \text{ (Neboit, 2010)}$$

α et β sont deux paramètres du modèle MUSLE. Q est le volume du ruissellement (m^3), q_p est le débit de pointe ($m^3 s^{-1}$) pendant la crue, K est le facteur d'érodibilité du sol ($t h MJ^{-1} mm^{-1}$), LS est le facteur topographique (sans unité), C est le facteur de gestion de la couverture végétale (sans unité) et P est le facteur d'aménagement antiérosif (sans unité).

I.4.5.2. Équation des pertes en sol révisée (RUSLE)

Le modèle RUSLE est la version révisée du modèle USLE. Il possède de nombreuses modifications pour l'estimation de l'érosion hydrique en tenant compte du ruissellement et en introduisant un nouveau terme d'érosivité pluie-ruissellement RUSLE prévoit la perte en sol moyenne annuelle A_{RUSLE} ($t ha^{-1} an^{-1}$) en fonction de cinq facteurs d'érosion

$$A_{RUSLE} = R * K * LS * C * P \dots\dots\dots I.11 \text{ (Zeghmar et al., 2024)}$$

R_{RUSLE} est le facteur d'érosivité de pluie-ruissellement ($MJ mm ha^{-1} h^{-1} an^{-1}$) pour le modèle RUSLE. K , LS , C et P sont les mêmes facteurs que dans le modèle MUSLE.

I.5. Mesure des transports solide

La technique utilisée par ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) pour mesurer la matière en suspension débute par le prélèvement en un point unique soit sur le bord, soit au milieu au moyen d'un flacon de 1 litre en matière plastique. L'échantillonnage s'effectue lors d'une crue suivant des intervalles de temps variables en fonction du régime de l'oued. Ainsi, en étiage ou lorsque le débit est constant au cours de l'ajournée, il est possible d'effectuer un à deux prélèvements au cours de la journée. En période de crue, le nombre des prélèvements sera augmenté de deux façons :

- Un prélèvement est effectué durant la montée des eaux lorsque la montée est lente et tous les quarts d'heures et demies heures lorsque la montée est rapide.
- En décrue, on prélève un échantillon toutes les heures durant les six premières heures

Et toutes les deux heures en suite. L'espacement dans le temps des prélèvements des concentrations s'accroît au fur et à mesure qu'on éloigne du pic de la crue (Perrodon, 1957).

I.6. Type de transport solide

Les matières solides détachées sous l'effet de la précipitation et/ou le ruissellement, sont transportées par les cours d'eau jusqu'à la rivière principale.

C'est la seconde phase du processus de l'érosion hydrique. L'énergie nécessaire pour acheminer le matériau précédemment désagrégé, est fournie principalement par la déclivité des versants et la pente des cours d'eau (Chekhchoukh et Khadraoui, 2016). Le transport des éléments arrachés se fait de différentes façons : suspension, saltation ou bien par charriage (Figure I.9).

Ce sont notamment les conditions bioclimatiques et le régime hydrologique des cours d'eau qui conditionnent les modalités du transport solide. À cela s'ajoute la taille et la densité des particules (Bahrami et Wigand, 2018)

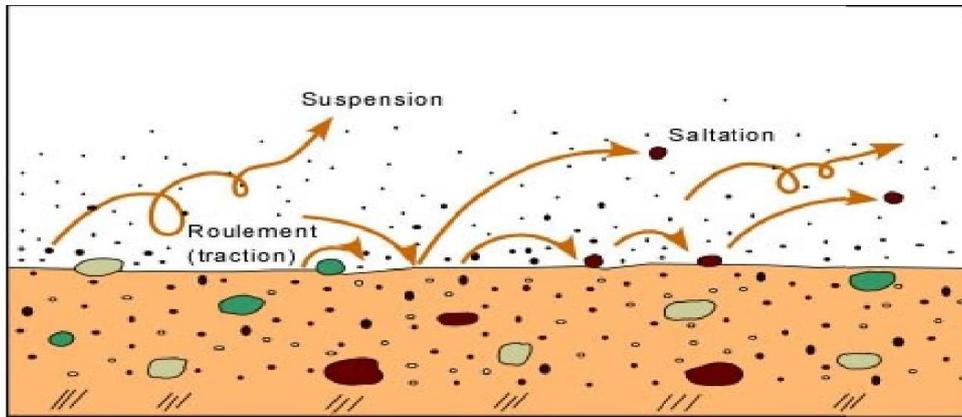


Figure I.9. Les différents types du transport solide dans les cours d'eau (effets. Centre for Advanced Studies in Earth Science)

I.6.1. Transport solide en suspension

Le transport solide par suspension représente essentiellement le transport des sédiments fins (argiles, limons, sables fins) par les cours d'eau et les rivières. Ce phénomène est généré par la dynamique des écoulements de telle manière que les particules solides restent toujours en suspension le long de leur trajectoire. Les particules peuvent donc se déplacer sur de grandes distances à l'échelle du réseau hydrographique et leur vitesse de déplacement est du même ordre que celle du fluide (Figure I.10).

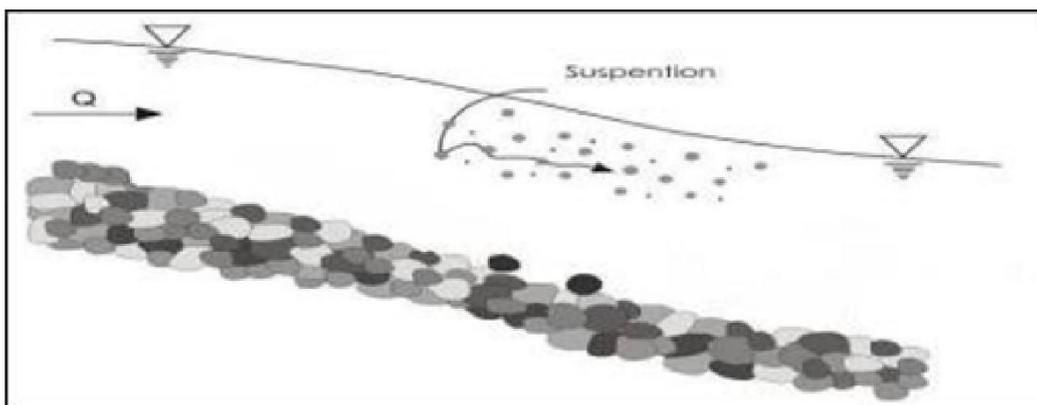


Figure I.10. Transport solide en suspension (Walter, 2000).

I.6.2. Transport solide par saltation

La saltation désigne les mouvements irréguliers de sauts d'un point à un autre. Ce mouvement semblable à un bond, désigne le mode transport des sédiments qui se trouvent au fond des cours d'eau. L'énergie de l'écoulement entraîne les particules solides (de la taille du sable ou du gravier) qui possèdent une masse volumique supérieure à celle de l'eau (Figure I.11).

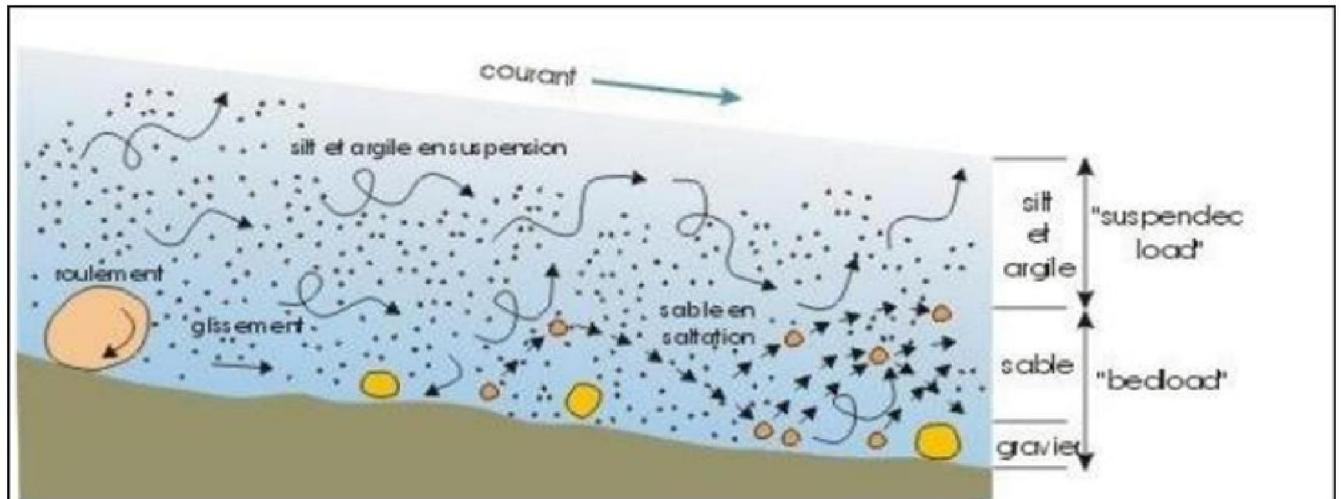


Figure I.11. Modes de transport solide (Bouzada, 2013).

I.6.3. Transport solide par charriage

Le transport solide par charriage concerne les sédiments grossiers (sables, graviers, galets et blocs de roche ...etc (Figure I.12).

Ces derniers restent toujours en contact avec le fond des cours d'eau tout en se déplaçant par traction, glissement ou roulement. Les matériaux charriés, parcourent des distances relativement courtes et discontinues dans le temps et dans l'espace.

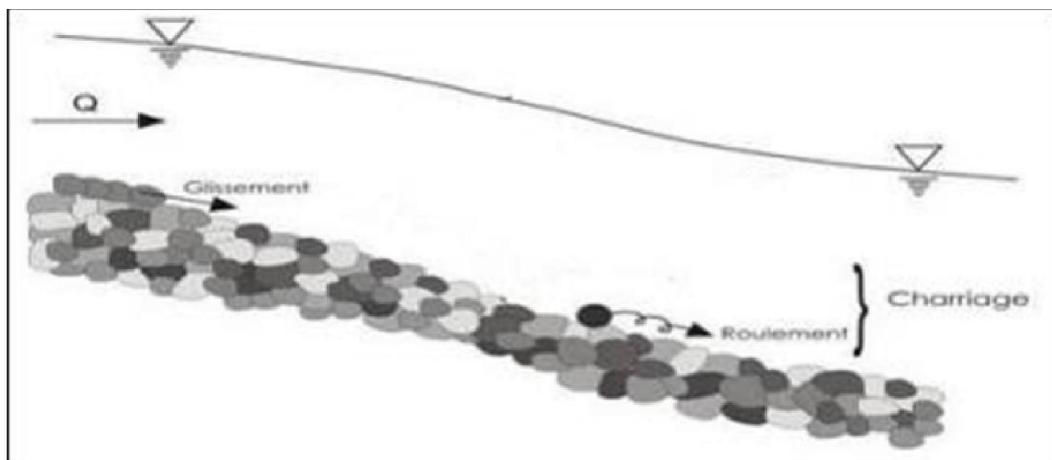


Figure I.12. Transport solide par charriage (Musy et Higy, 2004)

I.7. Aperçu de la situation de l'érosion hydrique dans le monde et en Algérie

La dégradation des sols est causée par l'érosion hydrique, un phénomène naturel très courant à l'échelle mondiale. En effet, ce phénomène est considéré depuis plus d'un siècle comme l'un des problèmes environnementaux les plus préoccupants au niveau mondial.

La dégradation des terres à l'échelle mondiale a été principalement causée par l'érosion hydrique au cours des dix dernières années. Environ 45,15% des terres de la planète sont touchées par une forte érosion hydrique [Anonyme 3]. En outre, l'évolution des paysages

méditerranéens est étroitement liée à une érosion intensive, naturelle et/ou anthropique, qui est toujours présente en relation avec les conditions morphologiques, lithologiques, les activités agricoles, les travaux d'aménagement, l'élevage et les activités forestières qui caractérisent ces régions.

En plus de cela, il y a un grand contraste climatique entre les saisons. Selon, on estime une dégradation particulière, variant de 400 à 610 t.km⁻² entre les bassins qui se déversent dans la Méditerranée et ceux qui se déversent dans l'océan Atlantique.

L'érosion et l'envasement constituent une véritable catastrophe en Algérie. L'érosion est très importante en raison de la nature et de la morphologie des terrains en pente, de la fragilité du couvert végétal, du manque de boisement et de l'urbanisation en amont des barrages.

Chaque année, les barrages sont stockés de 2 à 3% (Bouguerra, 2014) en raison de l'envasement causé par le transport et le dépôt de sédiments par les eaux de ruissellement.

L'érosion hydrique est complexe en raison de son caractère irrégulier et aléatoire, ainsi que de sa discontinuité spatio-temporelle.

Les zones marneuses sont vulnérables à l'érosion hydrique et ont dépassé le seuil tolérable de 10 tonnes par hectare.

Des collines et des montagnes marno-argileuses sont fréquemment drainées par des rivières. Le courant entraîne une diversité d'érosion, avec la création de ravins profonds et hiérarchiques, typiques des terres difficiles.

I.8. Causes de l'érosion

Les causes sont multiples. L'agent principal est l'eau et plus particulièrement la pluie torrentielle.

Le climat de l'Algérie du Nord est caractérisé par une irrégularité saisonnière et interannuelle des pluies liées à des intensités par fois très élevées. Ces intensités peuvent engendrer avec des temps de concentration parfois très courts des pertes de terrains considérables.

A cela, doit s'ajouter le couvert végétal, la pente du terrain, la lithologie du bassin versant, l'homme, qui ont leur part dans l'érosion des bassins versants.

I.9. Conséquence de l'érosion

L'eau et l'air circulent à la surface de la Terre. Cette couche mince, d'une épaisseur allant de quelques cm à quelques mètres, abrite presque toutes les espèces de la planète. Le sol est une ressource « non renouvelable » qui, en cas d'érosion intense, se dégrade au fil des millénaires. Aujourd'hui, l'érosion des sols participe à plusieurs grands problèmes environnementaux qui perturbent la planète (Durand Delga, 1969).

1.9.1. Biodiversité

Le sol est un milieu vivant où des milliards de bactéries, champignons, et insectes de tous genres habitent. Sa dégradation provoque une perte d'espèces dont nous avons peu conscience à cause des difficultés de mesure et de suivi de ces micro-organismes et parce que ces familles d'espèces se trouvent rarement parmi les espèces « emblématiques » (comme le loup, l'aigle, le panda, le dauphin, etc). De plus, la dégradation du sol provoque inévitablement une perte d'habitat pour divers espèces à la surface de la terre et dans les milieux aquatiques, où l'augmentation de la turbidité et de la pollution jouent un rôle important dans la dégradation de ces environnements.

1.9.2. Désertification

Ce thème sera approfondi dans le prochain module, mais il est à noter que la perte du sol dans les milieux semi-arides conduit à la création de vastes zones « stériles » et des conditions de sécheresse aggravée par une augmentation du ruissellement et par la diminution de la réserve hydrique du sol.

1.9.3. Pollution des eaux

Pratiquement toute l'eau qui tombe sur une surface terrestre entre en contact avec le sol. L'eau peut s'infiltrer et percoler vers la nappe phréatique et les cours d'eau, et dans ce cas, elle lessive une partie de ce qui est soluble dans le sol (nitrates, pesticides...). Elle peut également ruisseler à la surface et transporter vers les cours d'eau les sédiments et tout ce qui y sont associés : pesticides, engrais, matières organiques (Ben Hamiche, 2015).

De manière générale, nous pouvons regarder les conséquences de l'érosion sous trois angles :

- Les impacts « sur site » et « hors site ».
- Les conséquences à court terme et à long terme.
- Les conséquences dans les pays riches et les pays pauvres.

1.10. Méthodes de lutte contre l'érosion et le transport solide

L'érosion des sols est l'un des principaux facteurs menaçant les installations hydrauliques et les terres agricoles. Le contrôle de l'érosion des sols et du transport des sédiments est une préoccupation importante pour protéger la capacité de stockage de l'eau. Comme le contrôle de l'érosion à un niveau d'efficacité généralement plus élevé que le contrôle des sédiments. Les méthodes de contrôle de l'érosion peuvent être classées dans les catégories suivantes :

I.10.1. Procédés agro techniques

Ces techniques de prévention de l'érosion reposent principalement sur des techniques de culture adaptées pour retenir l'eau. On utilise les courbes de niveau pour travailler sur les pentes douces et les zones de pluie modérée.

Les cultures en bande associées à des travaux de terrassement peuvent retenir l'eau des ruissellements sur les terrains pentus et dans les régions où il peut y avoir des crues importantes.

Il est crucial de protéger le sol en convertissant des sols exposés et altérés (tels que des sols limoneux, sableux, cohésifs, limoneux) en plantes afin de limiter l'érosion de la couche arable.

I.10.2. Restauration des forêts

Les ceintures forestières sont un moyen efficace de conservation des sols. Elles contribuent à la réduction de la vitesse de vent et améliorent le microclimat. Elles sont très efficaces lorsqu'elles sont plantées en lignes perpendiculaires au ruissellement, pour que l'écoulement sera dispersé et l'infiltration favorisée. Cependant une mauvaise disposition des ceintures peut être la cause d'une intensification du ruissellement et de la formation des ravines.

I.10.3. Procédés hydrotechnique

Ces procédés comprennent les fossés d'infiltration avec banquettes pour empêcher la formation des ravines, les barrages pour la rétention des sédiments ; des terrasses le long des courbes de niveaux, des ouvrages de retenue et de diversions au sommet des ravines, etc.

I.11. Conclusion

Depuis longtemps, la description qualitative des formes d'incision et des formes d'accumulation a montré l'importance du jeu de l'érosion dans de nombreuses régions du monde, en particulier dans les pays méditerranéens. Une nécessaire quantification devrait être tentée grâce à des méthodes précises et économiques.

Les agents de l'érosion hydrique considérés comme les plus efficaces sont la pluie et les écoulements. Le phénomène de l'érosion hydrique commence avec l'impact de la goutte de pluie initiale. Cela occasionne de nombreux dégâts environnementaux et aura de grosses répercussions sur l'écosystème du bassin versant.

La recherche bibliographique entamée a démontré la difficulté qui peut y avoir pour le choix des méthodes de quantification et de modélisation de l'érosion. Cette difficulté est liée à l'insuffisance des données hydrométriques, notamment les mesures des concentrations en matière en suspension, qui sont très fréquentes dans le réseau de l'ANRH.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EROSION HYDRIQUE ET LE TRANSPORT SOLIDE

Il en découle aussi de cette brève synthèse que le phénomène de la dégradation des sols dans l'est de l'Algérie est bien répandu. Les formes et les processus d'érosion sont divers et assez complexes et dépendent des caractéristiques physico-géographiques et climatiques du milieu en question. Ceci nous ramène à évoquer d'une manière primordiale une analyse bien définie du terrain d'étude et de son climat pour permettre l'interprétation des formes et des processus d'érosion qui peuvent exister.

II.1. Introduction

Le bassin versant est un territoire délimité par des frontières naturelles, où les écoulements d'eau convergent vers un point unique appelé l'exutoire (Anctil et al., 2012). L'objectif principal de ce chapitre est de fournir une connaissance approfondie des principales caractéristiques morpho métriques du bassin versant de sébaou (wilaya de Tizi Ouzou). Ce chapitre sera essentiellement descriptif. La caractérisation morpho métrique d'un bassin versant est considérée comme la méthode la plus appropriée pour une planification et une gestion efficaces de celui-ci (Pingale et al., 2012). Une compréhension détaillée de ces aspects est cruciale pour le développement de stratégies de gestion durable et pour l'optimisation des ressources hydriques des bassins versants concernés.

II.2. Aperçu géographique

L'Oued Sébaou (Attitudes : 36° 54' 46" Nord ; Longitudes : 3° 51' 25" Est), prenant sa source dans la chaîne montagneuse du Djurdjura, parcourt 97 kilomètres avant de se jeter dans la mer Méditerranée. Le bassin versant du Sébaou couvre une superficie de 2500 km² et est situé dans les Monts du Djurdjura, au nord de l'Algérie, dans la wilaya de Tizi-Ouzou. Cette région se trouve à environ une centaine de kilomètres à l'est-sud-est d'Alger.

