UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Contribution à la limitation des sédiments par un système de retention : “cas du bassin versant du barrage Mugere”

Nkunzimana, Célestin; Dr-Ir Mvuyekure, Jean Claude

2023
FSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1978

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

République du Burundi
Ministère de l'éducation nationale
et de la recherche scientifique



Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets

Université du Burundi
Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Année Académique: 2021-2022

CONTRIBUTION A LA LIMITATION DES SEDIMENTS PAR UN SYSTEME DE RETENTION : " CAS DU BASSIN VERSANT DU BARRAGE MUGERE"

Mémoire

Présenté publiquement par :

NKUNZIMANA Célestin

En vue de l'obtention du grade de Master en Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets.

Soutenu le 14/09 /2023 devant le jury composé de:

Dr-Ir NZEYIMANA Joseph: Président

Dr-Ir NIYONZIMA Nestor : Lecteur principal

Dr-Ir MVUYEKURE Jean Claude : Directeur

Bujumbura, Septembre 2023

Contribution à la limitation des sédiments par un système de retention : "cas du bassin versant du barrage MUGERE"

Composition du Jury

Dr. Ir NZEYIMANA Joseph: Président

Dr. Ir NIYONZIMA Nestor : Lecteur principal

Dr. Ir MVUYEKURE Jean Claude : Directeur

Dédicace

A Dieu tout puissant,

A mes regrettés parents,

A mes frères et sœurs,

A tous ceux qui me sont chers,

Je dédie ce travail.

REMERCIEMENTS

Au terme du présent travail, l'honneur m'échoit d'exprimer ma gratitude à toutes les personnes tant morales que physiques qui ont fait une contribution de sa réalisation dès le début jusqu'à son aboutissement, mais plus particulièrement à :

- Dieu tout puissant qui me prête encore la vie ;
- Mes regrettés parents qui n'ont ménagé aucun effort afin que je puisse aller à l'école ;
- Mon Directeur de mémoire Dr. Ir MVUYEKURE Jean Claude de m'avoir honoré pour me diriger malgré ses multiples responsabilités ;
- Mes remerciements vont également à l'endroit de ceux qui m'ont formé depuis l'école primaire jusqu'à l'université du Burundi dans le deuxième cycle et plus particulièrement ceux de la faculté des sciences de l'ingénieur par leur formation tant moral que scientifique dont j'ai bénéficiée ;
- La famille GAHUNGU Polycarpe par son soutien moral et financier qu'elle m'a montrée durant toute la période de formation de ce cursus ;
- Tout le personnel de l'IGEBU et géomatique pour un accueil chaleureux pendant la collecte des données utilisées pour ce travail.
- Toute personne qui, de près ou de loin a contribué moralement et financièrement pour l'aboutissement de ce travail qu'elle trouve ici l'expression de ma grande gratitude.

RESUME

L'érosion du sol désigne sa dégradation par l'écoulement de surface du à la tombée de pluie ou au glissement de terrain. Les sols pauvres en matières organiques sont sensibles à l'érosion. Elle est la cause de l'envasement des retenues des barrages (volumes utiles), des bouchages des réseaux d'assainissement routier.

Nous avons reparti ce travail en quatre chapitres dont le premier est consacré à la revue de la littérature, le deuxième est consacré à la présentation de la zone d'étude, le troisième parle de l'évaluation des transports solides, et le dernier parle de la conclusion et recommandation en fonction des résultats trouvés.

Le présent travail aura comme Contribution à la relève de ce défi, la quantification des matières solides charriées par le ruissellement vers l'amont du barrage hydroélectrique de la rivière MUGERE (le tout étant en t/ha/an). Pour y arriver, nous avons procédé par l'usage d'un modèle empirique quantifiant les pertes de terre par an et par hectare appelé RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).

Avec ce modèle nous avons trouvé que la quantité moyenne des terres perdue par an en utilisant le système d'information géographique par l'outil calculateur de raster (Rasta calculator) est de **1.437.416,3** tonnes/an. En considérant la masse volumique des matériaux charriés à 1700 kg/m3 (masse volumique de l'argile), on trouve que le volume total des matériaux charriés est de **845539 m3 /an.** En ramenant ce volume à toute la surface du bassin versant, on trouve que la perte en terre moyenne est environ égale à **5.86mm/an soit 6mm/an**. La vitesse de décantation des particules est de 0.26m/s avec un temps de séjour d'une minute (1 min).Les dimensions du bassin de rétention proposées sont les suivantes : L=130.484m, l=3m, H=2m

Mots clés : **bassin versant, modèle, érosion, barrage**

Contribution à la limitation des sédiments par un système de retention : "cas du bassin versant du barrage MUGERE"

Abstract

Soil erosion refers to its degradation by surface runoff due to rainfall or landslide. Soils low in organic matter are susceptible to erosion. It is the cause of the silting up of dam reservoirs (useful volumes), of the blockages of road sanitation networks.

This work will have as a contribution to meeting this challenge, the quantification of solid matter carried by the runoff upstream from the hydroelectric dam of the MUGERE River (all in t/ha/year). To achieve this, we proceeded by using an empirical model quantifying soil loss per year and per hectare called RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).

With this model we found that the average amount of land lost per year using the geographic information system raster calculator tool (Rasta calculator) is 1,437,416.3 tons/year. Considering the density of the materials transported at 1700 kg/m3 (density of clay), we find that the total volume of the materials transported is 845539 m3/year. By reducing this volume to the entire surface of the watershed, we find that the average soil loss is approximately equal to 5.86mm/year or 6mm/year. The settling velocity of the particles is 0.26m/s with a residence time of one minute (1 min). The dimensions of the proposed retention basin are as follows: L=130.484m, W=3m, H=2m

Keywords: watershed, model, erosion, dam

TABLE DES MATIERES

Composition du Jury i
Dédicace ii
REMERCIEMENTS iii
RESUME iv
Abstract v
TABLE DES MATIERES vi
Listes des tableaux ix
Listes des figures x
Liste des abréviations xi
Avant-propos xii
CHAPITRE 0. INTRODUCTION GENERALE 1
0.1. Objectif global 2
0.2. Objectifs spécifiques 2
0.3. Problématiques 2
0.4. Démarche méthodologique 2
0.5. Résultats attendus 3
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE 4
I.1 Bassin versant 4
I.1.1 Caractéristiques du BV 4
I.1.1.1 Courbe Hypsométrique 6
I.1.1.2 Les indices de pente 8
I.1.1.3 Temps de concentration 9
I.1.2 Calcul du Bilan Hydrique 10
I.2 Concepts relatifs à l'érosion hydrique 11
I.2.1 Définition 11
I.2.2 Processus de l'érosion hydrique 12
I.2.2.1 Le détachement 12
I.2.2.2 Le transport 13
I.2.2.3 La sédimentation 13
I.2.3 Forme de l'érosion hydrique 13

I.2.3.1 Érosion en nappe 13
I.2.3.2 Érosion linéaire 14
I.2.3.3 L'érosion par ravinement « gully érosion » 15
I.2.3.4 Érosion en masse 15
I.2.4 La topographie : 16
I.2.5 Facteur climatique (le climat) 17
I.2.6 Facteurs lithologiques 17
I.2.7 Le couvert végétal 18
I.2.8 Facteurs anthropiques 18
I.2.9 Effets de l'érosion hydrique 18
I.3 MODELISATIO DE L'EROSION HYDRIQUE 19
I.3.1 Types de modèles 19
I.3.1.1 Modèle empirique 19
I.3.1.2 L'équation universelle révisée de perte en terre 20
I.3.2 Particularités et critères de choix du modèle 20
I.3.3 Méthodologie de calcul du modèle RUSLE 21
Présentation des facteurs considérés dans le modèle RUSLE 21
I.4 Concepts relatifs à la télédétection 28
I.4.1 La télédétection et la cartographie 28
I.4.1.1 Définition 29
I.4.1.2 Images utilisées dans cette étude 29
I.4.1.3 Traitements et analyse d'images 30
I.5 Le SIG (Système d'information Géographique) 31
I.5.1 Logiciels et outils de traitements des données 33
I.6 Concepts relatifs au dessablage des barrages 33
I.6.1 Définitions 33
CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE 35
II.1 Bassin Versant du barrage de MUGERE 35
II.2 CADRE CLIMATIQUE 36
II.2.1 Pluviométrie 36
II.2.1.1 Prétraitement des données 36

II.3 CADRE HYDROLOGIQUE....39
II.3.1 Caractérisation du réseau hydrographique....39
II.3.1.1 Classification des affluents dans notre zone d'étude....39
II.3.2 Polygone de Thiessen....41
II.4 RELIEF....43
II.5 CADRE PEDOLOGIQUE....57
II.6 COUVERTURE ET UTILISATION DES SOLS....59
II.6.1 Acquisition....59
II.6.2 Traitement : Elaboration de la carte d'occupation du terrain....59
CHAPITRE III : EVALUATION DES TRANSPORT SOLIDES....63
III.1 EROSION....63
III.2 Evaluation de transport solide par le modèle RUSLE....65
III.3 Quantification de perte des terres moyenne dans le bassin versant de la MUGERE....72
III.4 Perspectives et voies d'amélioration....78
CHAPITRE IV : CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATION....82
IV.1 Conclusion générale....82
IV.2 Recommandation....83
Références bibliographiques....84

Listes des tableaux

Tableau I-1: Classification du relief selon ORSTOM.....8
Tableau I-2:Temps de concentration selon les différents auteurs.....9
Tableau I-3: Formes de l'érosion linéaire (Hadir, 2010).....14
Tableau I-4: Classification de l'indice de susceptibilité des sols.....24
Tableau I-5: Valeur de K selon la texture du sol.....25
Tableau II-1: Répartition de la pluviométrie et température de la zone d'étude.....36
Tableau II-2: Données pluviométriques de BUHONGA.....37
Tableau II-3: Précipitation de GISOZI.....38
Tableau II-4:Répartition des différentes surfaces en fonction des altitudes.....49
Tableau II-5:Temps de concentration pour les différents auteurs.....54
Tableau II-6: Synthèse des caractéristiques du bassin versant.....56

Listes des figures

Figure 1: Type du bassin versant....4
Figure 2: Allure d'une courbe hypsométrique (Laborde, 2009). 7
Figure 3: Bilan hydrique selon Laborde (2009)....10
Figure 4: Mécanisme de l'érosion....12
Figure 5: Ravins engendrés par l'érosion dans le BV du barrage....15
Figure 6: Fonctionnement du modèle RUSLE....21
Figure 7: Classification des structures des sols....24
Figure 8:Valeurs de référence du facteur P selon les pentes et l'utilisation de surface 28
Figure 9:Classificaion des images....31
Figure 10:Représentation des différentes couches en format Raster ou Vecteur....32
Figure 11: Limites administratives de la zone d'étude 35
Figure 12: Ordre des affluents du bassin versant du barrage MUGERE 40
Figure 13:Polygone de thiessen entre 3 stations 41
Figure 14: Polygone de THIESSEN du Bassin Versant du Barrage MUGERE....42
Figure 15:Carte de relief du Bassin versant du barrage MUGERE 44
Figure 16: Carte topographique du Bassin Versant du barrage MUGERE....45
Figure 17: Profil en long de la rivière dans le BV du barrage Mugere....46
Figure 18: Carte des pentes du BV du barrage MUGERE....48
Figure 19: Courbe hypsométriques du BV du barrage MUGERE....50
Figure 20: Carte hypsométrique du Bv du barrage MUGERE 52
Figure 21: Carte pédologique du BV du barrage MUGERE 58
Figure 22: Répartition de la couverture du sol dans le BV du barrage MUGERE 60
Figure 23:Carte d'occupation du sol....61
Figure 24: Facteur d'érosivité R dans le bassin versant....66
Figure 25: Facteur d'érodabilité k dans le bassin versant....67
Figure 26: Carte facteur LS....69
Figure 27:Carte Facteur C....71
Figure 28:Carte d'érosion du BV du barrage MUGERE....74
Figure 29:Taux de pertes en terres selon le degré de la pente....75
Figure 30:Taux de pertes en terres en fonction de l'altitude....76
Figure 31:Taux des pertes en terre selon le type du sol 77
Figure 32:Taux des pertes en terres selon la couverture du sol 78

Liste des abréviations

BV: Bassin Versant

DUSLE: Differential Universal Soil Loss Equation

ESRI: Environmental Systems Research Institute

FAO: Food and Agriculture Organization

HWSD: Hamonise World Soil Data Base

IGEBU: Institut Geographique du Burundi

JRC: Centre Commun de recherche

MNT: Modèle Numérique du Terrain

MPA: Moyenne Pluviométrique Annuelle

MW: Mega Watt

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NDVI: Indice de Végétation par Différence Normalisée

NLI: National Land Imaging

OLI: Operational Land Imager

PIR: Proche Infrarouge

REM: Rayonnement Electromagnétique

RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation

SIG: Systeme d'Information Géographique

SWM: Stanford Watershed Model

TIRS: Thermal Infrared Sensor

USGS: United States Geological Survey

USLE: Soil Loss Equation

Avant-propos

La démographie galopante et l'extension des terres cultivables ont augmenté l'érosion dans le bassin versant du barrage MUGERE. Certains facteurs comme la déforestation, construction des maisons, agriculture ont augmenté et ont provoqué à leur tour une érosion importante dans le BV. Certaines mesures ont été proposées pour diminuer la quantité des terres érodées chaque année comme le traçage des courbes antis érosives (haies) puisque la zone présente des fortes pentes donc il y a susceptibilité de risque d'érosion dans le BV du barrage MUGERE.

Malgré ces mesures, la quantité des sédiments qui se déposent en amont du barrage reste ce qui peut perturber le fonctionnement du barrage surtout pendant les saisons pluvieuses. Le présent travail de fin d'étude intitule **: «CONTRIBUTION A LA LIMITATION DES SEDIMENTS PAR UN SYSTEME DE RETENTION : CAS DU BV DU BARRAGE MUGERE »** s'inscrit dans le cadre de diminution des sédiments au niveau du barrage.

Au cours du présent mémoire, la quantification des sédiments au niveau du barrage a été évaluée en conjonction avec les SIG. Il a été également évalué la portion de terre enlevée par an et aussi le taux des pertes en terres en fonction des différentes altitudes du bassin, de la pente, de la couverture végétale et texture du sol.

CHAPITRE 0. INTRODUCTION GENERALE

Dans son chemin vers le développement durable, le Tiers Monde en général et le Burundi en particulier a besoin d'une source d'énergie adéquate, suffisante, renouvelable et durable.

