



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

Université Blida 1

Faculté de Technologie

Département des Sciences de l'Eau et Environnement

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Ressources hydrauliques

Thème :

Application des méthodes de géotraitement pour la cartographie du risque érosif par introduction des indices morphométriques

- Cas du bassin versant de Boukourdane -

Par

HADRI Mounia

Devant le jury composé de :

M. Benaziza Ali	MCB	Président
M. Kara Omar Abdellah	MCB	Examineur
Mme. Benkaci Souhila	MCB	Promotrice

Année universitaire : 2022 /2023

Résumé

Cette étude consiste à l'évaluation du risque érosif au niveau du bassin versant d'oued El-Hachem, par utilisation des indices morphométriques et par application des méthodes de géotraitement via le logiciel ArcGIS. Les résultats ont révélé un faible risque érosif sur l'ensemble du bassin. Ce qui confirme le fait que le barrage de Boukourdane a souvent présenté un faible taux d'envasement. L'utilisation des levés bathymétriques nous a permis d'estimer un volume érodé à environ 27,41 Mm³ et un taux de sédimentation de 24% durant une période de 15 ans (2004-2019).

Mots-clefs : cartographie, érosion, Boukourdane, Oued El-Hachem, indices morphométriques.

Abstract

This study aims to assess the erosion risk in the Oued El-Hachem watershed by utilizing morphometric indices and applying geoprocessing methods using ArcGIS software. The results revealed a low erosion risk throughout the watershed, confirming the low sedimentation rates typically observed at the Boukourdane Dam. The use of bathymetric surveys allowed us to estimate an eroded volume of approximately 27.41 Mm³ and a sedimentation rate of 24% over a 15-year period (2004-2019).

Key words: mapping, erosion, Boukourdane, Oued El-Hachem, morphometric indices.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم مخاطر التآكل في حوض وادي الهاشم باستخدام المؤشرات المورفومترية وتطبيق أساليب المعالجة الجغرافية باستخدام برنامج ArcGIS. كشفت النتائج عن وجود مخاطر منخفضة للتآكل في جميع أنحاء الحوض، مما يؤكد معدلات الترسيب المنخفضة التي غالبًا ما تلاحظ في سد بوكوردان. استخدام الدراسات الباثيمترية للسد سمح لنا بتقدير حجم التآكل بحوالي 27.41 مليون متر مكعب ومعدل ترسيب يبلغ 24% على مدار فترة 15 عامًا (2004-2019).

الكلمات المفتاحية: رسم الخرائط، تآكل التربة، بوكوردان، واد الهاشم، مؤشرات مورفومترية.

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu de m'avoir donné la force pour achever mon projet.

Je tiens à remercier et témoigner ma reconnaissance envers mon encadrante Madame BENKACI qui n'a ménagé aucun effort pour la bonne réussite de ce travail, ainsi que mes enseignants qui ont contribué à ma formation.

Mes sincère remerciements à tous les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail.

Sans oublier mes parents qui m'ont soutenu et cru en moi durant toute ma formation.

À tous « MERCI »

Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail à tous ceux qui m'ont encouragé durant Toute la période de réalisation du projet.

En particulier :

- *À mes chers parents.*

- *À mes chers frères « Mohamed et Yacine ».*

- *À ma chère sœur « Rania ».*

- *Et à tous mes amis et collègues.*

Table des Matières

Résumé	I
Remerciement.....	II
Dédicaces.....	III
Table des Matières.....	IV
Liste des Abréviations	VII
Liste des Tableaux	VIII
Liste des Figures.....	VIII
Introduction Générale	1

Chapitre 1 : Phénomène d'érosion

1.1. Erosion.....	3
1.2. Type d'érosion	3
1.2.1. Erosion éolienne	3
1.2.2. Erosion aratoire.....	3
1.2.3. Erosion glacière	3
1.2.4. Erosion hydrique	3
1.3. Processus de l'érosion hydrique.....	4
1.4. Formes de l'érosion hydrique	4
1.4.1. Erosion en nappe	4
1.4.2. Erosion linéaire.....	5
1.4.3. Erosion en masse	5
1.5. Facteur influençant l'érosion hydrique	6
1.5.1. Pluviométrie	6
1.5.2. Topographie du terrain	6
1.5.3. Végétation.....	6
1.5.4. Sol.....	7

1.5.5. Activités humaines	7
1.6. Méthodes de calcul l'érosion hydrique.....	7
1.6.1. Équation universelle de perte en sol	7
1.6.2. Projet de Prévision de l'Érosion Hydrique.....	11
1.6.3. Outil d'Évaluation des Sols et des Ressources en Eau	11
1.7. Le transport solide	11

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

2.1. Situation géographique	13
2.2. Caractéristiques physiographiques.....	15
2.2.1. Caractéristiques géométriques	15
2.2.2. Caractéristiques du relief	16
2.2.3. Caractéristiques de forme	18
2.3. Réseau hydrographique.....	22

Chapitre 3 : Élaboration de la carte de sensibilité à l'érosion au niveau du BV de Boukourdane

3.1. Les données exploitées pour la mise en place du SIG	25
3.1.1. Données cartographiques.....	25
3.1.2. Levés bathymétriques	25
3.2. Logiciels utilisés	25
3.2.1. Google Earth.....	25
3.2.2. Global Mapper.....	25
3.2.3. ArcGIS.....	25
3.3. Traitement et génération des cartes thématiques	26
3.3.1. Indice du pouvoir érosif (SPI)	26
3.3.2. Indice de transport-sédimentation (STI).....	28
3.3.3. Indice topographique d'humidité (TWI)	29
3.3.4. Indice de rugosité topographique (TRI)	31

3.3.5.	Taux de délivrance des sédiments (SDR).....	32
3.3.6.	Estimation des matériaux potentiels (DFTI)	34
3.4.	Élaboration de la carte de sensibilité à l'érosion	35
3.4.1.	Superposition des cartes par l'application ModelBuilder.....	37
3.4.2.	Edition de la carte	37

Chapitre 4 : Cartographie des zones d'érosion et de dépôt au niveau de la retenue du barrage de Boukourdane

4.1.	Diagramme méthodologique.....	39
4.2.	Évolution du fond de la retenue du barrage de Boukourdane.....	39
4.3.	Estimation des volumes des sédiments déposés ou érodés durant les années 2004-2019.....	40
4.3.1.	Identification des zones d'érosion et de dépôt au niveau de la retenue du barrage de Boukourdane	40
4.3.2.	Volume des sédiments érodés.....	41
4.3.3.	Volume des sédiments déposés	42
4.3.4.	Diagramme Erosion-Dépôt.....	43
	Conclusion Générale.....	45
	Références	46

Liste des Abréviations

3D : 3 Dimensions

AEP : Alimentation en Eau Potable

BV : Bassin Versant

DFTI : Debris Flow Topographic Index

GPS : Global Positioning System

MNT : Modèle Numérique du Terrain

MUSLE : Modified Universal Soil Loss Equation

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

RBV : Riffle Bioassessment by Volunteers

RUSLE : Revised Universal Soil Loss Equation

SDR : Sediment Delivery Ratio

SIG : Système d'Information Géographique

SPI : Soil Power Index

STI : Sediment Transport Index

SWAT : Soil and Water Assessment Tool

TRI : Topographic Ruggedness Index

TWI : Topographic Wetness Index

USLE : Universal Soil Loss Equation

WEPP : Water Erosion Prediction Project

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : Érodabilité des différentes unités pédagogiques.	9
Tableau 1.2 : les valeurs du facteur C par type d'occupation du sol.	10
Tableau 2.1 : Classement ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente global	21
Tableau 2.2 : Classement ORSTOM du relief à partir de la dénivelée spécifique.....	22
Tableau 2.3 : Caractéristiques physiographiques de la zone d'étude.	22

Liste des Figures

Figure 1.1 : Phases principales de l'érosion et sédimentation.....	4
Figure 1.2 : Différentes formes d'érosion en masse [12].	6
Figure 2.1 : Les limites du bassin versant à l'amont du barrage de Boukourdane. Calcul des auteurs via ArcGIS.	13
Figure 2.2 : Représentation 3D du bassin versant d'Oued El-Hachem. Calcul des auteurs via ArcScene.....	14
Figure 2.3 : Carte altimétrique du bassin versant d'oued El Hachem. Calcul des auteurs via ArcGIS.....	15
Figure 2.4 : Courbe hypsométrique de la zone d'étude.	16
Figure 2.5 : Carte hypsométrique de la zone d'étude. Calcul des auteurs via ArcGIS.	17
Figure 2.6 : Rectangle équivalent du bassin versant d'Oued El Hachem.....	20
Figure 2.7 : Diagramme méthodologique du réseau hydrographique	23
Figure 2.8 : Classification du réseau hydrographique. Calcul des auteurs via ArcGIS.	24
Figure 3.1 : Schéma de calcul de SPI par l'application ModelBuilder sur ArcGIS.....	27
Figure 3.2 : Carte d'indice du pouvoir érosif du BV Oued El-Hachem. Calcul des auteurs via ArcGIS.....	27
Figure 3.3 : Schéma de calcul de STI par l'application ModelBuilder sur ArcGIS.....	28
Figure 3.4 : Carte d'indice de transport-sédimentation du BV Oued El-Hachem. Calcul des auteurs via ArcGIS.	29
Figure 3.5 : Schéma de calcul de TWI par l'application ModelBuilder sur ArcGIS.	30
Figure 3.6 : Carte d'indice topographique d'humidité du BV Oued El-Hachem. Calcul des auteurs via ArcGIS.	30
Figure 3.7 : Schéma de calcul de TRI par l'application ModelBuilder sur ArcGIS.	31

Figure 3.8 : Carte d'indice de rugosité topographique du BV Oued El-Hachem. Calcul des auteurs via ArcGIS.	32
Figure 3.9 : Schéma de calcul de SDR par l'application ModelBuilder sur ArcGIS.	33
Figure 3.10 : Carte du taux de délivrance des sédiments du BV Oued El-Hachem. Calcul des auteurs via ArcGIS.	33
Figure 3.11 : Schéma de calcul de DFTI par l'application ModelBuilder sur ArcGIS.	34
Figure 3.12 : Carte de l'estimation des matériaux potentiels du BV Oued El-Hachem. Calcul des auteurs via ArcGIS.	34
Figure 3.13 : Diagramme méthodologique pour la réalisation de la carte de sensibilité à l'érosion.	36
Figure 3.14 : Schéma de superposition des cartes par l'application ModelBuilder sur ArcGIS.	37
Figure 3.15 : Carte de sensibilité à l'érosion des sols du BV d'Oued El-Hachem. Calcul des auteurs via ArcGIS.	38
Figure 4.1 : Schéma du diagramme méthodologique pour l'élaboration des cartes thématique sur l'application ModelBuilder.	39
Figure 4.2 : Évolution du volume de dépôts durant la période 2004-2019. Calcul des auteurs via ArcGIS.	40
Figure 4.3 : Identification des zones d'érosion et de dépôts au niveau de la retenue du barrage de Boukourdane. Calcul des auteurs via ArcGIS.	41
Figure 4.4 : Calcul des volumes des sédiments érodés au niveau de la retenue du barrage de Boukourdane. Calcul des auteurs via ArcGIS.	42
Figure 4.5 : Calcul des volumes des sédiments déposés au niveau de la retenue du barrage de Boukourdane. Calcul des auteurs via ArcGIS.	43
Figure 4.6 : Diagramme Erosion-Dépôt. Calcul des auteurs via ArcGIS.	44

Introduction Générale

Introduction Générale

L'érosion est un phénomène omniprésent dans de nombreux environnements. Elle présente des répercussions importantes sur les écosystèmes et la biodiversité. Dans les pays méditerranéens en particulier, l'érosion est largement répandue et ses effets sont amplifiés par divers facteurs tels que l'intensification agricole, la dégradation des terres et les variations climatiques extrêmes.

En raison des conséquences néfastes de l'érosion, il est crucial d'identifier les zones les plus sujettes à ce phénomène afin de les protéger en priorité. Une évaluation quantitative de l'érosion permet de déterminer les zones à haut risque, où les mesures de conservation des sols et de gestion des terres doivent être mises en place de manière proactive. L'utilisation des systèmes d'informations géographiques permet une analyse rapide et efficace des risques d'érosion.

Dans ce cadre, notre étude vise à cartographier le risque d'érosion dans le bassin versant d'Oued El-Hachem et à analyser son évolution dans la retenue du barrage de Boukourdane. Pour cela, nous avons utilisé une approche basée sur l'introduction des indices morphométriques par implémentation des méthodes de géotraitement dans un environnement SIG.

Notre mémoire est structuré en quatre chapitres, chacun abordant des aspects spécifiques liés à la cartographie du risque érosif au niveau du BV de Boukourdane.

Le premier chapitre présente une revue de la littérature sur le phénomène d'érosion, en examinant ses différents types, ses formes, les facteurs influençant l'érosion hydrique ainsi que les méthodes de calcul associées.

Dans le deuxième chapitre, une présentation détaillée de la zone d'étude est réalisée, mettant en évidence le barrage de Boukourdane, son bassin versant et ses principales propriétés. Cette présentation contextuelle est essentielle pour comprendre les caractéristiques géographiques spécifiques et les enjeux liés à la gestion du risque érosif dans cette région.

Le chapitre trois est articulé principalement sur l'élaboration de la carte de sensibilité à l'érosion au niveau du bassin versant de Boukourdane. Les indices morphométriques

introduits tels que : le SPI, le STI, le TWI, le TRI, le SDR et le DFTI ont été présentés et expliqués en détail. Les cartes correspondantes de ces indices ont été établies par l'application ModelBuilder via le logiciel ArcGIS, La carte de sensibilité à l'érosion au niveau de notre région d'étude a été obtenue par la superposition de l'ensemble des indices.

Le quatrième et dernier chapitre, a fait l'objet de la cartographie des zones d'érosion et de dépôt, spécifiquement au niveau de la retenue du barrage de Boukourdane. Ce chapitre met en évidence les résultats obtenus à partir du chapitre précédent et des données de terrain également, permettant de localiser et d'évaluer les zones sujettes à l'érosion et celles où les dépôts peuvent se produire dans la retenue du barrage.

Chapitre 1 :

Phénomène d'érosion

1.1. Erosion

L'érosion est définie comme le détachement et le transport des particules de sol par l'action de l'eau, la glace, le vent et d'autres facteurs [1]. Bien que l'érosion provoque une dégradation du sol, elle entraîne aussi une dégradation de la qualité des eaux [2].

1.2. Type d'érosion

La compréhension des différents types d'érosion est importante pour comprendre l'impact des forces naturelles dans la formation de notre environnement et comment protéger l'environnement et les ressources naturelles [3].

1.2.1. Erosion éolienne

L'érosion éolienne est définie comme la résultante de l'action mécanique exercée par le vent sur la surface du sol. Évidemment, plus le vent est fort, régulier et rempli de poussières et moins il y a d'obstacles sur son chemin, plus sa force d'érosion est grande [4].

1.2.2. Erosion aratoire

En vue de préparer le terrain pour la culture, le travail du sol est une activité essentielle qui consiste à retourner la terre en la labourant [5]. Cette activité provoque l'arrachement et le déplacement des particules du sol.

1.2.3. Erosion glacière

L'érosion glacière est définie comme l'arrachement et le transport des particules du sol où l'agent est la glace. La glace modifie de façon mécanique et chimique le substrat rocheux sur lequel elle repose [6].

1.2.4. Erosion hydrique

L'érosion hydrique est définie comme étant l'ensemble de processus qui à la fois arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt par l'action de l'eau. Ce type d'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol et ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre [7].

1.3. Processus de l'érosion hydrique

Le processus d'érosion hydrique est influencé par la pluviométrie, la topographie, la texture du sol, la couverture végétale ainsi que l'action anthropique [8], donc elle est difficile à mesurer globalement. Tout d'abord, les gouttes de pluie brisent les mottes de terre et projettent les particules désagrégées en tous sens [9]. Ce mécanisme appelé « effet de Splash » (*Fig.1.1*), dépend de la structure de la pluie, réduit la perméabilité du sol par effet de battance. Le ruissellement de l'eau fait que les particules du sol détachées se transportent de leur emplacement initial et se déposent lorsque le débit diminue.

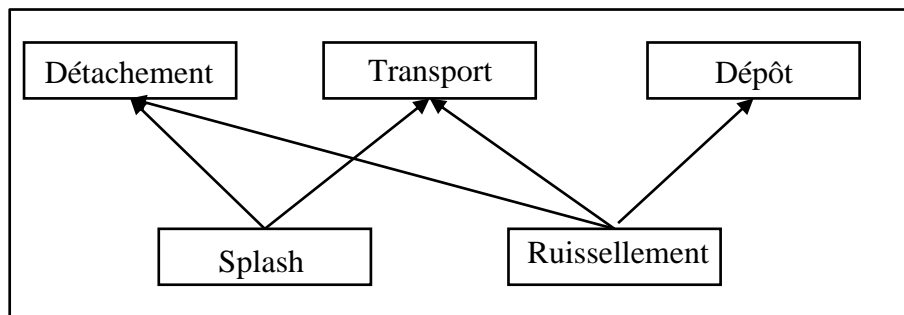


Figure 1.1 : Phases principales de l'érosion et sédimentation

1.4. Formes de l'érosion hydrique

L'érosion hydraulique peut prendre plusieurs formes, dont chacune est causée par différents mécanismes. Les formes d'érosion hydrique se produisent uniquement lorsque la capacité de rétention d'eau du sol est atteinte ou lorsque l'eau rencontre un obstacle qui empêche son infiltration dans le sol [10].