Le bassin versant du Sébaou occupe le synclinal miocène de Tizi-Ouzou. Il est délimité :

- Au sud : Par la chaîne du Djurdjura, une imposante barrière montagneuse offrant un paysage escarpé et une diversité écologique remarquable.
- À l'est : Par les massifs d'Akfadou et de Beni Ghobri, connus pour leurs reliefs accidentés et leur riche biodiversité.
- Au nord : Par la chaîne côtière, qui forme une transition entre les montagnes intérieures et la plaine littorale.
- À l'ouest : Par les reliefs du bassin versant du moyen Sébaou, constituant une zone de transition vers les plateaux intérieurs.

Le bassin versant présente une topographie variée, avec des altitudes allant des hauteurs montagneuses du Djurdjura aux plaines côtières en passant par des collines et des vallées intermédiaires. Cette diversité topographique influence fortement le climat local, les régimes hydrologiques et les types de sols présents, contribuant ainsi à une variabilité significative des processus d'érosion dans la région.

L'Oued Sébaou est le principal cours d'eau du bassin, drainant les précipitations de la région et jouant un rôle crucial dans l'écosystème local. Les montagnes du Djurdjura, avec leurs sommets enneigés en hiver, constituent une source importante d'eau de ruissellement qui

alimente l'oued. Cette eau est essentielle non seulement pour l'agriculture, mais aussi pour la biodiversité locale.

Le bassin versant de Sébaou est d'une importance économique notable pour la région de Tizi-Ouzou. L'agriculture, principalement composée de cultures de céréales, d'oliviers, et d'arbres fruitiers, dépend fortement de l'eau de l'oued. En outre, la forêt de Djurdjura et les massifs environnants abritent une faune et une flore diversifiée, faisant de cette région un point d'intérêt pour la conservation de la biodiversité.

Cependant, le bassin versant du Sébaou est confronté à plusieurs défis environnementaux, notamment l'érosion des sols. Les fortes pentes, combinées à un couvert végétal parfois insuffisant et à des pratiques agricoles inadéquates, contribuent à l'accélération des processus érosifs.

La situation géographique et les limites précises du bassin sont représentées sur la figure II.1.

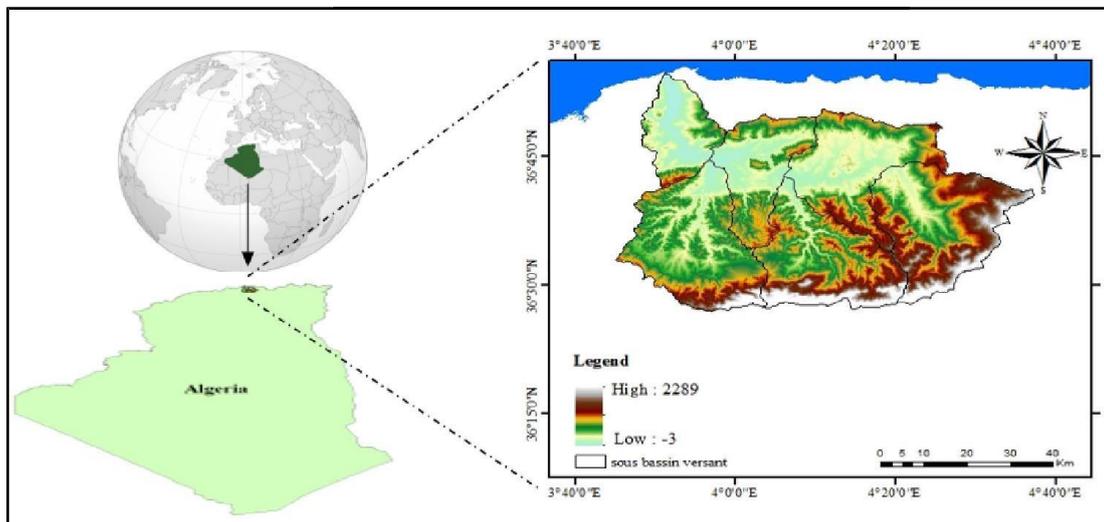


Figure II.1. Situation géographique et limites du bassin versant de Sébaou.

II.3. Caractéristiques topographiques de la zone d'étude

L'utilisation d'un système d'Information Géographique (SIG) avec des données de la télédétection ont permis d'identifier le profil topographique du sous bassin étudié. Un modèle numérique du terrain (MNT) de type SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) avec une précision de 30m a été téléchargé et intégré dans l'interface de l'outil « ArcGis ». Après différentes manipulations sur l'outil SIG, il a été possible de calculer plusieurs paramètres topographiques et morpho métriques intéressants que nous citons ci-après :

II.3.1. Altimétrie

Le MNT téléchargé, montre un gradient altimétrique décroissant du sud vers le nord avec des valeurs d'altitudes variant entre -3 et 2289 m mais l'altitude moyenne est estimée à 850m (voir figure II.2). Ces valeurs reflètent une altimétrie basse en générale sur l'ensemble du

bassin mis à part les parties méridionales qui regroupent en majorité, les altitudes supérieures à la moyenne. Ce profil altimétrique est typique aux régions des basses plaines du nord Algérien et en particulier celle des plaines de Tizi-Ouzou.

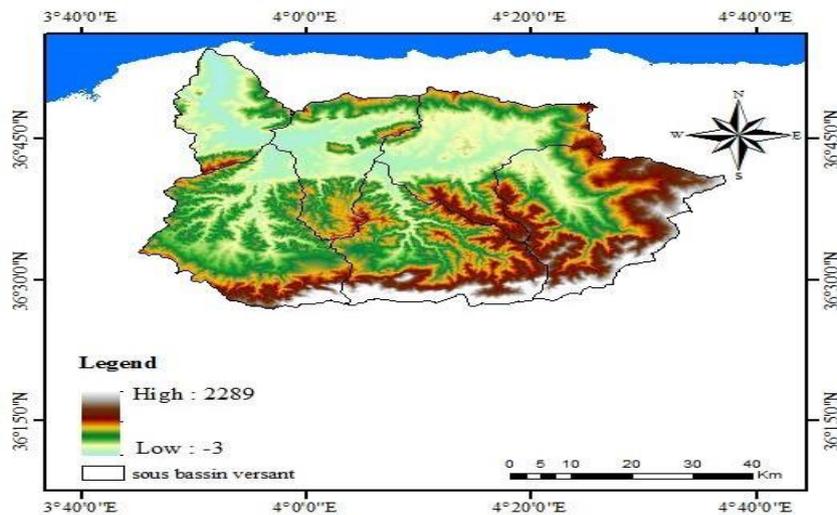


Figure II.2. MNT du bassin de Sébaou (SRTM -30x30m).

Afin d'avoir une meilleure analyse de l'aspect altimétrique du bassin de l'oued Sébaou, nous avons classifié les valeurs d'altitudes avec un pas moyen de 150 m. De plus, les superficies de chaque classe ont été déduites à partir du SIG, ceci à permit une meilleure interprétation de la répartition spatiale des altitudes sur le domaine de l'oued Sébaou (Figure II.3).

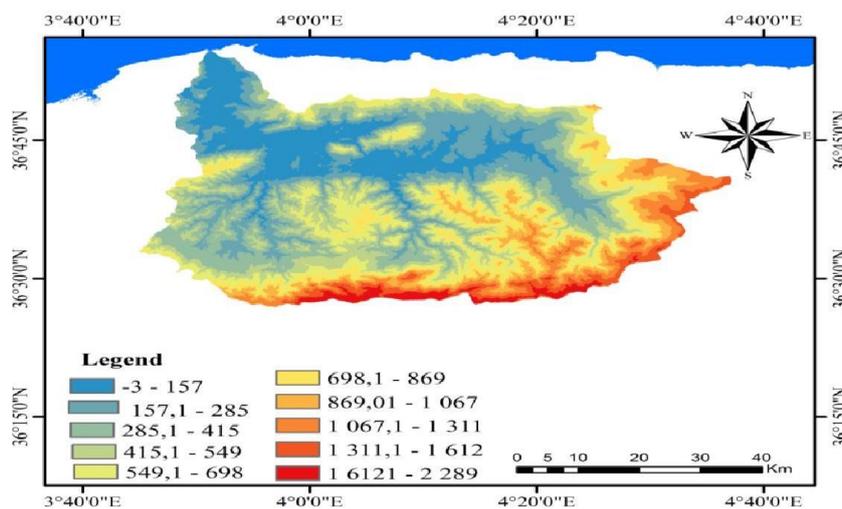


Figure II.3. Classes d'altitudes au niveau du sous-bassin de Sébaou.

La figure II.3 montre une dominance flagrante des classes d'altitudes entre -3 à 415 m et 549 à 700m. En effet ces tranches d'altitude occupe environ 40% du bassin et se développe dans la partie centrale d'Est en Ouest. Ces régions sont bordées au sud par une altimétrie plus au

moins élevée correspondant à des altitudes variant entre 869 et 2289m. Cette classe d'altitude représente 39% de la superficie total.

II.3.2. Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique donne une vue synthétique de la pente du bassin versant et représente la répartition de la surface du bassin en fonction de son altitude. Cette courbe reflète l'état d'équilibre dynamique potentiel du bassin et reste un outil pratique pour comparer plusieurs bassins versants entre eux ou avec les différentes sections d'un même bassin. Il peut également être utilisé pour déterminer les précipitations moyennes dans un bassin versant et pour fournir des informations sur le comportement hydrologique et hydraulique de celui-ci et de son système de drainage. Cette courbe permet de juger de l'âge et du degré d'érosion des bassins versants et est également un outil de comparaison entre sous bassin versants.

La courbe hypsométrique donne une approche globale sur le profil altimétrique du bassin, elle peut donc donner une première approche sur la situation générale du relief soumis aux différentes formes d'érosion (hydrique, éolienne....etc). Les pourcentages cumulés des surfaces comprises entre deux courbes de niveau successives, représentés sur la figure II.4, sont portés sur l'axe des abscisses, tandis qu'en ordonnées, sont représentés les altitudes moyennes des classes d'altitudes correspondantes.

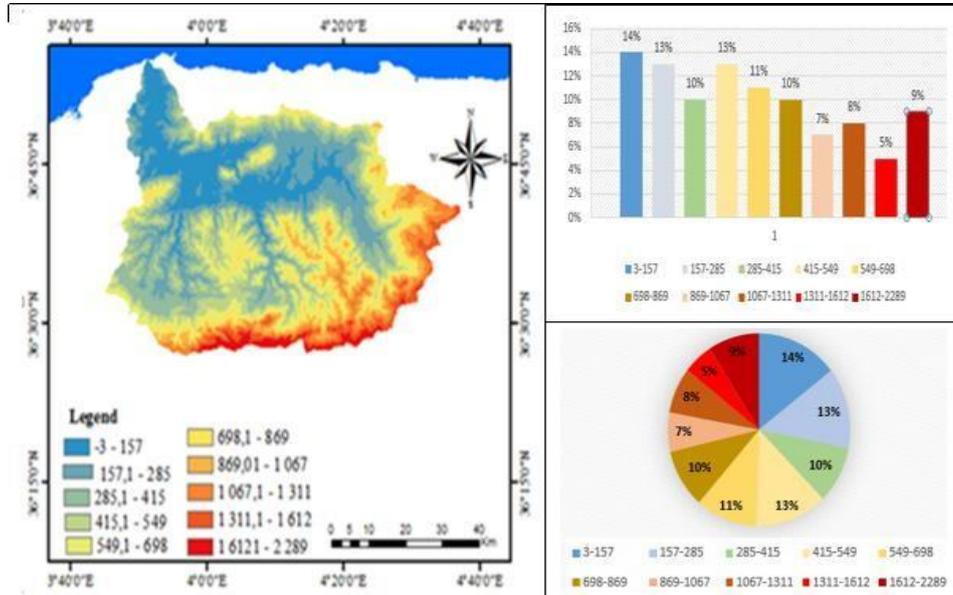


Figure II.4. Classes d'altitudes au niveau du sous-bassin de Sébaou.

La répartition des surfaces partielles en fonction des altitudes du bassin versant sont représentées dans le tableau II.1.

Tableau II.1. Répartition de la surface partielle en fonction de l'altitude du bassin versant de Sébaou.

Classes altitude (m)	centre classe(m)	Périmètre	surface	surface km	surface %	surface cumule%
3-157	80	133016,84	32912789,41	32,91	7,26	7,3
157-258	207	380103,91	113953993,1	113,95	25,16	32,4
258-415	336,5	457274,41	119972989,8	119,97	26,49	58,9
415-549	482	321732,38	69898426,53	69,89	15,43	74,4
549-698	623,5	203997,98	41610110,6	41,61	9,19	83,6
698-869	783,5	148841,98	24386787	24,38	5,38	89,0
869-1067	968	123292,14	20290672,56	20,29	4,48	93,4
1067-1311	1189	114221,8	17505720,93	17,50	3,86	97,3
1311-1612	1461,5	80294,58	9208495	9,20	2,03	99,3
1612-2289	1950,5	28040,05	3024380,19	3,02	0,66	100,0

II.3.3. Analyse de la répartition spatiale des pentes

Le calcul des pentes et l'analyse de la répartition spatiales des déclivités est fondamental pour la connaissance du potentiel morphogénique des bassins versants (Durand Delga1969). C'est notamment l'ordre de grandeur des pentes et leur endroits dans le bassin qui va conditionner la dynamique érosive (Bouhali 2016).

En dérivant le MNT précédemment utilisé (figure II.2) en fonction des distances planimétriques, il a été possible d'établir une carte des pentes aux limites du bassin de Sébaou. Les pentes calculées à l'aide du SIG sont exprimées en pourcentages ce qui a donné des valeurs variant entre 0 et 40%. Les pentes les plus dominantes variées entre 0 à 5% représentent 25% de la surface totale, suivi d'une surface de 22% pour les classes 30 à 40%. Les classes des pentes 10 à 15% sont les moins dominantes et représente une surface de 10%. Toutefois la pente moyenne du bassin est évaluée à 15%.

Afin de faciliter l'interprétation des résultats et d'avoir une bonne représentation de la répartition spatiales des pentes au niveau du bassin étudié, il a été judicieux de regrouper l'ensemble des valeurs en des classes : (figure II.5).

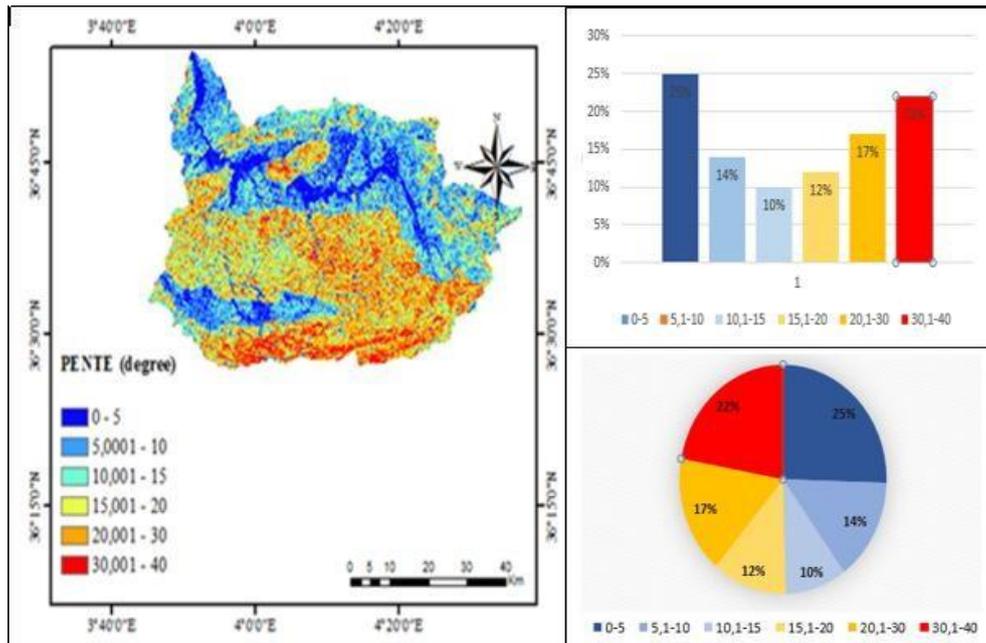


Figure II.5. Classe des pentes au niveau du sous bassin de Sébaou.

II.3.3.1. Indice de pente global Ig

L'indice global de pente I_g est défini comme le rapport de la différence d'élévation entre les altitudes de H5% et H95%, entre lesquelles se situent 90% de la surface du bassin versant, et la longueur L du rectangle équivalent. L'indice de pente global I_g (figure II.6) exprimé par la formule II.1 suivante :

$$I_g = \frac{D}{L_b} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L_b} \quad \dots \text{II.1 (Benachour, 2016)}$$

Où: I_g = la pente globale (m/km); D = la différence d'altitude (équation II.1) entre D5% et D95% qui sont déterminées sur la courbe hypsométrique(m); L_b = la longueur du rectangle équivalent (Km).

$$I_g = (1630 - 130) / 101 = 14.81 \text{ (m/km)}$$

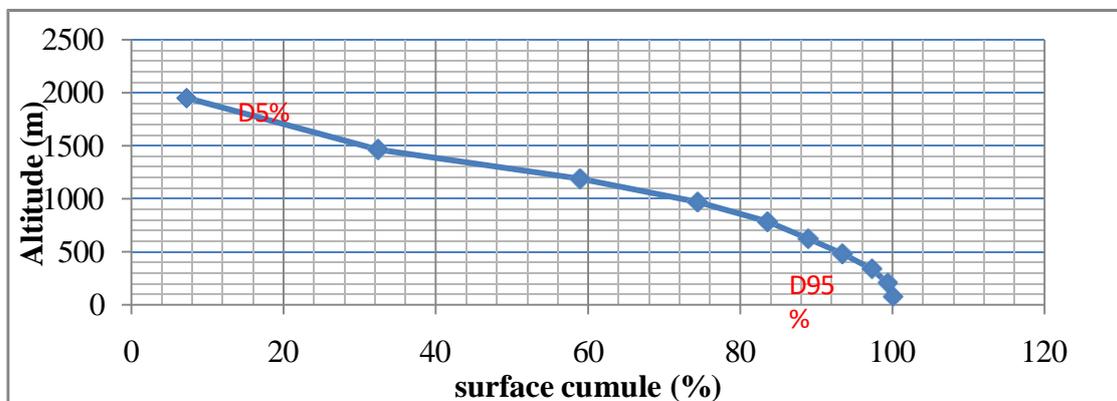


Figure II.6. Courbe hypsométrique du Bassin versant de Sébaou.

La courbe hypsométrique de la figure II.6 montre en général une forme convexe, cependant une légère concavité est observée à la fin de cette dernière indiquant la présence de pentes brusques ou des vallées encaissées à l'aval.

On note aussi que le début de la courbe est marqué par une très forte pente correspondant aux altitudes dépassant les 1500 m (Figure II.6). Ce sont les régions montagneuses installées en amont du bassin. Avec la diminution des altitudes, la pente de la courbe s'adoucit progressivement sur une large partie de la superficie, ceci reflète la présence d'une succession de large vallées et de plaines basses à l'approche de l'exutoire.

Cette pente est utilisée pour caractériser le relief des bassins versants et a conduit à une première classification de l'ORSTOM (Heusch, 1988) représentée dans le tableau II.2.

Tableau II.2. Classes de type de relief du bassin versant de Sébaou (Henri Pelleray).

Classe	Type de relief	Valeur de I_g
1	très faible	$I_g < 0,002$
2	faible	$0,002 < I_g < 0,005$
3	assez faible	$0,005 < I_g < 0,01$
4	modère	$0,01 < I_g < 0,02$
5	Assez fort	$0,02 < I_g < 0,05$
6	fort	$0,05 < I_g < 0,1$
7	très fort	$0,1 < I_g$

II.4. Caractéristiques morpho métriques

Il existe dans la littérature plusieurs paramètres morpho métriques pouvant contribuer à la compréhension des processus hydrologique et ceux du détachement, transfert des matières solides depuis l'amont vers l'aval des cours d'eau (Neboit, 2010). Dans ce qui suit, nous avons choisi de définir un certain nombre d'indices morpho métriques intéressants, permettant d'appuyer, par la suite notre analyse de l'état de la dégradation des sols dans le bassin étudié.

II.4.1. Indice de compacité de Gravelius (Kc)

Cet indice morphologique permet d'identifier la forme générale du bassin, ce qui donne une idée globale sur l'influence de la forme de ce dernier sur la concentration et l'accroissement des flux hydrologiques.