Etant doté d'un climat favorisant que le cycle de l'eau soit plus ou moins constant dans le temps, ce qui fait que l'eau de pluie reste en quantité suffisante et d'un relief offrant un potentiel hydroélectrique élevé, le BURUNDI a été évalué en 1983 à 1 700 MW, dont environ 300 MW sont des sites d'une capacité de plus d'un 1 MW. Seuls 32MW sont exploités.

En 2017, la fourniture d'électricité par les centrales hydroélectriques constituait 39% de la production électrique totale, le barrage de MUGERE fournissant 8 MW soit 10 % de la production totale.

Cependant, les aménagements hydroélectriques font face à un problème de sédimentation de leurs retenues, ce qui a un impact négatif sur la capacité de stockage des barrages et ainsi la génération en électricité. Le barrage de MUGERE a été construit avec une capacité de retenue d'eau de 74500m^3.

La sédimentation est un processus engendré par l'érosion hydrique du bassin versant en amont du barrage. Ainsi, étudier la sédimentation revient à étudier l'érosion au sens plus large sur l'étendue du bassin versant.

C'est ainsi que ce travail visera à étudier l'érosion hydrique du bassin versant drainé par le barrage, essayer de quantifier la quantité déposée au pied du barrage, et proposer un bac de dépôt de ces sédiments en amont du barrage.

Le modèle employé est le modèle RUSLE en conjonction avec les outils SIG du logiciel ArcGis pour faciliter la modélisation. Ces outils, basés sur la télédétection multispectrales spatiale, vont nous permettre de décrire et classifier tous les paramètres nécessaires à la mise à jour des données géospatiales concernant l'hydrologie, l'occupation des sols et la topographie d'une part et à l'intégration et à la compilation de ces données dans un logiciel de système d'information géographique d'autre part.

0.1. Objectif global

L'objectif global est de limiter les sédiments accumulés au point du barrage et de proposer un bassin de stockage de ces sédiments pour interrompre leur cheminement dans le barrage.

0.2.Objectifs spécifiques

Plus spécifiquement, les points suivants seront traités ;

- Atténuation des sédiments dans le bassin versant du barrage MUGERE ;
- Evaluation de transport solide dans le bassin versant ;
- Propositions des dimensions d'un bac de rétention des sédiments en amont du barrage en tenant compte de la topographie du lieu et de la quantité des terres perdues ;

0.3.Problématiques

Plusieurs ouvrages hydrotechniques aménagés afin d'exploiter le volume d'eau stocké en amont de ces derniers, souffrent souvent d'un phénomène de sédimentation (du à l'érosion) et causant la diminution du volume d'eau utile stocké. Des barrages construits pour des durées de vie longues se trouvent colmatés en peu de temps à cause de l'érosion. C'est pour cette raison qu'on va évaluer la quantité des sédiments qui se déposent en amont du barrage par ha/an et proposer un système de rétention.

0.4.Démarche méthodologique

Afin d'arriver à la fin de ce travail et atteindre les objectifs visés, la méthodologie adoptée est la suivante :

- ❖ Consultation des différents ouvrages dans la bibliothèque et sur les sites internet afin de bien formuler la revue de la littérature ;
- ❖ Collecte des données au sein des différentes institutions (IGEBU, BCG) ;
- ❖ Visite sur terrain pour voir l'état des lieux de la zone d'étude. ;
- ❖ Traitements des données collectées ;
- ❖ Evaluation des sédiments charriés dans tout le bassin versant ;
- ❖ Proposition des bassins de rétention des sédiments évalués ;

0.5. Résultats attendus

Comme c'est un travail de recherche qui doit faire la contribution au pays les résultats attendus sont :

- Le BV du barrage MUGERE est délimité, toute sa superficie est connue ;
- Les pertes de terres dans le bassin sont quantifiées ;
- Les sédiments qui se déposent au barrage sont maitrisés et ne causent plus aucun ennui sur le barrage ;
- Les données trouvées pourront satisfaire pendant les études ultérieures ;
- Les dimensions des bassins qui retiendront les sédiments sont connus ;

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE

I.1 Bassin versant

Un bassin versant constitue l'ensemble du territoire drainé par un cours d'eau principal et ses tributaires, lesquels s'écoulent et convergent vers un même point de sortie appelé exutoire.

Il peut être hydrologique ou topographique.

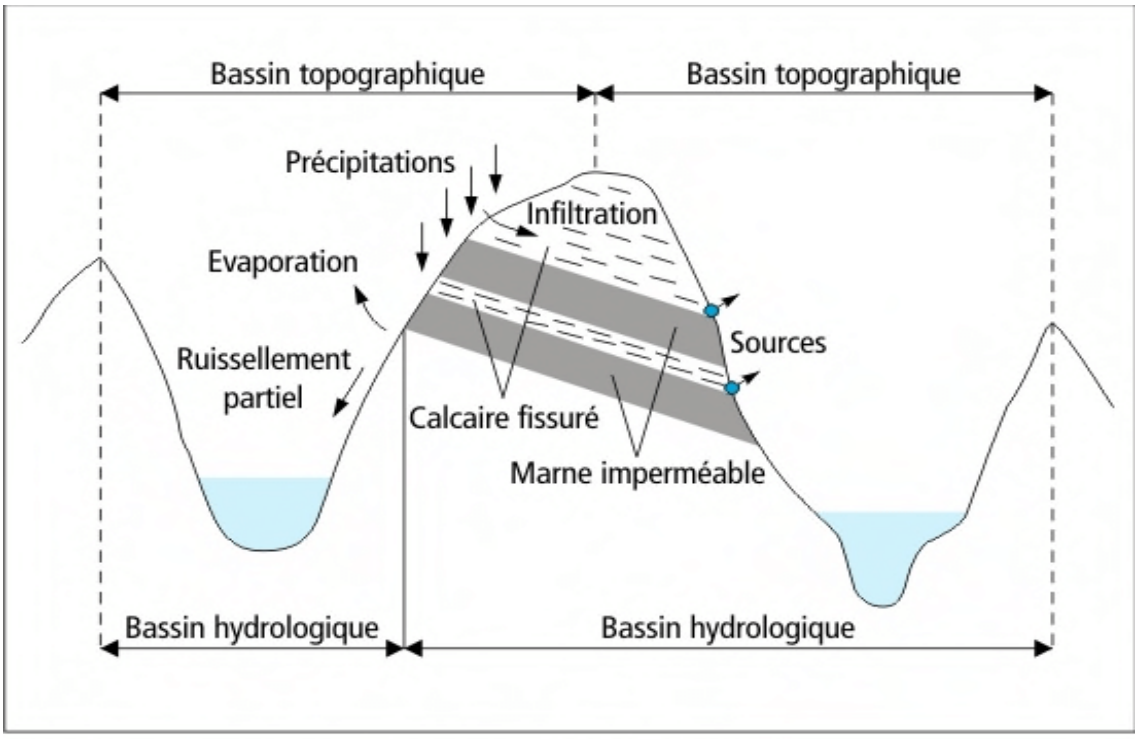


Figure 1*: Type du bassin versant*

I.1.1 Caractéristiques du BV

A. La surface

La surface constitue l'aire de réception des précipitations qui alimentent un cours d'eau par écoulement. Le débit du cours d'eau à l'exutoire dépend donc en partie de la surface.

B. Le périmètre et rectangle équivalent

Le périmètre est la caractéristique de longueur la plus utilisée. Le périmètre peut être mesuré directement sur la carte topographique par curvimètre ou de manière indirecte en utilisant la longueur du rectangle équivalent. [1]

$$\boldsymbol{P = 2(L + l)} \quad [1]$$

Avec P : périmètre du bassin versant (km),

L : longueur du rectangle équivalent (km),

l : largeur du rectangle équivalent (km),

C. Rectangle équivalent

Est le rectangle de longueur L et de largeur l qui a la même surface et le même périmètre que le bassin versant:

[2]

$P = 2(L + l)\ et\ A = L * l$

$$\begin{cases} L = \dfrac{\mathbf{P} + \sqrt{\boldsymbol{P^2 - 16A}}}{\mathbf{4}} \\ l = \dfrac{\mathbf{P} - \sqrt{\boldsymbol{P^2 - 16A}}}{4} \end{cases} \quad [3]$$

Avec P : périmètre du bassin versant (km),

L : longueur du rectangle équivalent (km),

l : largeur du rectangle équivalent (km),

A : surface du bassin versant (km2).

D. Le coefficient de Gravelius

Le coefficient de Gravelius sert à déterminer la forme du bassin versant. Sa formule est la suivante :

$$\boldsymbol{K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}} \quad [4]$$

P : Périmètre du bassin versant Km

A : Surface du bassin versant en km^2

E. La pente moyenne d'un cours d'eau

La pente moyenne d'un cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin .Une pente abrupte favorise l'écoulement superficiel tandisque une pente donne à l'eau le temps de s'infiltrer entièrement ou en partie dans le sol.

$$\boldsymbol{P_{moy} = \frac{DH_{max}}{L}} \quad [5]$$

Où $P_{moy} = Pente\ moyenne\ du\ cours\ d'eau\ principale$

$DH_{max} = Denivellée\ du\ cours\ d'eau$

$L = Longueur\ du\ cours\ d'eau\ principale$

F. La densité de drainage

Selon Horton, la densité de drainage est le rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique et la superficie du bassin versant.

$$\mathbf{D_d = \frac{\sum L_i}{A}} \quad [6]$$

I.1.1.1 Courbe Hypsométrique

L'altitude fait partie des caractéristiques morphométriques du bassin versant. Elle matérialisée sur une courbe hypsométrique qui une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude.

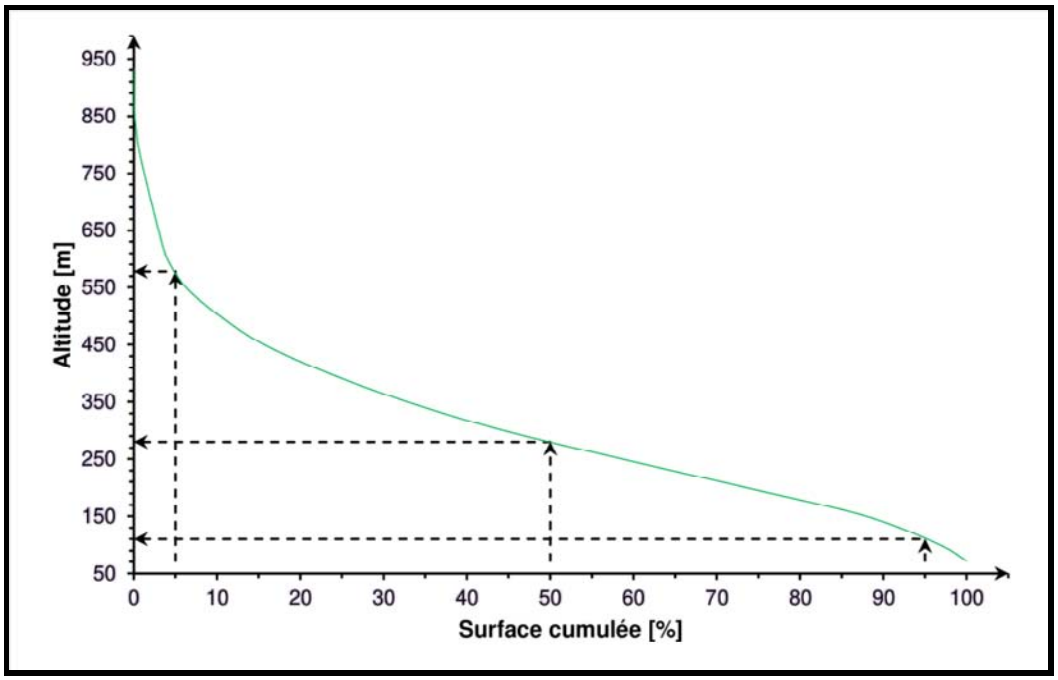


***Figure 2*: Allure d'une courbe hypsométrique (Laborde, 2009).**

Altitude moyenne :

$$H_M = \frac{1}{A}\sum_{i=1}^{n}\left[S_i \frac{h_{i+h_{i+1}}}{2}\right] H_M \qquad [7]$$

Hmoy : Altitude moyenne du bassin versant en (m).

- A : Surface totale du bassin versant en (Km2).
- Si : La surface comprise entre deux courbes de niveau en (Km2).
- hi, hi+1 : Altitudes haut et bas qui délimite la surface Si en (m).

Altitude médiane : Correspond au point d'abscisse 50 % sur la courbe hypsométrique.

L'altitude maximale et minimale du bassin : Altitude la plus fréquente : c'est l'altitude correspondante au maximum de superficie sur la courbe hypsométrique.

Tableau I-1: Classification du relief selon ORSTOM

R1	Relief très faible		$D_S<$	10m
R2	Relief faible	10m	$< D_S<$	5m
R3	Relief assez faible	25m	$<D_S<$	50m
R4	Relief modéré	50m	$<D_S<$	100m
R5	Relief assez fort	100m	$<D_S<$	250m
R6	Relief fort	250m	$<D_S<$	500m
R7	Relief très fort	500m	$<D_S$	

I.1.1.2 Les indices de pente

Les indices de pentes font également partie des caractéristiques morphométries du bassin versant.

On distingue 3 types d'indices :

- ✓ La pente moyenne
- ✓ L'indice de pente de Roche
- ✓ L'indice de pente globale

a. La pente moyenne

La pente moyenne du bassin versant donne une indication directe sur le temps de parcours de ruissellement direct.

$$\mathbf{I_m = \frac{D \times L}{A}} \quad \textbf{[8]}$$

Ou I_m : La pente moyenne du bassin versant (m/km ou ‰)

D : Distance entre deux courbes de niveau en (m)

L : Longueur totale des courbes de niveau en (m)

b. L'indice de pente de Roche

Il est égal à la somme des racines carrée de la pente moyenne de chacun des éléments pondérées par la surface intéressé (M. Roche 1963)

$$I_p = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{n} x_i \sqrt{\frac{a_i - a_{i-1}}{x_i}} \quad [9]$$

c. Indice de pente globale

$$I_G = \frac{D}{L} \quad \textbf{[10]}$$

Ou D : Dénivelée

L : Longueur du cours d'eau.

I.1.1.3 Temps de concentration

Il correspond au temps nécessaire pour permettre à l'eau de ruisseler du point le plus reculé du bassin versant jusqu'à l'exutoire. Pratiquement le temps de concentration peut être déduit des mesures sur le terrain ou s'estimer à l'aide des formules le plus souvent empiriques.