1.4.1. Erosion en nappe

On parle d'érosion en nappe lorsque les particules sont arrachées sous l'effet de Splash (impact des gouttes de pluies), qui s'applique à toute la surface du sol, il s'agit d'une érosion diffuse [11]. Le transport des particules arrachées s'effectue par le ruissellement en nappe. Ce phénomène est observé sur les pentes faibles où l'eau ne peut pas se concentrer. L'érosion en nappe entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de sa surface. Ainsi, une érosion significative de 15 à 30 t/ha/an correspond à une diminution de hauteur de 1 à 2 millimètres d'une année à l'autre [12].

1.4.1.1. Facteurs influençant l'érosion en nappe

- 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 avant les pluies, c'est à dire l'état du sol [12].

1.4.1.2. Signes de caractérisation de l'érosion en nappe

- L'apparition de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés ;
- La remontée de cailloux à la surface du sol [12].

1.4.1.3. Conséquences de l'érosion en nappe

- Le nivellement de la surface du sol ;
- La squelettisation des horizons superficiels ;
- Le décapage entraînant l'apparition de taches claires [12].

1.4.2. Erosion linéaire

Ce type d'érosion intervient à la suite du ruissellement. Dans un premier temps, des flaques se forment. En débordant, les flaques communiquent entre elles et des lignes d'écoulement limitées dans l'espace apparaissent selon la ligne de plus grande pente. L'érosion linéaire est donc un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et a acquis une énergie cinétique capable d'entailler le sol et d'emporter des particules de plus en plus grosses: non seulement des argiles et des limons comme l'érosion en nappe sélective, mais des graviers ou des cailloux et des blocs lorsqu'il sera organisé en ravines [12].

1.4.3. Erosion en masse

Les mouvements de masse (*fig.1.2*) concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique. Leur cause (lents ou rapides) est à rechercher dans le déséquilibre entre d'une part, la masse de la couverture pédologique, de l'eau qui s'y trouve stockée et des végétaux qui la couvrent et d'autre part, les forces de frottement de ces matériaux sur le socle de roche altérée en pente sur lequel ils reposent (pente limites de 30 à 40 degrés = 65 %) [12].

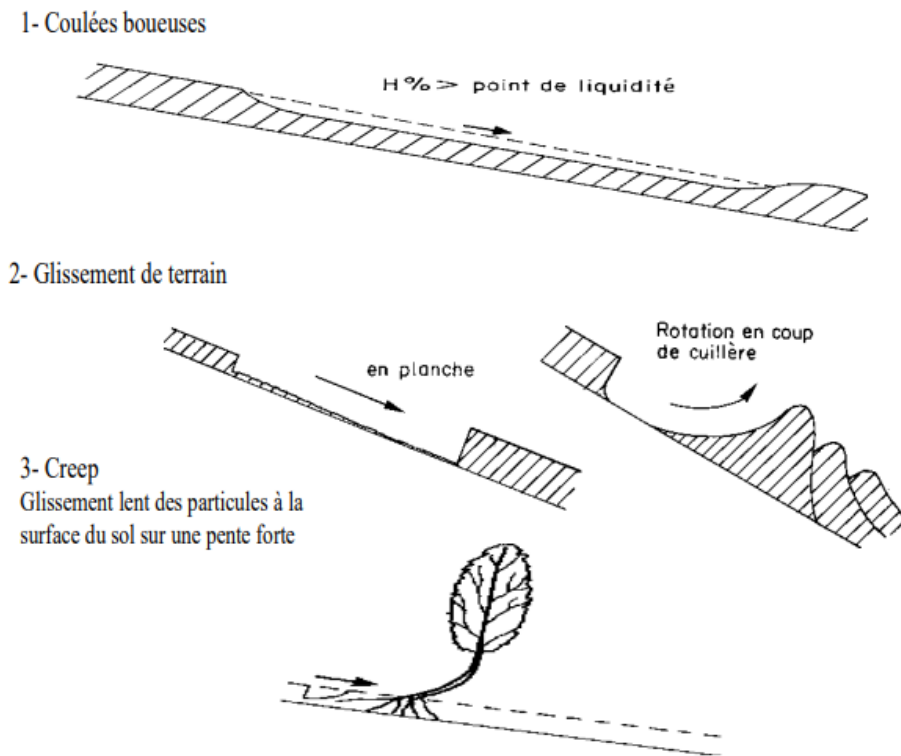


Figure 1.2 : Différentes formes d'érosion en masse [12].

1.5. Facteur influençant l'érosion hydrique

Bien que l'eau soit définie comme un agent morphogène moteur de l'érosion, d'autres facteurs interviennent alors dans ce processus et conditionnent son impact. Multiples sortes d'activités anthropiques, pratiques agricoles, exploitations forestières, pâturages, tendent à accélérer les processus d'érosion d'une façon considérable [13].

1.5.1. Pluviométrie

Les précipitations sont la cause principale de l'érosion hydrique. La pluie détruit les agrégats puis arrache et transporte les matériaux [14].

1.5.2. Topographie du terrain

La forme du terrain peut affecter l'érosion du sol en déterminant comment l'eau s'écoule à la surface. Les fortes pentes accélèrent l'érosion tandis que les pentes douces la réduisent [15].

1.5.3. Végétation

La couverture végétale présente un facteur important pour la protection du sol contre l'érosion. À l'égard de l'augmentation de la capacité d'infiltration du sol, une partie de la pluie tombe directement sur la végétation ce qui augmente la capacité d'infiltration du sol et diminue l'effet de « Splash » [10].

1.5.4. Sol

L'érodibilité du sol dépend de la capacité d'infiltration du sol, de la stabilité structurale, de la texture et de la teneur en matière organique [14].

1.5.5. Activités humaines

Les activités humaines, telles que l'agriculture, exploitations forestières, les développements immobiliers et les activités minières, peuvent influencer l'érosion hydrique en perturbant le sol, la végétation et la topographie du terrain [14].

1.6. Méthodes de calcul l'érosion hydrique

Le choix du modèle dépend de la disponibilité des données et des conditions de la zone d'étude. Bien que ces modèles soient largement utilisés, ils présentent certaines limites, telles que des problèmes d'incertitude liés à la nature empirique simplifiée du modèle et de ses sous-composantes, des problèmes d'incertitude liés à la disponibilité des données, et leur incapacité à prendre en compte les pertes de sol dues à l'érosion en rigole.

1.6.1. Équation universelle de perte en sol

L'équation universelle de perte en sol (USLE), l'Équation Universelle de Perte en Sol Révisée (RUSLE) et l'Équation Universelle de Perte en Sol Modifiée (MUSLE) sont tous des modèles de prédiction de l'érosion des sols [16].

Ces modèles prennent en compte des facteurs tels que les précipitations, l'érodibilité du sol, la longueur et la pente du versant, et l'usage des terres et la couverture végétale [16]. Le RUSLE est une version plus récente de l'USLE qui a été mise à jour pour inclure des facteurs supplémentaires [17]. Le MUSLE est une version simplifiée de l'USLE souvent utilisée dans des petits sous bassins [18].

1.6.1.1. Le modèle USLE

L'équation de USLE permet d'évaluer les pertes annuelles de sols (A) comme produit de six facteurs : l'érosivité de pluie (R), l'érodabilité des sols (K), la longueur et l'inclinaison de pente (LS), la couverture végétale ainsi que les pratiques de conservation du sol (P).

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

Où :

A : représente les pertes en sol (t/ha/an) ;

R : est l'érosivité de pluie (MJ.mm/ha/H/an) ;

K : est l'indice d'érodabilité du sol (t.ha.H/ha/MJ/mm) ;

LS : est le facteur de longueur et de pente.

C : est l'indice de culture, qui prend en compte l'influence des pratiques culturales et de la couverture végétale.

P : est le facteur de conservation du sol.

1.6.1.2. Le modèle RUSLE

C'est la version révisée de USLE. Plusieurs améliorations sont réalisées pour la détermination des différents facteurs. Ce modèle est écrit de manière similaire à l'USLE :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (2)$$

1.6.1.3. Le modèle MUSLE

MUSLE est la version modifiée de USLE. Ce modèle remplace le facteur d'érosivité de pluie par les débits de pointe instantanés et le facteur total du ruissellement pour prédire l'érosion du sol lors d'une averse. Sa formule s'écrit comme suit :

$$A = 11.8(Q \times q_p)^{0.56} \times K \times LS \times C \times P \quad (3)$$

Où :

Q : représente le volume de ruissellement consécutif à l'averse (m³)

q_p : représente le débit de pointe (m³/s)

1.6.1.4. Les facteurs des modèles

- **Érosivité de pluie (R)**

Il représente l'effet du ruissellement et de l'impact des gouttes de pluies (énergie cinétique).

- **Selon USLE et RUSLE :**

$$R = -823.8 + 5.213P \quad (4)$$

Avec : P : pluie annuelle

- **Selon MUSLE :**

$$R = 11.8(Q \times q_p)^{0.56} \quad (5)$$

Avec :

Q : volume de ruissellement consécutif à l'averse (m³)

q_p : débit de pointe (m³/s)

- **Érodabilité du sol (K)**

Il représente la détachabilité des particules terreuses sous l'action de l'eau.

$$K = 2,77 \times 10^{-6} \times M^{1.14} \times (12 - MO) + 0,043 \cdot (b - 2) + 0,033 \times (c - 3) \quad (6)$$

Avec :

M = (pourcentage Limons + pourcentage sable très fin) x (100 - pourcentage argiles)

MO : teneur en matière organique

b : structure du profil (1 < b < 4)

c : capacité d'infiltration du sol (1 < c < 6)

Le tableau 1.1 suivant illustre les valeurs du facteur d'érodabilité K en fonction du sol.

Tableau 1.1 : Érodabilité des différentes unités pédagogiques.

Type du sol	K métrique
Sol peu évolué lithique	0.32
Sol peu évolué régosolique	0.44
Sol peu évolué d'apport alluvial	0.39
Sol peu évolué d'apport colluvial	0.27
Vertisol	0.36
Sol calcimagnésique-rendzine	0.27
Sol calcimagnésique brun calcaire modaux	0.23
Sol calcimagnésique brun calcaire verticale	0.22
Sol fersiallitique	0.6

- **Facteur LS**

C'est le facteur topographique qui est en fonction de la longueur de la pente et de son angle.

- **Selon USLE**

$$LS = \left(flow\ accumulation \times \frac{resolution}{22.1} \right)^m \times (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065) \quad (7)$$

- Selon RUSLE

$$LS = \left(flow\ accumulation \times \frac{resolution}{22.1} \right)^m \times (0.065 + 0.045 \times S + 0.0065 \times S^2) \quad (8)$$

- Selon MUSLE

$$LS = 1.4 \times \left(\frac{A_s}{22.1} \right)^{0.4} \times \frac{\sin(\theta \times 0.01745)^{1.4}}{0.09} \quad (9)$$

• Taux de couverture du sol (C)

Il est fonction de l'indice de végétation normalisées (NDVI). Il est donné par l'équation suivante :

$$C = 0.9167 - NDVI \times 1.167 \quad (10)$$

Où :

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (11)$$

Avec :

IR = valeurs de pixel du canal infrarouge ;

R = valeurs de pixel du canal rouge.

Tableau 1.2 : les valeurs du facteur C par type d'occupation du sol.

Types d'occupation du sol	Facteur C
Badlands/Terrains incultes	0.75
Culture/Arboriculture	0.25
Oliviers	0.28
Reboisement	0.15
Forêt claire	0.08

• Pratiques de conservation du sol (P)

Le facteur P représente l'effet des pratiques de conservation sur les processus d'érosion hydrique. Il varie en fonction des techniques de conservation appliquées dans le bassin versant, allant de 0 dans les zones bien protégées à 1 en l'absence de pratiques de conservation.

1.6.2. Projet de Prédiction de l'Érosion Hydrique

Le modèle « Projet de Prédiction de l'Érosion Hydrique » est connu sous son acronyme anglais : WEPP (Water Erosion Prediction Project). Il est largement utilisé pour simuler l'érosion hydrique et le transport des sédiments dans différentes régions géographiques [19].

Le modèle WEPP est utilisé en conjonction avec des données climatiques d'entrée, et les estimations à long terme sont basées sur l'érosion cumulée sur la période couverte par ces données [19].

Pour intégrer le modèle WEPP dans les SIG, un outil spécifique a été développé, connu sous le nom de Geospatial Modelling of Soil Erosion (GEMSE). Cet outil est composé de plusieurs bases de données, notamment des données climatiques, des données sur les sols, des données topographiques et des données sur l'occupation du sol [20].

1.6.3. Outil d'Évaluation des Sols et des Ressources en Eau

Ce modèle est connu sous son acronyme anglais : SWAT (Soil and Water Assessment Tool). C'est un modèle de bassin versant semi-distribué et complet largement utilisé. Cependant, sa paramétrisation et sa calibration peuvent être complexes en raison du grand nombre de paramètres d'entrée requis [21]. SWAT est couramment utilisé dans diverses simulations hydrologiques et environnementales pour analyser les processus hydriques et les réponses dans les bassins versants [22].

Il permet d'analyser les effets des mesures d'atténuation, de quantifier les apports de sédiments et d'évaluer l'efficacité des mesures de conservation des sols [23].

Étant donné que le modèle peut être exécuté sous forme d'interface sur un SIG, il facilite l'agrégation des données d'entrée nécessaires pour simuler des bassins versants à grande échelle [22]. ArcSWAT 2009 est utilisée pour configurer et paramétrer le modèle [24].

1.7. Le transport solide

Il est défini comme étant le déplacement des particules du sol arraché, par l'action de l'eau. On distingue trois types de transport solide : le charriage (mouvement des éléments grossiers du lit), la suspension (déplacement des matériaux fins dans l'écoulement) et la saltation (déplacement par bonds successifs) [25].

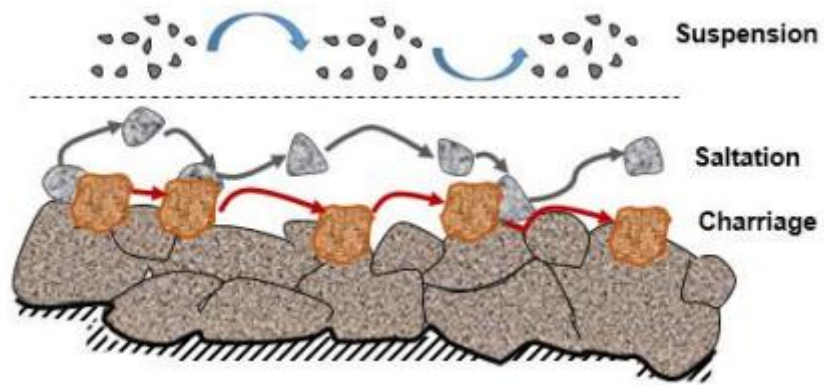


Figure 1.3 : différents modes de transport solide [25].

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

2.1. Situation géographique

Le barrage réservoir de Boukourdane est situé dans la wilaya de Tipaza. Il a été réalisé à l'exutoire d'Oued El-Hachem, qui prend naissance suite à la confluence des quatre principaux affluents (*Fig.2.1*) : l'oued Boukadir en provenance de l'Ouest, l'oued Tegza en provenance du Sud et les oueds Nachef et Fedjena venant de l'Est [26]. La capacité utile du barrage est de 97 hm³ et permet de régulariser un volume de 50 hm³ [27].

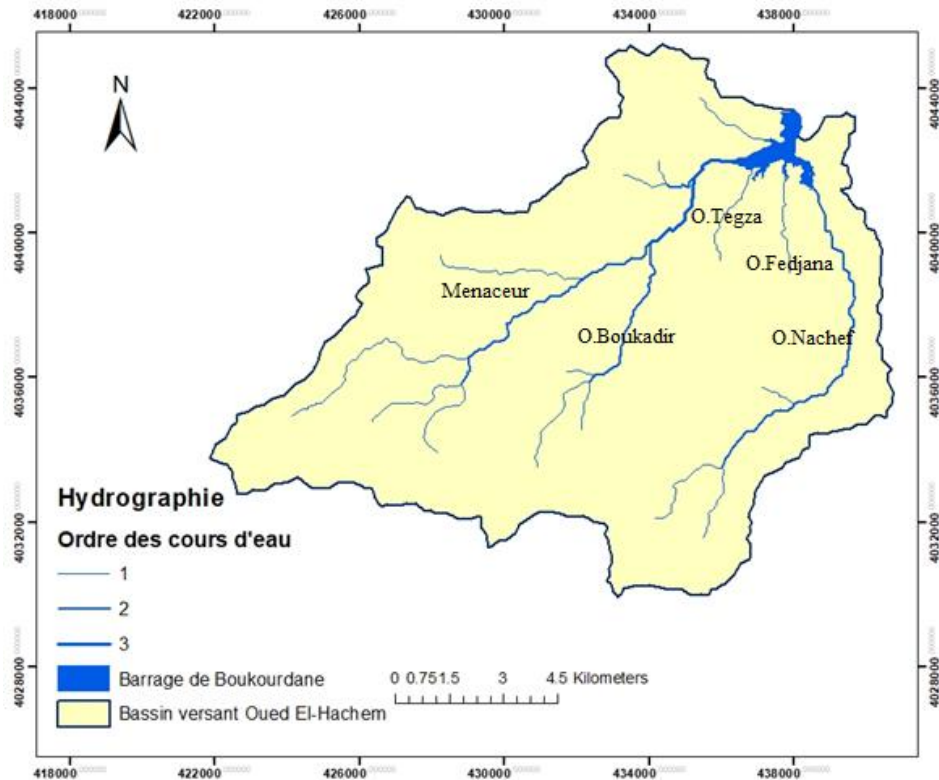


Figure 2.1 : Les limites du bassin versant à l'amont du barrage de Boukourdane.