L'indice de Gravelius (Kc) compare donc le périmètre du bassin par rapport à une surface de référence circulaire :

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \dots \text{II.2 (Touabia, 2004)}$$

Avec :

P : Périmètre du bassin versant (Km),

S : superficie du bassin versant (Km²).

Il s'étend sur un périmètre de 250,4 km et une superficie de 2500 km²

Si la valeur calculée est supérieure à 1, alors le bassin versant est allongé : le temps mis par l'eau pour atteindre l'exutoire est important ; le temps de réponse est plus long et le débit de pointe peut être atténué par ce délai.

S'il est proche de 1, le bassin versant est de forme presque circulaire, il est dit bien drainé avec un potentiel d'infiltration plus important que les bassins allongés (Laborde, 1987).

Comme ce qui est le cas pour le bassin de Sébaou (Kc =1,4), Comparativement au différents indices de compacité (Kc=1,4>1,15); donc le bassin versant est de forme allongée.

II.4.2. Longueur du rectangle équivalent (L)

La notion du rectangle équivalent permet elle aussi permet de différencier les bassins versants par rapport à leurs distances planimétriques.

Cet indice peut être estimé par la formule suivante qui donne l'équivalence de la forme du bassin par rapport à celle d'un rectangle ayant le même périmètre.

$$L = \frac{K_c \sqrt{S}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] \text{ Km} \dots \text{II.3 (Mark Morel, 1999)}$$

$$L+l = P/2 = 125 \text{ km}$$

$$L \times l = S = 2500 \text{ km}^2$$

Telle que :

S : la surface du bassin versant, P : le périmètre du bassin versant, L : la longueur de rectangle équivalent, l : la largeur de rectangle équivalent et Kc : c'est l'indice de compacité de Gravelius. La longueur du rectangle équivalent estimée pour le bassin de Sébaou est de l'ordre de 100 Km.

En remarque que la longueur est largement supérieure à la largeur de ce rectangle ce qui nous confirme que le bassin versant est de forme allongée.

II.4.3. Dénivelée spécifique (Ds)

La dénivelée spécifique est un paramètre permettant de classer directement le relief du bassin selon des données empiriques (Tableau II.3).

Ce paramètre n'est autre que le produit de l'indice de pente global (Ig) et la racine carrée de la superficie du bassin (S) :

$$D_s = I_g * \sqrt{s} \dots \dots \dots \text{II.4 (Rouch, 1963)}$$

Avec

Ds : la dénivelée spécifique en (m).

Ig : l'indice de pente globale exprimé en m/km.

S : la surface totale du bassin versant, exprimé en km².

$$D_s = 741.216 \text{ m}$$

Tableau II.3. Classification d'ORSTOM (Henri Pelleray).

R₁	Relief très faible	Ds < 10 m
R₂	Relief faible	10 m < Ds < 25 m
R₃	Relief assez faible	25 m < Ds < 50 m
R₄	Relief modéré	50 m < Ds < 100 m
R₅	Relief assez fort	100 m < Ds < 250 m
R₆	Relief fort	250 m < Ds < 500 m
R₇	Relief très fort	500 m < Ds

Selon la classification des reliefs d'après ORSTOM, (Ds > 500 m), donc le type de relief très fort et de classe (R7).

II.5. Caractéristiques hydrographiques

II.5.1. Densité de drainage

La densité du drainage (Dd) est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface d'un bassin versant. Elle s'exprime en km/km². Elle dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatiques, anthropiques et de la végétation. En général, une faible densité de drainage indiquant un sol très perméable, une végétation relativement dense et une faible pente, favorisant ainsi l'infiltration, contrairement à une forte densité de drainage qui représente un sol peu perméable, une végétation basse et une forte pente, favorisant ainsi le ruissellement de surface. La densité de drainage est donnée par la relation (II.5):

$$D_d = \frac{\sum L_i}{S} = 3.17 \text{ (1/km)} \dots \dots \dots \text{II.5 (Touaibia, 2004)}$$

Avec : Dd = densité de drainage (km/km²), Li = longueur de cours d'eau (km), S = surface du bassin versant (km²).

II.6. Occupation du sol et de couvert végétal

Plus la couverture végétale est dense, plus elle diminue l'action érosive relative au ruissellement agressif. Ce facteur joue donc un rôle important dans la protection du sol mais,

en dehors de la densité de la végétation, sa typologie, d'autres facteurs peuvent interagir sur l'action protectrice du couvert végétal tel que les conditions topographiques et climatiques.

A partir des données cartographiques relatives aux travaux, nous avons pu dresser une carte d'occupation du sol aux limites du bassin de Sébaou. La carte réalisée, résulte de la digitalisation de plusieurs cartes scannées.

Le bassin versant du Sébaou a été étudié par plusieurs chercheurs afin d'établir une description géologique détaillée de la région, ainsi que des tracés de cartes et de coupes géologiques représentant toutes les formations qui affleurent à la surface du sol et identifiant tous les horizons aquifères.

Le sous bassin versant étudié est constitué par des formations d'âge paléozoïque quaternaire affectées par une tectonique souple et cassante. L'orogénèse alpine est la plus caractéristique de la région. Le bassin miocène occupant la grande zone synclinale qui s'étend principalement d'Azazaga à Dellys résulte des cycles orogéniques (mécanismes de formation des montagnes) hercyniens et alpins.

Notre zone d'étude se situe dans la partie centrale de l'orogénèse nord-magrébin on y distingue : les zones internes (Domaine kabyle), les zones externes (Telliennes), les domaines des flysch. Les différents paramètres morphologiques du bassin versant du Sébaou sont récapitulés dans le tableau II.4.

Tableau II. 4. Paramètres morphologiques du bassin versant du Sébaou.

Paramètres morphologiques	Valeurs
Surface (S)	2500 km ²
Périmètre (P)	250 km
Longueur (L)	101,185 km
Largeur (l)	24,707 km
Altitude maximale (Lmax)	2289 m
Altitude moyenne (Lmoy)	850 m
Indice de compacité de Gravelius (Kc)	1,41
Indice de pente globale (I _g)	14.81 m/km =0.14%
Densité de drainage (Dd)	3.17 (1/km
Dénivelée spécifique (Ds)	741.216 m

II.7. Conclusion

L'étude du complexe physique du bassin versant de l'oued Sébaou, nous a permis de quantifier les différents paramètres et indices relatifs aux caractéristiques de la région étudiée.

On peut conclure que :

- Le bassin versant montre que les classes dominantes des altitudes inférieures à 700 m. Cette tranche d'altitude occupe environ 40% du bassin.
- L'indice de compacité est évalué à 1,4 ce qui montre que la forme du bassin est allongé
- La dénivelée spécifique est de l'ordre de 741,22 m, ce qui signifie que le relief du bassin est très fort.

Ces interprétations nous ramène à déduire que le bassin de Sébaou est susceptibles de fournir une érosion hydrique importante sur certaines régions. Toutefois l'analyse de l'interaction du milieu physique avec le climat et notamment les précipitations est une étape décisives pour en tirer des conclusions définitives.

III.1. Introduction

L'érosion hydrique représente un problème environnemental majeur à l'échelle mondiale, entravant considérablement le développement durable (Boissy et al., 2022). Ce phénomène complexe et interconnecté résulte de divers processus, notamment les précipitations, le ruissellement, la topographie, la texture du sol, la couverture végétale, les pratiques culturales et les aménagements anthropiques. L'érosion hydrique entraîne non seulement la dégradation des paysages agricoles, mais également l'envasement des infrastructures hydro-agricoles, compromettant ainsi leur efficacité (Khenter, 2017).

La modélisation de l'érosion hydrique se révèle être un outil précieux pour la prise de décision et la gestion durable des ressources en eau et en sol, à condition que les modèles soient adaptés aux conditions locales (Raclot, 2021). La dégradation des sols, définie comme un processus réduisant le potentiel de production des sols ou la qualité des ressources naturelles, est principalement causée par l'érosion hydrique. La détection des zones érodées et l'évaluation des facteurs influençant l'érosion, avec leurs caractéristiques spécifiques, sont des tâches complexes (Bouhsane, 2021). Cependant, ces défis peuvent être surmontés grâce à l'intégration de diverses sources de données (données spatiales, mesures et enquêtes sur le terrain, et images satellitaires) dans des systèmes de traitement géospatiaux, tels que les systèmes d'information géographique (SIG) (EL JAZOULI, 2020).

Les SIG, en conjonction avec des modèles empiriques comme la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), jouent un rôle crucial dans la quantification de l'érosion hydrique (Tahiri et al., 2017). La méthode RUSLE permet de prédire les pertes de sol annuelles en tenant compte de facteurs tels que l'érosivité des précipitations, la sensibilité du sol à l'érosion, la topographie, la couverture végétale et les pratiques de gestion du sol. Ainsi, l'utilisation de SIG et de la méthode RUSLE offre une approche intégrée et efficace pour la gestion et la conservation des sols, favorisant ainsi un développement durable (Hara et al., 2021).

III.2. Données et Méthodologie

Le modèle RUSLE a été appliqué dans le bassin versant de Sébaou, où le modèle se caractérise par une structure simple et une facilité d'application avec la possibilité d'intégrer ses paramètres dans les systèmes d'information géographique (SIG). Les données pluviométriques de 9 stations à travers la zone d'étude couvrant la période 1982 à 2002 ont été collectées pour dériver le facteur d'érosivité. Afin de délimiter le bassin versant et d'en dériver

Chapitre III : Cartographie et estimation des zones à risque d'érosion hydrique par l'utilisation du modèle RUSLE

les paramètres géomorphologiques critiques, y compris la longueur de la pente. Notre méthodologie reposait sur l'utilisation d'un modèle numérique d'élévation (DEM) méticuleusement acquis avec une résolution de 30 mètres. Des informations essentielles sur le sol, notamment la teneur en limon, sable, argile et matière organique, ont été utilisées pour déterminer l'érodabilité du sol. Le facteur C, indicatif des pratiques de gestion de la couverture terrestre, a été dérivé de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) à l'aide de l'imagerie Sentinel-2. Les données provenant de diverses sources, résumées dans le tableau III.1, ont été fusionnées pour une analyse complète. La méthodologie détaillée pour évaluer la susceptibilité à l'érosion des sols à l'aide du modèle RUSLE est présentée dans l'organigramme illustré sur la figure III. 2.

Tableau III.1: Les types, descriptions, sources et informations sur les données utilisées.

Données	Description	Source	Variables générées
Données de précipitations	Données pluviométriques d'une période de 20 ans (1982 à 2002) pour 9 stations pluviométriques.	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANHR)	Facteur R
SRTM (MNT)	United States Geological Survey (USGS) websites (30 m resolution)	https://earthexplorer.usgs.gov/	Facteur LS Facteur P
Types de sol	ISRIC–World Soil Information 250 m	https://soilgrids.org	Facteur K
Images satellites Sentinel-2	Image satellite Sentinel-2 sans nuages acquise le 24/03/2024 avec une résolution spatiale de 10 m.	https://earthexplorer.usgs.gov/	NDVI Facteur C

La méthodologie détaillée d'évaluation de l'érosion des sols à l'aide de la méthode RUSLE est présentée dans l'organigramme suivant (Fig. III.1).

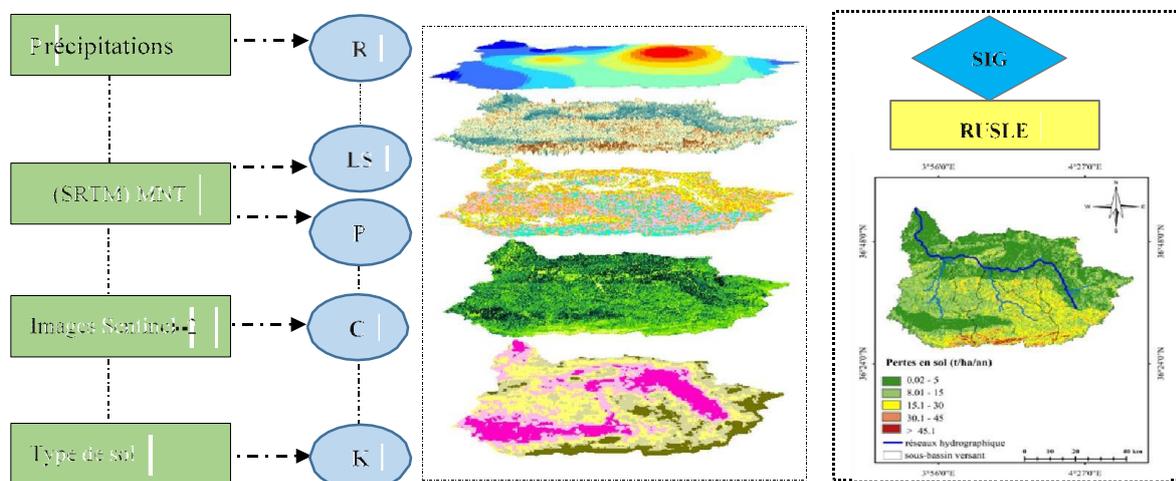


Figure III.1. Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique

III.3. Modèle RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)

La version révisée du modèle RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) intègre de nombreuses modifications pour améliorer l'estimation de l'érosion hydrique en prenant en compte le ruissellement et en introduisant un nouveau terme d'érosivité pluie-ruissellement (Yaméogo et al., 2021). Le modèle RUSLE prévoit la perte en sol moyenne annuelle (A_{RUSLE}) en tonnes par hectare par an ($t\ ha^{-1}\ an^{-1}$). RUSLE se base sur la combinaison de cinq facteurs distincts qui décrivent les caractéristiques du bassin versant, permettant ainsi une évaluation plus précise des processus érosifs (Khemiri et Jebari, 2021). L'environnement SIG a permis la création de cartes individuelles et spatiales pour chaque facteur du modèle et la cartographie de la répartition spatiale de l'érosion des sols selon l'équation suivante (Hajji et al., 2019):

$$A = R * K * LS * C * P \text{ (III.1)}$$

Où : A = perte annuelle de sol exprimée en $t/ha/an$; R = facteur d'érosivité des pluies exprimé en $MJ.mm/ha.h.an$; K = facteur d'érodibilité des sols exprimé en $t.ha.h/ha.MJ.mm$; LS = facteur topographique indiquant la pente et la longueur de pente adimensionnel ; C = facteur adimensionnel de la couverture végétale et des pratiques culturales.

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

III.3.1. Facteur d'agressivité des précipitations (R)

Le facteur climatique (R) est déterminant pour évaluer la force érosive des précipitations sur le sol. Il prend en compte les variations régionales du climat en fonction du type, de l'intensité et de la fréquence des précipitations (Payet et al., 2012). Hudson (1981) définit l'érosivité comme la capacité potentielle de la pluie à produire de l'érosion, souvent liée à ses caractéristiques physiques (Printemps, 2007). L'estimation du facteur (R) selon la formule de Wischmeier nécessite la connaissance des énergies cinétiques (E_c) et de l'intensité moyenne sur 30 minutes (I_{30}) des gouttes de pluie de chaque averse (Boissy et al., 2022). Cette estimation est donnée par la formule empirique suivante :

$$R = K \cdot E_c \cdot I_{30} \text{ (III.2)}$$

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

Chapitre III : Cartographie et estimation des zones à risque d'érosion hydrique par l'utilisation du modèle RUSLE

Cependant, les seules données disponibles concernant les précipitations dans les stations situées dans le bassin ou à proximité sont des moyennes mensuelles et annuelles. Des chercheurs comme ont développé des formules alternatives qui utilisent uniquement les précipitations mensuelles et annuelles pour déterminer le facteur (R) (Zeghmar et al., 2024). L'une de ces formules est:

$$\log R = 1.74.\log\sum (P_i^2 / P) + 1.29 \text{ (III.2)}$$

Où : P_i = Précipitations moyennes mensuelles (mm) ; P = précipitations moyennes annuelles (mm).

Les résultats des précipitations sont présentés à la fois dans la figure III.2 et dans le tableau III.2.

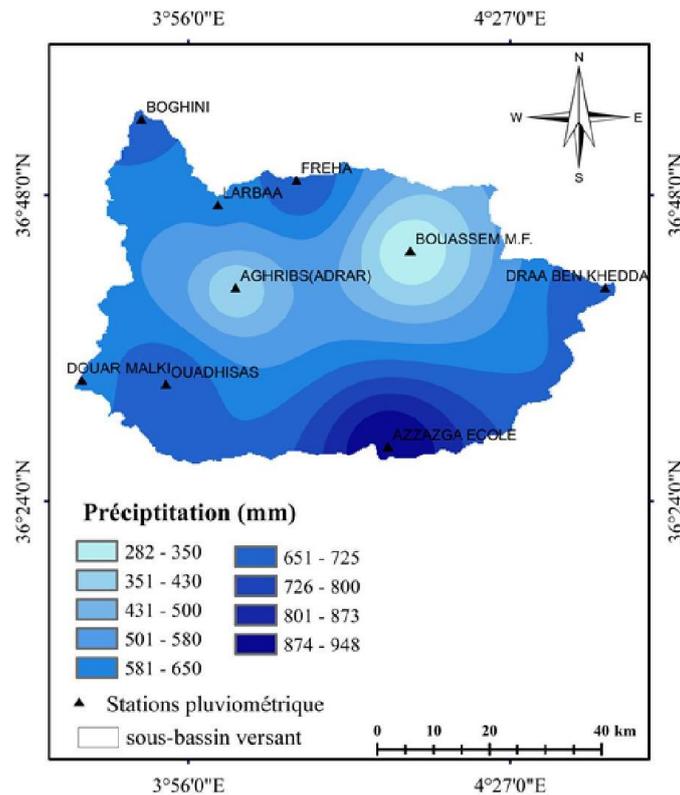


Figure III.2. Distribution des précipitations moyennes annuelles bassin Sebou.

La carte des précipitations synthétisée à partir de la spatialisation des stations pluviométrique, montre que la valeur du facteur pluie varie de 282 à 948 mm avec une moyenne $P = 594$ mm (Fig. III.2). Les valeurs élevées sont enregistrées au nord centre du bassin en allant jusqu'à l'ouest et au sud de l'est au ouest. Par contre, les valeurs les plus faibles sont enregistrées au nord-est du bassin en allant à l'intérieur du bassin vers l'Ouest. En effet, les valeurs de la pluie

Chapitre III : Cartographie et estimation des zones à risque d'érosion hydrique par l'utilisation du modèle RUSLE

subissent un gradient croissant au centre du bassin vers le sud et du centre du bassin vers le

Code station	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	P(an moy)	R
021804	32,98	60,22	90,54	127,25	114,79	82,04	63,77	63,44	40,41	8,20	3,75	7,40	694.79	195.58
021801	21,13	25,70	33,20	42,18	34,70	32,09	28,10	27,01	22,28	7,28	3,67	5,05	282.39	44.62
021603	31,36	60,46	97,43	135,03	114,30	82,47	69,11	66,79	44,79	8,45	2,71	6,12	719.02	207.31
021504	43,10	75,83	124,29	183,97	145,35	106,60	94,71	92,32	60,25	11,57	3,91	5,84	947.74	315.17
021701	38,78	57,83	90,10	125,17	124,59	91,31	30,46	81,66	53,05	12,38	3,75	6,25	715.33	206.13
021903	40,81	52,62	82,71	105,47	106,16	83,65	65,02	71,73	51,20	11,41	6,83	6,61	684.22	180.34
021601	19,38	36,48	45,65	56,39	48,82	42,37	38,83	40,08	25,38	6,04	2,56	6,08	368.06	69.55
021427	25,69	57,38	78,19	93,06	96,38	73,10	67,77	69,03	52,80	7,86	4,62	5,04	630.92	161.28
021403	32,46	59,21	87,75	101,12	96,39	73,63	65,55	61,83	51,65	11,19	2,95	32,46	589.19	145.96

nord-ouest.

Tableau III.2: Valeurs des précipitations moyennes mensuelles et annuelles en (mm) et R pour la période (1982 -2002).

Les résultats de calcul du coefficient d'érosivité (R) sont affichés sur la figure III.3 et le tableau III.2.