Tableau I-2:Temps de concentration selon les différents auteurs

Auteurs	**Formule**
Ventura	$00.1272 \times \frac{\sqrt[3]{S}}{I}$
Sokolovski	$L/(3.6 \times Vr)$
Turaza	$0.108 \times \frac{\sqrt[3]{S \times L}}{\sqrt{I}}$
Giandotti	$60(0.4\sqrt{S} + 0.0015 \times L)/0.8(\sqrt{LI})$
KIRIPICH	$T_C = 0.195.L^{0.11}.P^{-0.385}$
CARFORNIA	$T_C = \left(\frac{0.87.L^3}{H_{max} - H_{min}}\right)^{0.386}$

Où : T_C : Temps de concentration en min

L : Longueur du talweg principal en $[Km]$

P : Pente du bassin versant en m/m

H_{max}, Hmin : Respectivement la hauteur moyenne et minimale du bassin versant en $[m]$

I.1.2 Calcul du Bilan Hydrique

Le bilan hydrique peu s'exprimer ainsi pour une période et un bassin donnés :

$$\boldsymbol{P + S = R + ET + (S + \Delta S)[mm]} \qquad [11]$$

S : Ressources (accumulation) de la période précedente10

ET =Evapotranspiration

ΔS= Variation de stockage

S+ΔS= ressource accumulées à la fin de la période

Le schéma ci-dessous montre les différents termes du bilan hydrique **[Musy.Soutter.1991]**.

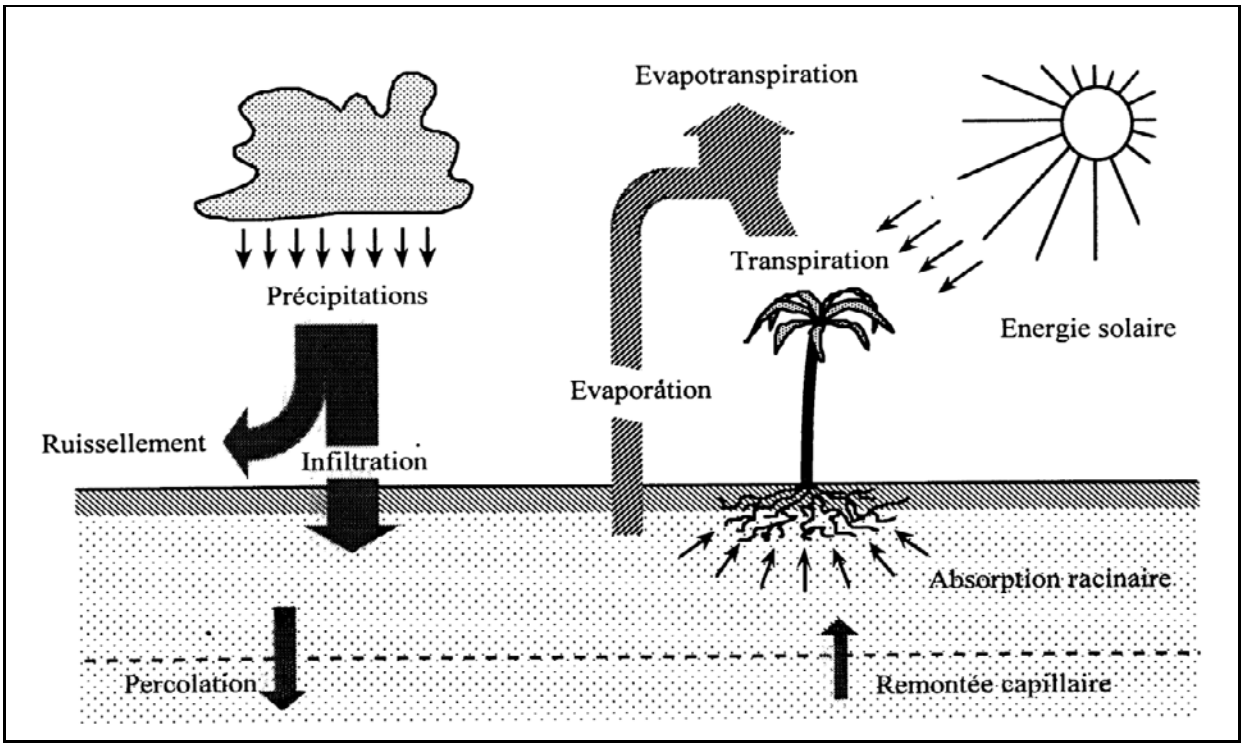


Figure 3: Bilan hydrique selon Laborde (2009)

La variation de stockage en eau dans le sol est définie dans l'équation du bilan hydrique comme la différence entre les apports par infiltration F et les pertes par évapotranspiration ET et par percolation profonde D

$$\mathbf{F - (ET + D) = \Delta S} \quad [12]$$

L'équation du bilan hydrique peut encore se formuler comme suit en se basant sur la notion de pluie nette et d'interception par le couvert végétal :

$$\boldsymbol{P = I + ET + F + P_n} \quad [13]$$

Où : P=Pluie totale ou pluie globale

I=Interception par la couverture végétale

ET=Evapotranspiration

F =Infiltration

S=Stockage dans les dépressions (pertes par mouillage et par stockage)

P_n=Pluie nette

I.2 Concepts relatifs à l'érosion hydrique

I.2.1 Définition

L'érosion façonne la Terre depuis qu'elle est émergée. C'est un phénomène complexe causé généralement par l'action combiné de pluie et de ruissellement qui ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol.

L'érosion peut être définie comme un phénomène de déplacement des matériaux à la surface du sol sous l'action de l'eau, du vent, de l'homme ou simplement de la gravité [2]. C'est un phénomène naturel caractérisé par des processus de détachement des particules du sol par les précipitations et le ruissellement, leur transport par les eaux superficielles qui ruissellent et leur dépôt le long du trajet suivi par les eaux superficielles sur les versants et dans les cours d'eau [3].

Cependant, les études scientifiques sur l'érosion n'ont commencé qu'au début du XX. Il fallut encore attendre les années 1940 pour qu'un chercheur découvre que l'énergie cinétique développée par la chute des gouttes de pluie était à l'origine de la dégradation de la surface du sol, du ruissellement et d'une bonne partie de l'érosion observée sur les terres cultivées, c'est l'effet splash [4].

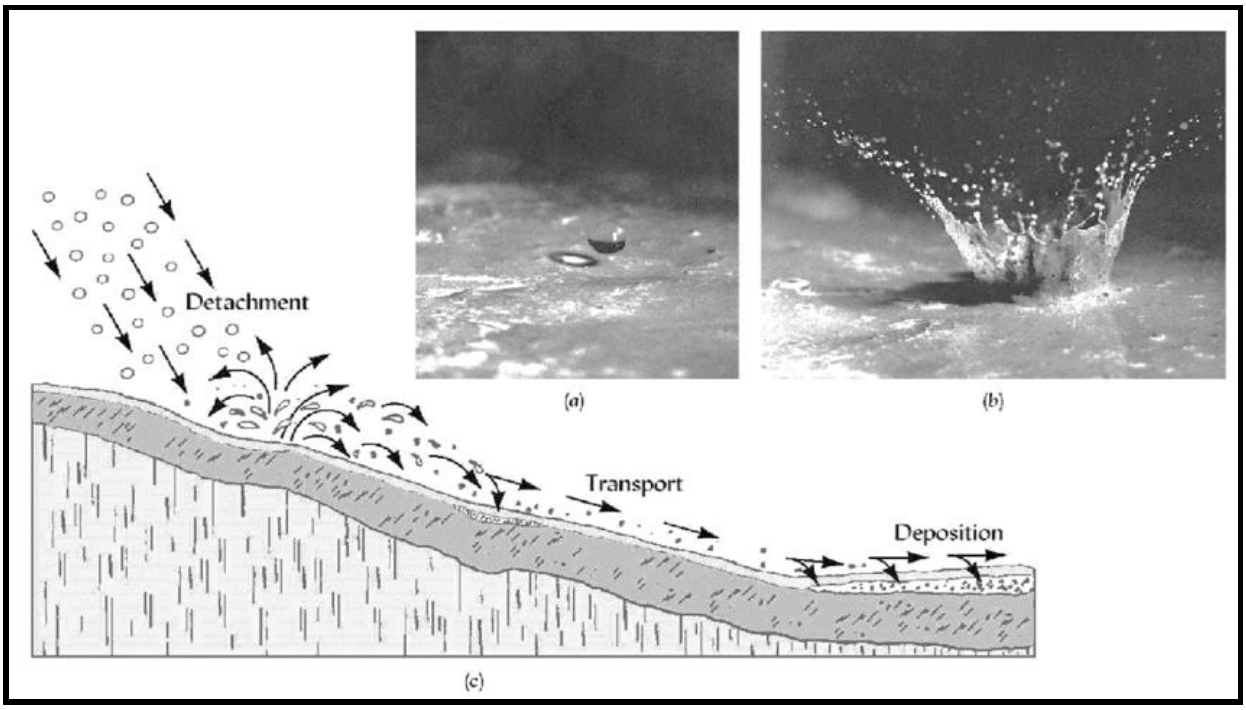


Figure 4: Mécanisme de l'érosion

I.2.2 Processus de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est le résultat de trois principaux mécanismes : le détachement des particules, leur transport et leur sédimentation.

I.2.2.1 Le détachement

Le détachement des particules du sol se produit sous l'action de deux agents érosifs : la pluie et le ruissellement.

- la pluie, qui est reconnue depuis longtemps comme un agent essentiel de l'érosion des sols [4]. L'énergie et l'eau apportées par les gouttes de pluie sont à l'origine de la déstructuration des agrégats présents à la surface [5] .Le potentiel érosif de la pluie est désigné par le terme général d'érosivité [6]qui dépend de l'intensité et des caractéristiques des gouttes de pluie comme la taille et la vitesse. L'impact des gouttes de pluies sur la surface de sol provoque le détachement des particules de sol qui seront éjectés de la surface et transportés, avant de se déposer à la surface.

- Le ruissellement est un moteur essentiel de l'érosion, il détache, transporte et exporte des fragments de sol [7].Les principales variables qui contrôlent l'action du ruissellement sur le détachement et le transport de particules sont la pente, la vitesse et l'épaisseur de l'écoulement.

I.2.2.2 Le transport

Les particules de sols détachés sont transportées vers le bas des pentes sous l'action des écoulements de surface par suspension, saltation et traction sur des distances plus ou moins importantes.

Quand la charge en sédiments est inférieure à la capacité de transport de l'écoulement, les particules de sol peuvent être ainsi transportées. Quand la charge est supérieure à la capacité de transport, les sédiments en excès se déposent. L'exportation des sédiments par le ruissellement est grandement influencée par le fait que la lame d'eau soit soumise ou non à l'impact des gouttes de pluie.

Pour un écoulement en nappe peu épais (érosion diffuse), la pluie tend à augmenter la concentration et la granulométrie de la charge solide exportée [8]. Il existe d'autres facteurs moins importants qui favorisent le déplacement et le transport des particules de sol tels que la gravité et le vent.

I.2.2.3 La sédimentation

La sédimentation est le mécanisme qui contrôle et peut limiter la quantité de sédiments exportés. Elle se produit quand la capacité de transport de l'écoulement est dépassée. Cette troisième phase du processus d'érosion hydrique apparaît donc par exemple lors du ralentissement du ruissellement. Les particules les plus grossières sont les premières à sédimenter, les plus fines étant transportées plus loin. On parle de tri granulométrique [9].

I.2.3 Forme de l'érosion hydrique

I.2.3.1 Érosion en nappe

L'érosion en nappe est le stade initial de la dégradation des sols par l'érosion hydrique. Il s'agit en réalité d'une fonte de l'horizon humifère superficiel combiné à la remontée en surface des cailloux par un travail profond du sol. Après quelques pluies, les terres fines sont entraînées par les pluies tandis que les cailloux, trop lourds pour être emportés, s'accumulent à la surface du sol

[10]L'importance de l'érosion en nappe dépend à la fois de l'intensité et de l'énergie des pluies qui favorisent le détachement des particules et déclenchent le ruissellement, et de la durée des pluies. Les particules migrent par sauts successifs de l'amont vers l'aval.

I.2.3.2 Érosion linéaire

Une érosion linéaire se produit quand le ruissellement en nappe se concentre et acquiert, par augmentation de la vitesse d'eau, un pouvoir érosif accru ce qui provoque des incisions linéaires dans le sol de plus en plus profondes [11]

On parle de griffes lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur, de rigoles lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur, En effet, sur un bassin versant ou une parcelle, l'érosion en rigoles succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissellement dans les creux. A ce stade, les rigoles ne convergent pas mais forment des ruisselets parallèles.

Quand les rigoles constituent un réseau bien ramifié et atteignent une profondeur d'ordre métrique, on parle dans ce cas de l'érosion par ravinement (gully erosion).

Les ravins constituent la forme la plus évoluée de l'érosion linéaire, et se répartissent sur l'ensemble du terrain. Parfois, lorsque le substrat est dur, les ravins s'élargissent par sapement des berges qui constituent la principale source des sédiments transporté [12].

Tableau I-3: Formes de l'érosion linéaire (Hadir, 2010).

Formes	**Tracé**	**Longueur**	**Largeur**	**Profondeur**
Griffe	Sinueux	<1 m	< 10 cm	5-6 cm
Rill	Rectiligne	Centaine de m	10-20 cm	5-10 cm
Rigole	Sinueux	Dizaine de m	5-70 cm	10-30 cm
Ravine	Peu sinueux	Centaine de m	50 cm à 1m	30-50 cm
Petit ravin	Peu sinueux	Centaine de m	50 cm à 1m	50-200 cm

I.2.3.3 L'érosion par ravinement « gully érosion »

L'érosion par ravinement est une forme accentuée de l'érosion par rigoles. Au cours du temps, les eaux se concentrent dans les rigoles et les creusent de plus en plus en forme de V si le substratum est tendre, et en forme de U si le substratum est dur. Il s'agit d'une érosion régressive.



Figure 5: Ravins engendrés par l'érosion dans le BV du barrage

I.2.3.4 Érosion en masse

L'érosion en masse déplace un volume de sol à l'intérieur de la couverture pédologique selon des formes telles que les mouvements de masse, les coulées de boue et les glissements de terrain. C'est un phénomène qui a lieu sur les terrains en pente forte.