Calcul des auteurs via ArcGIS.

Il est à environ 1.3 km au sud du village de Sidi-Amar. Il est situé sur une latitude de 35° 32' Nord, et une longitude de 2°18' [26]. Il se trouve à 11km du bord de la Méditerranée et à 8 km environ au sud de Djebel chenoua. À 20 km à l'ouest et au sud-ouest du barrage se trouve le massif Bou-Maad [28].

Le barrage de Boukourdane est destiné à :

- L'alimentation en eau potable (AEP) de Cherchel, Tipaza et Nador.
- L'irrigation de la vallée de l'Oued El Hachem et des régions de Hadjout et du Sahel.

Le barrage réservoir de Boukourdane a été réalisé à l'exutoire du bassin versant d'oued El Hachem. Ce dernier appartient au bassin hydrographique Algérois-Soummam-Hodna et plus exactement le bassin Algérois.

Le bassin versant de l'oued El-Hachem s'étend depuis la montagne Bou-Maad au sud jusqu'à la Méditerranée au nord [27]. Le bassin versant possède un taux d'érosion de 446 t/km².an [26]. Ce faible taux d'envasement est dû au boisement d'une grande partie du bassin versant Oued El-Hachem avec l'absence des ravines et des bads lands [29].

La carte altimétrique (Fig.2.3) a été élaborée sur ArcGIS en se basant sur le MNT extrait par le logiciel Global Mapper (Fig.2.2).

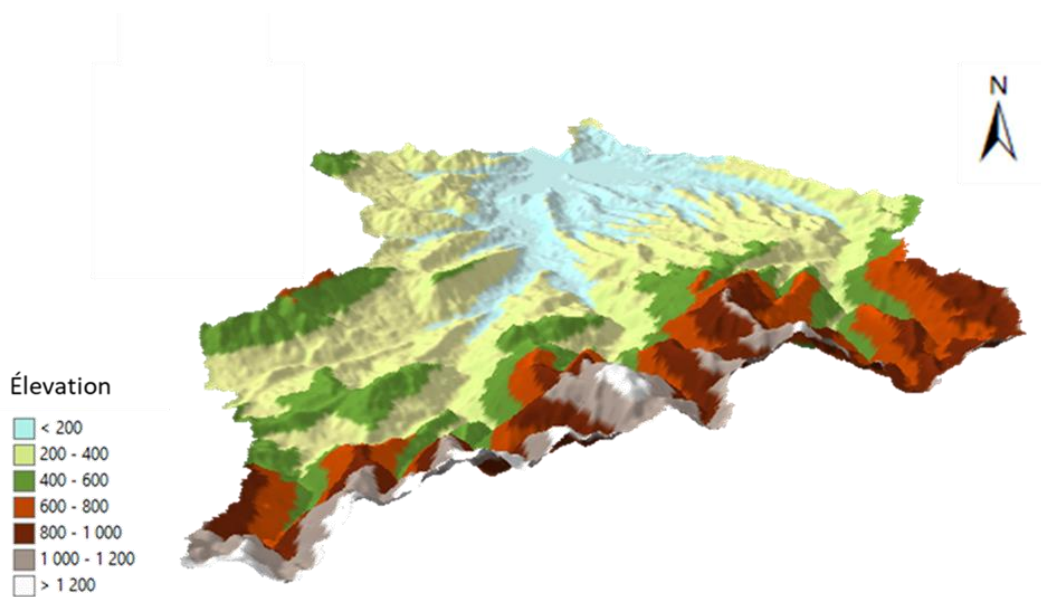


Figure 2.2 : Représentation 3D du bassin versant d'Oued El-Hachem. Calcul des auteurs via ArcScene.

L'altitude du bassin versant de l'oued El Hachem varie entre 107m et 1407m (Fig.2.3) avec une moyenne de 480 m.

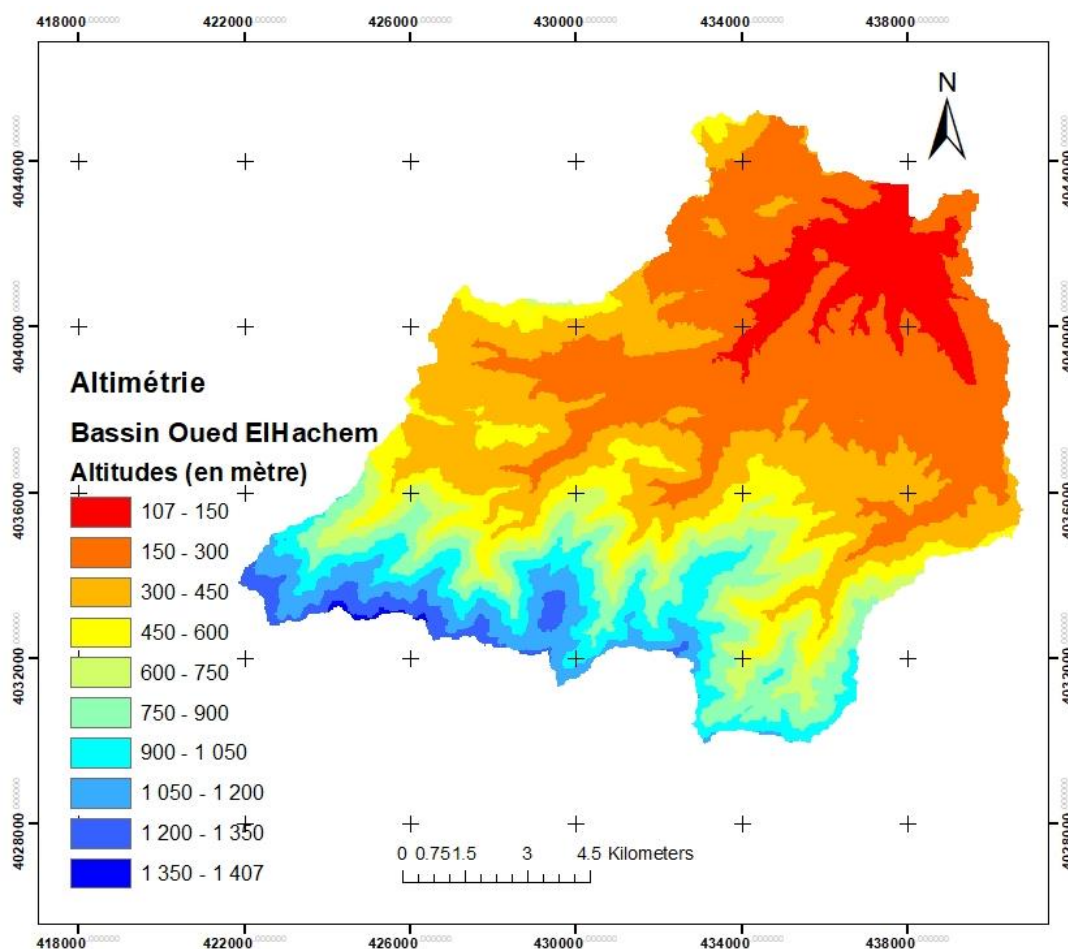


Figure 2.3 : Carte altimétrique du bassin versant d'oued El Hachem. Calcul des auteurs via ArcGIS.

2.2. Caractéristiques physiographiques

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est influencé par les caractéristiques morphométriques suivants [30] : superficie, périmètre, longueur, largeur, indice de compacité de Gravelius, indice de pente, pente moyenne du cours d'eau, altitude maximale, altitude minimale.

2.2.1. Caractéristiques géométriques

La surface est l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont donc être en partie reliés à sa surface. Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant [31]. Ces deux paramètres sont les premiers paramètres à rechercher. L'estimation de ces deux paramètres s'est effectuée à l'aide des logiciels Global Mapper et ArcGIS après délimitation du barrage à l'aide de Google Earth. Le bassin versant Oued El-Hachem couvre une superficie de 157.48 km² pour un périmètre de 131 km.

2.2.2. Caractéristiques du relief

2.2.2.1. Courbe hypsométrique

L'étude hypsométrique permet d'analyser la dispersion des altitudes en fonction des pourcentages des surfaces partielles du bassin versant [32]. L'hypsogramme et la courbe hypsométrique (Fig.2.4) sont déterminés suite à l'élaboration de la carte hypsométrique (Fig.2.5) sur ArcGIS.

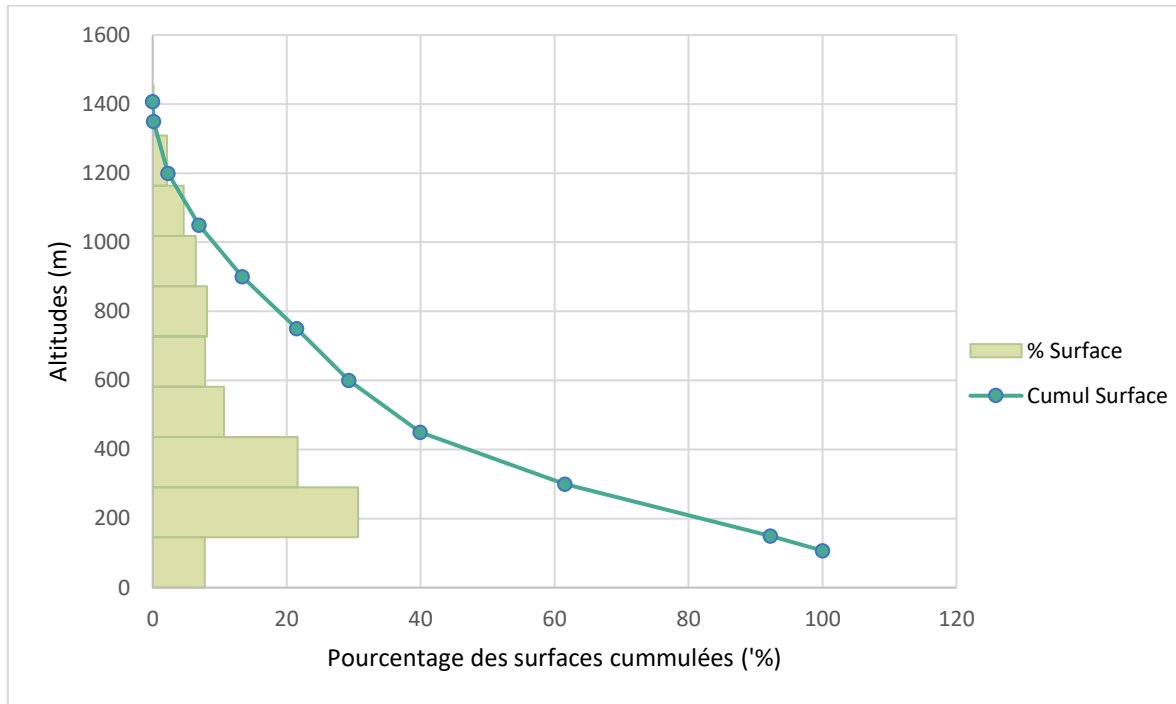


Figure 2.4 : Courbe hypsométrique de la zone d'étude.

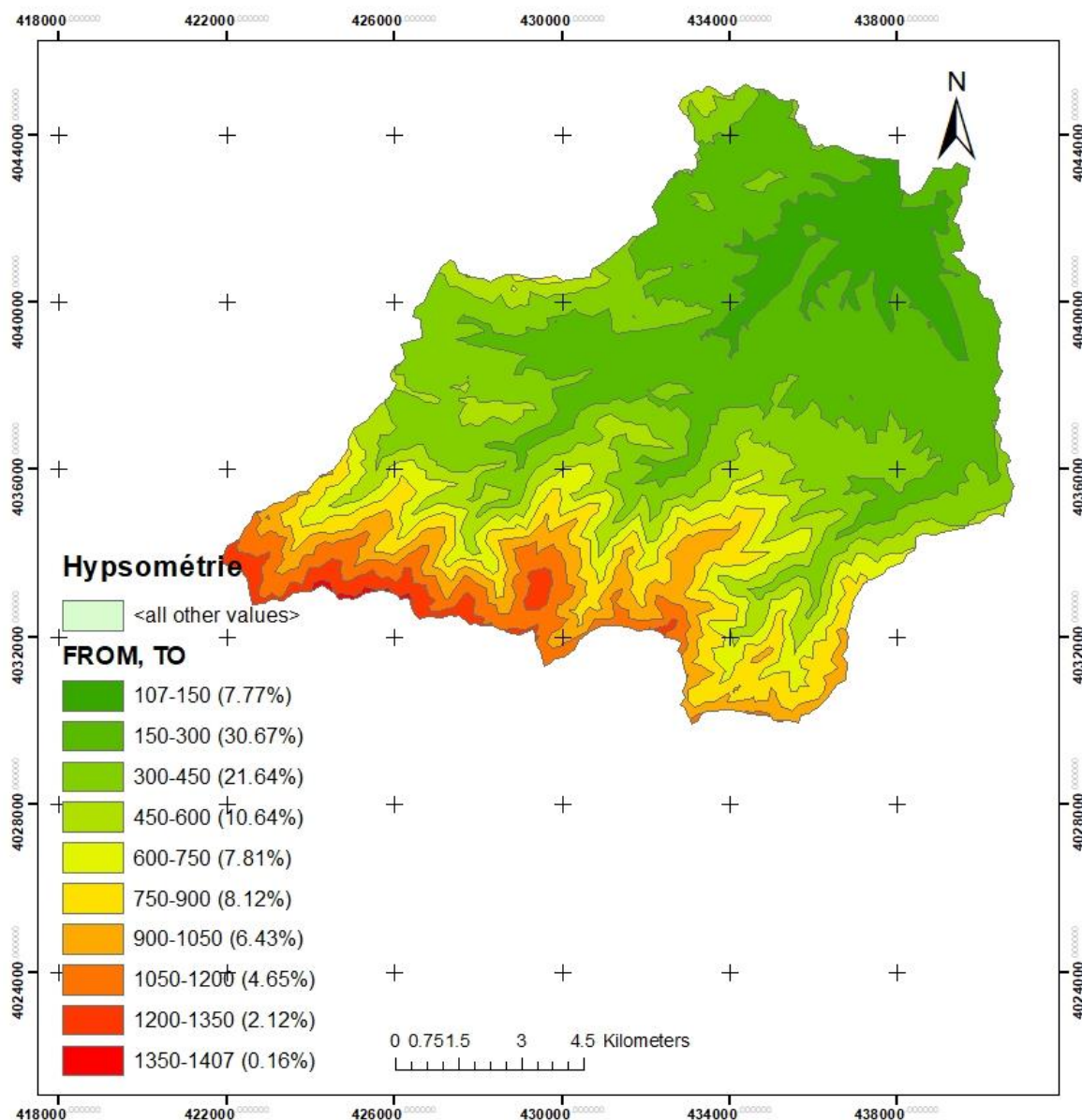


Figure 2.5 : Carte hypsométrique de la zone d'étude. Calcul des auteurs via ArcGIS.

- **Interprétation de la courbe hypsométrique**

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Elle permet de déterminer les caractéristiques suivantes :

- **Altitudes maximales et minimales**

L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin [33], estimé à 1407 m. Tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire [33], estimé à 107 m. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température,

la précipitation et le couvert neigeux. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente [33].

- **Altitude moyenne**

L'altitude moyenne est définie comme suit :

$$H_{moy} = \sum \frac{a_i * h_i}{A} \quad (12)$$

Avec :

H_{moy} : altitude moyenne du bassin [m] ;

a_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²] ;

h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

A : superficie totale du bassin versant [km²].

L'altitude moyenne calculée pour notre bassin est estimée à : $H_{moy} = 479.85$ m.

- **Altitude médiane**

Elle correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50 % de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Pour notre cas elle est estimée à 450 m.

2.2.3. Caractéristiques de forme

La forme du bassin versant, a une influence directe sur les modalités des écoulements superficiels vis-à-vis d'une averse.

2.2.3.1. Indice de compacité de Gravelius

L'indice de forme, appelé indice de compacité de Gravelius, est un paramètre indicateur de la forme du bassin versant, il enseigne aussi sur la vitesse de concentration des débits, la puissance des crues et l'importance de l'activité de l'érosion du sol. Il est donné par la formule suivante :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \approx 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (13)$$

Avec :

A : surface du bassin versant [km²] ;

P : périmètre du bassin [km].

Si : $K_G \leq 1 \Rightarrow$ le bassin est de forme circulaire.

$K_G > 1 \Rightarrow$ le bassin est de forme allongée.

Pour le bassin versant d'Oued El-Hachem, l'indice de compacité de Gravelius a été évalué à $K_G = 2.92 > 1$. Cette valeur indique bien que notre bassin a une forme allongée, ce qui induit un temps important d'acheminement de l'eau vers l'exutoire, et les débits de pointe des crues sont dans ce cas faibles.