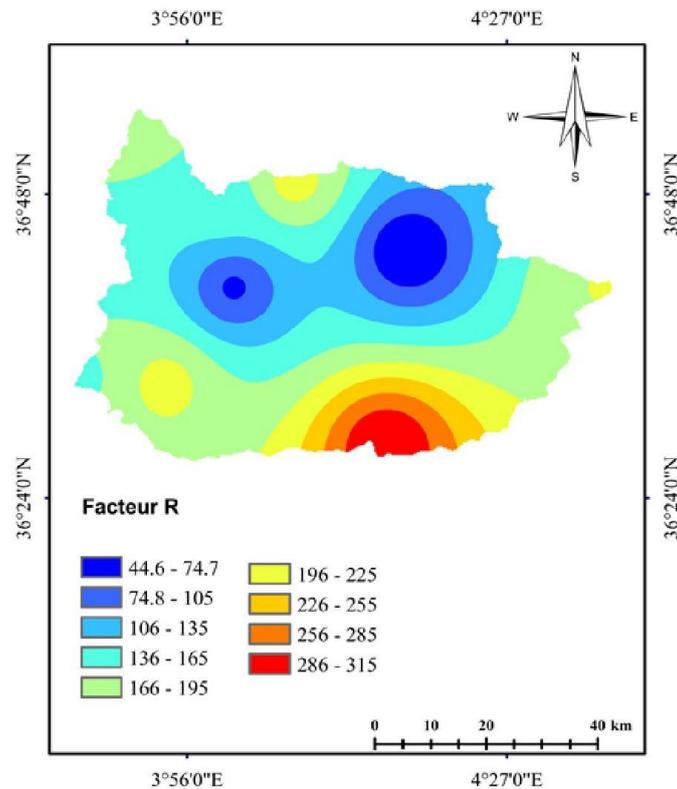


Figure III.3. Érosivité des pluies (R)

Les valeurs de R varient entre 44,6 et 315 MJ.mm/ha.h.an, avec une moyenne établie à 160 MJ.mm/ha.h.an. Les valeurs de R les plus faibles présentées par la classe (44,6 à 135 MJ.mm/ha.h.an) se situent en allant du centre du bassin vers le Nord Est, cette zone est représentée par la couleur bleu au centre du bassin. Alors que, les valeurs les plus fortes (>136(MJ.mm/ha.h.an) se situent dans deux zone, la première, en allant du centre du bassin vers le nord centre et le nord-ouest et la deuxième, en allant du centre du bassin vers le sud. Les valeurs de l'érosivité les plus élevées se situent à l'extrême sud du bassin représenté par la couleur rouge. Il est à signaler que cette zone est une région montagneuse.

III.3.2. Facteur d'érodibilité des sols (K)

La résistance intrinsèque au détachement et au transport des particules par l'eau est exprimée par les paramètres intrinsèques du sol tels que la stabilité structurale, la formation de croûtes, l'état de dispersion, la teneur en matière organique et la texture. Ces paramètres jouent un rôle crucial dans la sensibilité des sols à l'érosion. Le facteur K dépend de la texture du sol, de sa teneur en matière organique et de sa perméabilité (Bollinne and Rosseau, 1978).

Chapitre III : Cartographie et estimation des zones à risque d'érosion hydrique par l'utilisation du modèle RUSLE

L'érodibilité des sols repose sur des facteurs tels que le pourcentage de matière organique, la texture, la structure et la perméabilité. Ce facteur représente la capacité d'un sol à résister à l'érosion et s'exprime en tonnes par hectare par mégajoule par millimètre (t.ha.H/ha.Mj.mm). Son estimation est réalisée à l'aide de l'équation de Wischmeier et Smith (1978) suivante (Tahiri et al., 2017):

$$100K = 2,1 * M^{1,14} * 10^{-4}(12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3) \quad (III.3)$$

K : Facteur d'érodibilité en t.ha.H/ha.Mj.mm (Tonne. Hectare. Heure/Hectare. Mégajoule).

M : Représente la texture et se calcul par la formule III.4 en (Millimètre) ;

$$M = (\% \text{ sable fin + limon}) * (100 - \% \text{ argile}) \quad (III.4)$$

Où : a= Pourcentage de matière organique ; b = Code des classes de structure ; c= Code des classes de perméabilité.

Après le téléchargement des cartes relatives à la matière organique, au sable et à l'argile, on calcule le paramètre (M) par la formule (III.4), par la suite on détermine les codes (b) et (c) en utilisant les diagrammes représentés sur les figures III.4 et III.5.

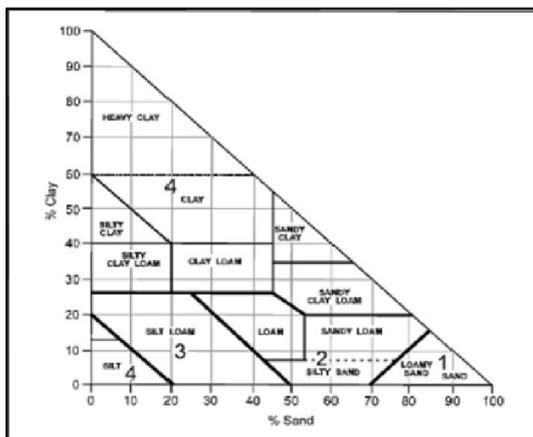


Figure III.4. Code Structure(b).

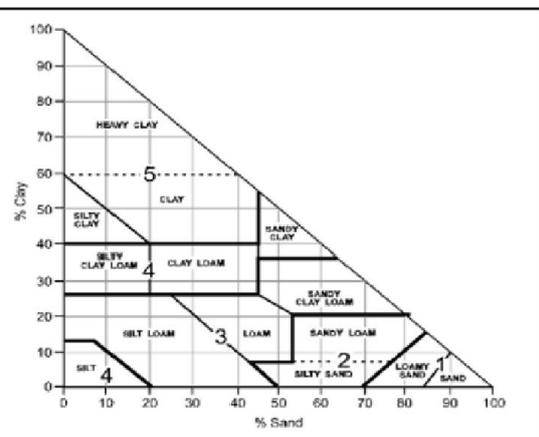
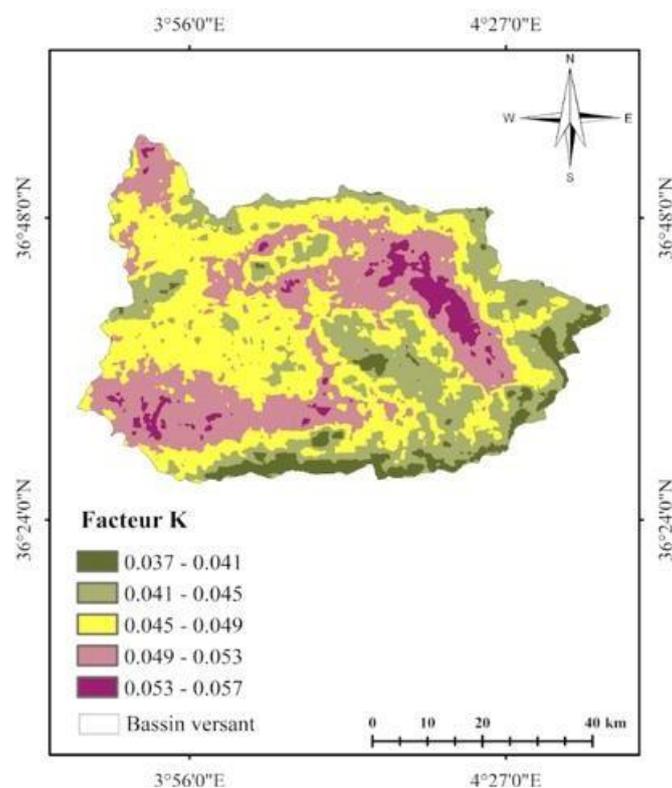


Figure III.5. Code de perméabilité (c)

La figure III.6 illustre une cartographie du facteur d'érodibilité (K) pour le bassin versant de Sébaou. Cette cartographie met en évidence la variation spatiale de la susceptibilité à l'érosion hydrique dans la région étudiée



Les valeurs de K varient entre 0.037 et 0.057 (t.h.ha)/(MJ.ha.mm), avec une moyenne établie à 0.047 MJ.mm/ha.h.an. Les zones de couleur illustrées sur la carte représentent les différentes classes de valeurs K, permettant aux observateurs de visualiser rapidement les zones présentant un risque élevé en érodibilité du sol.

III.3.3. Facteur pratique anti-érosive (P)

Le facteur P décrit l'impact des pratiques agricoles sur l'érosion des sols, où une bonne végétation protège le sol en réduisant les agressions climatiques et le ruissellement de l'eau (Wischmeier et Smith, 1978). Il prend en compte les pratiques de gestion telles que la culture en courbes de niveau, en bandes, ou la construction de terrasses, qui modifient le modèle d'écoulement. Dans notre étude, le facteur P a été déterminé à partir de la carte des pentes (Tableau III.3). La valeur 0 signifie que les pratiques de conservation sont excellentes, réduisant presque totalement l'érosion, tandis qu'une valeur de 1 indique l'absence de telles pratiques, rendant l'érosion très probable (Figure III. 7) (Parveen et Kumar, 2012). Les pratiques comme la culture en terrasses et les reboisements en banquettes sont

Chapitre III : Cartographie et estimation des zones à risque d'érosion hydrique par l'utilisation du modèle RUSLE

particulièrement efficaces, avec des valeurs de P égales ou inférieures à 1, reflétant leur capacité à modifier l'écoulement de surface et à réduire le ruissellement.

Tableau III.3. Facteur de pratique de conservation (P) selon la pente du bassin versant (Renard, 1997).

Pente (%)	Contouring	Strip Cropping	Terracing	Classe de P
0-7	0.55	0.27	0.10	Très faible
7-11.3	0.6	0.30	0.12	Faible
11.3-17.6	0.8	0.40	0.16	Modéré
17.6-26.8	0.9	0.45	0.18	Fort
> 26.8	1.00	0.50	0.20	Très fort

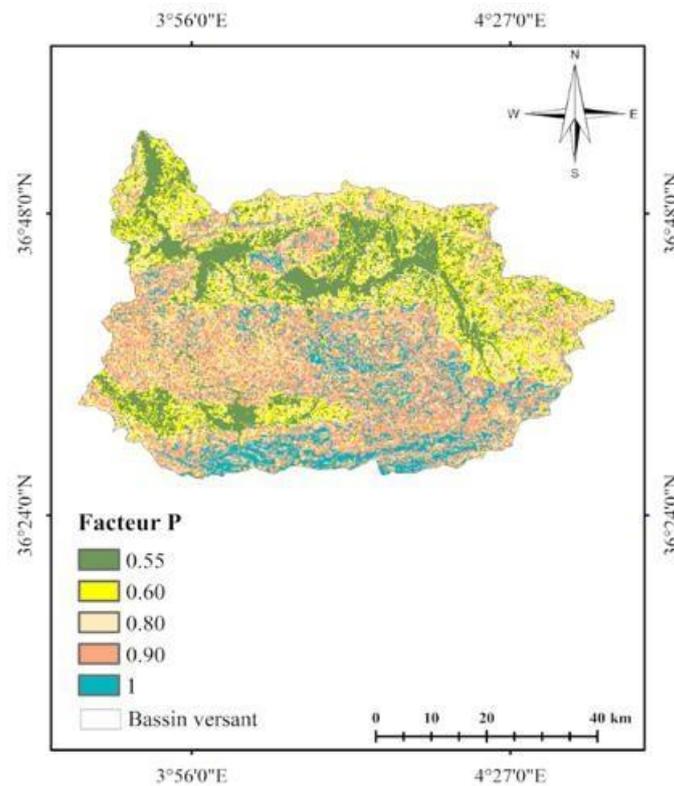


Figure III.7. Facteur pratique anti-érosive (P)

III.3.4. Facteur topographique (LS)

Le facteur topographique (LS) représente l'effet combiné de la longueur et de l'inclinaison de la pente (Mostephaoui et al., 2013). La longueur de la pente correspond à la distance parcourue par l'écoulement depuis le sommet de la pente jusqu'à une structure d'interception.

Chapitre III : Cartographie et estimation des zones à risque d'érosion hydrique par l'utilisation du modèle RUSLE

Il est généralement défini comme le rapport de perte de sol entre deux parcelles ayant des conditions identiques à l'exception de la longueur et de l'inclinaison de la pente : l'une ayant une longueur et une inclinaison données. À partir des données collectées au niveau des parcelles expérimentales, Wischmeier et Smith (1978) ont développé une relation, présentée sous forme de diagramme, permettant de calculer la valeur de LS (Délusca, 1999). Ce diagramme repose sur l'hypothèse que les pentes ont des gradients essentiellement uniformes. Pour la construction du diagramme, l'équation suivante a été utilisée :

$$LS = (L/22,13) \cdot m \cdot (0,065 + 0,045 \cdot S + 0,065 \cdot S^2) \text{ (III.5)}$$

Où : L : est la longueur de pente (en m)

S : est l'inclinaison de la pente (en %)

m : est un paramètre tel que, m = 0,5 si la pente est > 5 %, m = 0,4 si la pente est de 3,5 à 4,5 %, m = 0,3 si la pente est de 1 à 3 % et m = 0,2 si la pente est < 1 %.

La figure III.8 représente le facteur LS, dont la valeur minimale est de 0,03 et la valeur maximale est de 17,91.

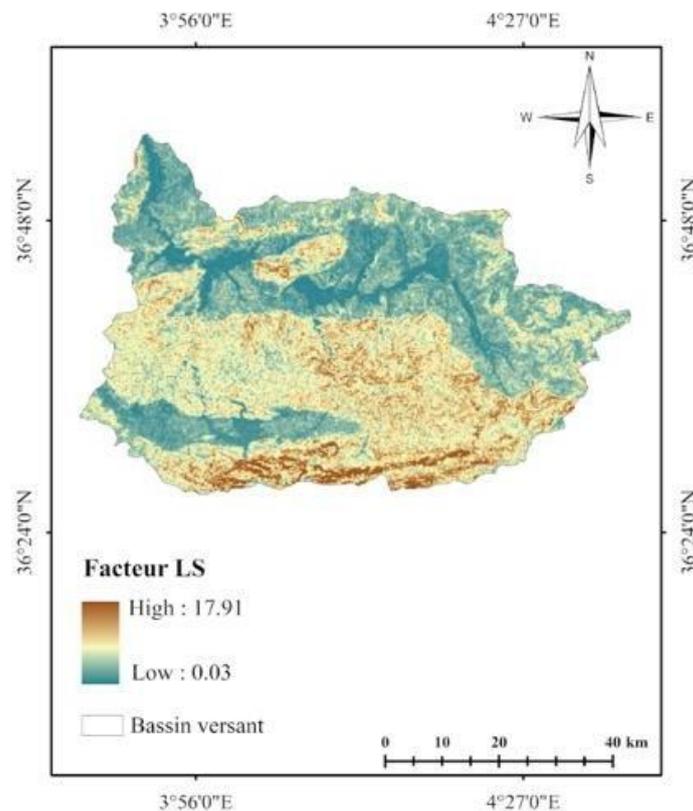


Figure III.8. Distribution des valeurs du facteur LS dans le bassin versant

III.3.5. Facteur d'occupation des sols (C)

La couverture végétale joue un rôle crucial dans la réduction des processus d'érosion, en protégeant les berges des rivières et en diminuant les risques de glissements de terrain. Elle atténue également l'impact des gouttes de pluie sur la surface du sol en dissipant leur énergie avant qu'elles ne l'atteignent (Zeghmar et al., 2024). Parmi les différents facteurs influençant la protection contre l'érosion, le couvert végétal est considéré comme le plus déterminant. Il peut être surveillé par imagerie satellite, notamment à travers l'estimation de l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ou par des méthodes de classification supervisée ou non supervisée.

Dans notre étude, nous avons généré le facteur NDVI à partir d'images Sentinel-2 à une résolution de 10 mètres. Les valeurs du NDVI varient de -1,0 à 1,0, les valeurs les plus élevées indiquant une végétation dense et verte, tandis que les valeurs faibles correspondent à un sol nu (Sader and Winne, 1992). Le calcul de l'indice NDVI a été effectué selon l'équation suivante :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}} \quad (\text{III.6})$$

Pour les images Sentinel-2 en utilise l'équation suivante :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Band 8} - \text{Band 4}}{\text{Band 8} + \text{Band 4}} \quad (\text{III.7})$$

Où NIR est la bande proche infrarouge telle que la bande 8 et la bande 4.

Cette méthodologie permet d'évaluer efficacement la densité de la végétation et de surveiller les changements de couverture végétale au fil du temps, fournissant ainsi des données essentielles pour la gestion de l'érosion et la conservation des sols. Les images Sentinel, avec leur haute résolution et leur couverture globale, offrent un outil puissant pour ces analyses environnementales.

Plusieurs études montrent que diverses méthodes sont employées pour calculer et quantifier le facteur C. Dans notre étude, nous avons dérivé le facteur C à partir de l'indice NDVI (Fig. III.9 (a,b)), en suivant la méthodologie proposée par Van der Knijff et al. (2000), comme suit :

$$C = \exp\left[-\alpha\left(\frac{\text{NDVI}}{\beta - \text{NDVI}}\right)\right] \quad (\text{III. 8})$$

Chapitre III : Cartographie et estimation des zones à risque d'érosion hydrique par l'utilisation du modèle RUSLE

Où $\alpha = 2$ et $\beta = 1$ sont les paramètres sans unités qui représentent les paramètres de forme qui déterminent la forme de la courbe NDVI-C

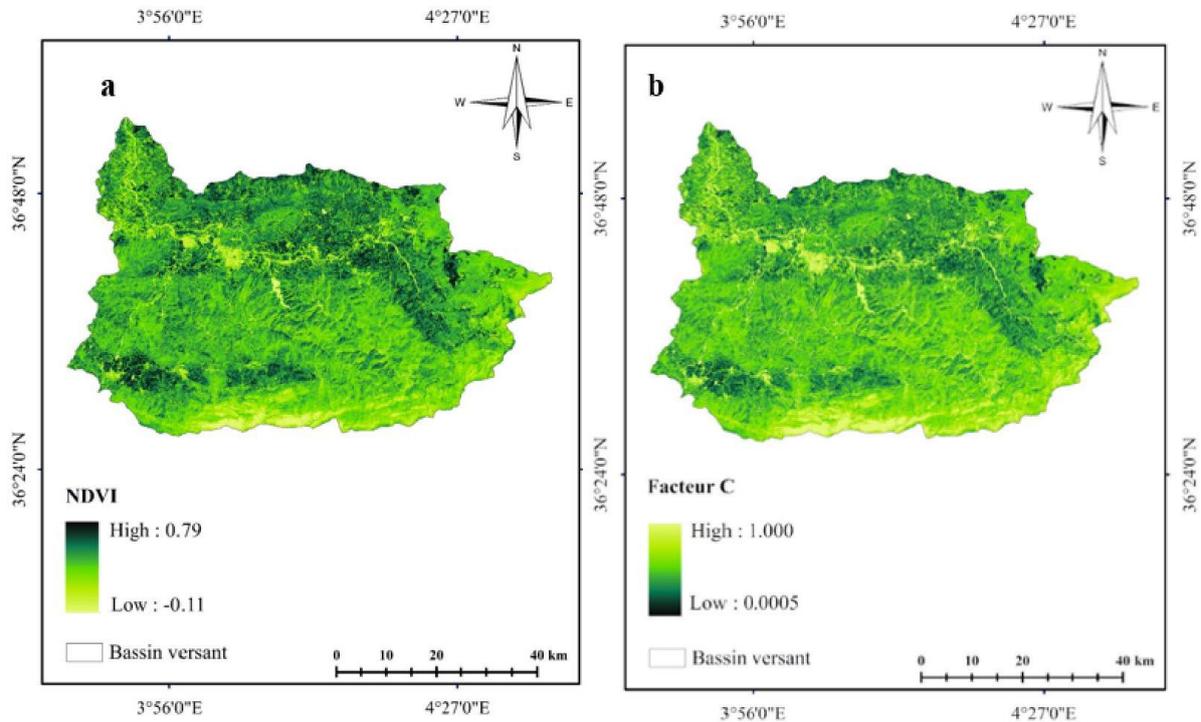


Figure III.9. Facteur NDVI (a), Carte d'occupation du sol (b)

L'image de l'indice NDVI, avec des valeurs variant de -0.11 à 0.79, reflète la densité et la santé de la végétation dans la zone étudiée. Les valeurs élevées de NDVI, observées dans le nord de l'image, indiquent une végétation dense et en bonne santé. Cela suggère que cette région est couverte par une végétation verte et luxuriante, comme des forêts ou des terres agricoles en croissance active. En revanche, les valeurs faibles de NDVI, présentes dans le sud de l'image, révèlent une couverture végétale plus clairsemée ou inexistante. Cette situation peut être due à des sols nus, des zones urbanisées, des surfaces d'eau ou encore à une végétation stressée.