La cause des mouvements de masse provient du déséquilibre entre d'une part la masse sol, de l'eau stockée et des végétaux qui le couvrent et d'autre part, les forces de frottement qui permettent la stabilisation de ces matériaux sur la roche altérée, en pente. Les mouvements de masse constituent la manifestation d'un processus appelé solifluxion. [13].

On distingue :

a) Les glissements de terrain :

Les glissements de terrain se produisent sans dépassement de la limite de liquidité. Un glissement de terrain peut survenir lorsque l'eau de pluie pénètre dans la terre au sommet d'une pente, s'infiltrant dans les fissures et les espaces interstitiels. D'après Hafida (2010), ce phénomène est très courant sur les schistes et sur les marnes en voie d'altération.

b) Les coulées de boues :

Elles se produisent lorsqu'un mélange d'eau et de terre à haute densité atteint et dépasse le point de liquidité. Alors, l'ensemble perd sa cohésion et s'écoule à grande vitesse.

4. Facteurs de l'érosion hydrique

Deux principaux types de facteurs de l'érosion peuvent être distingués : les facteurs naturels regroupés sous quatre grandes familles : topographie, climat, lithologie et couvert végétal, et les facteurs anthropiques relatifs aux activités humaines.

I.2.4 La topographie :

Plusieurs chercheurs ont mis en évidence l'effet de la topographie sur l'érosion. Nombreux sont ceux qui ont montré que la topographie agit sur le ruissellement et les pertes en sol par deux composantes [14]:

- la longueur de la pente car plus la pente est longue, plus les eaux ont tendance à se concentrer graduellement dans les fissures ou rainures, ce qui entraîne un apport considérable en eau et en sédiments
- le degré de la pente car plus le degré de l'inclinaison des versants est important, plus l'énergie cinétique de l'écoulement et la détectabilité des particules du sol sont importantes

Dans les milieux semi-arides et arides, le recouvrement de la surface du sol par des fragments de roches diminue le ruissellement et la perte des sols, même si la pente est forte. Par ailleurs, l'érosion est moins intense sur les pentes concaves que sur les pentes convexes (FAO, 1976). La perte en terre est plus grande les pentes rectilignes [10]

I.2.5 Facteur climatique (le climat)

La pluie est essentiellement à l'origine de l'érosion par son impact sur les particules des sols qu'elle détache ainsi des matériaux de surface. Quand les particules détachées, la quantité de pluie qui ruisselle détermine le mouvement de sédiments des interfluves vers le réseau de drainage. L'action causée par l'impact de la pluie commence quand la première goutte percute le sol, au travers de sa capacité à détacher des particules de la surface. Ce processus représente le premier stade de l'érosion hydrique des sols [15]

L'érosivité des pluies se définit comme étant la capacité potentielle de la pluie à causer l'érosion [16].Cette érosivité dépend des caractéristiques de la pluie (la taille et la vitesse des gouttes, à l'intensité de la pluie) et à l'état de surface de sol.

Les caractéristiques de la pluie, peuvent être modifiées par l'action du vent par l'augmentation de la vitesse d'impact, du couvert végétal, et des conditions hydriques du sol. Les autres facteurs climatiques exerçant une influence sur l'érosion des sols sont, la température, les variations saisonnières des orages, leur localisation, leur fréquence et le régime de vents. L'influence du climat sur l'érosion est difficile à évaluer à cause des variations de paramètres climatiques, aussi bien que celle des autres caractéristiques du bassin versant [17].

I.2.6 Facteurs lithologiques

L'érodabilité du sol désigne sa susceptibilité face aux processus d'érosion. Elle est fonction des propriétés physico-chimiques du sol (texture, profondeur, pierrosité, teneur en matière organique) et de la cohésion qui existe entre ces particules.

Il existe trois propriétés essentielles des sols pour déterminer leur érodabilité et pour évaluer leur résistance à l'érosion :

- la teneur en limon et surtout en argile
- la matière organique qui assure la cohésion du sol
- les caractéristiques minéralogiques et chimiques des sols qui ont un rapport avec la cohésion.

I.2.7 Le couvert végétal

Le couvert végétal agit dans le sens de retarder l'érosion du sol [18]. Ce rôle peut être direct, la végétation faisant obstacle au ruissellement et protégeant les sols [19]. Il peut également être indirect, le couvert végétal assurant une amélioration du bilan hydrique et des propriétés physiques du sol [19].Il dépend aussi du stade de développement de la végétation .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 radiculaire, et son développement en surface freine le ruissellement par rapport au sol nu.

I.2.8 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.2.9 Effets de l'érosion hydrique

Les effets de l'érosion hydrique des sols peuvent être classés en deux catégories : les effets sur les sites érodés et les effets hors sites érodés.

Les effets sur site se traduisent par les pertes en terre et le lessivage des éléments minéraux et organiques fertilisants sur les terres agricoles. Le sol devient ainsi de plus en plus fragile, et sa stabilité structurale décroît. Cela donne lieu à des effets apparents tels que le creusement de ravines et de lavaka.

Les effets hors site, par contre, sont le comblement accéléré des lacs, l'ensablement des plaines, la baisse du potentiel de pêche et l'extension de rizière. Le sol érodé est entraîné avec les eaux de ruissellement vers les drains agricoles, les fossés et d'autres voies d'eau dont il peut altérer la qualité. Les particules de sols en suspension augmentent la turbidité de l'eau et ajoutent à l'accumulation de sédiments

I.3 MODELISATIO DE L'EROSION HYDRIQUE

La modélisation est une représentation des phénomènes physiques sur le terrain à travers un outil informatisé afin d'établir la réalité sur place en un modèle réduit pour pouvoir l'utiliser à des fins intéressants. Le recours à la modélisation peut aider dans la prise de décision pour la conservation des ressources en sols, par l'établissement des schémas d'aménagements et par l'évaluation des risques d'érosion. [20]

Un modèle est la représentation simplifiée, sous une forme physique ou mathématique, d'un système complexe dans lequel les réponses produites par des sollicitations externes sont difficilement prévisibles à cause du très grand nombre de facteurs en jeu [21].

I.3.1 Types de modèles

I.3.1.1 Modèle empirique

Les modèles empiriques consistent à établir une loi mathématique qui relie la variable de sortie à des variables d'entrée, dont la forme et les coefficients sont fixés à l'aide d'observations et de mesures sur le terrain. Ceci est effectué de façon expérimentale en ajustant les valeurs calculées par le modèle à celles mesurées sur le terrain. Ces modèles ont été créés pour jouer un rôle opérationnel, c'est-à-dire comme outil de conservation des sols et de contrôle de l'érosion hydrique [22].

En 1965, Wischmeier et Smith développèrent la première équation universelle empirique de pertes en terre (USLE). Ils ont développé l'USLE à partir de mesures sur parcelles élémentaires expérimentales respectant des dimensions exactes.

Equation empirique d'après Fournier

$$E = \frac{1}{36} * \left(\frac{P_X{}^2}{P_a}\right)^{2.65} * \left(\frac{h^2}{s}\right)^{0.46} \quad [14]$$

Ou E : Apport solide annuel moyen spécifique

Px : Pluviométrie moyenne mensuelle du mois le plus pluvieux`

Pa : Pluviométrie moyenne annuelle en mm

h : Dénivelé moyenne du bassin versant en m

S : Superficie du BV en km^2

I.3.1.2 L'équation universelle révisée de perte en terre

Le modèle RUSLE n'est pas utilisé pour estimer la quantité des sédiments migrants d'un bassin, mais la quantité de sol perdue au niveau d'un site particulier [21]. Pour cela, le modèle conserve la même forme que l'équation utilisée dans le modèle USLE, établie précédemment par Wischmeier et Smith, en 1958.

L'équation s'exprime par la relation (1) :

$$A = R \,.\, K \,.\, LS \,.\, C \,.\, P \qquad [15]$$

Telle que :

A : La moyenne annuelle des pertes en sol en [t/ha/an]

R : Facteur de l'érosivité des pluies [MJ mm/ha/h]

K : Facteur de l'érodabilité des sols [t h /MJ/ mm]

LS : Facteur de la longueur et l'inclinaison de la pente (adimensionnel)

C : Facteur du couvert végétal (adimensionnel)

P : Facteur des pratiques antiérosives (adimensionnel)

I.3.2 Particularités et critères de choix du modèle

Ce modèle a bénéficié des nouvelles poussées technologiques, surtout par le développement de l'informatique et du monde numérique.

Les apports majeurs du RUSLE par rapport à l'ancien modèle USLE se résument par les quelques points suivants :

- le facteur d'érosivité R intègre plus de données climatiques pour son élaboration ;
- le facteur d'érodabilité du sol K tient compte des variations saisonnières, qui de ce fait, est devenu calculable et non extrait à partir d'abaques préétablis [23];
- le facteur pente est considéré comme un système et non comme une simple pente ;
- le facteur C qui exprime l'impact du couvert végétal sur le taux d'érosion est fonction de la couverture de surface (herbacée, litière, sol nu, …) et de l'humidité du sol ;
- le facteur P qui exprime l'effet des pratiques de conservation de sols est devenu fonction des courbes de niveau, des terrasses et de leurs caractéristiques.

Le choix du modèle a été aussi motivé par le fait que ce modèle ne diffère pas conceptuellement de l'équation originale de pertes en sol (USLE) de Wischmeier et Smith. Au contraire, il améliore la qualité des paramètres du milieu qui définissent le rôle de chaque facteur. Aussi que, les données d'entrées pour ce modèle sont plus faciles d'accès par rapport à d'autres modèles plus récents, qui nécessitent des données plus sophistiquées. D'après [23], il n'en existe pas de meilleure pour le moment.

I.3.3 Méthodologie de calcul du modèle RUSLE

Le modèle choisi intègre cinq paramètres, qui seront expliqués en détails dans cette section.

Présentation des facteurs considérés dans le modèle RUSLE

D'après l'équation (20), le modèle RUSLE se base sur cinq facteurs qui seront décrits successivement ci-après.

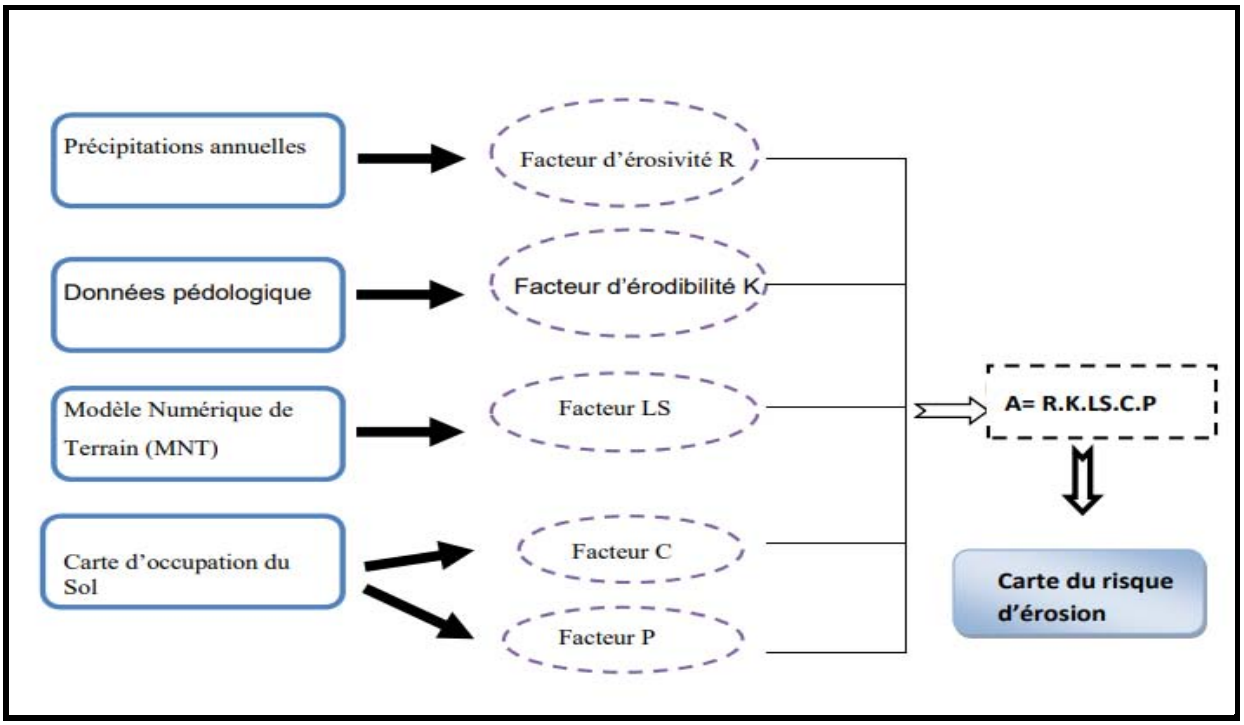


Figure 6: Fonctionnement du modèle RUSLE

a. Facteur d'érosivité des pluies R

L'érosivité de la pluie se définit comme étant une aptitude à provoquer l'érosion. C'est le paramètre pris en considération pour évaluer l'influence de l'agressivité climatique sur les pertes en sol. Il est exprimé en [MJ.mm/ha/h] [23]. Ce facteur est calculé en utilisant les données pluviométriques de stations météorologiques dans la Région ou par les données climatiques enregistrées. Par la suite, les résultats sont interpolés sur le reste du bassin.

L'efficacité de la pluie vis-à-vis des processus d'érosion est liée aux rôles qu'elle a dans le détachement des particules des sols et surtout dans la formation du ruissellement [24]L'estimation du facteur R nécessite la connaissance des énergies cinétiques et de l'intensité moyenne sur 30 min des gouttes de pluie de chaque averse, sur une longue période allant jusqu'à 30 ans [25]. Mais cette méthode nécessite des enregistrements de précipitations à des résolutions élevées. À défaut de disponibilité de données nécessaires pour le calcul du facteur R par cette méthode directe, d'autres auteurs ont développé d'autres formules alternatives.

La formule la plus utilisée pour calculer le facteur R en n'utilisant que les précipitations annuelles est celle de Renard et Freimund (1997), modifiée par Sharma, dont l'expression est :

$$\begin{cases} Si\ P_i < 850mm, R = 0.0483 \times {P_i}^{1.61} \times 0.1 \\ Si\ P_i > 850mm, R = \left(587.8 - 1.219P_i + 0.004105{P_i}^2\right) \times 0.1 \end{cases} \quad [16]$$

Avec Pi qui représente les précipitations annuelles en (mm).