2.2.3.2. Rectangle équivalent

Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin versant réel, dans laquelle on conserve la même surface, le même périmètre, le même indice de Gravelius, la même répartition hypsométrique et les mêmes conditions d'écoulements. Le rectangle équivalent est caractérisé par la longueur « L » et la largeur « l » définies respectivement par les formules suivantes :

$$L = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right] \quad (14)$$

$$l = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right] \quad (15)$$

Avec :

L : La longueur du rectangle équivalent [Km] ;

l : La largeur du rectangle équivalent [Km].

A : surfaces du bassin versant [Km²] ;

K_G : Indice de compacité.

Les résultats du calcul pour le bassin versant d'Oued El-Hachem nous donnent : $L = 62.93\text{km}$
 $l = 2.5\text{km}$.

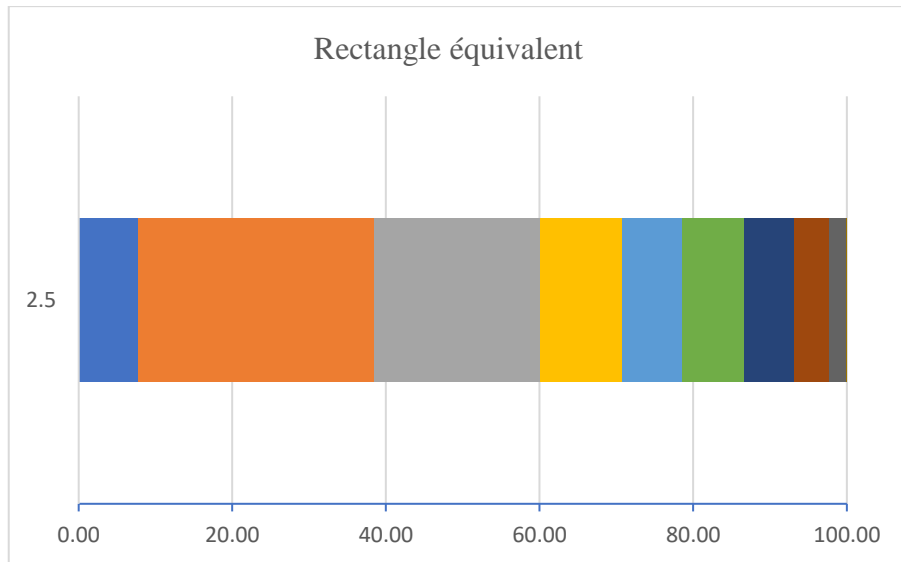


Figure 2.6 : Rectangle équivalent du bassin versant d'Oued El Hachem.

2.2.3.3. Les Indices de pente

- **Indice de pente moyenne**

Le calcul de la pente moyenne se base sur une lecture d'une carte topographique. La relation suivante donne une valeur approchée de la pente moyenne :

$$i_{moy} = \frac{D * \sum l}{A} \quad (17)$$

i_{moy} : pente moyenne, [m/km ou ‰] ;

$\sum l$: longueur totale des courbes de niveau [km] ;

D : équidistance des courbes de niveau [m] ;

A : superficie du bassin, [km²] ;

La valeur obtenue pour notre bassin est de : $i_m = 749.89$ m/km.

- **Indice de pente de Roche**

Il est défini par Roche et calculé directement à partir du rectangle équivalent. Il se calcule comme suit :

$$I_p = L^{-\frac{1}{2}} \sum_n^1 \sqrt{a_i \cdot d_i} \quad (18)$$

Avec :

L : longueur du rectangle équivalent ;

a_i : représente la fraction en % de la surface A comprise entre deux courbes de niveau voisines distantes de d_i ;

a_i et d_i sont calculé à l'aide du logiciel ArcGIS :

$$I_p = 4.16$$

- **Indice de pente global**

Cet indice permet de déduire la nature du relief en se référant à la classification de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer (O.R.S.T.O.M.) illustrée sur le tableau 2.1 suivant :

Tableau 2.1 : Classement ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente global

R1	Relief très faible	$I_g < 0.002$
R2	Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
R3	Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
R4	Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
R5	Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
R6	Relief fort	$0.05 < I_g < 0.1$
R7	Relief très fort	$I_g > 0.1$

Il est défini par :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad (19)$$

L : la longueur du rectangle équivalent.

D : la dénivelée (m) : $D = h_{5\%} - h_{95\%}$

$h_{5\%}$ et $h_{95\%}$ sont définis sur la courbe hypsométrique déjà tracée, ils représentent les altitudes entre lesquelles s'inscrivent 90% de la surface du bassin.

$H_{5\%} = 1120\text{m}$; $H_{95\%} = 140\text{m}$; $L = 62.93 \text{ km}$

$I_g = 0.015 \text{ ‰}$, ce qui signifie un relief modéré.

- **Dénivelée spécifique**

Elle est définie comme suit :

$$D_s = I_g \cdot \sqrt{A} \quad (20)$$

$$\Rightarrow D_s = \frac{D}{L} \sqrt{L * l} = D \sqrt{\frac{l}{L}} \quad (21)$$

Elle donne lieu à une deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M., indépendante des surfaces des bassins, comme illustrée sur le Tableau 2.2 ci-après.

Tableau 2.2 : Classement ORSTOM du relief à partir de la dénivelée spécifique

R1	Relief très faible	$D_s < 10$ m
R2	Relief faible	$10 \text{ m} < D_s < 25$ m
R3	Relief assez faible	$25 \text{ m} < D_s < 50$ m
R4	Relief modéré	$50 \text{ m} < D_s < 100$ m
R5	Relief assez fort	$100 \text{ m} < D_s < 250$ m
R6	Relief fort	$250 \text{ m} < D_s < 500$ m
R7	Relief très fort	$D_s > 500$ m

La valeur calculée est de : $D_s = 195.33$ m, ce qui traduit un relief assez fort.

Les caractéristiques morphométriques du bassin Oued El-Hachem sont résumées sur le tableau 2.3 ci-après :

Tableau 2.3 : Caractéristiques physiographiques de la zone d'étude.

Superficie (km²)	157.48
Périmètre (km)	131
Indice de compacité K_G	2.92
Altitude maximale (m)	1407
Altitude moyenne (m)	479.85
Altitude minimale (m)	107
Longueur du rectangle équivalent (km)	62.93
Largeur du rectangle équivalent (km)	2.50
Pente moyenne (m/km)	749.89
Dénivelé spécifique	195.33

2.3. Réseau hydrographique

Le bassin versant de Boukourdane est drainé par l'oued principal « Oued El-Hachem », ce dernier est de 34 km de longueur. Il assure l'alimentation du barrage de

Boukourdane avec un apport moyen annuel de 35 millions m³ [29]. La carte du réseau hydrographique (Fig2.8) a été élaborée sur ArcMap tenant compte du diagramme méthodologique représenté sur la figure 2.7.

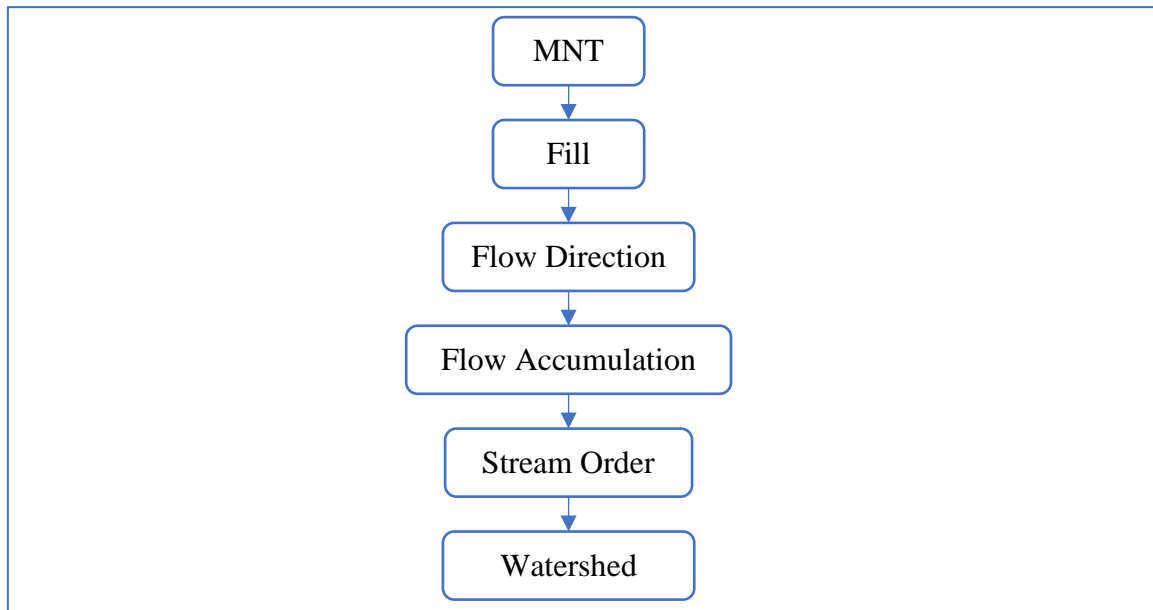


Figure 2.7 : Diagramme méthodologique du réseau hydrographique

Nous avons utilisé l'outil « Fill » du logiciel ArcGIS, afin d'interpoler les vides du MNT, ce qui va supprimer les petites imperfections dans les données. Ensuite, nous avons utilisé l'outil « Flow Direction » pour déterminer la direction des flux, suivi de l'outil "Flow Accumulation" pour calculer l'accumulation des flux. En utilisant l'outil "Stream Order", nous avons identifié les cours d'eau par ordre, en mettant en évidence le cours d'eau principal. Enfin, en ajoutant un point d'exutoire et en utilisant l'outil "Watershed", nous avons pu délimiter le bassin versant d'étude.

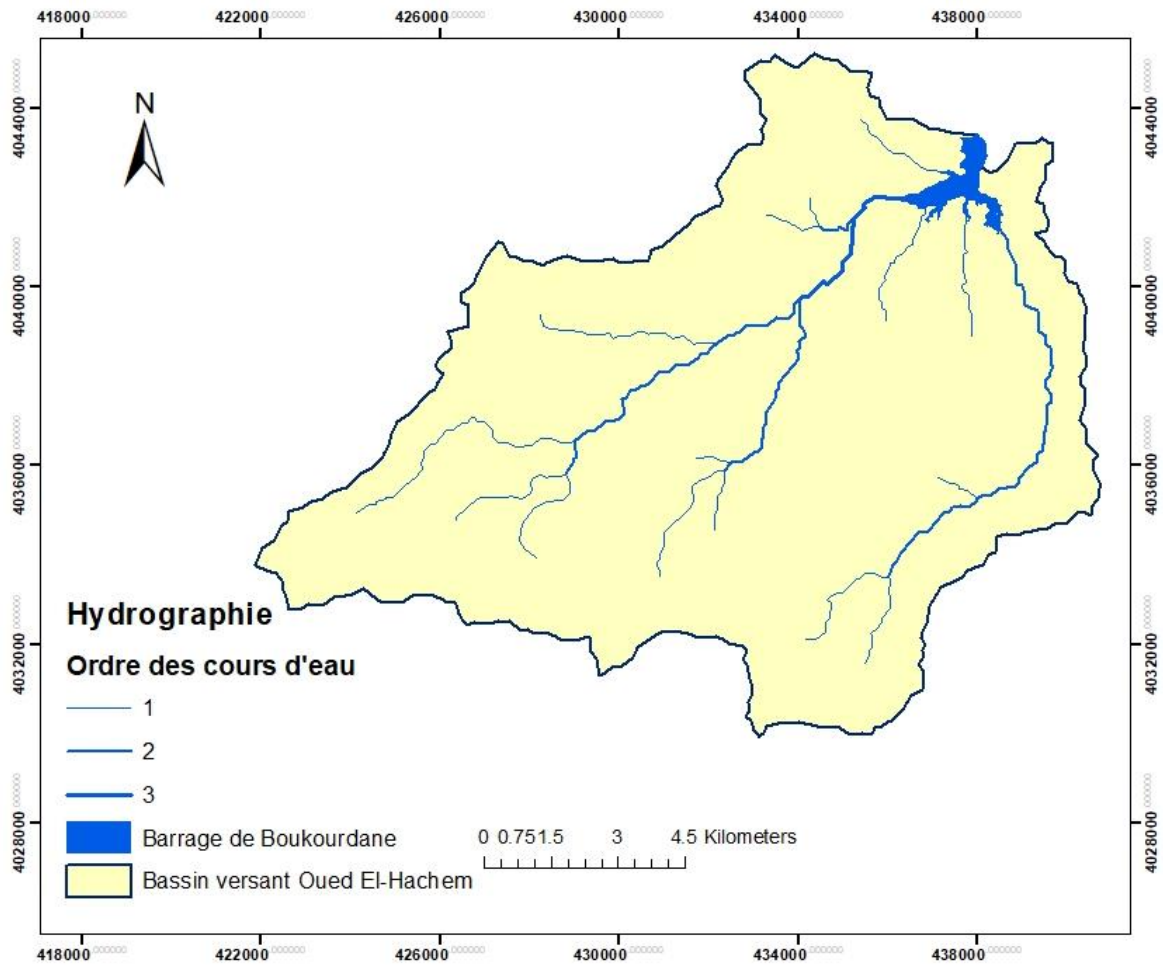


Figure 2.8 : Classification du réseau hydrographique. Calcul des auteurs via ArcGIS.

Chapitre 3 : Élaboration de la carte de sensibilité à l'érosion au niveau du BV de Boukourdane

3.1. Les données exploitées pour la mise en place du SIG

3.1.1. Données cartographiques

1.1.1.1.1. La carte du réseau hydro-climatologique et de la surveillance de la qualité des eaux du nord de l'Algérie, échelle 1/500000, effectué à l'institut National de Cartographie et de Télédétection à Alger en 2004. Cette carte a été numérisée et géopositionnée en fonction de la projection conique conforme de Lambert de la zone nord de l'Algérie, et a été exploitée particulièrement pour la délimitation de la zone d'étude [25].

3.1.2. Levés bathymétriques

L'Agence Nationale des Barrages du Ministère des Ressources en Eaux (A.N.B.) a confié au consortium de bureaux d'étude Levantina, Ingenieria y Construcción, SL, la réalisation d'un levé bathymétrique pour le barrage de Boukourdane en 2019 [27]. Dans le cadre de cette de cette étude nous avons utilisé les deux levés 2004 et 2019.

3.2. Logiciels utilisés

Toutes les cartes élaborées dans ce travail ont été conçues à l'aide des logiciels suivants :

3.2.1. Google Earth

Google Earth est un logiciel développé par Google qui permet de visualiser et d'explorer la Terre grâce à des images satellite, des photographies aériennes et de systèmes d'information géographique (SIG) [34]. Il peut être considéré comme le logiciel cartographique de base le plus couramment utilisé.

3.2.2. Global Mapper

Global Mapper est un outil de visualisation capable d'afficher les ensembles de données les plus courants, tels que les rasters ou vecteurs d'élévation. Il permet de convertir, éditer, imprimer, créer des traces GPS et d'utiliser les fonctionnalités des ensembles de données SIG, le tout dans un logiciel extrêmement facile à utiliser [35].

3.2.3. ArcGIS

ArcGIS est un logiciel Desktop qui permet la collecte, l'organisation, la gestion, l'analyse, la communication et la diffusion des informations géographiques. Ce logiciel comprend une suite d'applications intégrées qui permettent d'effectuer des tâches SIG, tel que : la cartographie, la gestion des données, l'analyse géographique, le géotraitement... [36].

Les applications utilisées dans ce travail sont les suivants :

- **ArcScene** : C'est une application qui permet la visualisation et la superposition de plusieurs couches de données dans un environnement 3D. ArcScene est également entièrement intégré à l'environnement de géotraitement, offrant un accès à de nombreux outils et fonctions d'analyse [37].
- **ModelBuilder** : C'est un langage de programmation visuel qui permet la construction des flux de travaux de géotraitement dans le but d'automatiser et documenter les processus d'analyse spatiale et de gestion des données. Le modèle est représenté sous forme de diagramme qui enchaîne des séquences de processus et d'outils de géotraitement, en utilisant la sortie d'un processus comme entrée d'un autre processus [38].
- **ArcMap** : C'est une application SIG qui permet de visualiser et de manipuler des informations géographiques sous forme de couches et d'autres éléments dans une carte. Ces éléments cartographiques comprennent le bloc de données qui contient les couches de carte pour une étendue spécifique, ainsi que des éléments tels qu'une barre d'échelle, une flèche indiquant le nord, un titre, un texte descriptif et une légende des symboles [39].

3.3. Traitement et génération des cartes thématiques

Plusieurs indices morphométriques ont été utilisés pour la cartographie du risque érosif au niveau du BV d'Oued El-Hachem. Ces derniers ont été cartographiés à l'aide de l'application ModelBuilder via le logiciel ArcGIS.

3.3.1. Indice du pouvoir érosif (SPI)

Cet indice calcule la distribution spatiale du potentiel de perte de sol en supposant un ruissellement excessif uniforme des précipitations et en considérant que le taux d'érosion est limité par le transport plutôt que par le détachement [40].

Il peut être calculé comme suit :

$$SPI = A_s \cdot \tan\beta \quad (22)$$

Avec :

A_s : La surface spécifique de bassin versant = Accumulation des flux (m^2) ;

β : La pente en degré.

La formule 22 ci-dessus, écrite sous forme de formule de géotraitement, a été implémentée directement sous « ArcGIS Raster Calculator ». L'application de cette dernière nous a permis d'obtenir le schéma représenté sur la figure 3.1 ci-dessous.