L'analyse de cette répartition spatiale du NDVI permet de comprendre les variations de la couverture végétale dans la zone étudiée. Les régions avec des valeurs élevées de NDVI (proches de 0.79) sont des indicateurs de bonnes pratiques de gestion des terres ou de conditions environnementales favorables à la croissance végétale. En contraste, les zones avec des valeurs faibles (proches de -0.11) peuvent nécessiter des interventions pour améliorer la couverture végétale et réduire les risques d'érosion et de dégradation des sols. Cette interprétation peut guider les efforts de conservation et de gestion des terres, en mettant

Chapitre III : Cartographie et estimation des zones à risque d'érosion hydrique par l'utilisation du modèle RUSLE

l'accent sur les régions nécessitant des actions spécifiques pour améliorer ou maintenir une couverture végétale adéquate.

III.4. Détermination de la perte de sol

La combinaison des différents facteurs composant les équations de la RUSLE a permis de produire les cartes finales des pertes moyennes de sol par érosion hydrique. Selon les estimations de la RUSLE, l'érosion annuelle moyenne du sol est de 12.95 tonnes par hectare par an ($t\ ha^{-1}\ an^{-1}$). Nous avons classé la gravité de cette perte de sol en cinq catégories, comme indiqué dans le Tableau III.4 et illustré dans la Figure III.10.

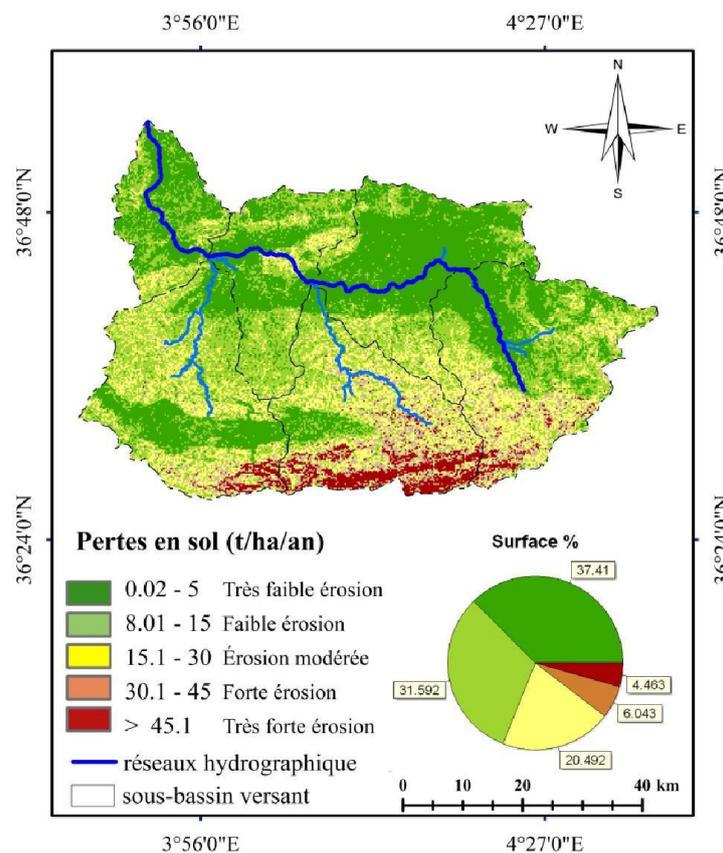


Figure III.10. Cartes annuelles de répartition des pertes en sol (RUSLE)

Tableau III.4. Perte annuelle de sol dans le bassin versant de Sébaou.

Perte de sol annuelle	Classes ($t\ ha^{-1}\ an^{-1}$)	Surface %
Très faible érosion	< 5	37.41
Faible érosion	5 – 15	31.59

Chapitre III : Cartographie et estimation des zones à risque d'érosion hydrique par l'utilisation du modèle RUSLE

Érosion modérée	15 – 30	20.49
Forte érosion	30 – 45	6.04
Très forte érosion	> 45	4.46

La carte des pertes moyennes de sol (Figure III.10) met en évidence les zones les plus vulnérables à l'érosion hydrique.

La cartographie de tous les facteurs impliqués dans le processus d'érosion à savoir l'érosivité des pluies (R), la topographie (LS), l'érodibilité du sol (K), le couvert végétal (C) et les pratiques antiérosives (P) nous a permis d'établir une carte de pertes en sol sur la totalité du bassin versant de l'oued Sébaou. On a hiérarchisé les différents secteurs du bassin versant selon leur sensibilité à l'érosion hydrique et mettre à la disposition des autorités responsables un support de base pour l'aide à la décision dans les futurs projets d'aménagements anti érosif du bassin versant. Les régions classées dans les catégories fortes érosion (6.04%) et très forte érosion (4.46%) nécessitent des interventions urgentes pour prévenir la dégradation du sol, telles que des pratiques de gestion durable des terres, la plantation de couverture végétale, et la mise en place de structures de conservation des sols.

Les zones avec des pertes de sol Modérées (20.49%) à faible érosion (31.59%) bénéficieraient de mesures préventives pour maintenir ou améliorer leur état actuel, réduisant ainsi le risque de dégradation future. Enfin, les régions avec des pertes de sol très faibles (37.41) peuvent être considérées comme relativement stables, bien qu'une surveillance continue soit recommandée pour assurer la durabilité à long terme.

Les résultats de l'application du modèle RUSLE ont montré que la perte moyenne des sols par le phénomène érosif est de l'ordre de 12,95 t/ha/an, cette valeur dépasse la limite moyenne de tolérance des sols vis-à-vis de l'érosion (7 t/ha/an). Une partie importante de bassin, soit environ 38% de la superficie totale est marquée par un taux d'érosion inférieure à 7 t/ha/an, contre 6% des terres qui montrent une forte perte de sol (supérieur ou égal 30 t/ha/an) et environ 5% de perte en sol est très forte (supérieur ou égal 45 t/ha/an). La carte du risque érosif a montré que le risque n'apparaît pas de manière homogène sur l'ensemble du bassin versant de l'oued Sébaou ; il est qualifié de faible à modéré sur une superficie de 222 500 ha soit 89 %. Dans le reste, soit 11 % le risque d'érosion apparaît plus problématique classé de fort à très fort, soit environ 27 500.

III.5. Conclusion

Dans cette étude, nous avons examiné le bassin versant de Sébaou afin de quantifier les pertes en sol causées par l'érosion hydrique à l'aide de l'Equation Universelle des Pertes en Sol révisée (RUSLE), intégrée dans un Système d'Information Géographique (SIG) ArcGIS. Les résultats obtenus révèlent que les sols du bassin versant de Sébaou sont soumis à plusieurs facteurs favorisant l'érosion, tels que des pentes prononcées, un faible couvert végétal et une forte érodibilité des sols.

Les techniques de SIG se sont avérées efficaces pour déterminer les divers facteurs d'érosion des sols, y compris l'érosivité des pluies (R), l'érodabilité des sols (K), la couverture végétale (C) et la longueur/inclinaison de la pente (LS). Grâce à ces techniques, nous avons pu produire des cartes thématiques précises de ces paramètres, ainsi qu'une carte des pertes moyennes de sol estimées.

Nos analyses indiquent que le bassin versant de Sébaou est sujet à une forte érosion, avec une moyenne annuelle de perte de sol estimée à 12.95 tonnes par hectare par an ($t\ ha^{-1}\ an^{-1}$). Nous avons classé la gravité de cette perte de sol en cinq catégories, montrant que les zones de forte et très forte érosion nécessitent des interventions urgentes telles que la plantation de végétation, la mise en place de structures de conservation des sols et l'adoption de pratiques de gestion durable des terres.

IV. 1. Introduction

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux de processeurs élémentaires étroitement liés qui fonctionnent simultanément. Chaque processeur basique génère une sortie unique en fonction des données qu'il reçoit. Il est évident que toute structure hiérarchique de réseaux est un réseau. Ils se distinguent par leur aptitude à apprendre, à généraliser, à mémoriser, à classer, à s'adapter et à prendre des décisions. Ils sont utilisés dans différents secteurs, tels que la détection de formes, la gestion et la robotique. Dans le domaine de la maintenance industrielle, on utilise les réseaux de neurones afin de résoudre les problèmes de diagnostic en classifiant automatiquement les signaux et les formes.

IV.2. Historique

Malgré le développement de la notion de mémoire associative par le psychologue américain James (1890) Mc Culloch et W. Pitts ont introduit le concept de réseaux de neurones en 1943, démontrant que des réseaux formels simples peuvent effectuer des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques. Difficiles. Hebb (1949), un physiologiste américain, explique le conditionnement chez l'animal en utilisant les caractéristiques des neurones eux-mêmes. Il met également en évidence l'importance du couplage synaptique dans le processus d'apprentissage en se basant sur le comportement psychophysologique (1949), ce qui constitue la première règle d'apprentissage.

La construction du premier neuro-ordinateur basé sur le modèle de Perceptron, appliqué au domaine de la reconnaissance de formes, a élaboré le modèle Adaline (Adaptative Linéairement) en se basant sur l'idée de Hebb. Le modèle présente une structure similaire au Perceptron. Mais la loi d'apprentissage diffère. Elle a donné naissance à l'algorithme de rétro-propagation de gradient, qui est largement employé. Actuellement, grâce aux Perceptrons multicouches. Aujourd'hui encore, les réseaux de type Adaline sont employés dans certaines applications spécifiques. Après les recherches de Minsky et Papert (1969), qui soulignent les limites théoriques du perceptron, la théorie des réseaux de neurones a connu une évolution profonde. Limitations alors connues, en particulier en ce qui concerne l'incapacité de ce modèle à traiter des problèmes non linéaires. Ces limitations sont implicitement étendues à tous les modèles de neurones artificiels.

En 1985, trois groupes de chercheurs indépendants mettent en évidence la rétro propagation de gradient. Il s'agit d'un modèle d'apprentissage spécialement conçu pour les réseaux de neurones multicouches (ou Perceptrons multicouches).

En divisant cette fonction en une suite d'étapes linéairement séparables, on obtient une fonction non linéaire d'entrée/sortie sur un réseau. Les réseaux multicouches et la rétro-

propagation de gradient demeurent aujourd'hui le modèle le plus étudié et le plus efficace dans les applications. D'autres modèles et algorithmes ont été développés dans les années quatre-vingt-dix dans le but d'élargir les possibilités des réseaux statiques non bouclés en introduisant progressivement une mémoire interne et la récurrence au sein du réseau [Anonyme 4].

IV.3. Neurone biologique et neurone artificiel

Les avancées dans la compréhension de la structure interne du cerveau et de l'étude d'une partie de son fonctionnement ont joué un rôle significatif dans l'apparition des réseaux de neurones artificiels.

IV. 3. 1. Modèle neurophysiologique

Environ mille milliards de neurones composent le cerveau, avec entre 1000 et 10000 synapses (connexions) par neurone. La cellule neuronale est constituée d'un corps cellulaire et d'un noyau. Les dendrites sont des ramifications du corps cellulaire. Parfois, ces dernières sont si est fréquent de parler de chevelure dendritique ou d'arborisation dendritique dans ce contexte. L'information est transmise de l'extérieur vers le soma, le corps du neurone, grâce aux dendrites.

Le neurone traite ensuite l'information le long de l'axone (unique) afin de la transmettre aux autres neurones.

La transmission n'est pas directe entre deux neurones. En réalité, un espace intercellulaire de quelques dizaines d'Angströms se trouve entre l'axone du neurone à l'origine et les dendrites du neurone à l'origine (Xavier et al., 2007).

La liaison entre les deux La prochaine étape nous amène à l'analyse de petits réseaux de neurones, Cela nous conduit à présenter les caractéristiques de l'habitation, de la sensibilisation et surtout à élaborer l'idée neurones afin de faire face à ces phénomènes. L'analyse du fonctionnement de la vision chez l'animal (et l'homme) permet de comprendre les concepts de messages somato-sensoriels, de réduction d'information, d'étages de traitement et de complexification de l'information.

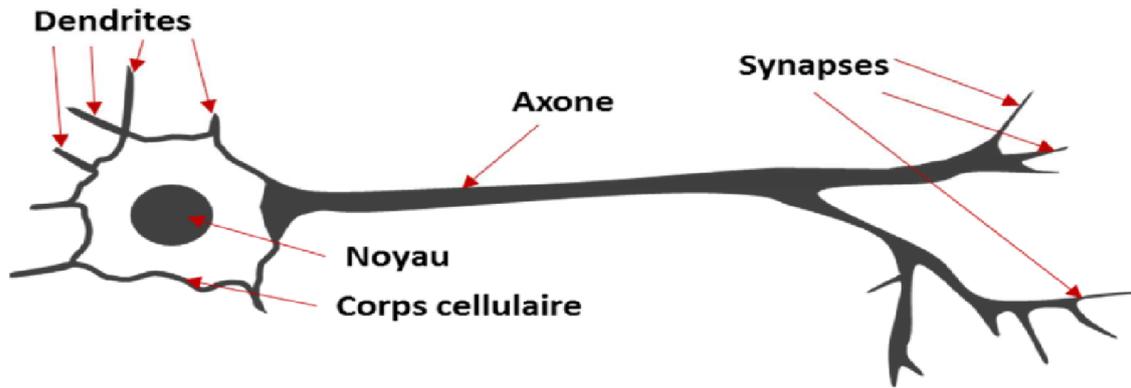


Figure IV.1. Schématisation d'un neurone biologique.

Il s'agit du seul prolongement qui transmet le signal du neurone à d'autres cellules, ce qui représente son rôle dans la communication avec d'autres neurones. Il a la capacité de se diviser à son extrémité afin d'entrer en contact avec de nombreuses autres cellules. Toutes les structures ont une fonction spécifique et elles ajustent leur comportement grâce à des mécanismes d'apprentissage. L'acquisition d'informations nécessite des changements physiques dans les connexions entre les neurones. La combinaison de différentes structures neuronales, chacune ayant une fonction spécifique, entraîne l'apparition d'une fonction d'ordre supérieur pour l'ensemble (Georges, 2016).

IV. 3. 1. Neurone artificiel

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux de processeurs élémentaires étroitement liés qui fonctionnent simultanément. Chaque processeur basique génère une sortie unique en fonction des données qu'il reçoit. Toute organisation hiérarchique des réseaux est bien sûr logique.

IV. 4. Modélisation mathématique du neurone biologique

Le modèle mathématique d'un neurone artificiel est illustré par la figure (IV.2). Un neurone est essentiellement constitué d'un intégrateur qui effectue la somme pondérée de ses entrées. Le résultat n de cette somme est ensuite transformé par une fonction de transfert f qui produit la sortie D du neurone. Les R entrées des neurones correspondent au vecteur

$P = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_R]$, alors que $W = [W_{1,1} \ \dots \ W_{1,R}]$ représente le vecteur des poids du neurone. La sortie n de l'intégrateur est donnée par l'équation suivante

$$n = \sum_{j=1}^R w_j p_j - b \dots\dots\dots V.1$$

$$= W_{1,1} \cdot p_1 + W_{1,2} \cdot p_2 + \dots + W_{1,R} \cdot p_R - b$$

$$D = f(n) = f(\sum w_{i,j} \cdot p_j - b) \dots\dots\dots V.2$$

Que l'on peut aussi écrire sous forme matricielle :

$$n = w^T * P - b \dots \dots \dots \text{IV.3}$$

(Laghrouche, 2016)

$$d=f(n)=f(w^T *P-b) \dots \dots \dots \text{V.4}$$

$$W = \begin{bmatrix} w_{i1} & \dots & w_{iR} \\ \vdots & & \vdots \\ w_{s1} & \dots & w_{sR} \end{bmatrix} F=[p_1 p_2 \dots p_R] \dots \dots \dots \text{IV.5} \quad (\text{HEBB, 1949}).$$

P: dimension matricielle est $R \times 1$,

W: dimension $S \times R$ S: le nombre de neurones d'une même couche

i: le premier indice (rangée) désigne toujours le numéro de neurone sur la couche.

j: le deuxième indice (colonne) spécifie le numéro de l'entrée.

Le biais b du neurone est une somme pondérée des poids et des entrées, ce qui représente cette sortie. Le niveau d'activation du neurone est connu sous le nom de résultat n de la somme pondérée (MARVIN MINSKY..1969). Le biais B est également connu sous le nom de seuil d'activation du neurone. Quand le seuil d'activation est atteint ou dépassé, l'argument de f est positif (ou nul). Sinon, il est défavorable.

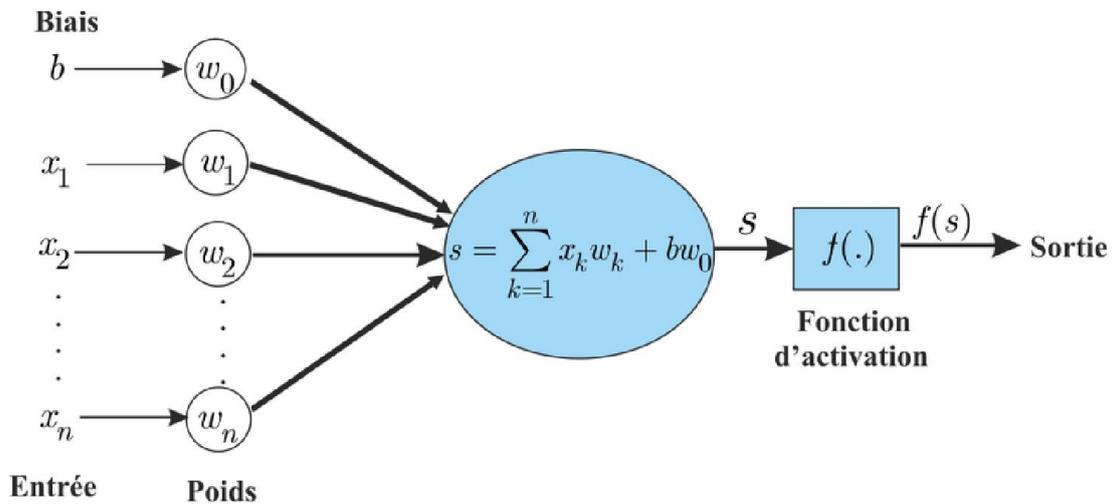


Figure IV.2. structure d'un Modèle neurone artificiel. (Hopfield, 1982).

IV.5. Fonctions d'activation

Différents types d'activation sont employés, comme nous le constatons dans le tableau. Toutefois, certaines des fonctions sont couramment employées, comme la fonction de limite et la fonction linéaire, ainsi que la fonction rayons X.

Tableau IV.1.Fonctions de transfert f(x) (Le Cun, 1985)

Nom de la fonction	Relation entrée / sortie	L'allure
Seuil	$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
Seuil symétrique	$f(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
Linéaire	$f(x) = x$	
Linéaire saturée	$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ x & \text{si } 0 \leq x \leq 1 \\ 1 & \text{si } x > 1 \end{cases}$	
Linéaire saturée Symétrique	$f(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x < -1 \\ x & \text{si } -1 \leq x \leq 1 \\ 1 & \text{si } x > 1 \end{cases}$	
Linéaire positive	$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ x & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
Sigmoïde	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	
Tangente hyperbolique	$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	

IV.6. Modèle des réseaux de neurones

IV.6.1. Perceptron

Le perceptron est inspiré du système visuelle humain basé sur les travaux de Mc Culloch et pitts en 1943 et Donald hebb, c'est le premier réseau évolutif c'est à dire qui a la capacité d'apprendre, inventé par Frank rosen (Smaili et Touati, 2018), il est utilisé pour la première fois dans le but de reconnaître les lettres de l'alphabet avec des cellules photovoltaïques

comme capteurs. Le perceptron utilise la fonction de Heaviside (Echelon) comme fonction d'activation (Parker, 1985)

IV.6.2. Perceptron multicouche (PMC ou MPC)

Le perceptron multicouche (PMC) appelé en anglais (MLP : Multi layer perceptron) est un type de réseau de neurone artificiel, il est composé au minimum de trois couches, une couche d'entrée, une autre au milieu dite couche cachée, et une dernière en sortie. On peut avoir plusieurs couches cachées, chaque couche est composée de plusieurs nombre de neurone où chaque neurone utilise une fonction d'activation non linéaire, l'information reçue dans la couche d'entrée se propage vers la couche de sortie dans une voie unidirectionnel appelé (feedforward), la couche de sortie représente la sortie du réseau neuronal.