Toutefois, Lo et al (1985) ont déjà développé une formule ne se basant aussi que sur les valeurs moyennes des précipitations annuelles, sur base d'expérimentation à Hawaï encore utilisée jusqu'à maintenant :

$$R = (38{,}46 + (3{,}48 \times P)) \times 0{,}1 \quad \textbf{[17]}$$

En Afrique, une formule a été développée au Kenya par Kassam et al (1992) se basant sur la moyenne pluviométrique annuelle (MPA).

Pour MPA <2000mm

$$R = 117.6 \times (1.00105)^{MPA} \quad \textbf{[18]}$$

$Pour\ MPA < 2000mm$

Ces trois formules seront utilisées pour le calcul du facteur d'érosivité R afin d'optimiser la précision du résultat final.

b. Facteur d'érodabilité des sols K

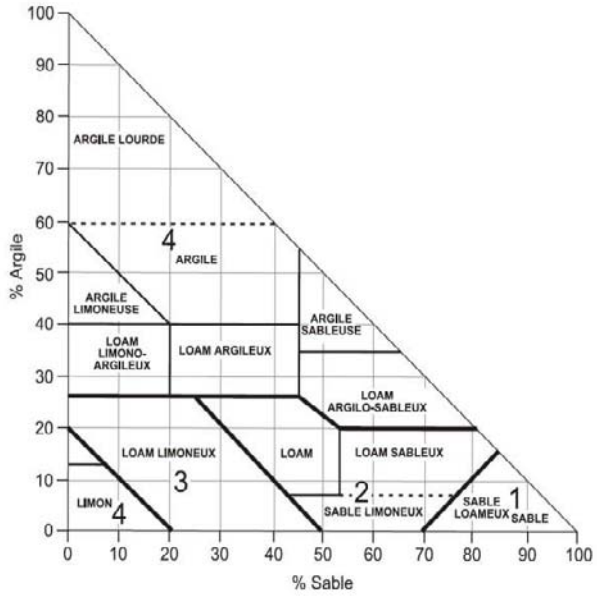
L'érodabilité du sol K détermine la résistance des différents types de sols à l'érosion. Certains sols sont plus sensibles à l'érosion hydrique et d'autres moins. Ce facteur K est déterminé en fonction des caractéristiques du sol : la capacité d'infiltration, la texture de rétention et la susceptibilité à l'arrachement. Il est exprimé en [t. h/MJ.mm].

L'infiltration et la cohésion élevée des matériaux accroissent la résistance du sol à l'arrachement et au ravinement. La faible teneur en argile favorise l'érodabilité. Le taux élevé du limon et du sable fin déstabilise la structure du sol et le rend sensible à l'agressivité climatique. De même, pour la matière organique, qui améliore les propriétés physiques et chimiques (cohésion, stabilité structurale, porosité) du sol, elle augmente la capacité à retenir l'eau et renforce la résistance à l'érosion [14].

$$100\ K = [2{,}1.10^{-4}.(12 - MO)M^{1.14} + 3.25(s-2) + 2.5(p-3)] \quad [19]$$

Avec K : Érodabilité du sol exprimé en [t. h/MJ.mm]
MO : pourcentage en matière organique (%)
M : pourcentage sable fin + pourcentage limon (%)
S : la classe de structure
p : le code de perméabilité

Les variables s et p peuvent être définies en fonction de M. La classe de structure du sol et le code de perméabilité sont déterminés sur les suivants [26]



Telle que :

(1) granulométrie très fine ;

(2) granulométrie fine ;

(3) granulométrie moyenne ou grossière ;

(4) granulométrie très grossière.

Figure 7: Classification des structures des sols

D'après ces diagrammes, plus le pourcentage de sable est élevé, plus le sol est perméable. Ce qui implique une valeur faible du facteur K et inversement. [27]Ont établi la classification, dans le tableau 3 interprétant l'indice de susceptibilité des sols :

Tableau I-4: Classification de l'indice de susceptibilité des sols

Érodabilité (K)	Type de sols
K < 0,10	Sols très résistants à l'érosion
0,10 à 0,25	Sols assez résistants à l'érosion
0,25 à 0,35	Sols moyennement sensibles à
0,35 à 0,45	Sols assez sensibles à l'érosion
>0,45	Sols très sensibles à l'érosion

Une autre classification par la Direction générale de la recherche Agriculture et Agroalimentaire Canada Ottawa (Ontario) (G.J. Wall, D.R. Coote, E.A. Pringle et I.J. Shelton) est proposée :

Tableau I-5: Valeur de K selon la texture du sol

Texture du sol de surface	Sensibilité relative à l'érosion hydrique	Valeurs du facteur K[1]
Sable très fin	Très forte	>0,05
Sable loameux très fin Loam limoneux Loam sableux très fin Loam limono-argileux	Forte	-0,04 - 0,05
Loam argileux Loam Argile limoneuse Argile Loam sablo-argileux	Modérée	0,03 - 0,04
Argile lourde Loam sableux Sable fin loameux Sable fin Loam sableux grossier	Légère	0,007 - 0,03
Sable loameux Sable	Très légère	<0,007

[1] Les valeurs du facteur K peuvent varier en fonction de la granulométrie, de la matière organique, de la structure et de la perméabilité de chaque sol.

c. Facteur topographique LS

La pente intervient dans les phénomènes d'érosion du fait de sa forme, de son inclinaison et de sa longueur. Le facteur topographique représente l'effet de la longueur de la pente et de la raideur de la pente sur l'érosion [28].

En général, lorsque la longueur de la pente augmente, l'érosion des sols totale et l'érosion des sols par unité de surface augmentent en raison de l'accumulation progressive des eaux de ruissellement dans la direction de descente de la pente. Comme la raideur de la pente augmente, la vitesse et l'érosivité du ruissellement augmentent.

Plusieurs formules ont été développées pour calculer le facteur LS. La méthode USPED (Unit Stream Power - basse Erosion and Deposition) de Jim Pelton et al, en 2012, a été utilisé du fait que cela soit une des plus récentes, ainsi que de sa facilité de mise en œuvre pour les calculs.

Cette méthode propose deux équations pour L et S :

Avec

L : Longueur de pente

λ_A : Surface d'écoulement supérieur [m^2]

$$\boldsymbol{L = (m + 1)\left(\frac{\lambda_A}{22.1}\right)^m} \quad [20]$$

m : Variable dépendant de la susceptibilité du sol à l'érosion

22,1 : Longueur de parcelle élémentaire

$$\boldsymbol{S = \left(\frac{\sin(0,01745.\theta_{deg})}{0.09}\right)^n} \quad [21]$$

Avec

S : Raideur de la pente

θdeg : Pente en degré

n = Variable dépendant de la susceptibilité du sol à l'érosion

A titre indicatif, les valeurs considérées pour m et n sont respectivement : m = 0,4 et n=1,4. Ces valeurs sont typiques des zones à susceptibilités de formation de ravins et rigoles.

d. Facteur de la couverture végétale C

C'est un facteur adimensionnel présentant l'efficacité de la couverture végétale par rapport à la susceptibilité du sol à l'érosion.

La couverture végétale et sa répartition spatiale jouent un rôle dans la réduction des effets du ruissellement en amortissant l'impact des eaux de pluie sur une surface [14]. La valeur du facteur C pour une occupation des sols donnée sur une surface est comprise entre 0 (pour les surfaces non érodables) à 1 (pour les sols nus). Initialement dans le modèle USLE, ce facteur a été estimé comme produit de cinq facteurs : utilisation des terres, couvert forestier, couverture de surface, rugosité et humidité du sol [14].

Toutefois, plusieurs chercheurs ont adopté les calculs par des nouvelles approches simplifiées : utilisation de la carte d'occupation des sols et l'attribution de classe pour chaque entité [29], ou

utilisation des techniques de télédétection comme la classification d'images satellites [30]et les indices de végétation [31].

Quelques chercheurs ont estimé le facteur C à l'aide d'indices de végétation normalisés [31]. De Jong (1994) a déjà décrit dans son ouvrage l'intérêt de l'indice de végétation dans l'extraction du facteur C pour la modélisation de l'érosion. Il a stipulé dans son travail qu'il y a une corrélation entre le NDVI et le facteur C du modèle RUSLE. La NDVI, l'indice de végétation par différence normalisée, transforme la réflectance de la végétation en pourcentage de la couverture végétale [32]

Le NDVI est un indice de végétation par différence normalisé. Il est utilisé en agriculture pour évaluer la vigueur et la quantité de végétation par analyses des mesures de télédétection. Le NDVI est souvent utilisé dans des outils d'aide à la décision en agriculture de précision.

Pour calculer le Normalized Vegetation Index NDVI, on utilise la réflectance des canaux rouge (R) et proche infrarouge (PIR) mesurées dans la bande visible par des capteurs embarqués sur drones ou satellites.

La formule de calcul est :

$$\mathbf{NDVI = (PIR-R) / (PIR+R)} \qquad \mathbf{[22]}$$

e. Facteur Pratiques antiérosives P

Les pratiques antiérosives sont adimensionnelles. Ce facteur représente la protection du sol en fonction des techniques culturales antiérosives réduisant la vitesse de ruissellement et diminuant ainsi le risque de l'érosion hydrique. Il varie en fonction des aménagements effectués, à savoir les cultures en courbe de niveau, en bandes alternées ou en terrasse, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage [14].

Les valeurs de P sont comprises entre 0 et 1, dans lequel la valeur 0 représente un très bon milieu de résistance à l'érosion et la valeur 1 montre une absence de pratique anti érosive [33].Wischmeier et Smith (1978) ont établi la classification en fonction de la pente dans le tableau 1 : IV, tel que le facteur P se répartit selon deux zones : les zones cultivées et les autres zones.

Figure 8:Valeurs de référence du facteur P selon les pentes et l'utilisation de surface

Utilisation de la surface	Pente (%)	Facteur P
Zone cultivée	0 – 5	0,1
	5 – 10	0,12
	10 – 20	0,14
	20 – 30	0,19
	30 – 50	0,25
	50 – 100	0,33
Autres zones	Tous	1

Dans le même principe, Fu et al (2005) ont développé une nouvelle méthode pour calculer la valeur du facteur P dans les zones cultivées, appelées communément la méthode Wenner (8) :

$$P = 0{,}02 + (0{,}03.\ S) \qquad [23]$$

Avec S la valeur de la pente en pourcentage en assumant que la valeur maximale de P soit 1.
Ce facteur n'affecte significativement la perte en terre que selon l'étendue des zones agricoles.

I.4 Concepts relatifs à la télédétection

I.4.1 La télédétection et la cartographie

La cartographie numérique depuis les traitements d'images satellitaires jusqu'au système d'information géographique est de plus en plus utilisée. La cartographie est un outil fondamental pour de multiples applications. Néanmoins, lors d'un travail de cartographie sur terrain, la collecte des données est entravée par différents problèmes. Un accès limité à divers lieux (végétation, propriété privée et relief escarpé), une durée de mission limitée (des conditions climatiques plus ou moins favorables) engendrent une hétérogénéité et une discontinuité de l'information recueillie.

Pour pallier ce problème, l'utilisation des données de télédétection aériennes et spatiales peut constituer une source d'information considérable. En effet, des capteurs mesurent une propriété physique de la surface terrestre avec des caractéristiques précises (résolution spatiale, spectrale et radiométrique, angle de prise de vue, date d'acquisition et rapport signal bruit). L'utilisation des

données de télédétection permet de disposer d'informations sous formes numériques et géo-référencées dans un système de coordonnées [34]

I.4.1.1 Définition

Traduit de l'anglais « remote sensing », Télé signifie « à distance » et détection veut dire « découvrir » ou « déceler ». Le dictionnaire de la géologie propose une définition telle :
« Ensemble des méthodes qui permettent de connaitre à distance les propriétés d'un objet ou d'un terrain. »

La télédétection est une technique d'acquisition d'information sur un objet ou une surface à travers l'analyse de données acquises par un capteur situé à distance de l'objet ou de la surface étudiée [35].

L'intérêt grandissant des études à échelle plurikilométrique et les problématiques environnementales associées ont stimulé l'utilisation de la télédétection dans les études des ressources naturelles et de l'environnement. Effectivement, elle permet d'appréhender l'occupation de sols, les facteurs topographiques et le suivi des changements depuis l'espace.

I.4.1.2 Images utilisées dans cette étude

Sachant que cette étude se porte sur une évaluation spatio-temporelle, il a été considéré un certain nombre d'images satellites à différents pas de temps, selon la disponibilité d'acquisition de ces données. Le choix s'est porté sur les images provenant du satellite Landsat 8 du fait qu'elle est une source d'informations importantes pour les études sur l'environnement. Aussi, l'utilisation des MNT de la zone étudiée ont été nécessaires pour déterminer les caractéristiques physiques du bassin versant.

a. Landsat satellite

Landsat est une série d'imagerie satellite multispectrale, développée par la NASA, depuis les années 1970. Les images Landsat sont surtout utilisées dans le domaine de la recherche sur l'environnement. D'ailleurs, le projet Landsat fait partie du programme NLI (National Land Imaging) de l'USGS (https://www.usgs.gov, 2019). Tous les satellites de la série LANDSAT sont

héliosynchrones, en orbite subpolaire, dont l'altitude standard a varié de 917 (Landsat 1 à 3) à 705km (Landsat 4 à 7), et repassent tous les 16 jours au-dessus du même point.

b. Modèle Numérique de Terrain 10m de résolution

Un modèle Numérique de Terrain, appelé singulièrement MNT est une représentation schématique sous forme numérique en format GeoTIFF, du relief en 3D d'une zone géographique. Il permet d'associer selon une maille régulière des positions (latitude/longitude) et des altitudes. Ce modèle numérique peut être composé d'entités vectorielles ponctuelles (points cotés), linéaires (courbes de niveau), surfaciques (facettes) ou représentées en mode raster (cellules).

Les MNT utilisés dans cette étude sont d'une résolution de 10 mètres. Ils ont été utilisés pour l'extraction des paramètres topographiques du terrain.

I.4.1.3 Traitements et analyse d'images

Pour tirer avantage des données de la télédétection, il faut être en mesure d'extraire l'information significative de l'imagerie. Le traitement et l'analyse d'images ont pour but d'identifier et de mesurer différentes cibles dans une image pour pouvoir en extraire l'information utile. Les cibles peuvent être des points, des lignes ou des surfaces. Le traitement d'images numériques nécessite évidement des logiciels, tels qu'ArcGIS, Envi, QGIS, ERDAS etc. pour traiter les données.

La classification par maximum de vraisemblance est basée sur une procédure de classification probabiliste qui suppose que chaque classe spectrale peut être décrite et modélisée selon une loi de distribution normale. La performance de ce type de classification dépend ainsi de la façon dont les données s'accordent au modèle prédéfini.