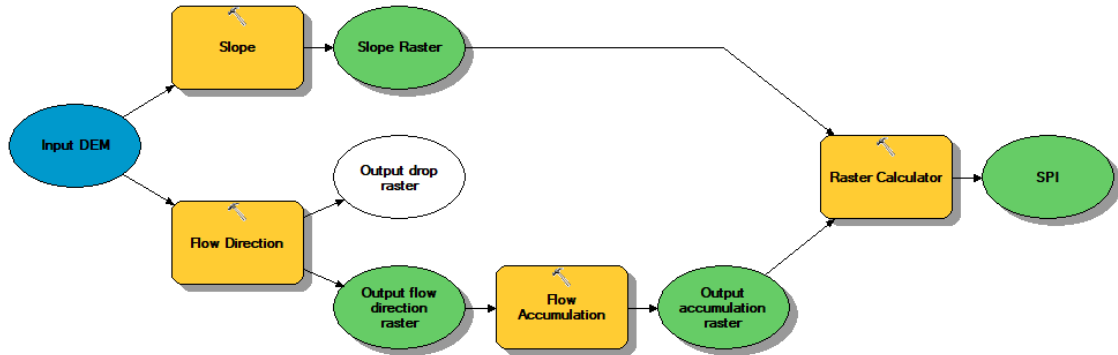


Figure 3.1 : Schéma de calcul de SPI par l'application ModelBuilder sur ArcGIS.

L'exécution du schéma ci-dessus (Fig.3.1) par l'application ModelBuilder sur ArcGIS, nous a permis également d'obtenir la carte d'indice du pouvoir érosif du BV Oued El-Hachem illustrée sur la figure 3.2 ci-après :

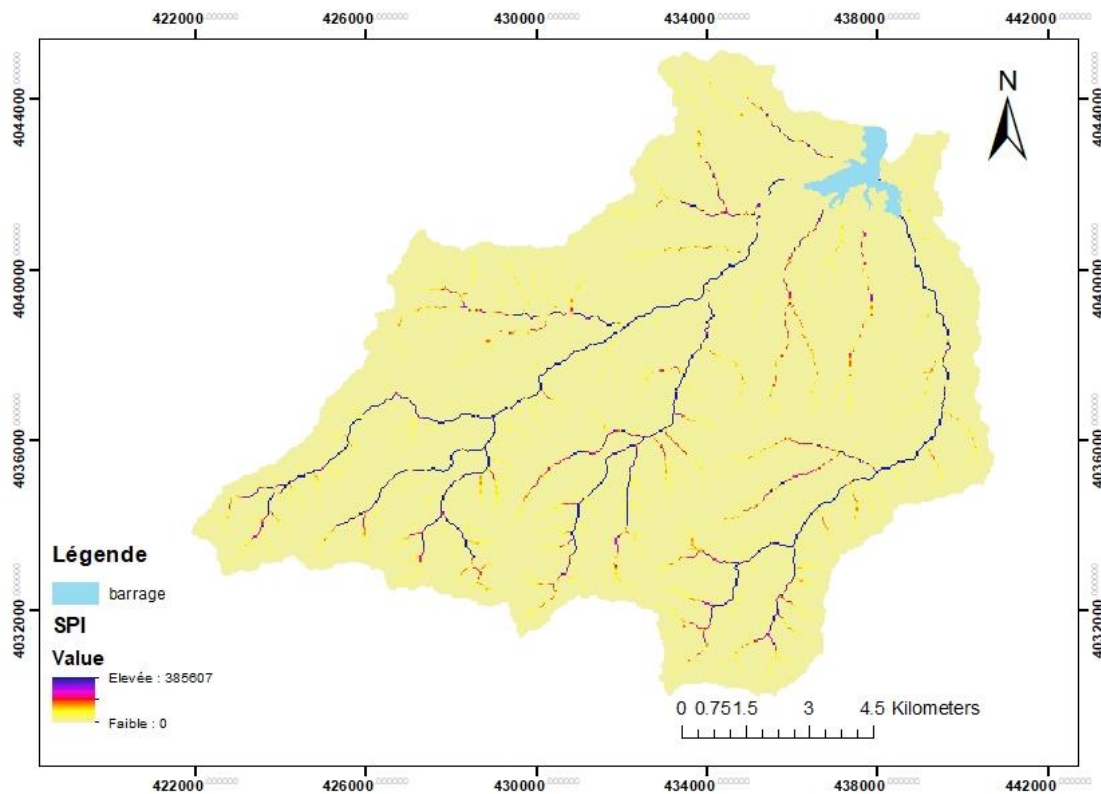


Figure 3.2 : Carte d'indice du pouvoir érosif du BV Oued El-Hachem. Calcul des auteurs via ArcGIS.

Les zones présentant des valeurs élevées de l'indice « SPI » sont sensibles à l'arrachement des particules par le ruissellement, ce qui indique une forte érosion. En revanche, les zones avec des valeurs faibles indiquent une propension à la déposition des sédiments.

3.3.2. Indice de transport-sédimentation (STI)

Cet indice est un facteur fondamental dans l'équation universelle de perte en sol (USLE). Il permet de calculer la capacité de transport de sédiments distribués spatialement en tenant compte de la convergence et de la divergence des écoulements. Il a été largement testé à différentes résolutions de MNT (Modèle Numérique de Terrain) et selon différentes méthodes d'acheminement des écoulements [41].

Il est donné par la relation suivante :

$$STI = \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^{0.6} \cdot \left(\frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^{1.3} \quad (23)$$

Où :

A_s : La surface spécifique de bassin versant = Accumulation des flux (m²) ;

β : La pente en degré.

L'application de l'équation ci-dessus sous « ArcGIS Raster calculator » nous a permis initialement d'élaborer le schéma de la figure 3.3 ci-dessous.

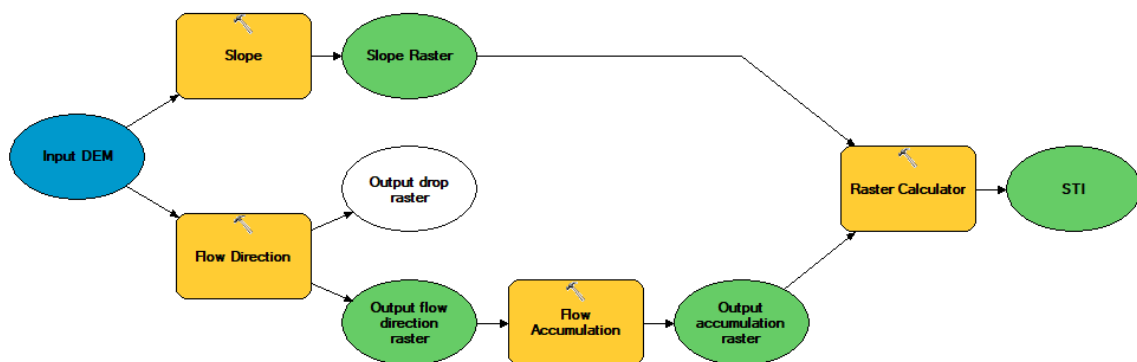


Figure 3.3 : Schéma de calcul de STI par l'application ModelBuilder sur ArcGIS.

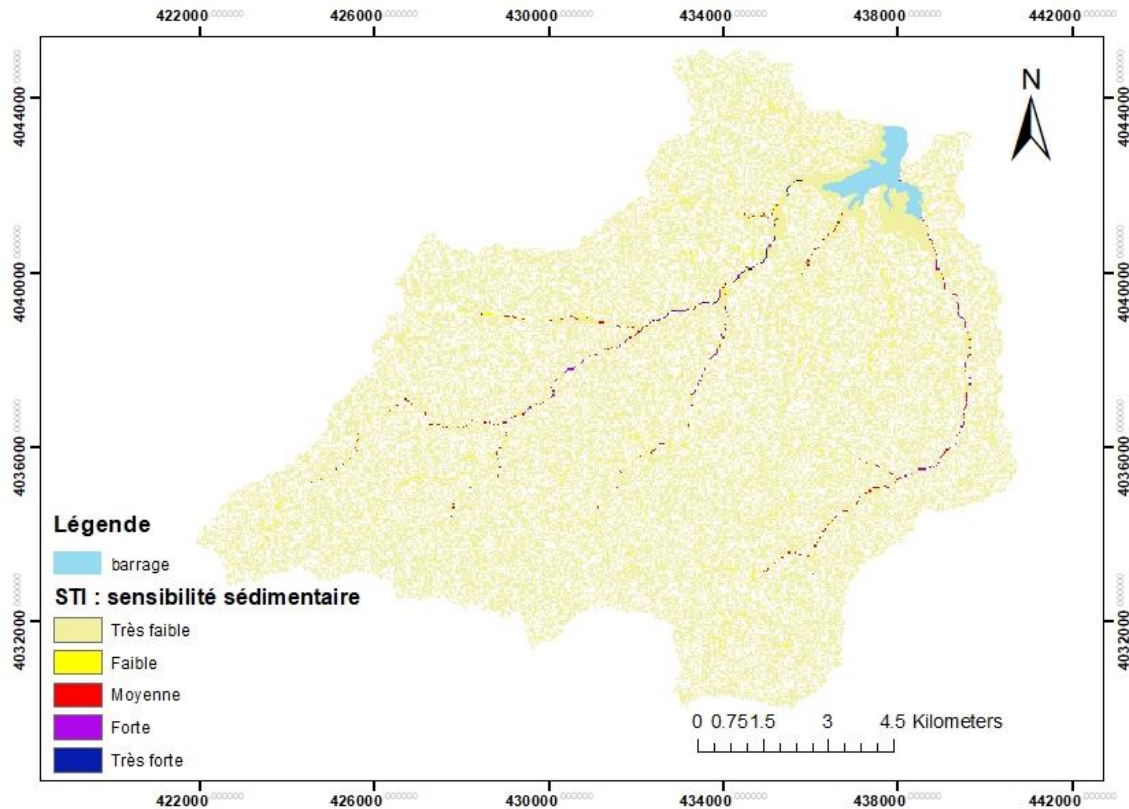


Figure 3.4 : Carte d'indice de transport-sédimentation du BV Oued El-Hachem. Calcul des auteurs via ArcGIS.

D'après la carte ci-dessus, les valeurs de STI observées dans le bassin versant Oued El-Hachem se situent entre 0 et 463. Cela indique que ces zones ne sont pas propices au transport des sédiments. En revanche, les Oueds sont partiellement identifiés comme des zones de transport des sédiments, avec une valeur maximale de 3690.

3.3.3. Indice topographique d'humidité (TWI)

L'indice topographique d'humidité a été largement utilisé pour quantifier les effets de la topographie sur les processus hydrologiques. Cet indice indique quantitativement l'équilibre entre l'accumulation d'eau et les conditions de drainage à l'échelle locale. Par ailleurs, il décrit la tendance d'un site à être saturé en surface en fonction de sa zone contributive et de ses caractéristiques de pente locale [41]. Il est donné par la relation suivante :

$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \beta}\right) \quad (24)$$

Avec :

As : La surface spécifique de bassin versant = Accumulation des flux (m²) ;

β : La pente en degré.

De la même manière effectuée pour les indices précédents, l'équation 24 ci-dessus a été utilisée pour le calcul de l'indice TWI de notre région d'étude. Le schéma élaboré via ModelBuilder est représenté sur la figure 3.5 suivante :

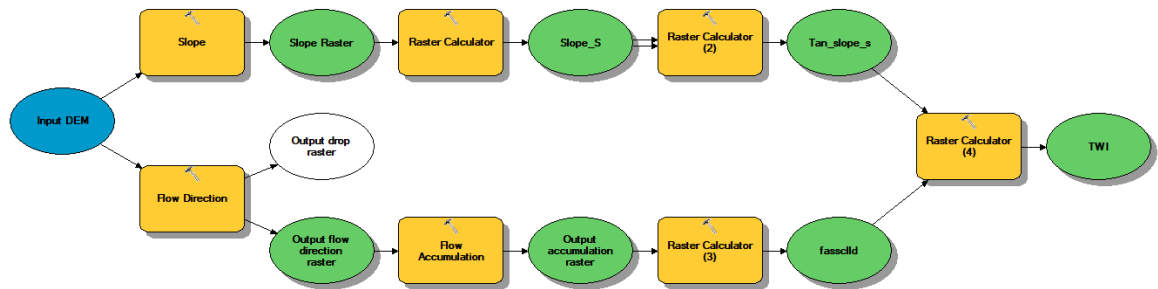


Figure 3.5 : Schéma de calcul de TWI par l'application ModelBuilder sur ArcGIS.

L'exécution du schéma ci-dessus (Figure 3.5) par l'application ModelBuilder sur ArcGIS, nous a permis d'obtenir la carte de TWI du BV Oued El-Hachem illustrée sur la figure 3.6 ci-après :

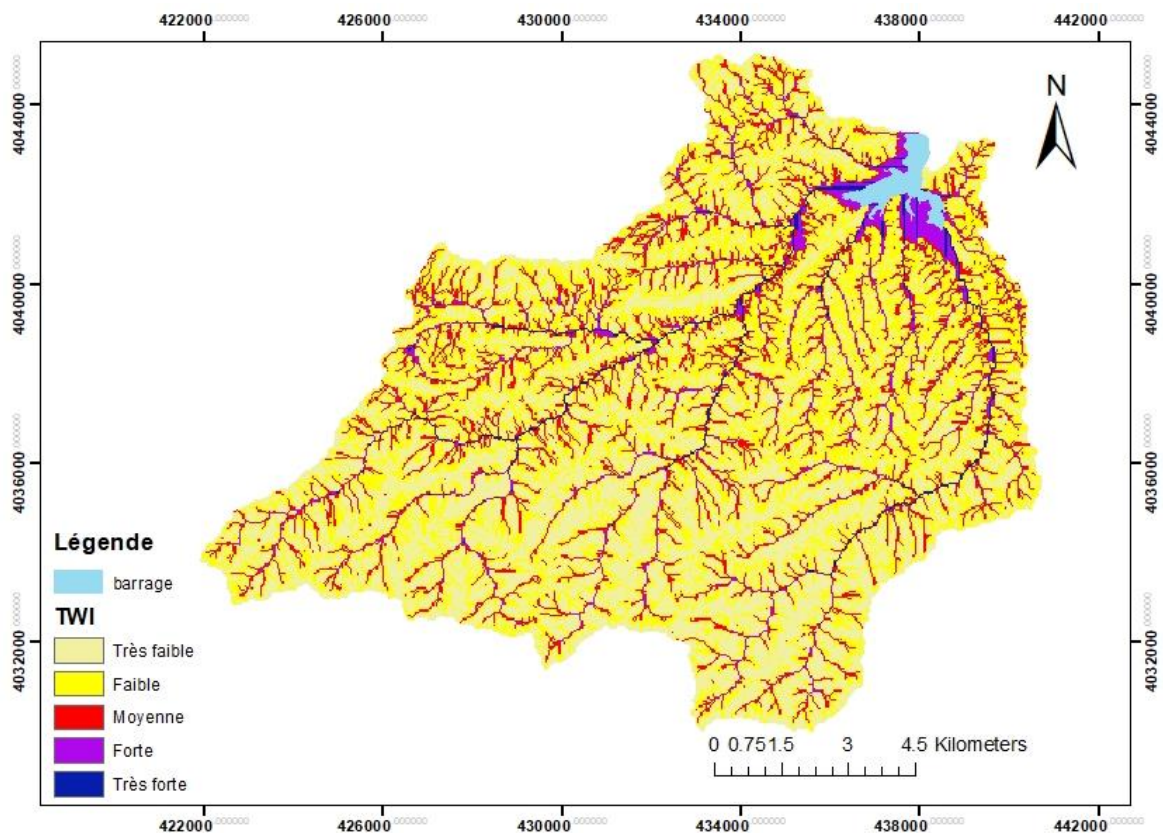


Figure 3.6 : Carte d'indice topographique d'humidité du BV Oued El-Hachem. Calcul des auteurs via ArcGIS.

La carte de l'indice TWI (Fig.3.6) montre les zones de saturation. L'indice « TWI » est majoritairement stable sur l'ensemble du bassin versant d'Oued El-Hachem, avec des valeurs inférieures à 7.58. Cependant, il est plus prononcé le long des oueds et de leurs affluents, atteignant des valeurs maximales entre 7,59 et 14,6. Les zones environnantes du barrage de Boukourdane sont particulièrement saturées.