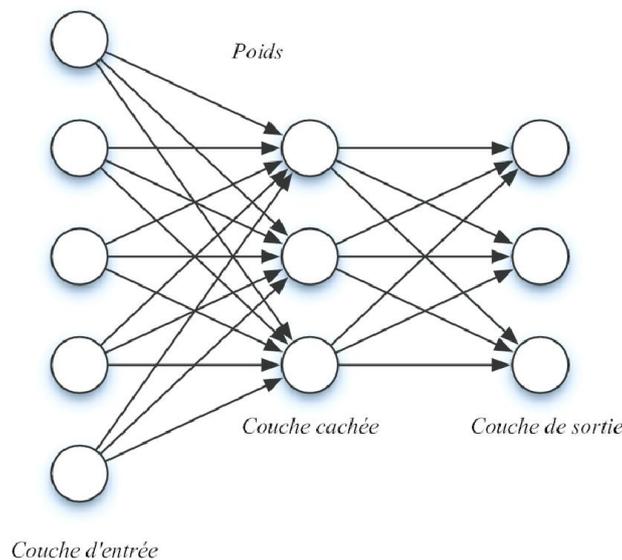


Figure IV.3. Un perceptron multicouche contenant trois couches (Werbos, 1975).

IV.6.3. Réseaux à fonctions radiales de base

Les réseaux à fonctions de base radiales (RBF : Radial Basis Functions) sont des réseaux de neurones qui utilisent des fonctions de base radiales comme fonction d'activation, les RBF sont usuellement composées de trois couches, les deux couches d'entrée et de sortie utilisent une fonction d'activation linéaire et la couche cachée utilise une fonction d'activation non linéaire. On trouve les RBF dans de nombreuses applications y compris l'approximation de fonctions, la prévision des séries chronologiques, et la classification.

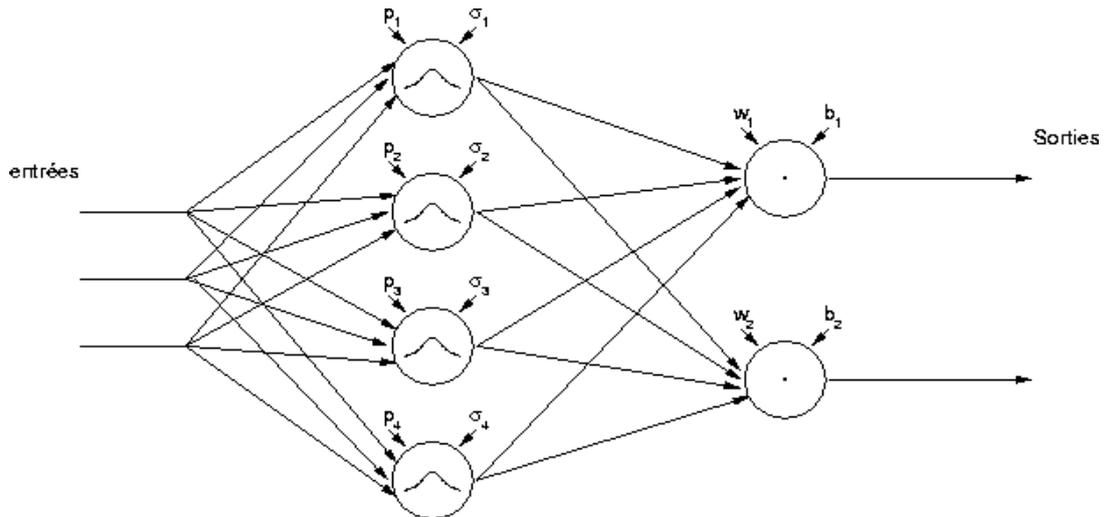


Figure IV.4. Illustration d'un réseau de neurones à fonctions de base radiale (RBF) (Nerrand et al., 1993).

IV.6.4. Réseaux de neurones récurrents

Les réseaux de neurones récurrents (RNN pour Récurrent Neural Networks) sont des réseaux de neurones présentant des connexions récurrentes, c'est-à-dire qu'une sortie d'un neurone situé dans la couche de sortie ou la couche cachée peut représenter une entrée d'un neurone situé dans la couche précédente. Ces neurones interconnectés interagissant non-linéairement (Hui et Zak, 1994), comme représenter dans la figure IV.5 ci-dessous.

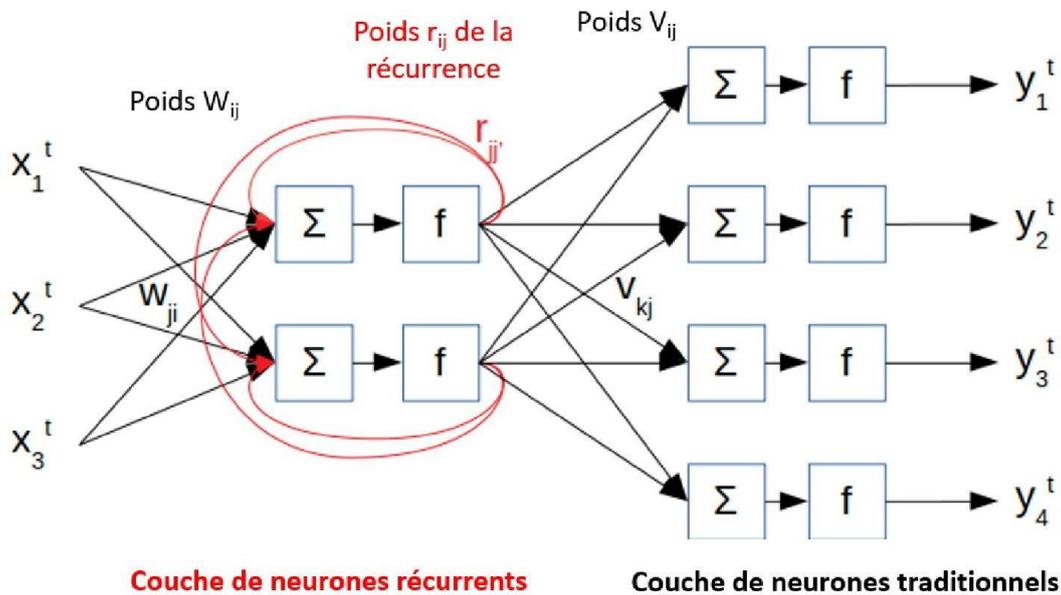


Figure IV.5. Les réseaux de neurones récurrents(RNN) (Dumolard, 1994).

Les RNNs ont un fonctionnement très semblable à celui du système nerveux, ces réseaux ont la capacité de stocker des informations et peuvent prendre en compte un certain nombre d'itérations passées à un moment donné. C'est pourquoi les RNNs sont spécialement conçus

pour les personnes. Applications impliquant le contexte, notamment dans le traitement des séquences temporelles telles que l'apprentissage, la reconnaissance de formes, la traduction automatique et la génération de signaux, c'est-à-dire lorsque les données forment une combinaison et ne sont pas autonomes (Demuth & Beale, 2002).

Les RNNs utilisent une méthode d'apprentissage appelée "rétro propagation du gradient". Cependant, la technologie des RNNs a des limites, en particulier en ce qui concerne la capacité de mémorisation. Ils ne peuvent mémoriser que le passé proche, et l'information commence à se déplacer. La disparition du gradient, qui survient après une cinquantaine d'itérations, rend l'entraînement d'un RNN extrêmement complexe. Ce n'est que récemment que des méthodes efficaces ont été développées, telles que les LSTM (Long Short Term Memory), afin de rendre les RNN plus efficaces et plus simples à entraîner.

IV.6.5. Réseaux de neurones feed-forward rétro propagation (RNFFRP)

La rétro-propagation est l'algorithme d'entraînement « par défaut » le plus utilisé. (Demuth & Beale, 2002). On l'emploie fréquemment pour résoudre des fonctions non linéaires difficiles. C'est un système d'apprentissage supervisé utilisé pour l'apprentissage d'un réseau neuronal artificiel. Cette technique offre une procédure de calcul efficace pour évaluer les dérivées de la fonction de performance du réseau. Le réseau de rétro propagation neuronal est couramment employé comme un réseau d'apprentissage multicouche, composé d'une couche d'entrée, de couches cachées (une ou plusieurs couches cachées selon la structure du réseau) et d'une couche de sortie. Les nœuds sont reliés entre les couches adjacentes grâce à des poids ajustables, qui sont optimisés par un algorithme d'apprentissage afin d'obtenir les résultats de classification désirés.

IV.7. Apprentissage pour les RNA

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. L'apprentissage neuronal fait appel à des exemples de comportement, L'apprentissage d'un système de RNA consiste à introduire des données en entrée dont la sortie est bien connue, puis on fait entraîner le réseau jusqu'à ce qu'on obtienne notre sortie désirée. Le choix des paramètres d'un réseau de neurones dépend principalement du problème à résoudre. Il n'existe donc pas de règle globale pour déterminer avec exactitude les paramètres à adopter pour résoudre un problème donné (Xinxing et al., 2013).

IV.7.1. Type d'apprentissage

Il existe 3 types d'apprentissage

IV.7.1.1 Apprentissage supervisé

Cet algorithme d'apprentissage ne peut être utilisé que lorsque les combinaisons d'entrées-sorties désirées sont connues. L'apprentissage est alors facilité et par là, beaucoup plus rapide que pour les deux autres algorithmes puisque l'ajustement des poids est fait directement à partir de l'ajustement erreur soit la différence entre sortie obtenue par le RNA et la sortie désirée.

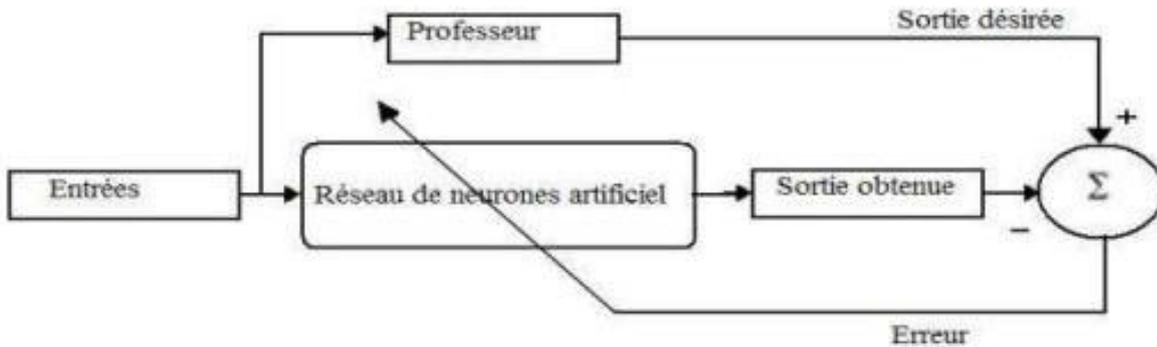


Figure IV.6. Schéma bloc de l'apprentissage supervisé d'un réseau de neurone (Yue et al., 2011).

IV.7.1.2. Apprentissage non supervisé

Il n'y a pas de connaissance à priori des sorties pour des entrées données. En fait, c'est l'apprentissage par exploration ou l'algorithme d'apprentissage ajuste les poids des liens entre neurones de façon à maximiser la qualité de classification des entrées.

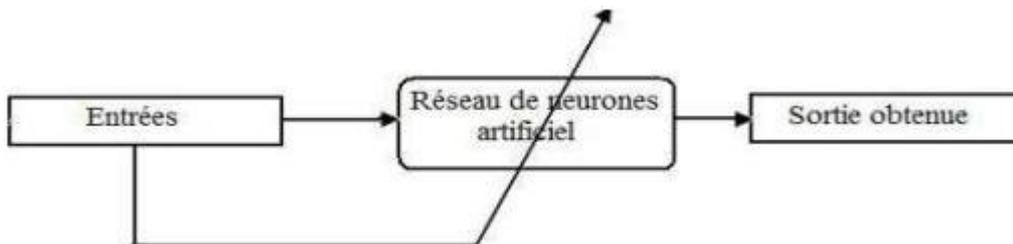


Figure IV.7. Schéma bloc de l'apprentissage non supervisé d'un réseau de neurone (Li & Shi, 2012).

IV.7.1.3. Apprentissage Semi – Supervisé

Il est mis en œuvre quand des données (ou "étiquettes") manquent. Le modèle doit utiliser des exemples non étiquetés pour pouvoir se renseigner.

IV.8. Architectures de réseaux de neurones Artificiels

L'organisation des réseaux de neurones peut se faire à partir de deux grandes catégories d'architecture : les réseaux statiques et les réseaux dynamiques.

IV.8.1. Réseaux statique (non bouclés)

Un réseau est non bouclé, ou statique, si son graphe ne possède pas de cycle. Il réalise donc, de manière générale, une relation algébrique non linéaire entre ses entrées et ses sorties (Georges, 2016).

C'est à dire qu'il est obligatoire de représenter un réseau graphiquement par un ensemble de neurones connectés entre eux et que l'information circule des entrées vers les sorties sans retour (un seul sens), c'est à dire que la sortie courante n'a aucune influence sur les entrées futures.

On peut dire que l'utilisation dominante des réseaux non bouclés est l'organisation des réseaux en plusieurs couches de neurones appelés réseaux multicouches ou perceptron multicouches.

Un réseau multicouche comporte une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées, et une couche de sortie.

Dans un tel réseau, la sortie de chaque neurone de la couche (L) est reliée à l'entrée de chaque neurone de la couche (L+1).

IV.8.2. Réseaux dynamique (bouclés)

Les réseaux de neurone bouclés sont utilisés pour la modélisation dynamique de processus non linéaires et pour leur commande. Ces réseaux récurrents sont aux contraire des réseaux statiques, ils peuvent avoir une topologie de connexion quelconque (autrement dit un réseau totalement connecté) comprenant des boucles qui aux entrées la valeur d'une ou plusieurs sorties. L'état général (global) dépend aussi de ses états précédents comme il est indiqué sur la Figure IV.10 (Nerrand et al., 1993).

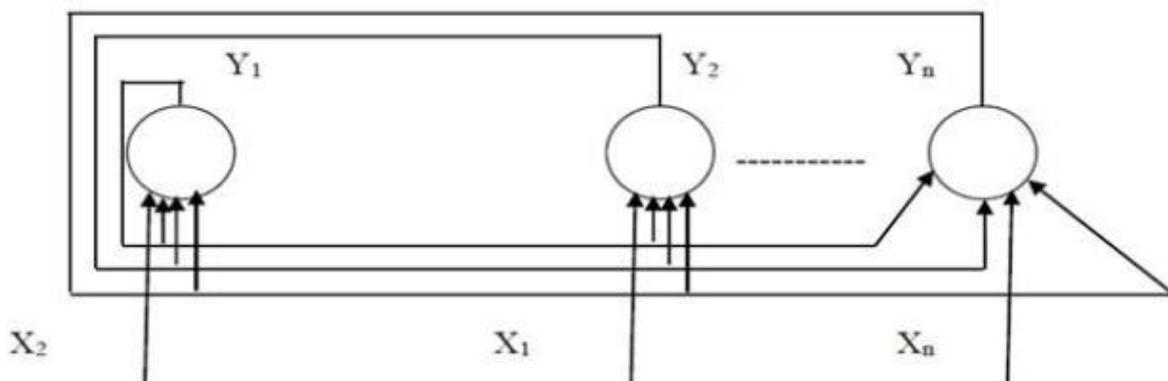


Figure IV.8. Réseau de neurone dynamique modèle (Parker, 1985).

IV.9. Domaine d'application des réseaux de neurones

Les RNA aujourd'hui ont des applications dans des domaines variés :

IV.9.1 Application au traitement du signal

Dans ce domaine, les applications développées portent principalement sur la détection de signatures radar ou sonner. Les experts ont identifié cette application comme étant étanche pour repérer une cible en utilisant des signaux sonars et des caractéristiques spécifiques de ces signaux. Environnement bruyant. Le réseau est utilisé comme un filtre pour filtrer le bruit.

IV.9.2 Application à la planification

L'optimisation est souvent sollicitée pour la planification des actions ou des tâches. A cet effet, l'utilisation du modèle de Hop Field paraît très utile pour la résolution des problèmes d'optimisation

IV.9.3 Application au contrôle

En raison de leurs particularités (technique de traitement parallèle, capacité d'adaptation et de généralisation, etc...). On recourt aux réseaux neuronaux dans le domaine du contrôle intelligent. Par exemple, plusieurs essais ont été effectués afin de mettre en place les réseaux de neurones ; Ces applications peuvent s'avérer bénéfiques.

On peut les classer selon diverses méthodes, comme le contrôle supervisé. Le contrôle inverse et la capacité d'adaptation des neurones de contrôle(Hopfield, 1982).

IV.9.4 Application au diagnostic

Les réseaux de neurones sont bien adaptés à la résolution des problèmes de diagnostic, utilisant la classification automatique des signaux et des formes. Dans ce contexte on distingue plusieurs applications des réseaux de neurones pour le diagnostic des défaillances et en particulier, pour le diagnostic des pannes des machines électriques.

IV.10. Réseaux de neurones sur MATLAB

IV.10.1 Description de MATLAB

MATLAB est un langage de programmation destiné aux calculs numériques, créé par The MathWorks. MATLAB offre la possibilité de procéder à des opérations sur des matrices, d'afficher des courbes et des données, ainsi que de réaliser des algorithmes. Il s'agit du logiciel le plus couramment employé dans le domaine de l'ingénierie et de la science. Il concerne divers secteurs tels que les systèmes automobiles, les systèmes de surveillance de la santé, les réseaux électriques intelligents, l'apprentissage automatique, la robotique, le traitement du signal, le traitement d'images, les systèmes de communications, les finances, et bien d'autres encore.

Chapitre IV : Modélisation de transport solide par les réseaux de neurones artificiels

MATLAB peut être utilisé de manière autonome ou en utilisant des boîtes à outils (généralement appelées "toolbox"), et chaque domaine est équipé d'une ou plusieurs boîtes à outils spécifiques, telles que les mathématiques, les statistiques et l'optimisation. Les boîtes à outils suivantes sont disponibles : la boîte à outils pour la résolution des équations différentielles partielles, la boîte à outils pour l'ajustement des courbes, la boîte à outils pour l'utilisation des réseaux de neurones, que nous aurons l'occasion d'expliquer plus loin.

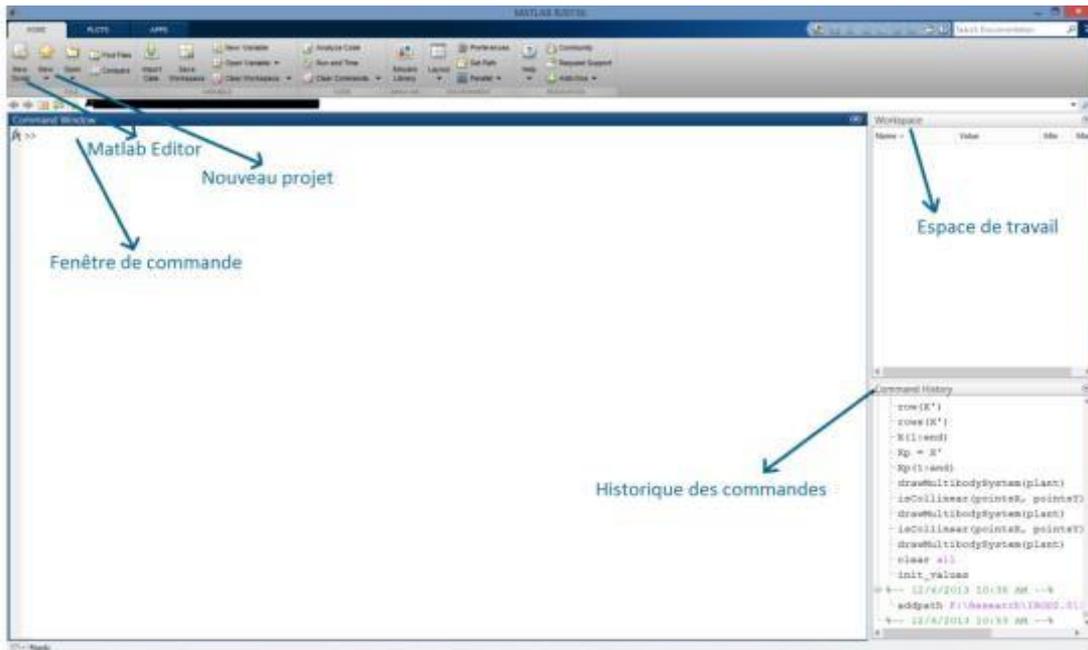


Figure IV.9. Interface MATLAB principale (Demuth et Beale, 2002).