Les méthodes de classification les plus communes peuvent être séparées en deux grandes catégories : les méthodes de classification supervisée et les méthodes de classification non supervisée.

Lors de l'utilisation d'une méthode de classification supervisée, l'analyste identifie des échantillons assez homogènes de l'image qui sont représentatifs de différents types de surfaces (classes d'information).

Ces échantillons forment un ensemble de données-tests. La sélection de ces données-tests est basée sur les connaissances de l'analyste, sa familiarité avec les régions géographiques et les types de

surfaces présents dans l'image. L'analyste supervise donc la classification d'un ensemble spécifique de classes. Les informations numériques pour chacune des bandes et pour chaque pixel de ces ensembles sont utilisées pour que l'ordinateur puisse définir les classes et ensuite reconnaître des régions aux propriétés similaires à chaque classe.

La classification non supervisée procède de la façon contraire. Les classes spectrales sont formées en premier, basées sur l'information numérique des données seulement. Ces classes sont ensuite associées, par un analyste, à des classes d'information utile (si possible). Des programmes appelés algorithmes de classification sont utilisés pour déterminer les groupes statistiques naturels ou les structures des données. Habituellement, l'analyste spécifie le nombre de groupes ou classes qui seront formés avec les données.

.

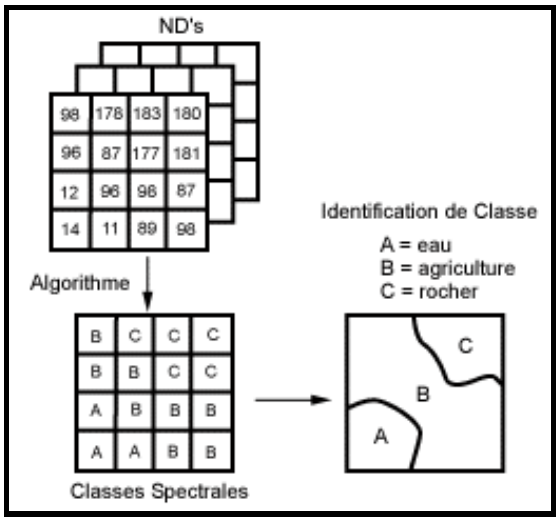


Figure 9:Classificaion des images

I.5 Le SIG (Système d'information Géographique)

Le système d'information géographique (SIG), peut être très simplement défini comme un outil informatique qui permet d'intégrer, de localiser, d'analyser et de représenter des données qui ont ou non une dimension géographique [36]. Les SIG sont considérée comme une des technologies de l'information les plus performantes car elle vise à intégrer des connaissances provenant des sources multiples et crée un environnement pluri-secteurs idéal pour la collaboration (A. Denis, 2012).

Dans les SIG, des modèles sont utilisés pour convertir la variation géographique en un objet discret. Il Ya généralement deux grands types de modèles : raster et vecteur [37]

- Un modèle raster divise la zone d'étude dans une grille régulière de cellules dans un ordre spécifique (similaire aux pixels numériques), chaque cellule contenant une valeur unique. Au sein d'une couche raster, il peut y avoir être de nombreuses zones (également appelées, régions et polygones), avec chaque zone étant un ensemble d'emplacements contigus qui présentent la même valeur. Toutes les zones individuelles qui ont les mêmes caractéristiques forment une classe d'une couche raster.
- Le vecteur est le modèle de données traditionnel basé sur les vecteurs. Son élément fondamental est un point. Les lignes sont créées en reliant les points et les zones sont définies par des ensembles de lignes

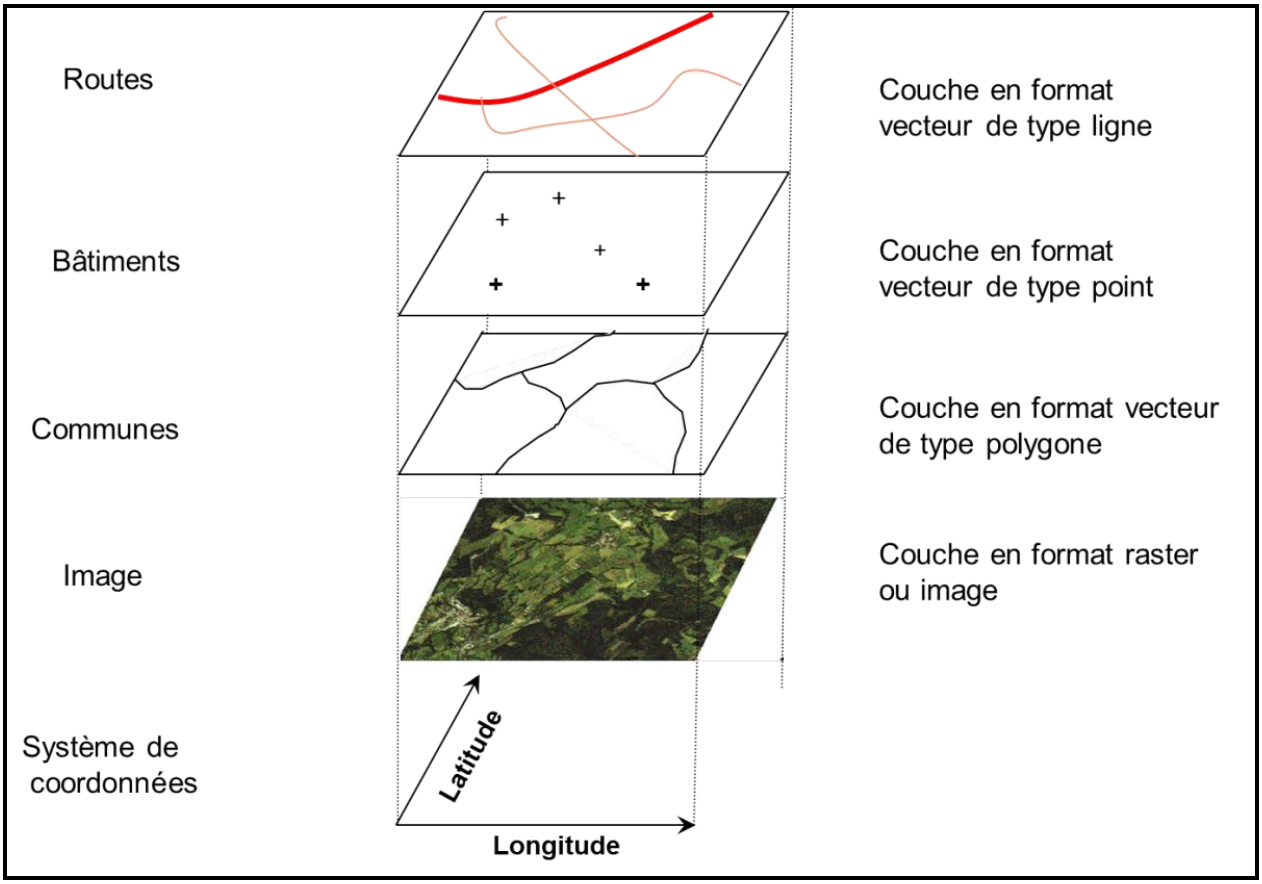


Figure 10:Représentation des différentes couches en format Raster ou Vecteur

La description et le contrôle de l'érosion des sols nécessitent la prise en compte de la distribution spatiale de ce phénomène. Dans ce contexte, l'utilisation des modèles, hydrologiques et des SIG apparaît fortement complémentaire.

I.5.1 Logiciels et outils de traitements des données

Arc GIS 10.3

ArcGIS est une suite de logiciels d'information géographique (ou logiciels SIG) développés par la société américaine ESRI (Environnemental Systems Research Institute). ArcGIS est une infrastructure pour créer des cartes (https://resources.arcgis.com). L'essentiel des traitements effectués dans cette étude a été effectué sur ArcMap, une plateforme du logiciel ArcGIS.

Il a permis la délimitation et l'extraction de la zone d'étude à partir des MNT qui couvrent le bassin versant du barrage MUGERE, ainsi que l'extraction des descriptions physiques de la zone (hydrologie, relief, etc.). Grâce à l'outil intégré Spatial Analyst Tools, la conception, les calculs et la combinaison des cartes thématiques des facteurs impliqués dans le modèle RUSLE ont été effectués avec la fonction Map Algebra dans Spatial Analyst Tools.

I.6 Concepts relatifs au dessablage des barrages

I.6.1 Définitions

Le piège à sable est une structure qui est construite pour exclure la quantité de sable qui est transportée par l'eau qui coule dans les canaux ou les tunnels pour la production d'électricité ou l'irrigation ou à d'autres fins. Le déssableur est fourni sous la forme de chambres qui dépendent de la décharge qui doit être transportée par le canal ou le tunnel.

Comme il est général et vrai, la durée de vie du barrage dépend du taux et de la quantité d'envasement auquel il est soumis tout au long de sa durée de vie. Plus le taux d'envasement est élevé, plus la quantité de limon déposé sera importante, ce qui entraînera une diminution de la capacité de stockage du barrage ou d'une autre structure hydraulique et une diminution de sa durée

de vie. Donc, pour surmonter ce problème dans une certaine mesure, des pièges à sable sont fournis qui essaieront de réduire la quantité de sable/limon dans l'eau et permettront à l'eau presque sans sable d'atteindre les turbines des centrales hydroélectriques. Outre son bon effet sur la durée de vie des barrages, il a également un effet très positif sur la durée de vie des turbines. Si l'eau qui doit être utilisée pour la production d'électricité contient une quantité considérable de sable ou de limon, elle frappera les turbines avec un impact plus important et provoquera l'érosion du matériau de la turbine et tentera également de réduire sa durée de vie.

Voici les diamètres à retenir en fonction des vitesses de sédimentation

d [mm]	**0.05**	**0.1**	**0.2**	**0.3**	**0.4**	**0.5**	**1**	**2**	**3**	**5**	**10**
V_0 [cm/s]	0.2	0.7	2.3	4	5.6	7.2	15	27	35	47	74
V_1 [cm/s]	0	0.5	1.7	3	4	5	11	21	26	33	
V_c [cm/s]	15	20	27	32	38	42	60	83	100	130	190

Avec :

- V0: vitesse de sédimentation, pour fluide à vitesse horizontale nulle
- V1 : vitesse de sédimentation, pour fluide à vitesse horizontale égale à Vc
- Vc : vitesse horizontale critique d'entrainement de la particule déposée.

CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II.1 Bassin Versant du barrage de MUGERE

Le bassin versant du barrage de MUGERE est situé au sud de la province de Bujumbura entre 3.425917° et 3.637837° de latitude Sud et entre 29.424084° et 29.552035° de longitude Est. La rivière MUGERE, s'écoule depuis les contreforts de Mirwa et se jette au lac Tanganyika dans la localité de Ruziba dans la Commune Kabezi.

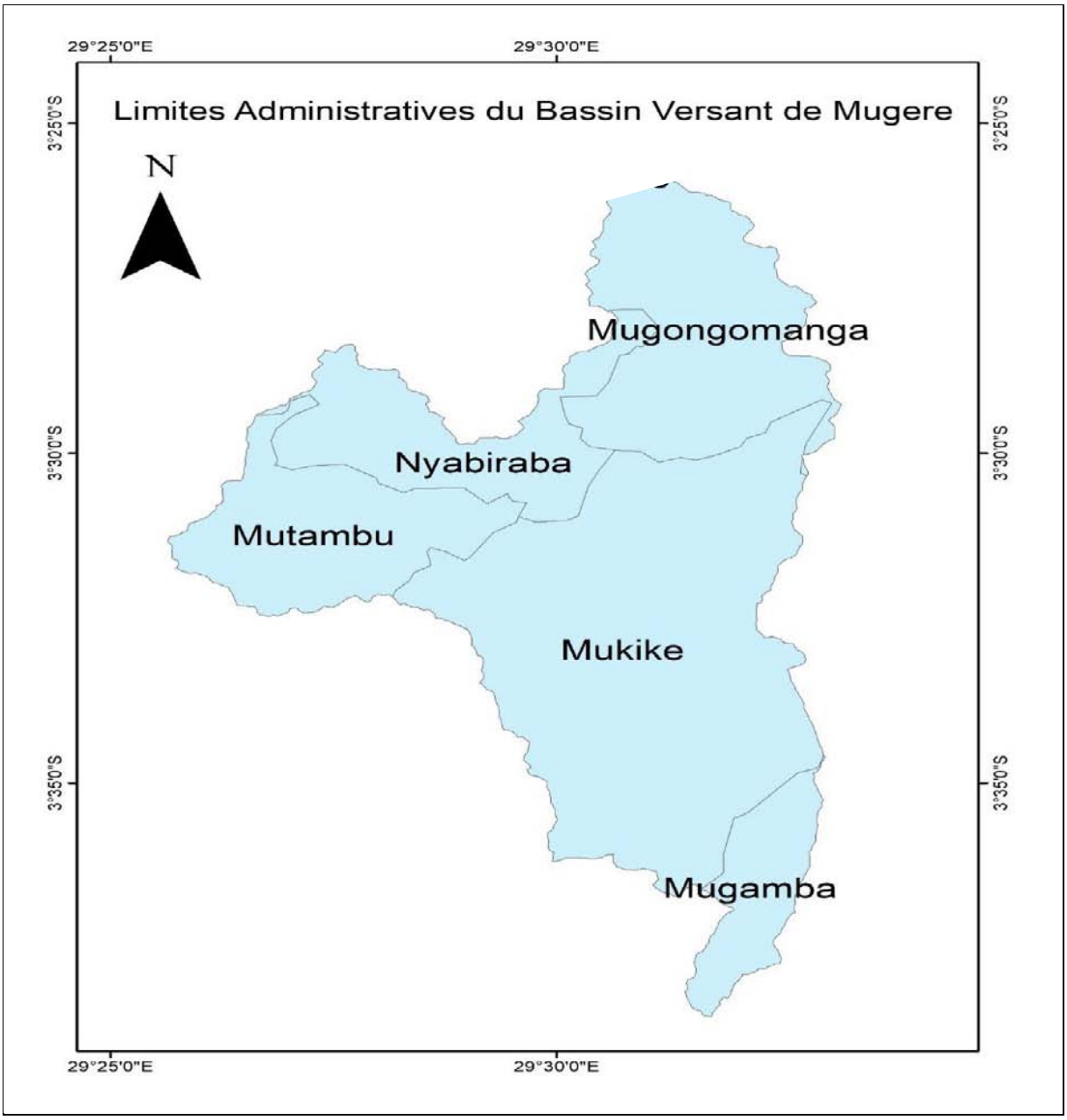


Figure 11: Limites administratives de la zone d'étude

II.2 CADRE CLIMATIQUE

Au point de vue climatique, la zone d'étude la région écoclimatiques de la Crête Congo-Nil. Son climat est influencé par l'altitude qui varie entre 1800 m et 2505 m. Il est caractérisé par une alternance de la saison pluvieuse qui s'étend généralement du mois d'Octobre à Mai et de la saison sèche qui va de Juin à Septembre. (Ministère de l'Eau et *de l'Environnement en ses attributions*, 2010)

Tableau II-1: **Répartition de la pluviométrie et température de la zone d'étude**

Régions écoclimatiques	Altitude (en mètre)	Température moyenne annuelle (°C)	Pluie moyenne annuelle (en mm)
Congo-Nil	1700 – 2500	14°C -15°C	1300 – 2000

Source :(MINATTE, 2005 cité par Ministère de l'eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'urbanisme)

II.2.1 Pluviométrie

II.2.1.1 Prétraitement des données

Apres avoir Vu les données disponible et stations qui peuvent contribuer dans le bassin versant, nous avons remarqué que plusieurs stations sont contributives. Mais seules les stations de BUHONGA et GISOZI possèdent des données c'est pour cette raison qu'on les a utilisé pour déterminer la pluviométrie moyenne dans le bassin versant du barrage MUGERE.