3.3.4. Indice de rugosité topographique (TRI)

Le TRI (Terrain Ruggedness Index) fournit une mesure rapide et objective de l'hétérogénéité du terrain. Il met en évidence la différence d'altitude entre les cellules adjacentes d'un modèle numérique du terrain en utilisant un SIG. Il est donné par la relation suivante [42] :

$$TRI = Y \left[\sum (x_{ij} - x_{00})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

Avec :

x_{ij} : L'altitude de chaque cellule voisine par rapport à la cellule (0,0).

x_{00} : Altitude de la cellule (0,0)

La carte de cet indice a été générée par l'exécution du schéma suivant :

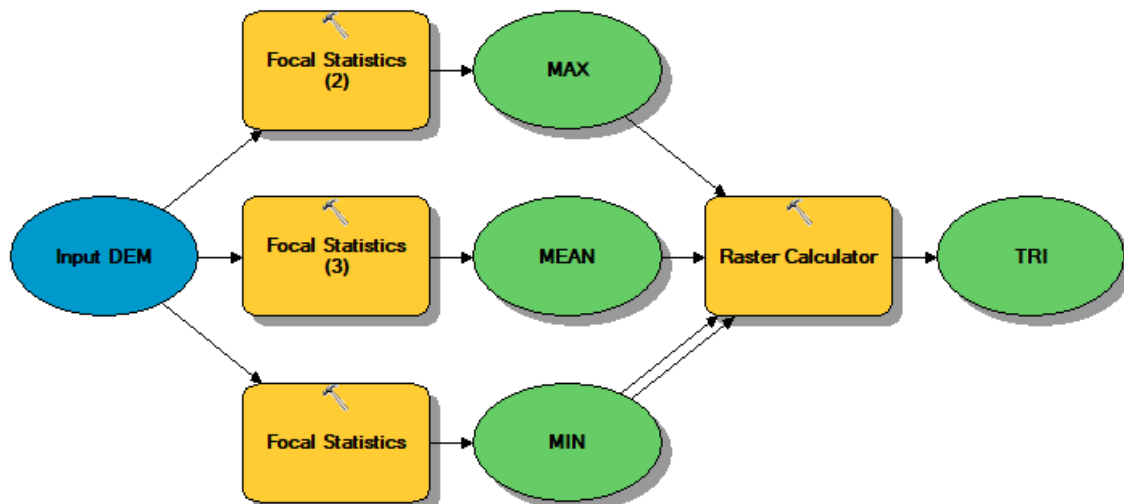


Figure 3.7 : Schéma de calcul de TRI par l'application ModelBuilder sur ArcGIS.

À l'aide de l'outil « Focal Statistic », nous avons créé trois cartes : Min, Max et Mean, qui représentent respectivement les valeurs minimales, maximales et moyennes du MNT. Ces cartes ont ensuite été utilisées pour générer la carte du TRI en appliquant l'équation suivante :

$$TRI = \frac{Mean - Min}{Max - Min} \quad (26)$$

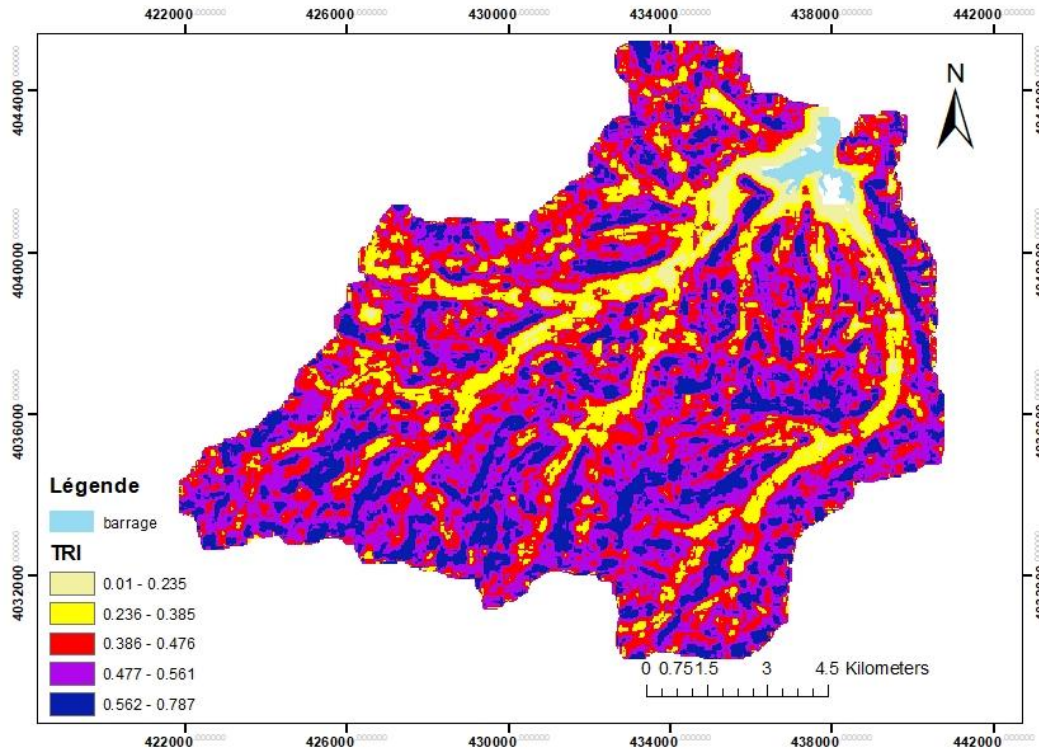


Figure 3.8 : Carte d'indice de rugosité topographique du BV Oued El-Hachem. Calcul des auteurs via ArcGIS.

D'après la carte de l'indice TRI (Fig.3.8), le bassin versant d'Oued El-Hachem présente majoritairement un relief accidenté. Les Oueds et les zones environnantes du barrage sont caractérisés par une topographie plus uniforme, avec des valeurs de TRI inférieures à 0.385.

3.3.5. Taux de délivrance des sédiments (SDR)

Le taux de délivrance des sédiments (SDR) est une mesure de l'efficacité de transport des sédiments dans un bassin versant. Il représente la quantité de sédiments transportés par rapport à la quantité totale de sol détachée. Différentes relations sont utilisées pour estimer le SDR. Cependant, ces estimations sont généralement limitées aux petits bassins versants avec des données adéquates [43]. Le SDR est donné par la relation suivante [44] :

$$SDR = 0.4724 \times A_s^{-0.125} \quad (26)$$

Avec :

A_s : La surface spécifique de bassin versant = Accumulation des flux (m^2).

La carte de cet indice est générée à partir du schéma suivant :

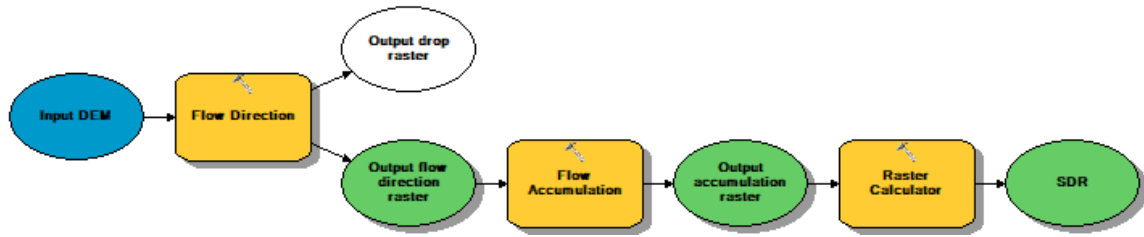


Figure 3.9 : Schéma de calcul de SDR par l'application ModelBuilder sur ArcGIS.

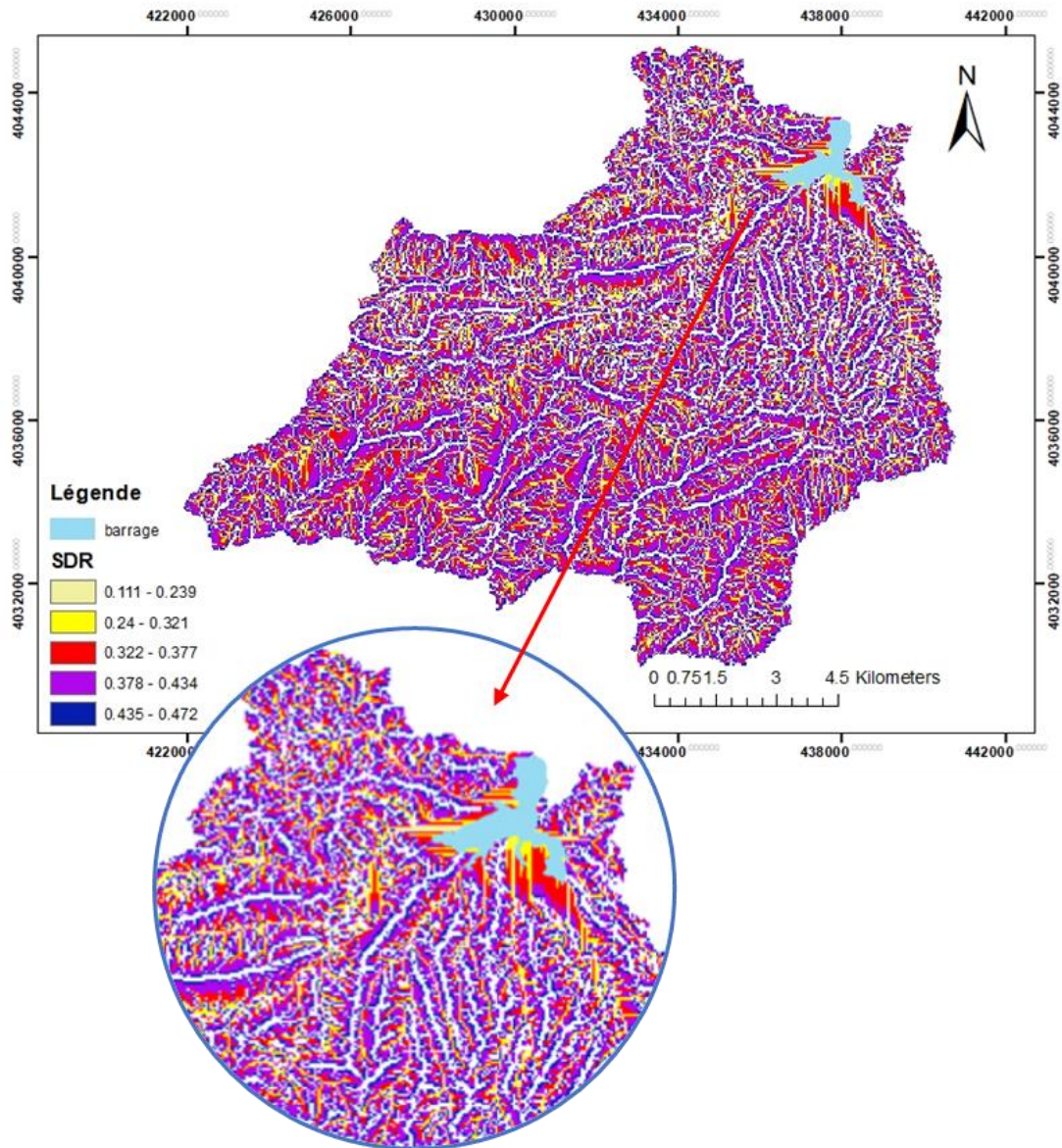


Figure 3.10 : Carte du taux de délivrance des sédiments du BV Oued El-Hachem.

Calcul des auteurs via ArcGIS.

La quantité de sédiments transportés par rapport à la quantité totale de sol détachée est élevée sur l'ensemble du bassin versant d'Oued El-Hachem.

3.3.6. Estimation des matériaux potentiels (DFTI)

C'est une mesure de la susceptibilité d'une zone aux coulées de débris basée sur les caractéristiques topographiques. Il est calculé à l'aide de différents indices topographiques, tels que l'indice d'humidité topographique (TWI) et l'indice de puissance des cours d'eau (SPI) [45]. Il est donné par un croisement logique entre STI et SPI [44] :

$$STI + SPI \geq 9.3 \quad (27)$$

L'élaboration de la carte du DFTI a été faite par l'exécution du schéma suivant :

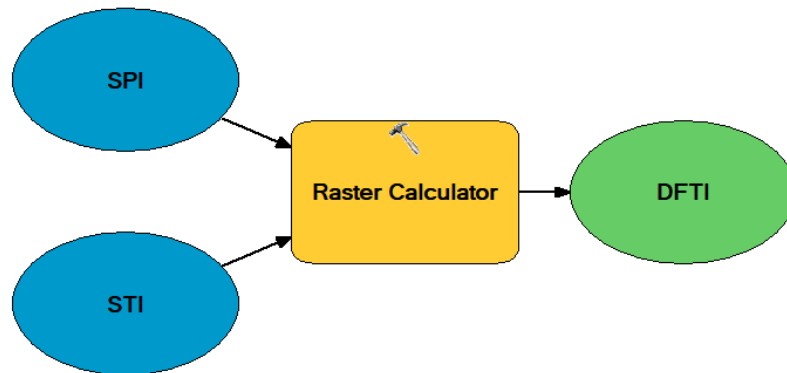


Figure 3.11 : Schéma de calcul de DFTI par l'application ModelBuilder sur ArcGIS.

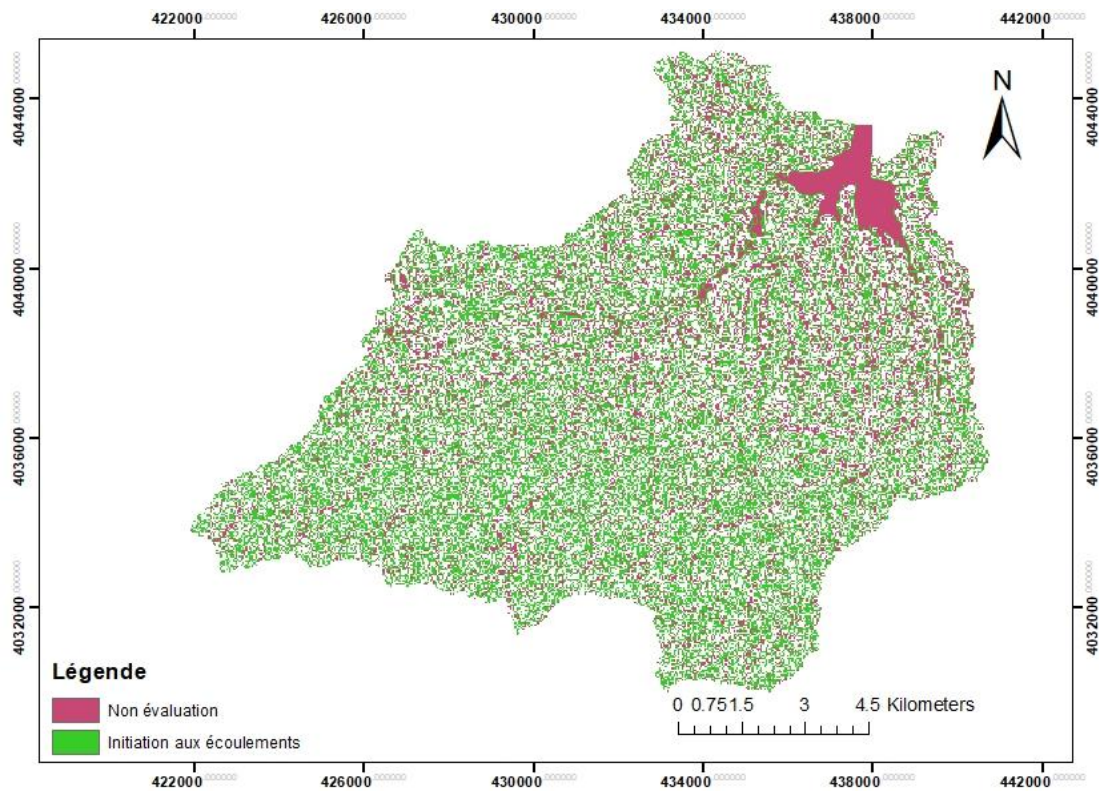


Figure 3.12 : Carte de l'estimation des matériaux potentiels du BV Oued El-Hachem.

Calcul des auteurs via ArcGIS.

Le bassin versant d'Oued El-Hachem présente une forte susceptibilité aux coulées de débris, comme le montre la valeur élevée de l'indice DFTI. Cependant, à l'aval du bassin versant, la susceptibilité aux coulées de débris est plus faible, ce qui suggère une diminution du risque de ces phénomènes dans cette zone.