Nouveau projet (New) : Comme son l'indique, ce bouton sert à ouvrir une nouvelle fenêtre de Command Window (ouverture d'un nouveau projet). Fenêtre de commande (Command Window) : C'est là que sont saisies toutes les instructions de notre programme, dans cette zone, les instructions sont écrites et exécutées une après l'autre. Editeur (MATLAB Editor) : Contrairement à Command Window, ici les instructions sont écrites à la fois, une fois fini, le programme exécute les instructions sous la forme d'une fonction. Espace de travail (Workspace) : Dans cette zone, on verra toutes les variables et les constantes qu'on utilise actuellement dans le Command Window, leurs noms, leurs formats, leurs tailles, et leurs types y seront aussi affichés. Historique des commandes (Command History) : L'historique des commandes affiche un journal d'états qu'on a exécuté dans les sessions de MATLAB actuelles et/ou précédentes.

IV.11. Résultat et discussion

IV.11.1. Utilisation des modèles FFBP et CFBP

Deux modèles ont été utilisés, feed forward back propagation (FFBP) et cascaded forward propagation (CFBP) avec l'influence des différentes fonctions d'activation à savoir tansig, logsig et purelin. Les données collectées sont mesurées dans plusieurs stations hydrométriques de Baghlia. Ces données sont divisées en deux phases, la première phase composée de 70% des données pour l'apprentissage et la seconde contient 30% pour la validation.

➤ Feed forward back propagation (FFBP)

Le type de réseaux de neurones FFBP est utilisé pour résoudre notre problème, en utilisant l'algorithme de LM pour la partie d'apprentissage.

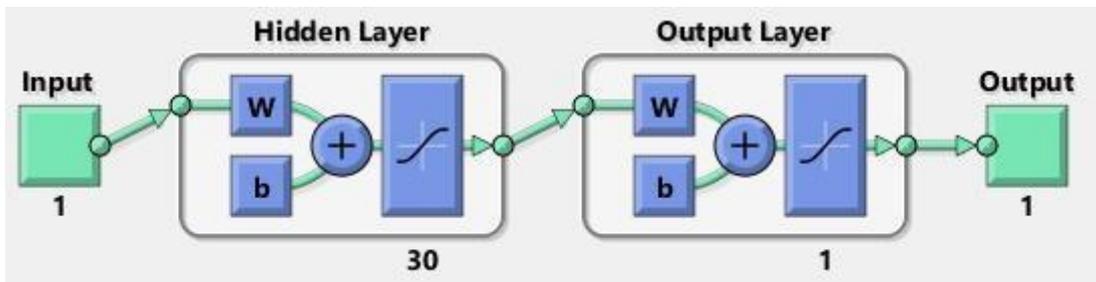


Figure IV.10. Schéma du modèle neuronal dans MATLAB model(FFBP).

➤ Cascade forward back propagation (CFBP)

En plus de la relation indirecte via la couche cachée, il y a une connexion directe entre l'entrée et la sortie dans cette classe, la seule distinction entre CFBP et FFBP réside dans le fait que chaque neurone du nœud d'entrée est connecté à chaque neurone des nœuds cachés et de sortie.

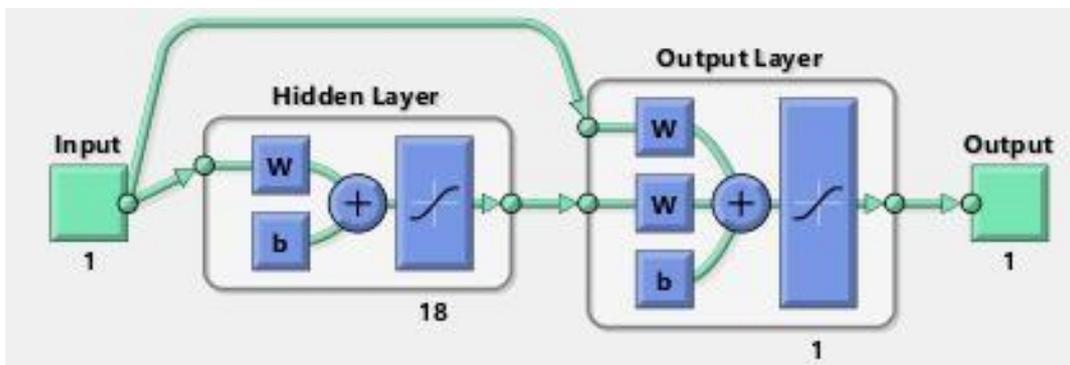


Figure IV.11. Schéma du modèle neuronal dans MATLAB model(CFBP).

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures IV.12 et IV.13.

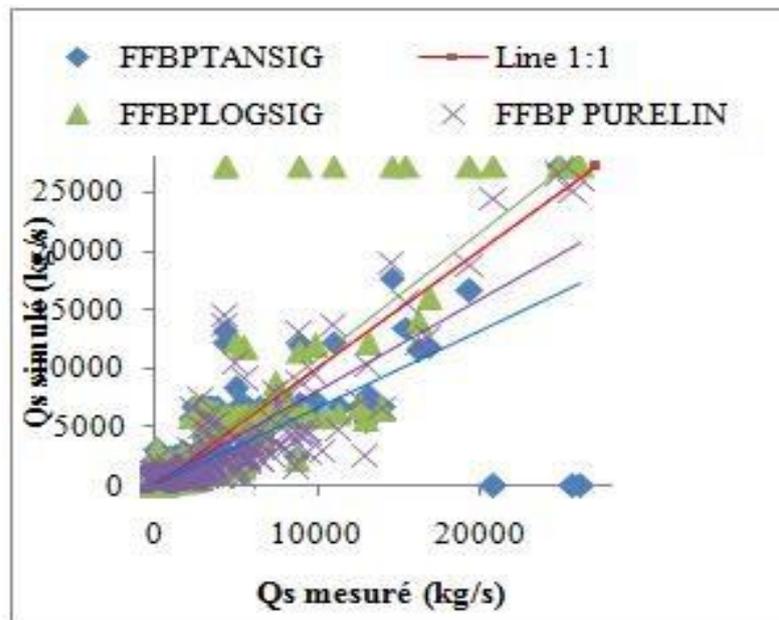


Figure IV.12. Débit solide simulé vs débit solide mesuré par le modèle FFBP

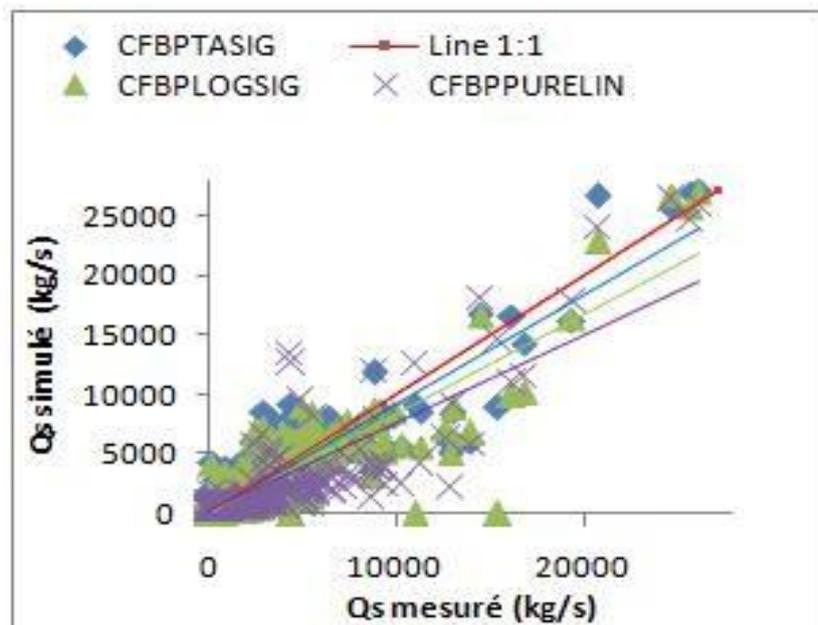


Figure IV.13. Débit solide simulé vs débit solide mesuré par le modèle CFBP

Les paramètres de performances, le coefficient de détermination R^2 , le coefficient de Nash NSE et le RMSE des deux modèles sont représentés dans le tableau 1.

Tableau IV.2. Paramètres de performance des modèles FFBP et CFBP

		Training 70%			Validation 30%		
		Fonction d'activation			Fonction d'activation		
Modèles	Paramètres	LOGSIG	TANSIG	PURELIN	LOGSIG	TANSIG	PURELIN
FFBP	R ²	0,88	0,86	0,9	0,88	0,77	0,89
	NSE	0,65	0,63	0,78	0,54	0,61	0,79
	RMSE	0,036	0,037	0,028	0,04	0,038	0,027
CFBP	R ²	0,9	0,94	0,9	0,86	0,93	0,89
	NSE	0,83	0,88	0,77	0,74	0,85	0,8
	RMSE	0,025	0,021	0,029	0,03	0,023	0,027

D'après les figures IV.12, IV.13 et le tableau IV.1 on constate que le modèle CFBP a donné des meilleurs résultats par rapport au modèle FFBP. Pour le modèle CFBP on a remarqué que la fonction TANSIG a donnée des meilleurs résultats par rapport aux autres fonctions, l'angle qui sépare la droite de régression TANSIG et la diagonal est très réduite ce qui fait que cette droite est très proche de la diagonal d'où l'erreur est réduite. Le R² de cette fonction est très significatif 0.94 lors de l'apprentissage, et est égal à 0.93 lors de validation. Le NSE de la fonction TANSIG lors de l'apprentissage et la validation est respectivement 0.88 et 0.85, ce coefficient reste significatif.

La performance de la fonction LOGSIG vient après celle TANSIG. Lors de l'apprentissage et de validation les valeurs de R² sont respectivement 0.9 et 0.86, par contre le NSE est 0.83 et 0.74. La fonction PURELIN est la moins performante de modèle CFBP où le R² est respectivement 0.9 et 0.89, le NSE est 0.77 et 0.8. Il est à signaler que les trois droites se situent en dessous de la diagonal ce qui indique que les valeurs simulées sont sous estimées par rapport aux valeurs mesurées. Pour le modèle FFBP, la fonction PURELIN est la plus performante où le R² lors de l'apprentissage et la validation sont respectivement 0.9 et 0.89, le NSE est 0.78 et 0.79. Ces valeurs sont un peu significatives. Suivi de la fonction TANSIG où le R² est respectivement 0.86 et 0.77, le NSE est de 0.63 et 0.61, ces valeurs sont acceptables. La fonction la moins performante est LOGSIG où le R² est 0.88 et NSE est de 0.65 et 0.54. Dans ce cas la performance donnée par le NSE est jugée moyenne.

IV.11.2. Utilisation du modèle perceptron multicouche (MLPNN)

Plusieurs tentatives de simulation par le perceptron multicouche ont été effectuées afin de prédire le transport solide. Pour cela, on a fait varier le nombre de couches cachées, le nombre de neurones tout en gardant la fonction de transfert dans la couche cachée sigmoïde. La base de données disponible a été divisée en deux, soit 70% pour le calage des poids et des biais et 30% pour la validation. Les schémas de simulation les plus importants, de point de vue résultats, retenus sont : la première simulation contient (1-7-5-4-1) c'est-à-dire, la première couche d'entrée a 1 neurone qui représente le paramètre d'entrée (débit liquide Q_l), la deuxième couche qui est la couche cachée avec 6 neurones, la troisième couche qui est la couche cachée avec 5 neurones, la quatrième couche est la couche cachée avec 4 neurones et la dernière couche c'est la couche de sortie qui est le débit solide avec un neurone. La deuxième simulation est constituée de (1-4-1), la troisième simulation contient (1-4-3-1) et la dernière simulation retenue est (1-10-5-2-1). L'architecture du modèle MLPNN1 et les droites de régression lors de l'apprentissage et de validation sont représentées sur les figures IV.14, IV.15 et IV.16.

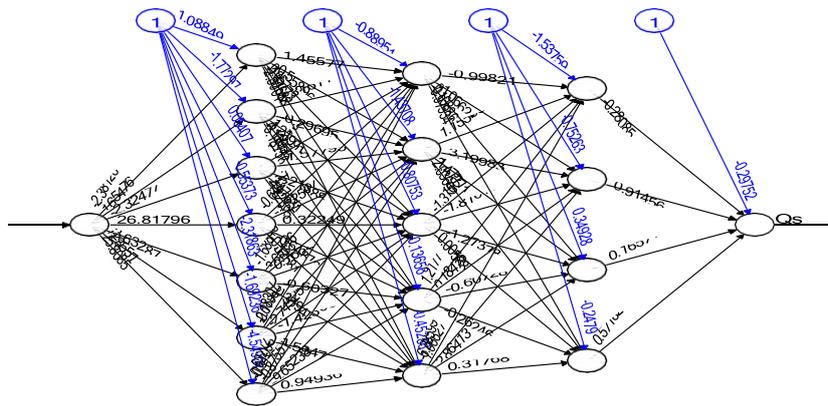


Figure IV.14. Architecture du modèle MLPNN1

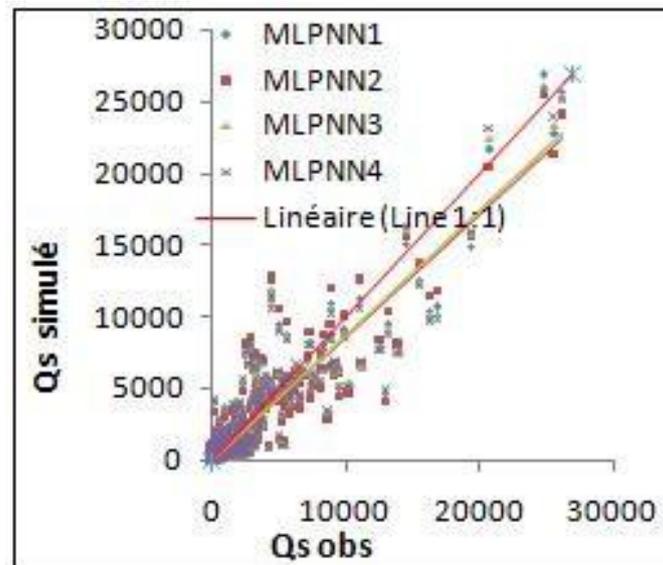


Figure IV.15. Droite de régression lors de training des différents modèles MLPNN

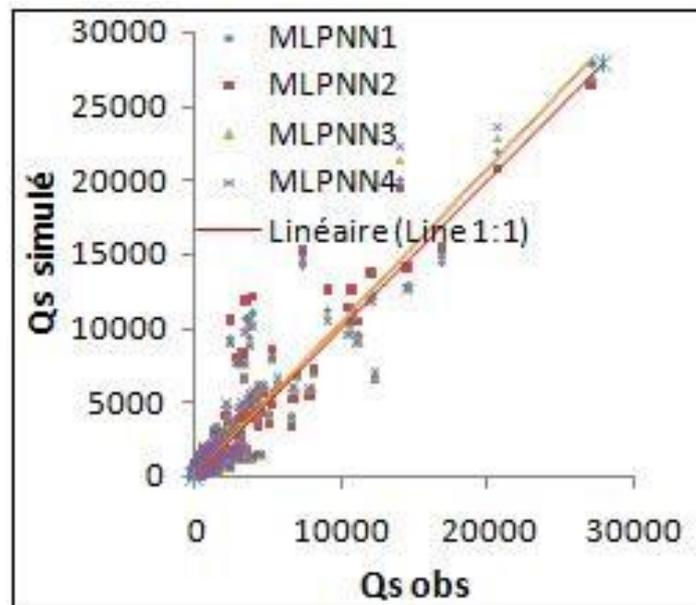


Figure IV.16. Droite de régression lors de validation des différents modèles MLPNN

Selon les figures IV.15 et IV.16, on remarque que les droites de régression sont très proches les uns des autres et l'angle entre ces droites et la droite bissectrice (Line 1 :1), qui est la diagonale, est très proche, cela indique que l'erreur est très réduite et que les valeurs simulées de transport solide sont très proche des valeurs observées. Il est à signaler que lors de training, les droites de régression sont au-dessous de la diagonale, ce qui signifie que les valeurs simulées de transport solide sont sous estimées par rapport à celles observées. Par contre, lors de validation, les droites de régression sont au-dessus de la diagonale, ce qui explique que les valeurs simulées sont légèrement sur estimées.

Les paramètres de performance obtenus sont représentés dans le tableau IV.2.

Tableau IV.3. Paramètres de performance des modèles MLPNN

Paramètres	Training 70%				Validation 30%			
	MLPNN1	MLPNN2	MLPNN3	MLPNN4	MLPNN1	MLPNN2	MLPNN3	MLPNN4
	1-7-5-4-1	1-4-1	1-4-3-1	1-10-5-2-1	1-7-5-4-1	1-4-1	1-4-3-1	1-10-5-2-1
R²	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,94
NSE	0,87	0,85	0,87	0,85	0,85	0,8	0,84	0,83
RMSE	0,022	0,023	0,022	0,022	0,023	0,027	0,024	0,025

Les résultats auxquels nous avons abouti semblent très satisfaisants. Pour tous les schémas de simulation, les valeurs des coefficients R et NSE de l'ensemble de calage et de validation varient respectivement entre 0.93 à 0.94 et 0.80 à 0.87. Ces valeurs indiquent que les résultats sont significatifs et que les valeurs simulées de transport solide sont proches des valeurs observées. Les valeurs de RMSE indiquent que l'erreur est proche de zéro, elle varie entre 0.022 et 0.027. On constate que lors de validation ces valeurs augmentent, mais restent toujours acceptables. Les performances numériques de réseau d'architecture sont plus appréciables pour le modèle MLPNN1 (1-7-5-4-1), en utilisant une couche d'entrée, trois couches cachées, avec 7 neurones de la première couche, 5 neurones pour la deuxième couche et 4 neurones pour la troisième couche et une couche de sortie. On remarque que les coefficients R et NSE lors de calage du modèle MLPNN1 sont respectivement 0.93 et 0.87 et lors de validation les valeurs sont respectivement 0.93 et 0.8. Cela indique que la corrélation entre le transport solide simulé et observé est proche et que ces valeurs sont significatives. Il est important de signaler que lors de validation les valeurs de R et NSE sont légèrement diminuées, cela signifie une légère sensibilité du modèle aux valeurs non vues auparavant. Pour le paramètre d'erreur RMSE lors de calage et de validation les valeurs sont respectivement 0.022 et 0.023, cela suggère que l'erreur est acceptable.

IV.12. Conclusion

La modélisation nous a permis d'évaluer le risque de transport solide au niveau du bassin versant Sébaou par l'utilisation des réseaux de neurones. Le modèle utilisé est le perceptron multicouche (MLPNN), FFBP et CFBP. Pour les modèles FFBP et CFBP on a effectué la simulation avec l'influence des fonctions d'activation TANSIG, LOGSIG et PURELIN. Par contre pour le MLPNN, quatre tentatives de simulation ont été effectuées pour voir la performance du modèle. On peut conclure que :

Chapitre IV : Modélisation de transport solide par les réseaux de neurones artificiels

- Le modèle CFBP a donné des meilleurs résultats par rapport au modèle FFBP ;
- Dans le modèle CFBP la fonction TANSIG a donnée des meilleurs résultats par rapport aux autres fonctions ;
- Dans le modèle FFBP la fonction PURELIN est la plus performante par rapport aux autres fonctions ;
- Le modèle MLPNN a donné des résultats satisfaisants ;
- Dans les tentatives effectuées modèle MLPNN1 a donné des meilleurs résultats par rapport aux autres ;
- Les paramètres de performance R et NSE ont significatifs et variés entre 0.8 à 0,93 ;
- Il est important d'utiliser d'autres modèles de simulation pour améliorer les valeurs prédites de transport solide.