Tableau II-2: Données pluviométriques de BUHONGA

Année	Nbre de JP	P365 (mm)	P30max (mm)	P_{Moy}Mensuelle (mm)	P24 (mm)
1981	152	1356.8	202	113.07	35.6
1982	140	1343.6	184.2	111.97	54.5
1983	147	1478.6	232.3	123.22	50.2
1984	121	1257.2	192.2	104.77	45.7
1985	142	1410.8	272.7	117.57	35.5
1986	153	1365	262.5	124.09	42
1987	147	1411.2	230.4	117.6	52.4
1988	167	1529.6	277.4	128.59	52.8
1989	141	1359	204.9	113.25	36.4
1990	126	1269.5	239.8	105.79	44.5
1991	149	1384.1	211.7	115.34	80.7
1992	124	1077.5	162.9	89.79	39.2
1993	117	1304.6	215	118.6	47.8
1994	130	1435.2	262	130.47	39.7
1995	128	1289.9	229.5	107.49	34.4
1996	121	1266.9	266.4	105.58	34
1997	163	1674.5	337.4	139.54	31.6
1998	152	1529.2	318.1	127.43	55.6
1999	76	739.4	188	73.94	42.2
2000	95	1183.1	331.7	98.59	60.8
2001	120	1468.7	310.7	122.39	52.7

Tableau II-3: Précipitation de GISOZI

Année	**Nbre de JP**	**P365 (mm)**	**P30max (mm)**	**$P_{MOY\ MENSUELE}$(mm)**	**P24max (mm)**
1982	193	1669.10	335.5	139.09	68.80
1983	168	1368.70	220	114.06	67.90
1984	167	1383.50	206.9	115.29	52.70
1985	179	1684.80	424.50	140.53	60.70
1986	204	1805.70	316.4	150.34	78.40
1987	160	1410.30	298.3	117.53	69.50
1988	190	1545.80	288	128.82	114.80
1989	194	1806.80	363.4	150.57	67.30
1990	167	1331.80	265.9	110.98	72.50
1991	186	1594.00	221.9	131.12	46.30
1992	168	1228.10	222.4	102.34	44.70
1993	140	982.40	175.7	89.15	41.80
1994	172	1341.00	260.7	111.75	46.30
1995	165	1235.30	187.7	102.94	69.10
1996	175	1538.00	307.2	128.17	53.20
1997	180	1739.70	335.5	144.98	66.00
1998	177	1265.40	220	105.43	79.50
1999	164	1457.30	206.9	121.441	64.00
2001	168	1368.70	316.4	124.175	63.70

Où :

P365 : Précipitation annuelle

P3max : Précipitation mensuelle maximale

Pmoy mensuelle : Précipitation moyenne mensuelle

P24 : Précipitation journalière Maximale

JP : Jours de précipitations

II.3 CADRE HYDROLOGIQUE

Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de la rivière MUGERE ont été obtenues grâce à un Model Numérique Terrain (MNT) obtenu au bureau de centralisation géomatique(BCG).

II.3.1 Caractérisation du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est constitué d'un ensemble de chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du bassin versant.

II.3.1.1 Classification des affluents dans notre zone d'étude

Nous avons classe l'ordre des affluents par la méthode de Stahel qui se résume en 4 points principaux :

- Selon la méthode de STRAHLER tout cours d'eau sans aucun affluent est désigné du de premier ordre.
- Deux cours d'eau de premier ordre se réunissent pour former un tronçon de deuxième ordre.
- Un tronçon de troisième ordre est formé par la réunion de deux cours d'eau de deuxième ordre mais il peut être rejoint par un cours d'eau additionnel de premier ordre ou de deuxième ordre et ainsi des suite.
- Un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inferieur garde son ordre, ce qui se résume par

$$\begin{cases} \boldsymbol{n+n=n+1} \\ \boldsymbol{n+m=\max(n,m)} \end{cases} \quad \textbf{[24]}$$

Apres avoir introduit le MNT de notre zone d'étude dans le logiciel arc Gis 10.3, nous avons Trouvé que la rivière MUGERE est *d'ordre 4 selon la* méthode de Strehler **(l'exutoire est pris sur le barrage)**

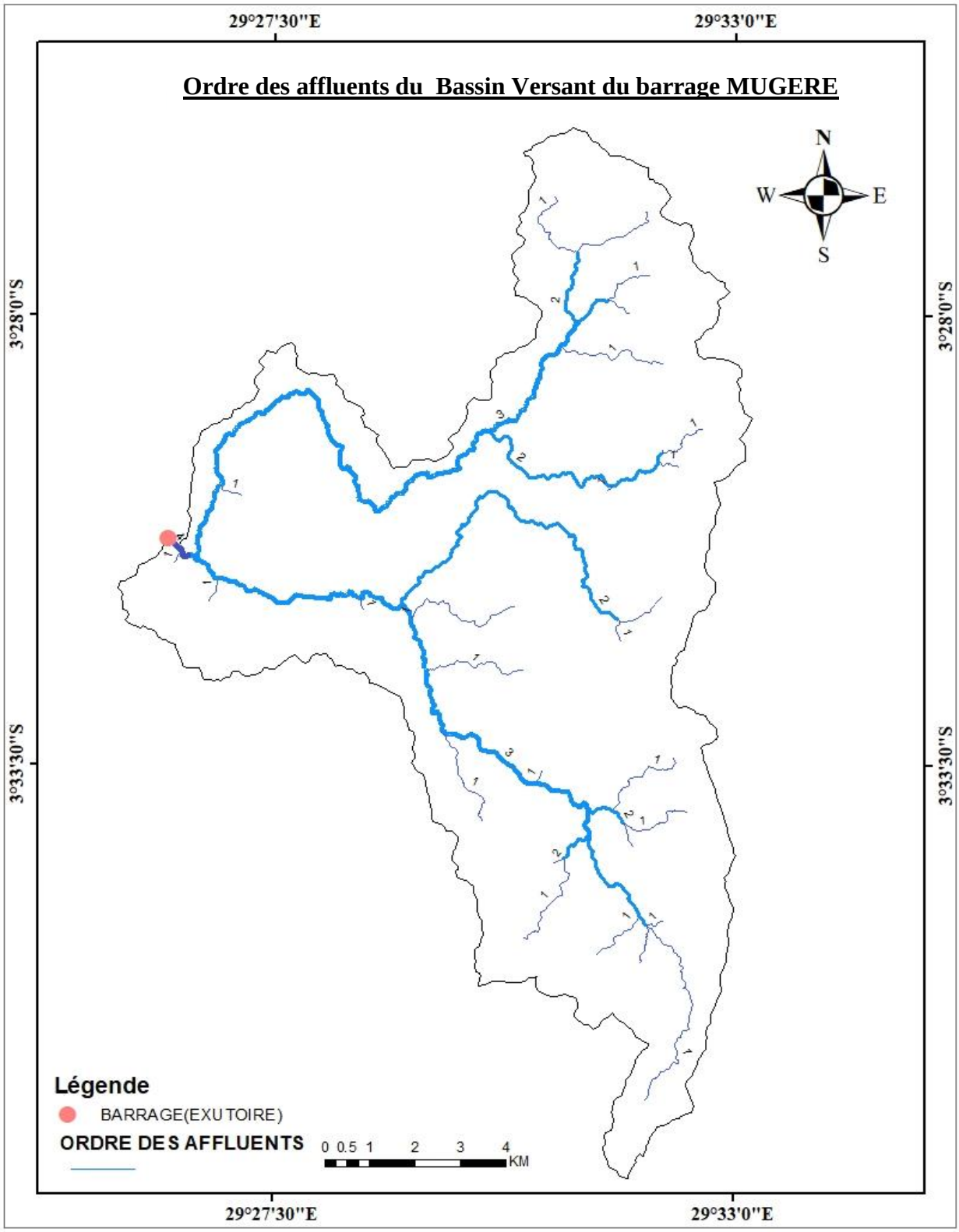


Figure 12: Ordre des affluents du bassin versant du barrage MUGERE

II.3.2 Polygone de Thiessen

C'est une méthode qui consiste à tracer au tour de de 2 ou 3 stations pluviométriques voisines par des médiatrices reliant ces stations afin de déterminer des surfaces d'influences sur chaque station. La superficie de chaque polygone montre la surface d'influence de chaque station contribuant dans le bassin [38]

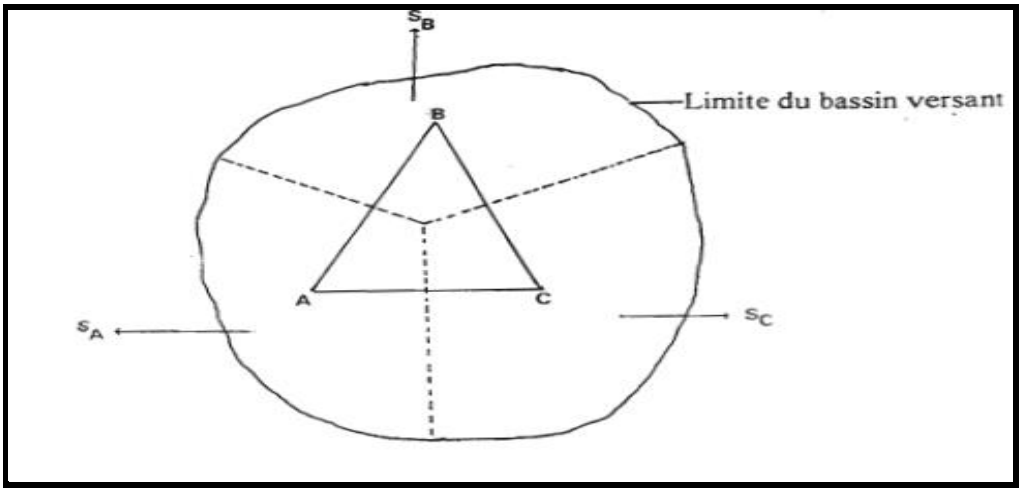


Figure 13:Polygone de thiessen entre 3 stations

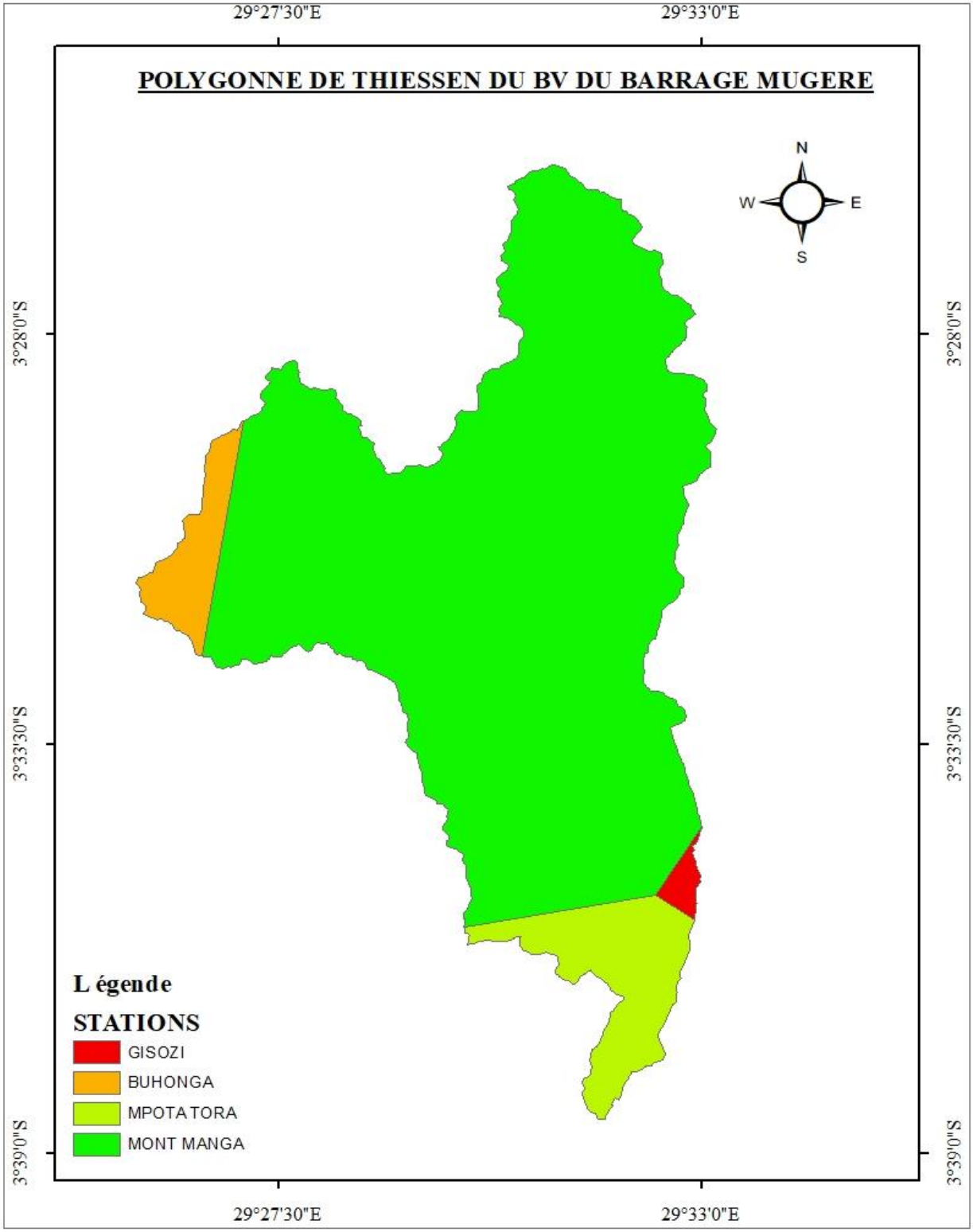


Figure 14: Polygone de THIESSEN du Bassin Versant du Barrage MUGERE

La formule suivante montre la répartition de la pluie sur différentes stations contribuant dans le bassin selon le polygone de Thiessen:

$$\boldsymbol{P_m = \frac{\sum_i^n Ai \times S_i}{A}} \quad [25]$$

II.4 RELIEF

La grande partie du bassin versant du barrage MUGERE est généralement constituée des montagnes ayant de grandes altitudes avec des fortes pentes ce qui leur donne une grande susceptibilité d'être érodées. D'où on observe une grande érosion dans ce basin du barrage MUGERE.