3.4. Élaboration de la carte de sensibilité à l'érosion

Pour générer la carte finale de vulnérabilité des sols à l'érosion pour le bassin versant Oued El-Hachem, nous avons utilisé la méthode de superposition en utilisant l'application « ModelBuilder » dans ArcGIS. La vulnérabilité à l'érosion et au transport des sédiments est exprimée en fonction des indices morphométriques comme suit :

$$\text{Degré de sensibilité à l'érosion} = \text{SPI} + \text{STI} + \text{TWI} + \text{TRI} + \text{SDR} + \text{DFTI}.$$

L'essentiel du travail a été réalisé en se basant sur l'organigramme méthodologique présenté sur la Figure (Fig.3.13) :

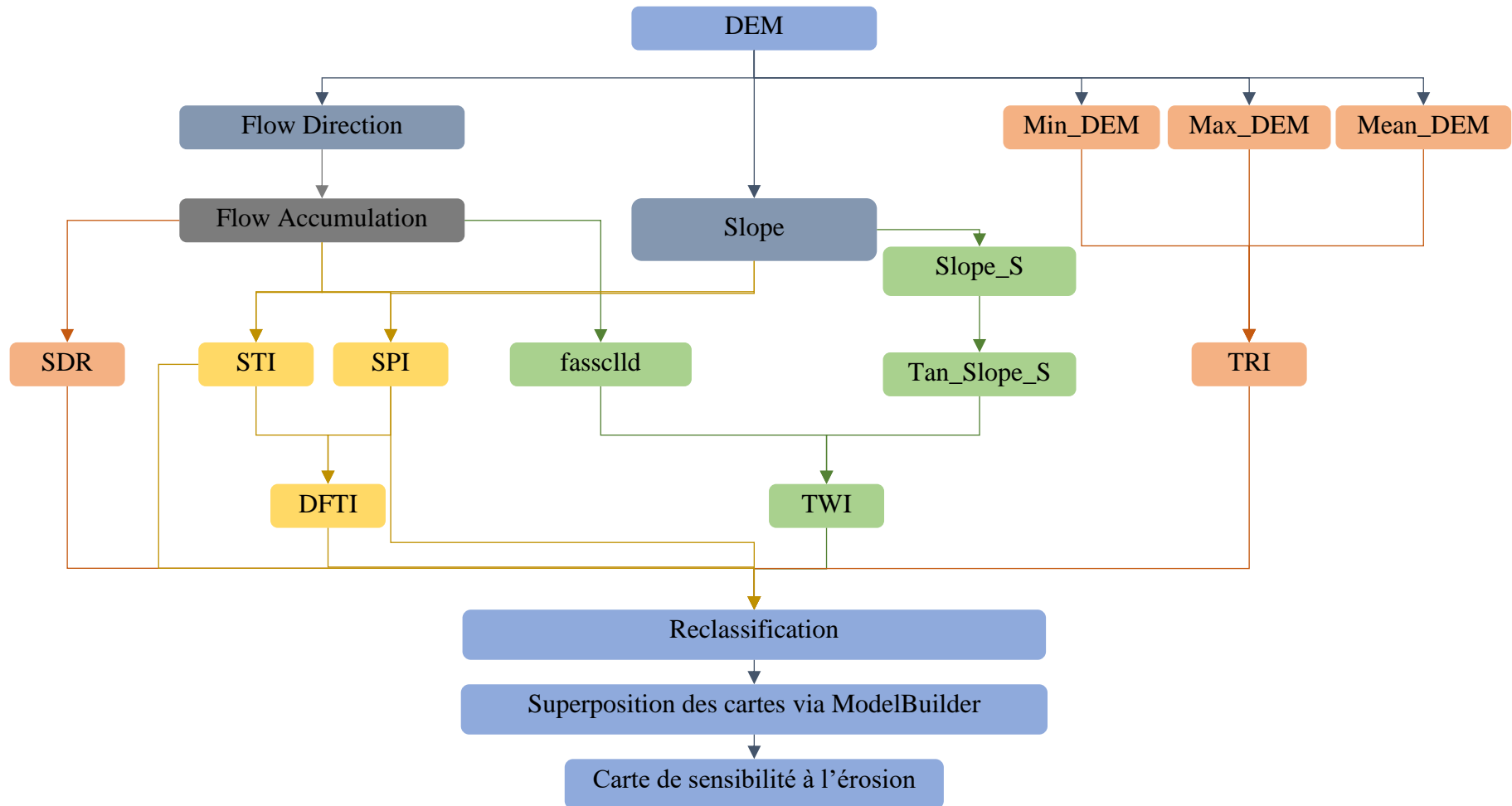


Figure 3.13 : Diagramme méthodologique pour la réalisation de la carte de sensibilité à l'érosion.

3.4.1. Superposition des cartes par l'application ModelBuilder

Il s'agit d'intégrer les cartes thématiques dans une carte générale de sensibilité des sols à l'érosion. Chacune des cartes en entrée doit être reclassée selon une échelle de mesure commune de 1 à 3, puis les résultats seront cumulés pour créer la carte finale (Fig.3.14).

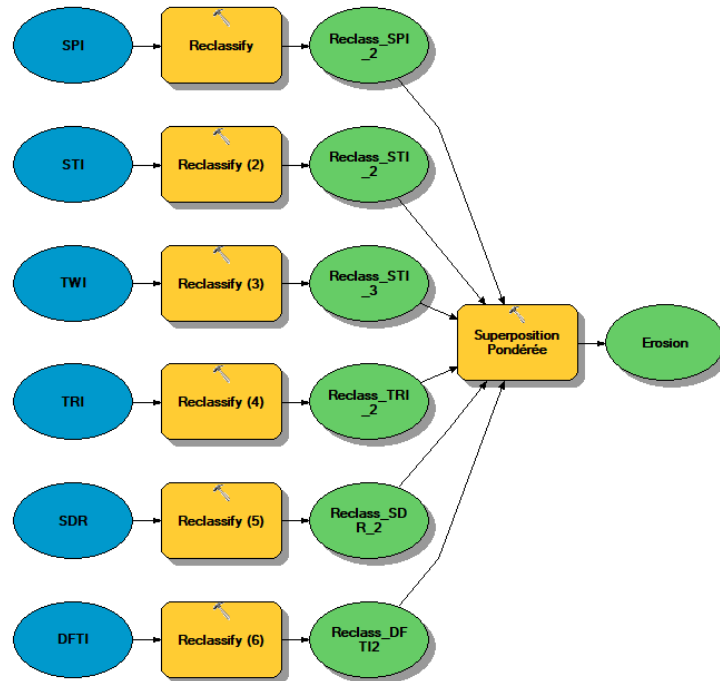


Figure 3.14 : Schéma de superposition des cartes par l'application ModelBuilder sur ArcGIS.

3.4.2. Edition de la carte

La carte de sensibilité à l'érosion (Fig.3.15) est obtenue par le croisement des différentes cartes thématiques via « ModelBuilder » sur ArcGIS. Cette carte prend en compte les valeurs des six facteurs étudiés : SPI, STI, TWI, TRI, SDR et DFTI. L'analyse de cette carte a révélé trois classes de sensibilité différentes : faible, moyenne et forte, permettant ainsi de localiser et d'identifier les zones correspondantes.

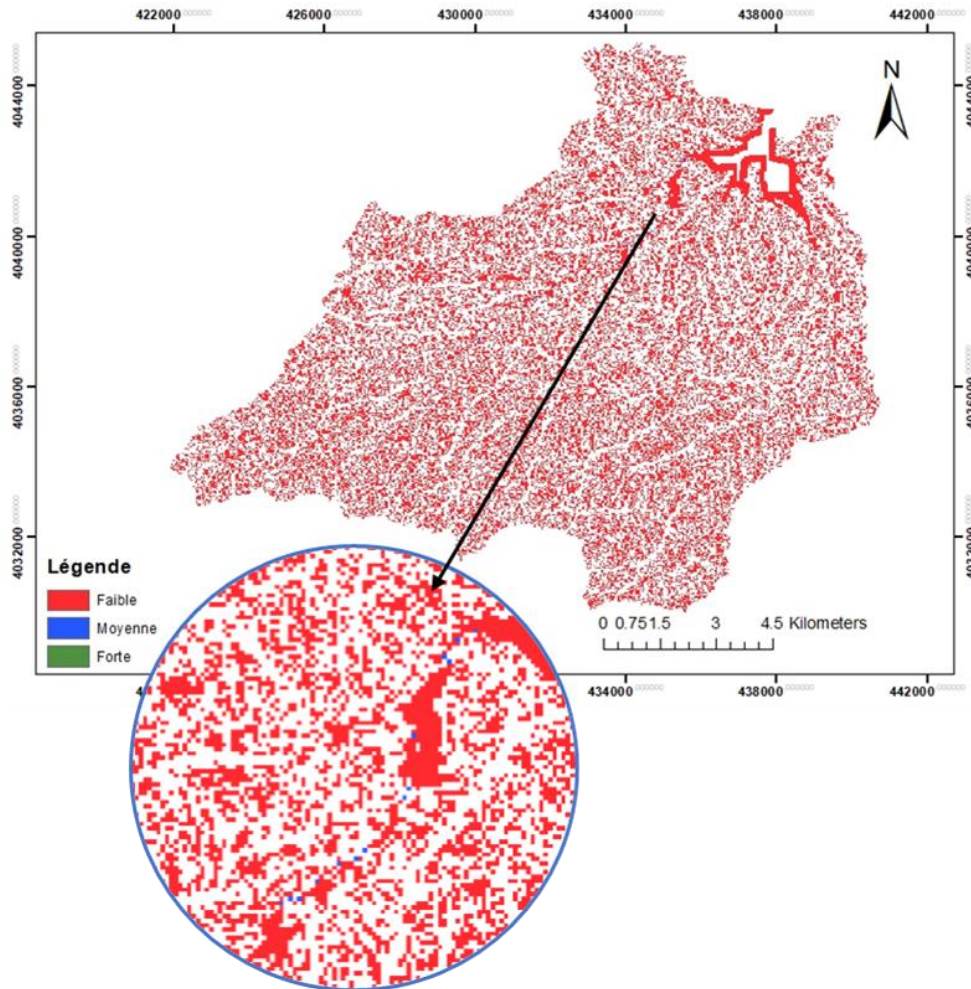


Figure 3.15 : Carte de sensibilité à l'érosion des sols du BV d'Oued El-Hachem. Calcul des auteurs via ArcGIS.

La carte ci-dessus montre que le risque érosif global au niveau de notre région d'étude est faible. Quelques zones présentent une vulnérabilité moyenne, mais leur superficie est négligeable. Ceci explique clairement le faible taux d'envasement du barrage de Boukourdane situé au niveau de la région.

Chapitre 4 :

Cartographie des zones d'érosion et
de dépôt au niveau de la retenue du
barrage de Boukourdane

4.1. Diagramme méthodologique

La création des cartes thématiques implique l'utilisation de différentes procédures et outils pour modéliser les données. L'application ModelBuilder nous a permis de créer et exécuter les graphiques nécessaires à notre étude.

Pour atteindre les objectifs assignés dans cette étude, nous avons suivis les étapes illustrées sur le diagramme de la figure 4.1 suivante :

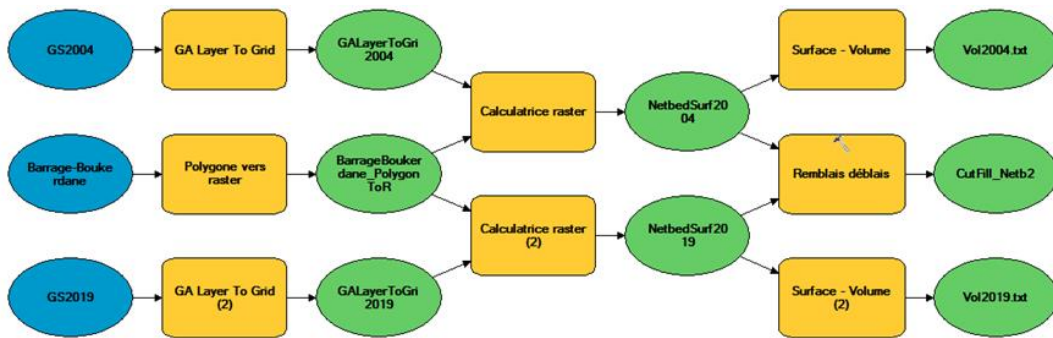


Figure 4.1 : Schéma du diagramme méthodologique pour l'élaboration des cartes thématique sur l'application ModelBuilder.

4.2. Évolution du fond de la retenue du barrage de Boukourdane

La cartographie du fond de la retenue du barrage de Boukourdane a été mise en évidence via le logiciel ArcGIS. Les levés bathymétriques effectués au niveau de la retenue durant les années 2004 et 2019 ont été introduites sous forme de fichier Excel en coordonnées (latitude, Longitude et profondeur). La méthode d'interpolation géostatistique (RBV) a été utilisée. Cette dernière nous a permis d'interpoler les élévations extraites et de construire les couches d'évolution de la surface du fond du lit de la retenue du barrage (Fig.4.2) pour les deux années d'étude (2004- 2019).

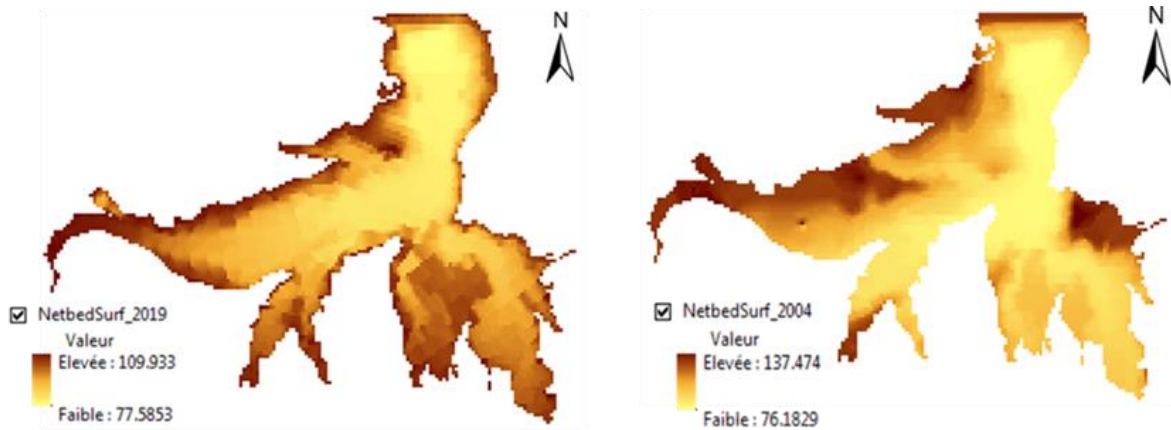


Figure 4.2 : Évolution du volume de dépôts durant la période 2004-2019. Calcul des auteurs via ArcGIS.

De la figure ci-dessus, nous remarquons que la hauteur du lit de la retenue du barrage de Boukourdane a légèrement varié au cours des années 2004-2019. La différence d'élévation minimale a été estimée à environ 1.80 m. Cette valeur représente l'évolution de la hauteur minimale de la vase déposée au fond de la retenue du barrage durant les années 2004-2019. Cette augmentation de la hauteur de la vase est observée principalement dans les zones situées au sud du barrage.

4.3. Estimation des volumes des sédiments déposés ou érodés durant les années 2004-2019

4.3.1. Identification des zones d'érosion et de dépôt au niveau de la retenue du barrage de Boukourdane

Une fois la couche d'évolution de la surface du fond du lit de la retenue est cartographiée, nous avons utilisé l'outil Remblais/déblais (Cut Fill) sur ArcMap, pour identifier les zones d'érosion et de sédimentation (*Fig.4.3*). Cette fonction récapitule les superficies et les volumes modifiés, en prenant des surfaces d'un emplacement donné à deux périodes différentes. Elle permet d'identifier les régions de suppression et d'ajout du matériau de surface, et également, les zones où les surfaces n'ont pas été modifiées.

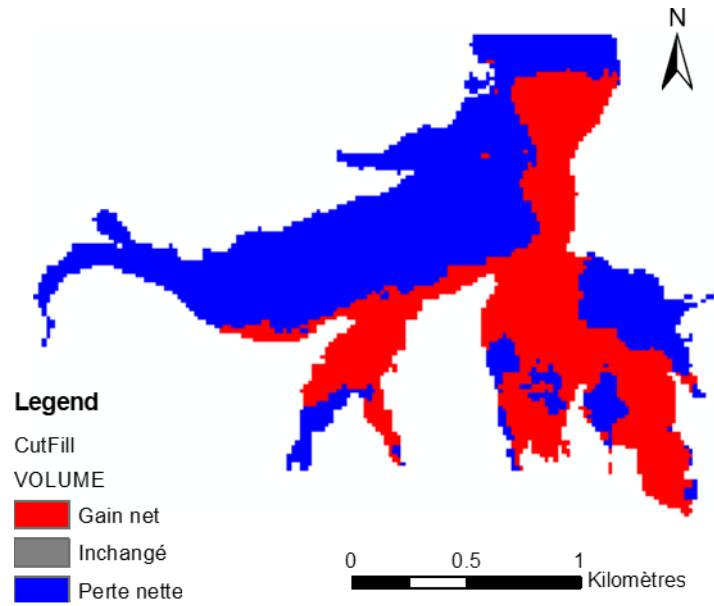


Figure 4.3 : Identification des zones d'érosion et de dépôts au niveau de la retenue du barrage de Boukourdane. Calcul des auteurs via ArcGIS.

4.3.2. Volume des sédiments érodés

Par défaut, lorsque l'outil Remblais/déblais est exécuté, une représentation spécialisée lui est appliquée de façon à mettre en surbrillance les emplacements de remblais/déblais (Fig.4.4). Le déterminant se trouve dans la table attributaire du raster en sortie. Il considère qu'un volume est positif à l'endroit où des matériaux ont été retirés (déblai) et négatif lorsque des matériaux ont été ajoutés [46]. L'exploitation de la table attributaire de la carte ci-dessus nous a permis de calculer le volume total des sédiments érodés. Il a été estimé à environ 27.41 Mm^3 et le volume moyen érodé a été évalué à 0.94 Mm^3 (Fig.4.4).