Conclusion générale

Le présent travail s'articule sur la à la quantification du transport solide et cartographie de l'érosion hydrique du sol par l'utilisation du SIG et les réseaux de neurones à l'échelle du bassin versant par l'utilisation du modèle RUSLE sous SIG et les réseaux de neurones artificiels sous le MATLAB. Donc à la lumière de cette étude, on peut conclure les points suivants :

- ✓ Le bassin versant choisi pour cette étude est situé au Nord-Centre de l'Algérie, il s'agit du bassin versant Sébaou avec une superficie de 2500km².
- ✓ La zone étudiée est marquée par un relief très fort représenté par la dénivelée spécifique de l'ordre de 740 m, les classes d'altitudes dominantes sont inférieure à 700 m, cette tranche d'altitude occupe environ 40% du bassin. Cela nous permis de déduire que le bassin de Sébaou est susceptible de fournir une érosion hydrique importante sur certaines régions.
- ✓ L'utilisation du modèle de prévision de perte en sol (RUSLE) sur le bassin versant de l'oued Sébaou sous ArcGIS a permis de :
 - Enregistrer une base de données multi-information, spatialisée sur l'ensemble du bassin versant ;
 - Cartographier tous les facteurs impliqués dans le processus d'érosion à savoir l'érosivité des pluies (R), la topographie (LS), l'érodibilité du sol (K), le couvert végétal (C) et les pratiques antiérosives (P) ;
 - Établir une carte de pertes en sol sur la totalité du bassin versant de l'oued Sébaou;
 - Hiérarchiser les différents secteurs du bassin versant selon leur sensibilité à l'érosion hydrique ;
 - Identifier les secteurs de forte dégradation qui nécessitent des interventions très urgentes ;
 - Mettre à la disposition des autorités responsables un support de base pour l'aide à la décision dans les futurs projets d'aménagements anti érosif du bassin versant.
- ✓ Les résultats de l'application du modèle RUSLE ont montré que la perte moyenne des sols par le phénomène érosif est de l'ordre de 12,95 t/ha/an, cette

valeur dépasse la limite moyenne de tolérance des sols vis-à-vis de l'érosion (7 t/ha/an).

- ✓ Une partie importante de bassin, soit environ 38% de la superficie totale est marquée par un taux d'érosion inférieure à 7 t/ha/an, contre 6% des terres qui montrent une forte perte de sol (supérieur ou égal 30 t/ha/an) et environ 5% de perte en sol est très forte (supérieur ou égal 45 t/ha/an).
- ✓ La carte du risque érosif a montré que le risque n'apparaît pas de manière homogène sur l'ensemble du bassin versant de l'oued Sébaou ; il est qualifié de faible à modéré sur une superficie de 222 500 ha soit 89 %. Dans le reste, soit 11 % le risque d'érosion apparaît plus problématique classé de fort à très fort, soit environ 27 500.
- ✓ La modélisation des transports solides en suspension à la station hydrométrique de Baghlia sur l'oued Sébaou par l'utilisation des réseaux de neurones avec trois modèles, FFBP, CFBP et MLP nous a permis de :
 - Développer des modèles neuronaux efficaces et précis pour la prédiction des transports solides en suspension.
 - Le modèle CFBP a donné des meilleurs résultats par rapport au modèle FFBP ;
 - Dans le modèle CFBP la fonction TANSIG a donnée des meilleurs résultats par rapport aux autres fonctions ;
 - Dans le modèle FFBP la fonction PURELIN est la plus performante par rapport aux autres fonctions ;
 - Le modèle MLPNN a donné des résultats satisfaisants ;
 - Dans les tentatives effectuées modèle MLPNN1 a donné des meilleurs résultats par rapport aux autres ;
 - Les paramètres de performance R et NSE ont significatifs et variés entre 0.8 à 0,93 ;

Perspectives

La présente recherche pourrait être suivie par les perspectives suivantes :

1. Modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Sébaou par l'application d'autres modèles ;
2. Elaboration d'un plan d'aménagement antiérosif sur l'ensemble du bassin de l'oued Sébaou selon la carte du degré de sensibilité de terres à l'érosion hydrique par la classification des secteurs par ordre de priorité, les secteurs de priorité forte sont appelés à être protégés en premier lieu et d'une façon approfondie par un couvert végétal approprié ;
3. La mise à jour ; dans l'avenir, des résultats obtenus par RUSLE pour mieux contrôler le phénomène érosif dans le bassin versant, et puis dégager un autre support de base pour l'élaboration d'un nouveau plan d'aménagements anti érosif ;
4. Validation des résultats du modèle RUSLE par des mesures sur le terrain en effectuant des mesures sur des parcelles sur toute la surface du bassin ;
5. Application des réseaux de neurones employés dans cette étude à d'autres bassins versants ;
6. Utilisation des autres modèles neuronaux sur le bassin sébaou pour améliorer la précision des prédictions.

References Bibliographiques

- Al-Juboori, A.M.** (2022). Solving complex rainfall-Runoff processes in semi-arid regions using hybrid heuristic model. *Water Resources Management* 36, 717–728.
- Allili C., Laignel B., Adjeroud N., Bir H. and Madani K.** (2015). Particulate flow at the mouth of the Soummam watershed (Algeria). *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 35 (1), 204-211.
- Angima, S.D., Stott, D.E., O’neill, M.K., Ong, C.K., Weesies, G.A.** (2003). Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agriculture, ecosystems & environment* 97, 295–308.
- ANRH** (1970). Etude de Transport Solide dans le Nord Algerie. Rapport de L’agence Nationale des Ressources Hydriques. Alger
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R.** (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1): 73–89.
- Arabi, M., & Roose, E.** (1989). Influence de quatre systeme de production en zone méditerranéenne de moyenne montagne en Algérie. *Bulletin Réseau Erosion*, 9, 39-51.
- Bahrami, S., Wigand, E.** (2018). Daily streamflow forecasting using nonlinear echo state network. *Int. J. Adv. Res. Sci. Eng. Technol* 5, 3619–3625.
- Bakker, M. M., Govers, G., Jones, R. A., & Rounsevell, M. D. A.** (2007). The Effect of Soil Erosion on Europe’s Crop Yields. *Ecosystems*, 10(7), 1209-1219. doi: 10.1007/s10021-007-9090-3.
- Benachour M.M.** (2016). Etude de l’érosivité des pluies sur le bassin de la Soummam par le biais de SIG et télédétection. Mémoire de fin d’études, Master en Hydraulique urbaine, ENSH de Blida.
- Ben Hamiche N.** (2015). Contribution à l’étude de l’influence climatique, lithologique et anthropique sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d’un aquifère du Nord-est algérien : Cas de la basse Soummam, Bejaia. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Béjaia.
- Ben Slimane** (2013). *A Guide to Understanding Landslides*, n° 15.
- Boissy, R., Ndiaye, M., Diatta, M., Mbaye, M.** (2022). Utilisation d’un SIG pour l’évaluation et la cartographie des risques d’érosion hydrique par l’Equation Universelle des Pertes en sol Révisée (RUSLE) dans le Département de Saraya (Sénégal). *VertigO- Rev. Électronique En Sci. Environ.* 22.
- Bollinne, A., Rosseau, P.** (1978). L’érodibilité des sols de Moyenne et Haute Belgique. *Bull Soc Géogr Liège* 14, 127–140.
- Bouhsane N.** (2021). La susceptibilité magnétique, outil de cartographie quantifiée de l’érosion-redistribution du sol dans un bassin versant: applications aux bassins Ait Azzouz et Mezguida du Bouregreg. (PhD Thesis). Université Mohammed V Rabat (Maroc).

- Bouzada Nacera** (2013). caractérisation géochimique des eaux souterraines utilisée dans l'irrigation dans les plaines du Cheliff. Thèse de magister, université de Hassiba Ben Bouali Cheliff.
- Bouguerra. S.** (2014). Etude de La Qualité des eaux de transport solide dans l'Oued Rhumel, Université Larbi Ben M'hidi OUM BOUAGHI, Page 21.
- Cekhchoukh F, khadraoui A.** (2016). Contribution de quantification de transport solide par l'approche de régression (cas de bassin du haut et moyen Cheliff), université de Djilali Bounaama khemis Miliana.
- Délusca, K.** (1999). Estimation de l'érosion hydrique des sols à l'aide de l'Équation universelle de perte de sol assistée d'un Système d'information géographique: le cas du bassin versant de la ravine Balan, Haïti. National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada, Ottawa.
- Demmak, A.** (1982). Contribution à l'étude des écoulements solides des cours d'eau d'Algérie, Inst Nat des Ressources Hydrauliques.
- Demuth, H., & Beale, M.** (2002). Neural Network Toolbox User's Guide - Version 4. Natick: The MathWorks.
- Dumolard P.** (1994). Les réseaux de neurones [compte-rendu] Jodoin J.-F. (1994). Les Réseaux de neurones. Principes et définitions. Paris : Hermès. - (1994). Réseaux neuromimétiques. Modèles et applications. Paris. 23-3 pp. 287-288.
- Durand Delga M.** (1969). Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, N. S., Bull. 39, 89-131.
- EL JAZOULI, A.** (2020). Cartographie et modélisation des risques d'érosion hydrique et de glissement de terrain au niveau du bassin amont d'oum er rbia.
- Fournier F.** (1960). Climat et érosion. Presses universitaire de France, Paris, France.
- Georges Koepfler** (2016). Optimisation et algorithmique, ufr de mathématiques et informatique, master 1 mathématiques appliquées, <http://www.math-info.univ-paris5.fr/~gk/OptiAlgo/OptiAlgo.pdf>, 2016.
- Giffort s. d. et Hawkins,** (1978). L'effet splash. No 14.
- Hara, F., Achab, M., Emran, A., Saidi, A., Mahe, G.** (2021). Quantification of water erosion using USLE and RUSLE methods: Application to the Bouregreg sub-watersheds, Morocco. Bull. Inst. Sci. Rabat Sect. Sci. Terre 43.
- Hebb Donald** (1949). The Organization of Behavior. Wiley, New York.
- Henri Pelleray M.** () Etude sommaire des transports solides dans un petit bassin du nord cameron, Service Hydrologique de l'ORSTOM au Cameroun.
- Heusch B.** (1988). L'érosion du Pré Rif occidental : une étude quantitative de l'érosion hydrique.

- Hajji, O., Abidi, S., Mekni, I., Hermassi, T.** (2019). Quantification de l'érosion hydrique en contexte semi-aride méditerranéen (cas du bassin versant d'El Gouazine-Tunisie). *J. Int. Sci. Tech. L'Eau L'Environnement JISTEE* Vol. IV-Numéro.
- Hopfield J.J.** (1982). Neural Networks and physics Systems with emergent collective Computational Abilities. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol 79, pp 2554-2558, Biophysics.
- Hui, S., & Zak, S. H.** (1994). The Widrow-Hoff algorithm for McCulloch-Pitts type neurons. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(6).
- Joannon,** (2005). Dégénération des sols par l'érosion hydrique : quels remèdes en région de grandes cultures, no 8 (s. d.)
- Jules Le Guern** (2022). Pertinence des méthodes acoustiques pour la quantification du transport solide par charriage dans les grands cours d'eau sablo-graveleux ». Université de Tours, 35 allée Ferdinand de Lesseps, Transport sédimentaire, 37200, no 19: 168.
- Kassoul, M., Abdelgader, A., & Belorgey, M.** (1997). Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie. *Revue des sciences de l'eau*, 10(3), 339. doi: 10.7202/705283.
- Khanchoul, K., & Jansson, M. B.** (2008). Sediment rating curves developed on stage and seasonal means in discharge classes for the Mellah wadi, Algeria. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 90(3), 227-233.
- 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. *Cah. Agric.* 30, 7.
- Khenter, K.** (2017). Vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique du bassin versant du barrage de Béni Amrane (w. Boumerdes). (PhD Thesis).
- Laborde. J.P.** (1987). *Éléments d'hydrologie de surface*, p98.
- Laghrouche M.** (2016). Essai de Implémentation d'un réseau de neurones dans un microcontrôleur . University Moulooud Mammeri, page 02.
- Le Bissonnais et al.,** (2002). Les processus d'érosion hydrique en résumé, no 7 (s. d.).
- Le Cun, Y.** (1985). A learning scheme for asymmetric threshold networks. In *Proceedings of Cognitva 85*, pages 599-604, Paris, France.
- Lefkir Abdelouahab, Benkaci Ali Tarik et Nouredine Dechemi.** (2005). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science* » Volume 19, no numéro 3. https://id.erudit.org/iderudit/013542adresse_copiée_une_erreur_s'est_produite.
- Li, H., & Shi, Y.** (2012). Robust H_∞ filtering for nonlinear stochastic systems with uncertainties and random delays modeled by Markov chains. *Automatica*, 48(1), 159–166
- Malet, J.-P., Maquaire, O.** (2004). Hydrological behaviour of earthflows developed in clayshales: investigation, concept and modelling. In Picarelli, L. (Ed).
- Marc Morel** (1999). Acquisition et constitution d'une information hydrologique de base.

Minsky M. et Papert S. (1969). Perceptrons : An introduction to computational geometry. Reissue of the 1988 Expanded Edition with a new foreword by Léon Bottou.

Musy A, Higy C. (2004), « Hydrologie une science de la nature », EPFL-La suisse p324. <http://didac.free.fr>.

Mostephaoui, T., Merdas, S., Sakaa, B., Hanafi, M.T., Benazzouz, M.T. (2013). cartographie des risques d'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol a l'aide d'un système d'information géographique dans le bassin versant d'el hamel (boussaada) algerie. Journal Algérien des régions arides, numéro spécial N°12, ISSN 1112-3273.

Neboit R. (2010). L'Homme et l'érosion. Editeur Presses Universitaires Blaise Pascal, collection Nature & Sociétés.

Nerrand, O., Roussel-Ragot, P., Personnaz, L. and Dreyfus, G. (1993). Neural networks and non-linear adaptive filtering: unifying concepts and new algorithms. Neural Computing 5, 165—199.

Ouvry (2010). Dégradation des sols par l'érosion hydrique : quels remèdes en région de grandes cultures », no 9 (s. d.).

Pandey S., Kumar P., Zlatic M. (2021). Recent advances in assessment of soil erosion vulnerability in a watershed, International Soil and Water Conservation Research, <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.03.001>

Parker, D B. (1985). Learning-logic. Technical report, TR-47, Sloan School of Management, MIT, Cambridge, Mass.

Parveen, R., Kumar, U. (2012). Integrated approach of universal soil loss equation (USLE) and geographical information system (GIS) for soil loss risk assessment in Upper South Koel Basin, Jharkhand.

Payet, E., Dumas, P., Pennober, G. (2012). Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana. Vertigo 11.

Perrodon, A, (1957). « Étude géologique des bassins néogènes sub-littoraux de l'Algérie occidentales » Publication, service carte géologique de l'Algérie, bulletin numéro 12.

Puech C. (1993). Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants. Thèse de doctorat, Université J.Fourier, 202p.

Pingale, S.M., Chandra, H., Sharma, H.C., Mishra, S.S. (2012). Morphometric analysis of Maun watershed in Tehri-Garhwal district of Uttarakhand using GIS. International Journal of Geomatics and Geosciences 3, 373–387.

Printemps, J. (2007). Estimation et spatialisation de l'érosion hydrique des sols en Nouvelle-Calédonie, utilisation de l'équation universelle de perte de sol assistée d'un SIG sur les communes de Voh, Koné et Pouembout. Mém. Master 2, 71.

Raclot, D. (2021). Érosion hydrique des sols en Méditerranée (PhD Thesis). Université montpellier.

Renard, K.G. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.

Rose C. W., 1994. Research Progress on Soil Erosion Processes and a Basis for Soil Conservation Practices. In :R. Lal (ed.). Soil Erosion. Research Methods. Soil and Water Conservation Soc. And St. Lucie Press, 2nd Edition, 159-178.

Rouch (1963). Hydrologie de surface.

Roy B. & Bouyoussou D. (1993). Méthodes multicritères d'aide à la décision Economica PARIS 1993. 21. RYAN J., (1982). A perspective o

Sader, S.A., Winne, J.C. (1992). RGB-NDVI colour composites for visualizing forest change dynamics. Int. J. Remote Sens. 13, 3055–3067. <https://doi.org/10.1080/01431169208904102>

Smaili M. et Touati A. (2018). Contribution à la caractérisation des eaux de cinq sources dans le bassin versant de Boussellam, Sud-est de Bejaia-Algérie. Mémoire de Master en Toxicologie Industrielle et Environnementale, Université de Béjaia.

Snelder et Bryan (1979). Le couvert végétal agit dans le sens de retarder l'érosion du sol », no 13.

Sogreah (1969). Etude général des aires d'irrigation et d'assainissement agricole en Algérie. Dossier. Alger : ministère de l'agriculture et de la réforme agraire.

Tixeront, J. (1960). Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. In: Assemblée Générale d'Helsinki 25 juillet-6 août, 26-41. IAHS Publ. no. 53.

Tahiri, M., Tabyaoui, H., El Hammichi, F., Achab, M., Tahiri, A., El Hadi, H. (2017). Quantification de l'érosion hydrique et de la sédimentation à partir de modèles empiriques dans le bassin versant de Tahaddart (Rif nord occidental, Maroc). Bull. L'Institut Sci. Rabat Sect. Sci. Terre 39, 87–101.

Touaibia. B. (2004). Manuel Pratique d'Hydrologie. Presses Madani Frères. Blida. Algérie.

Touaibia B. (1999). Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales: bassin versant de l'Oued Mina. Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 44(6).

Van der Knijff, J.M., Jones, R.J.A., Montanarella, L. (2000). Soil erosion risk assessment in Italy. European Soil Bureau. European Commission, JRC Scientific and Technical Report, EUR 19044 EN, 52 pp.

Vanmaercke, Poesen, Broeckx, and Nyssen (2014). A Guide to Understanding Landslides. « 5 A Guide to Understanding Landslides ». The Landslide Handbook, no 5 (s. d.). USGS website. <http://pubs.usgs.gov/circ/1325/>.

Walter H.Graf-M.S. Altinakar (2000). Hydraulique fluviale : écoulement et phénomène de transport solide dans les canaux à géométrie simple.

- Werbos E.** (1975). Beyond regression: New tools for prediction and analysis in behavioral sciences. (Doctoral thesis and published report). Cambridge, MA: Harvard University.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D.** (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D.** (1965). 17 modèles pour estimer l'érosion hydrique. 1996, s. d. S. d <https://planet-terre.ens-lyon.fr> (Consulté le 08/04/2021).
- Xavier ANTOINE , Pierre DREYFUSS et Yannick PRIVAT** (2007). Introduction `a l'optimisation : aspects théoriques, numériques et algorithmes. Nancy.
- Xinxing Pan, Lee, B., & Chunrong Zhang.** (2013). A comparison of neural network backpropagation algorithms for electricity load forecasting. 2013 IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems (IWIES).
- Yaméogo, A., Somé, Y.S.C., Palé, S., SIRIMA, B.A., DA, D.É.C.** (2021). Application de SIG/RUSLE à l'estimation de l'érosion par ruissellement en nappe dans le bassin versant supérieur de la Sissili (Burkina Faso). *Geo-Eco-Trop* 45, 299–310.
- Yue, Z., Songzheng, Z., Tianshi, L.** (2011). "Bayesian regularization BP Neural Network model for predicting oil-gas drilling cost," *Business Management and Electronic*.
- Zekri N. et Tounkob A.** (2021). L'érosion hydrique dans le bassin versant de Tafna. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, no 12.
- Zeghmar Amer , Marouf Nadir et Mokhtari Elhadj** (2024). Machine learning approach for RUSLE-based soil erosion modeling in Beni Haroun dam Watershed, Northeast Algeria. *Earth Science Informatics*, <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01305-7>.

Webographie :

[Anonyme 1] : https://library.ensh.dz/images/site_lamine/pdf/these_master/2017/6-0041-17

[Anonyme 2] : <https://planet-terre.ens-lyon.fr> (Consulté, 2021)

[Anonyme 3] : <http://didac.free.fr>. 2021

[Anonyme 4] : josich.over-blog.com/article...2021