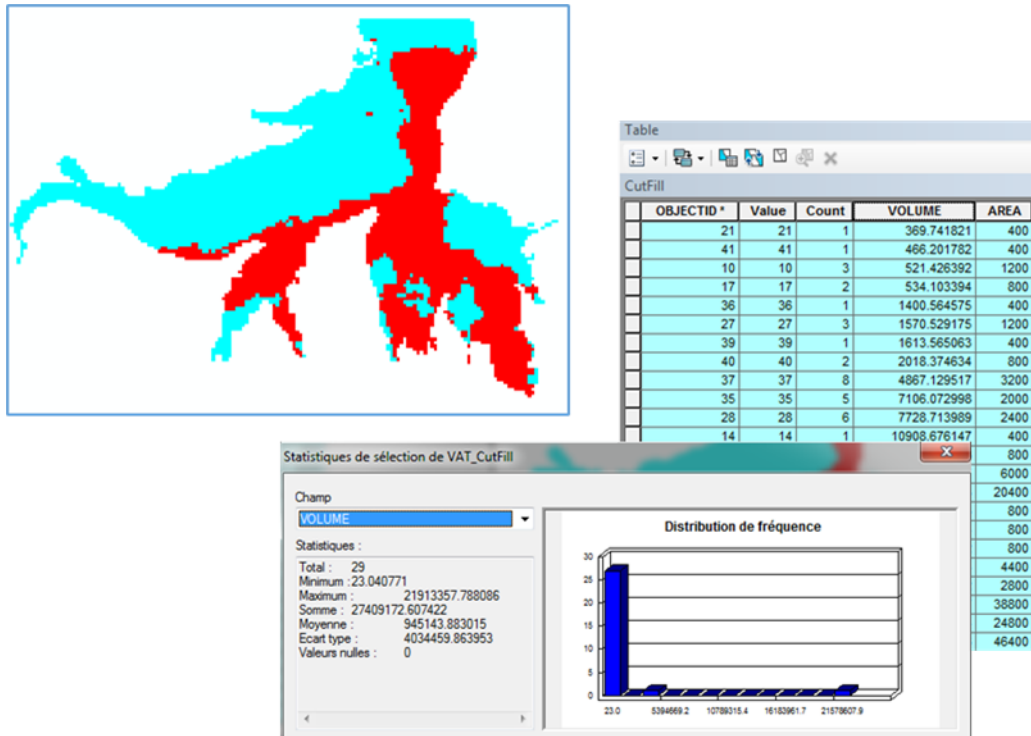


Figure 4.4 : Calcul des volumes des sédiments érodés au niveau de la retenue du barrage de Boukourdane. Calcul des auteurs via ArcGIS.

4.3.3. Volume des sédiments déposés

Le volume total des sédiments déposés au fond de la retenue du barrage de Boukourdane durant la période 2004-2019, peut être calculé soit sur Excel, soit directement sur ArcGIS avec l'outil Statistique, sur la base de la table attributaire des surfaces et des volumes des dépôts (Fig.4.5). Ce volume est estimé à environ 6699602.48 m³ soit 6.7 Mm³.

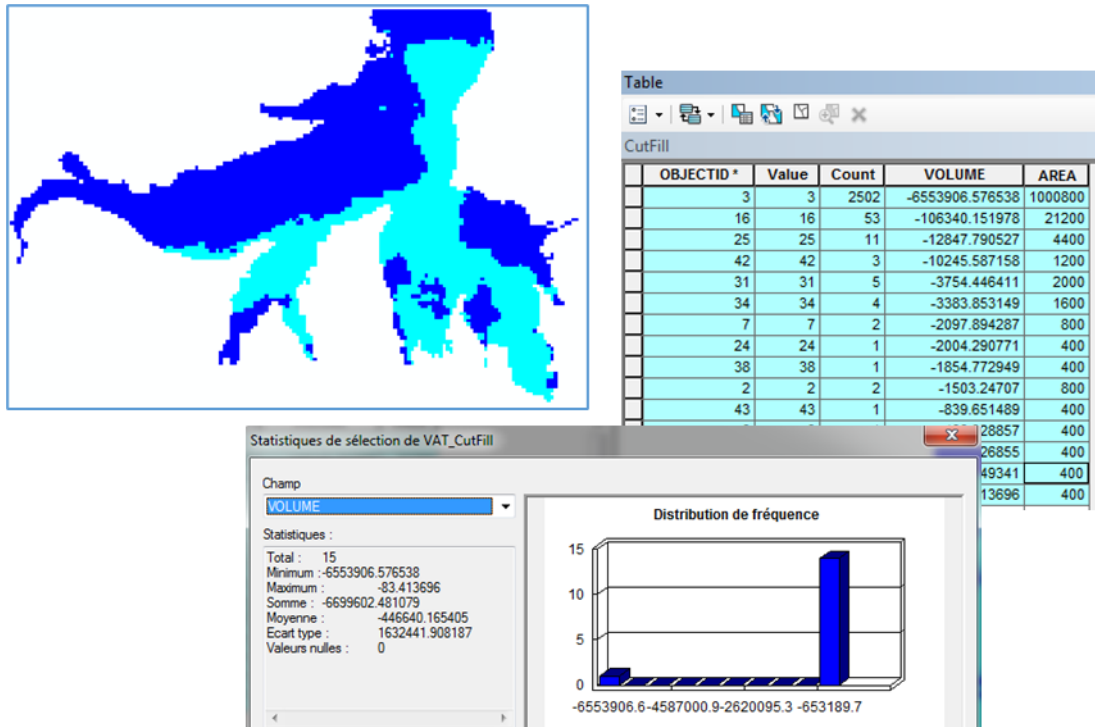


Figure 4.5 : Calcul des volumes des sédiments déposés au niveau de la retenue du barrage de Boukourdane. Calcul des auteurs via ArcGIS.

4.3.4. Diagramme Erosion-Dépôt

Le diagramme érosion – dépôt (Fig.4.6) a été obtenu après exploitation de la table attributaire sur ArcGIS. Il montre le volume important des sédiments érodés au fond de la retenue du barrage de Boukourdane. Nous remarquons que le taux de sédimentation au niveau du barrage est beaucoup plus faible par rapport au volume érodé. Il est évalué à environ 24%. Ceci confirme le fait que le Barrage de Boukourdane est l'un des barrages les plus rares à l'échelle national qui ne s'envase pas.

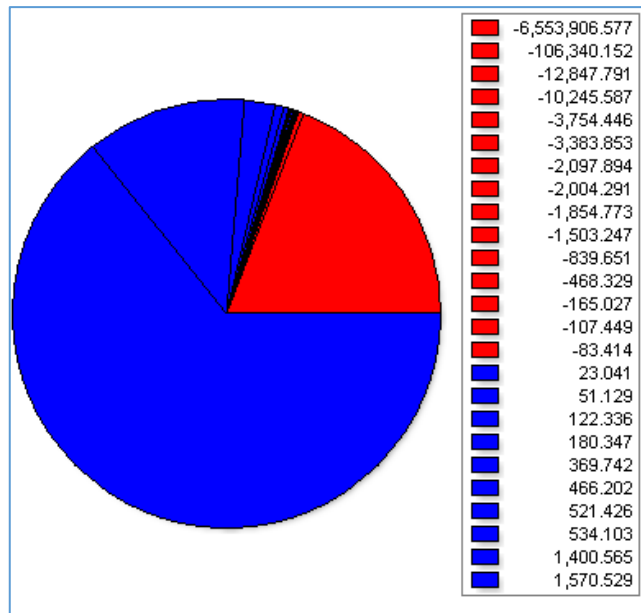


Figure 4.6 : Diagramme Erosion-Dépôt. Calcul des auteurs via ArcGIS.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

À la lumière des résultats obtenus dans le cadre de ce présent travail, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

L'analyse hydrologique a montré que le bassin versant d'Oued El-Hachem présente un relief assez fort, avec une altitude moyenne de 479.85 m.

L'utilisation des indices morphométriques et des outils de géotraitement nous a permis de cartographier le risque érosif au niveau du bassin versant d'Oued El-Hachem et d'analyser son évolution dans la retenue du barrage de Boukourdane. La carte finale élaborée a montré que notre bassin versant présente un faible risque érosif.

Ce résultat s'explique par plusieurs facteurs. D'un part, la bonne structure du sol et sa faible capacité à être érodé et transporté, et d'autre part, l'existence d'une couverture végétale adéquate au niveau de la région.

L'aménagement du bassin versant peut jouer également, un rôle important pour la réduction du risque. En outre, la préservation des sols peut être favorisé par deux facteurs essentiels : le relief accidenté où les terrains favorisent la rétention des eaux de ruissellement, limitant ainsi leur potentiel d'érosion, et la stabilité entre l'accumulation des eaux et les conditions de drainage.

L'étude de la bathymétrie de la retenue du barrage de Boukourdane durant la période de 2004 – 2019, a révélé des variations minimales de la hauteur du lit de la retenue, avec une élévation minimale d'environ 1,80 m. Ces variations sont principalement localisées au sud du barrage, où l'accumulation de sédiments est plus prononcée.

Cependant, malgré le volume érodé au niveau du barrage estimé à environ 27,41 Mm³, le taux de sédimentation reste relativement faible. Il a été estimé à environ 24%. Cela indique que le barrage de Boukourdane peut retenir une grande partie des sédiments en amont, limitant ainsi l'envasement de la retenue. Cette capacité de rétention des sédiments du barrage de Boukourdane est une caractéristique positive qui contribue à la prolongation de sa durée de vie.

Références

Références

- [1] Sedimentation Engineering. ASCE. Manual and reports on engineering practice (1977). N°.54.
- [2] Lecomte, V., Bissonais, Y.L., Renaux, B., Couturier, A., & Ligneau, L. (1997). Érosion hydrique et transfert de produits phytosanitaires dans les eaux de ruissellement. Cahiers Agricultures, 6, pp.175-183.
- [3] Reiffsteck, P., Léonard, C., Vargas, R., & Pailha, S. (2006). Etude comparative d'essais d'érosion interne.
- [4] Touré, Amadou A., Adamou D.T., Jean-Louis R., Christel B., Zibo G., Béatrice M., and Karimou J-M. A. (2018), "Quantification Des Flux d'Érosion Éolienne Au Cours d'Une Transition Champ-Jachère Au Sahel (Banizoumbou, Niger)." *Physio-Géo*, no. Volume 12 pp. 125–42.
- [5] Revel, J. C., Guiresse, M., Rouaud M., (2004), Effet de l'érosion aratoire sur le stockage du carbone au bassin versant du Vermeil (sud-ouest de la France), pp. 336-346, Bulletin du RESEAU EROSION n° 22.
- [6] Camille L., Pierre G., Jean-Claude D., Les formes et les marques de l'érosion glaciaire du plancher rocheux : Signification, terminologie, illustration, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Volume 51, Issues 1–4, 1985, pp. 365-387
- [7] Le Bissonais, Yves & Thorette, Jacques & Bardet, Cécile & Daroussin, Joël & Sigmap., (2002). L'érosion hydrique des sols en France.
- [8] Shi, P., Yan, P., Yuan, Y. et Nearing, M.A., (2004), Wind erosion research in China: past, present and future. *Progress in Physical Geography*, 28(3): pp. 366-386.
- [9] Ahn, S., Doerr, S.H., Douglas, P., Bryant, R.G., Hamlett, C.A., McHale, G.B., Newton, M.I., & Shirtcliffe, N.J. (2013). Effects of hydrophobicity on splash erosion of model soil particles by a single water drop impact. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38.
- [10] de Pina Tavares, J. (2010). Erosion des sols du Cap Vert : processus et quantification à l'échelle de trois Bassins Versants de l'île de Santiago, Université de Bourgogne.
- [11] Ellison W.D. (1944), "Studies of raindrop erosion", *Agric. Eng.* pp. 25131-181.

- [12] Roose, E. (1994), Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) (Vol. 70). Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- [13] Wachal.D.J, Banks.K.E, (2007), Integrating GIS and erosion modeling—a tool for watershed management, ESRI international user conference, Paper no. UC1038.
- [14] Sabir, M., (1987). L'érosion hydrique et sa quantification. Mémoire de DEA, Université de Paris XI.
- [15] Chaplot, V., and Le Bissonnais, Y. (2000), Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 145-153.
- [16] Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K.P. (2018), A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- [17] Djoukbal, O., Hasbaia, M., Benselama, O., & Mazour, M. (2018), Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (N-W of Algeria). *Modeling Earth Systems and Environment*, 5, 725-743.
- [18] Ezzaouini, M.A., Mahé, G., Kacimi, I., & Zerouali, A. (2020), Comparison of the MUSLE Model and Two Years of Solid Transport Measurement, in the Bouregreg Basin, and Impact on the Sedimentation in the Sidi Mohamed Ben Abdellah Reservoir, Morocco. *Water*.
- [19] Laflen, J.M., Flanagan, D.C., Ascough, J.C., Weltz, M.A., & Stone, J.J. (1994), The WEPP Model and Its Applicability for Predicting Erosion on Rangelands.
- [20] Baigorria, G. A. and Romero, C. C. (2007). Assessment of erosion hotspots in a watershed : Integrating the WEPP model and GIS in a case study in the Peruvian Andes. *Environmental Modelling & Software*, vol. 22, p. 1175-1183.
- [21] Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., Griensven, A.V., Liew, M., Kannan, N., & Jha, M.K. (2012). SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55, 1491-1508.

- [22] Mutenyo, I.; Nejadhashemi, P.A.; Woznicki, S.A.; Giri, S. Evaluation of Swat Performance on a Mountainous Watershed in Tropical Africa. *Hydrol. Curr. Res.* 2013, S14, 1–7.
- [23] Van Griensven, A.; Ndomba, P.; Yalaw, S.; Kilonzo, F. Critical Review of SWAT Applications in the Upper Nile Basin Countries. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012, 16, 3371–3381.
- [24] Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S.A., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752.
- [25] Benkaci, S. 2020. Impact du transport solide sur l'évolution des dépôts vaseux dans les barrages. Thèse de doctorat en sciences. Université Saad Dahleb de Blida.
- [26] Tadriss, N. Debauche, O. Remini, B. Dimitri Xanthoulis D., Degre A. (2016). Impact de l'érosion sur l'envasement des barrages, la recharge des nappes phréatiques côtières et les intrusions marines dans la zone semi-aride méditerranéenne : cas du barrage de Boukourdane (Algérie). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 20(4), 453-4
- [27] ANBT, 2019. Rapport Technique : Barrage Boukourdane, Wilaya de Tipaza.
- [28] ANBT, 1994. « Barrage de Boukourdane sur l'Oued El-Hachem, Wilaya de Tipaza ». Monographie.
- [29] Remini, B. Mokeddem, F.Z. Boukourdane (Algérie) : un barrage réservoir qui s'envase peu. *Larhyss Journal*, 35 (2018), 29-44
- [30] Biswas, S., Sudhakar, S. and Desai, V. (1999) Prioritization of Sub-Watersheds Based on Morphometric Analysis of Drainage Basin: A Remote Sensing and GIS Approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 27, 155-166.
- [31] Faye, C. 2018. Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : cas du bassin versant de la Gambie (Bassin continental Guineo-Sénégalais). *Revue Marocaine de Géomorphologie*. N°2. PP 110- 127. ISSN : 2508-9382
- [32] Pande, C.B., Moharir, K.N., & Pande, R. (2018). Assessment of morphometric and

hypso-metric study for watershed development using spatial technology – a case study of Wardha river basin in Maharashtra, India. *International Journal of River Basin Management*, 19, 43 - 53.

[33] Abdellah El Hmadi, P. E. S. Apports Du Modèle Numérique De Terrain Mnt A La Modélisation Du Relief Et Des Caractéristiques Physiques Du Bassin Versant Du Moyen Beht En Amont Du Barrage El Kansera (Sillon Sud Rifain, Maroc).

[34] Boothroyd, R. J. Williams, R. D. Hoey, T. B. Barrett, B. & Prasojo, O. A. (2021). Applications of Google Earth Engine in fluvial geomorphology for detecting river channel change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(1), e21496.

[35] Cătălin, Ș. E. (2018). A SCANNED GEOREFERENCING MAPS USING GLOBAL MAPPER 15 SOFTWARE. *Annals of ‘Constantin Brancusi’ University of Targu-Jiu. Engineering Series*, (4).

[36] Esri France (s.d.). Premiers pas avec ArcGIS Online. Récupéré de <https://resources.arcgis.com/fr/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>

[37] 3D Analyst and ArcScene-ArcMap. Documentation. (n.d.) <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/3d-analyst-and-arcscene.htm>

[38] What is ModelBuilder? ArcGIS Pro. Documentation. (n.d.) <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/what-is-modelbuilder-.htm>

[39] Qu'est-ce qu'ArcMap ? ArcMap. Documentation. (n.d.) <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/latest/map/main/what-is-arcmap-.htm>

[40] Sharma, A. (2010). Integrating terrain and vegetation indices for identifying potential soil erosion risk area. *Geo-Spatial Information Science*, 13(3), 201-209.

[41] Bannari, A. Ghadeer, A. El-Battay, A. Hameed, N.A. Rouai, M. (2017). Detection of Areas Associated with Flash Floods and Erosion Caused by Rainfall Storm Using Topographic Attributes, Hydrologic Indices, and GIS.

[42] Riley, S. J., DeGloria, S. D. and Elliot, R. (1999). A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity, *Intermountain Journal of Sciences*, vol. 5, No. 1-4, pp.23-27.

- [43] BASSAIRATE, O. CHIKHAOUI, M. NAIMI, M. SABIR, M. 2021. Effets de la dynamique de la végétation sur le rythme d'envasement et la disponibilité de l'eau dans le barrage Makhazine (Maroc). *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*. p-ISSN: 2028-991X.
- [44] Dehni. A, Lounis. M, Hassani. M. I. Géotraitement des indices hydro-morphométriques pour l'automatisation des modèles sédimentaires et érosifs (Application sur le BV de la Tafna – Nord-Ouest Algérien)
- [45] Hurem, D. 2023. An index based assessment of Debris Flow susceptibility by using SPI (Stream Power Index) and TWI (Topographic Wetness Index). Faculty of Forestry, Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Turkey. 2nd international conference on innovative academic studies.
- [46] ArcGis for desktop, “Fonctionnement de l'outil Remblai / Déblai”. Esri (2016), Environmental Systems Research Institute, Inc