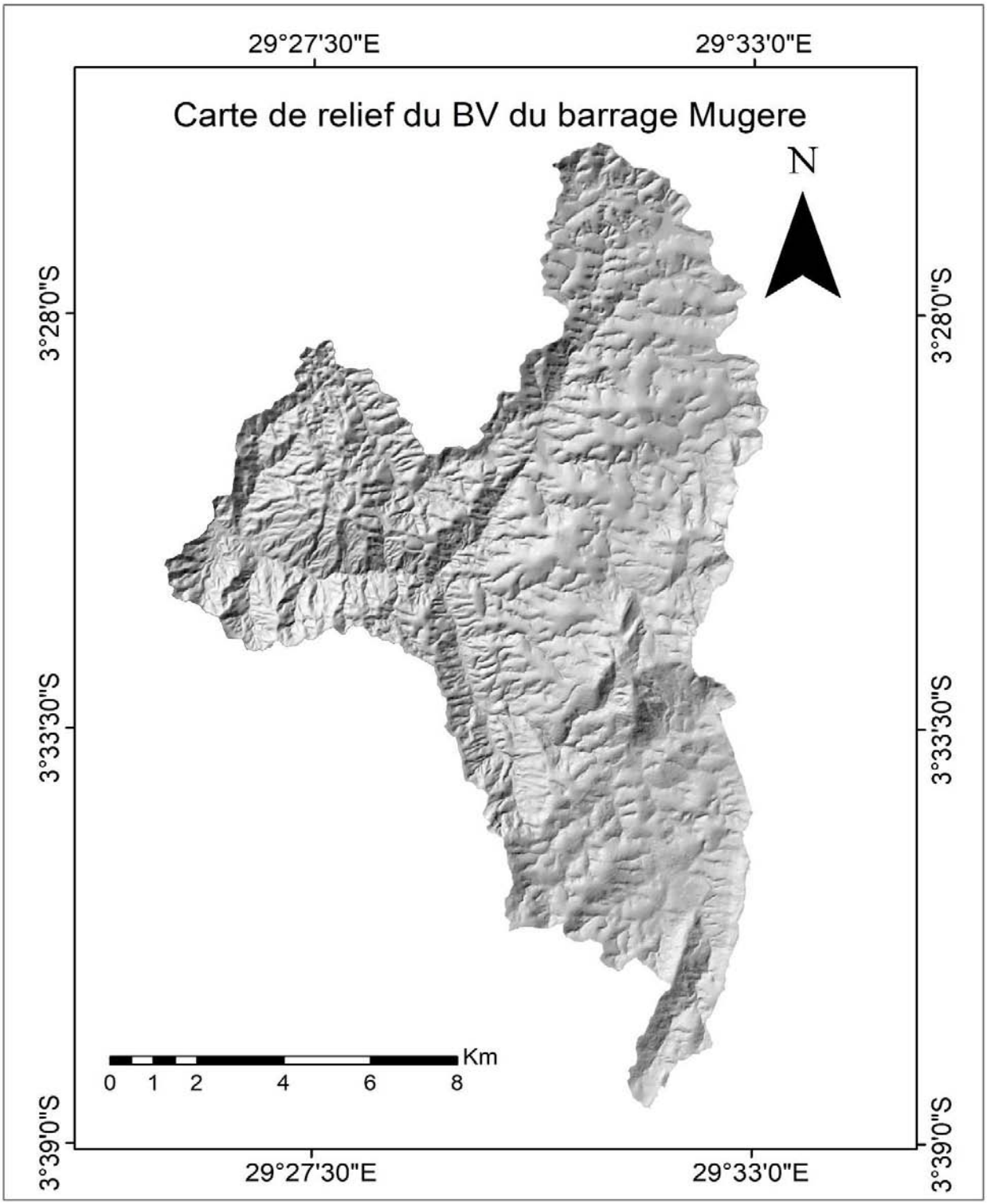


Figure 15:Carte de relief du Bassin versant du barrage MUGERE

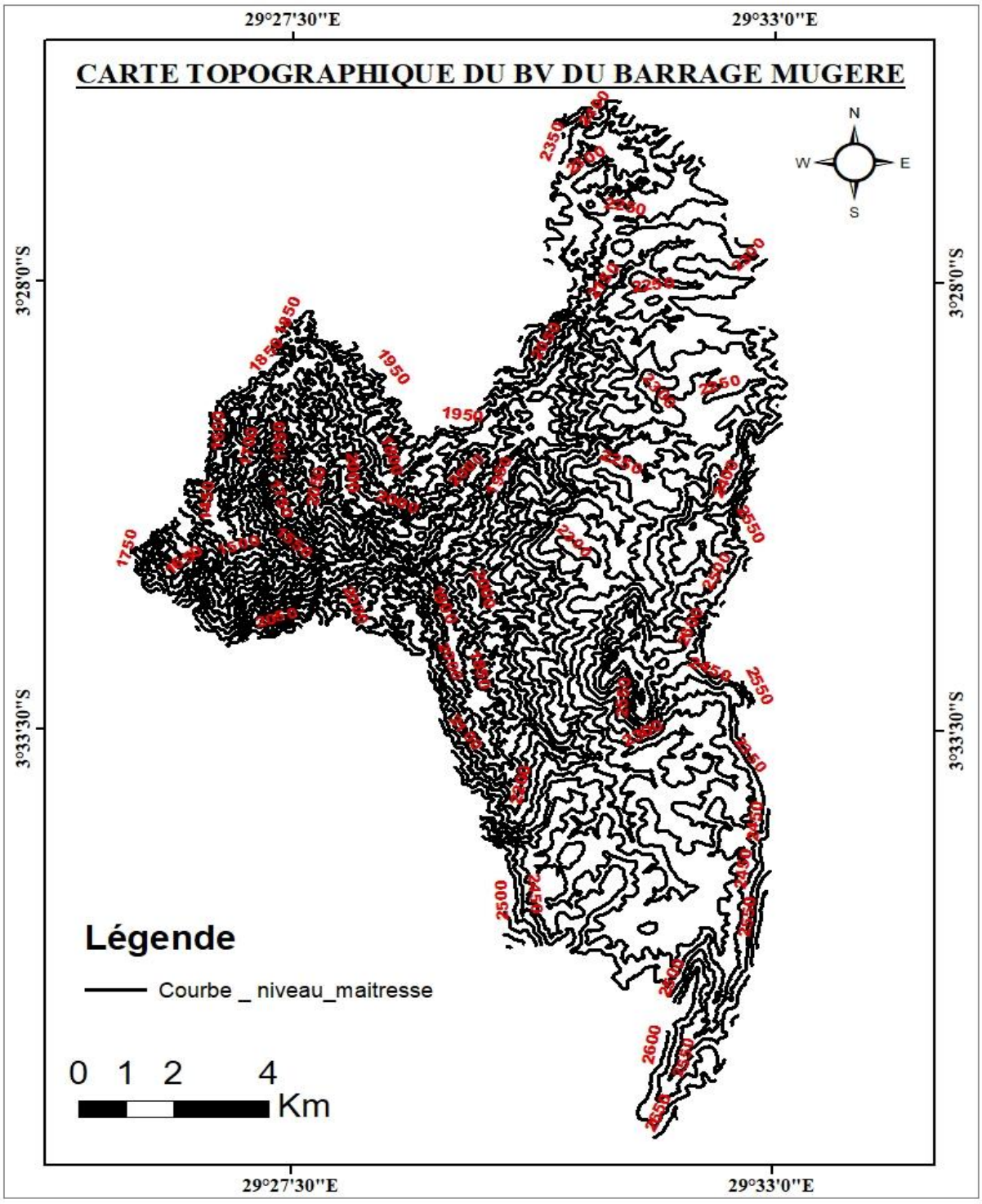


Figure 16: Carte topographique du Bassin Versant du barrage MUGERE

Profil en long de la rivière MUGERE en amont du barrage

La rivière MUGERE est caractérisée par une torrentialité en amont du barrage à cause des fortes pentes qui s'observent dans le bassin versant du barrage ce qui provoque une grande quantité d'érosion.

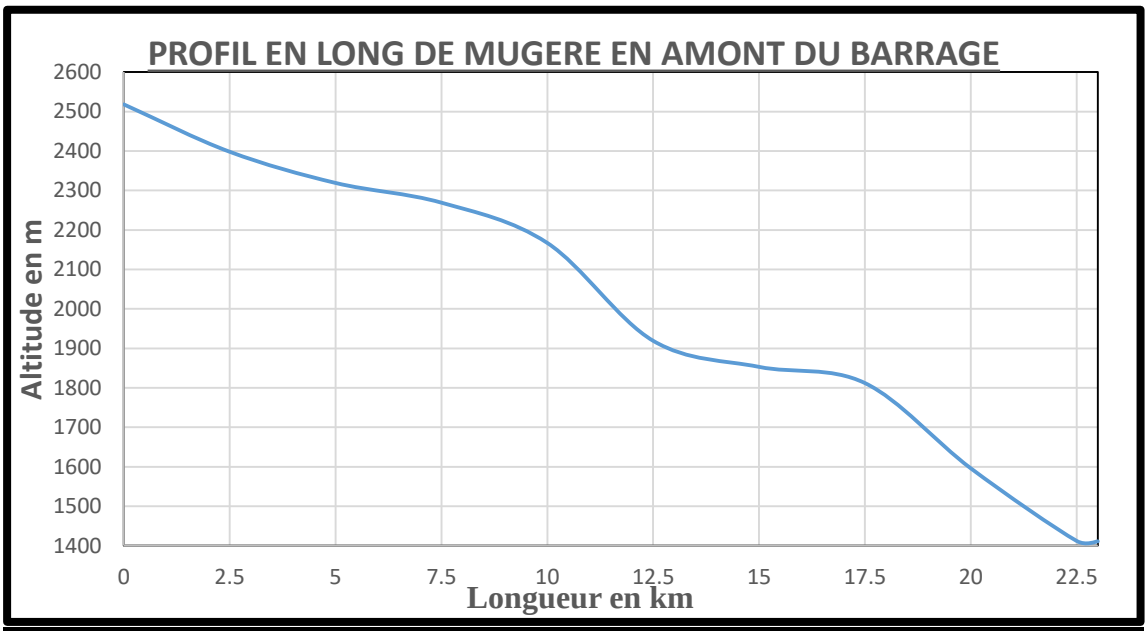


Figure 17: Profil en long de la rivière dans le BV du barrage Mugere

SURFACE

La surface topographique est le paramètre le plus important, il permet de contrôler l'intensité de plusieurs phénomènes hydrologiques (apports, volumes de précipitations ou infiltrations..). La surface du bassin étudié est estimée à : **S = 144.022 km²**

Le périmètre

Le périmètre correspond à la limite extérieure du bassin. Chaque bassin réagît d'une façon propre aux précipitations qu'il reçoit. Avec le logiciel ArcGis nous avons le périmètre égal à : **P = 81.04 km**

Indice de compacité de Gravelius

L'indice de forme Kc, 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. [39]

Selon la formule [4], nous avons trouvé que **Kc = 1.89> 1.5 alors le bassin versant est de forme allongée.**

Indice de pente de roche

Il est égal à la somme des racines carrée de la pente moyenne de chacun des éléments pondérées par la surface intéressé (M. Roche 1963)

$$I_p = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{n} x_i \sqrt{\frac{a_i - a_{i-1}}{x_i}} \qquad [26]$$

Où

Ip : $Indice\ de\ pente\ de\ roche$

$\frac{a_i - a_{i-1}}{x_i}$: $La\ pente\ moyenne\ dans\ l'elementcompris\ entre\ les\ courbes\ de\ niveaux\ a_i eta_{i-1}$

x_i: $Distance\ qui\ separe\ les\ deux\ courbes\ de\ niveaux\ sur\ le\ rectangle\ equivalent$

L : Longueur du rectangle équivalent

L'indice de pente peut être calculé à partir de la répartition hypsométrique (pourcentage de la superficie entre les courbes de niveau)

$I_p = \frac{\sum\sqrt{a_i \times d_i}}{\sqrt{L}}$

$ai\ est\ le\ pourcentage\ de\ la\ superficie\ entre\ les\ courbes\ de\ niveau.$
$di\ est\ la\ distance\ entre\ les\ courbes\ de\ niveau\ appelée\ aussi\ dénivelée$

Classe d'altitude	Surface en %	a_i	d_i	$a_i * d_i$	$\sqrt{a_i \times d_i}$
1388–1520	25.78008699	0.25780087	132	34.03	5.83
1520 –1650	22.95129091	0.22951291	130	29.84	5.46
1650 – 1780	13.25439654	0.13254397	130	17.23	4.15
1780 – 1910	11.51355622	0.11513556	130	14.97	3.87
1910– 2040	8.85667785	0.08856678	130	11.51	3.39
2040 – 2170	7.259287444	0.07259287	130	9.44	3.07
2170 – 2290	3.567361744	0.03567362	130	4.28	2.07
2290 – 2420	2.607372187	0.02607372	130	3.39	1.84
2420– 2550	2.592443953	0.02592444	130	3.37	1.84
2550–2675	1.617526163	0.01617526	125	2.02	1.42
Total	**100**	**1**			**32.95**

$I_P = \frac{32.95}{\sqrt{36610}} = 0.172$

$I_{p=}$17.2%

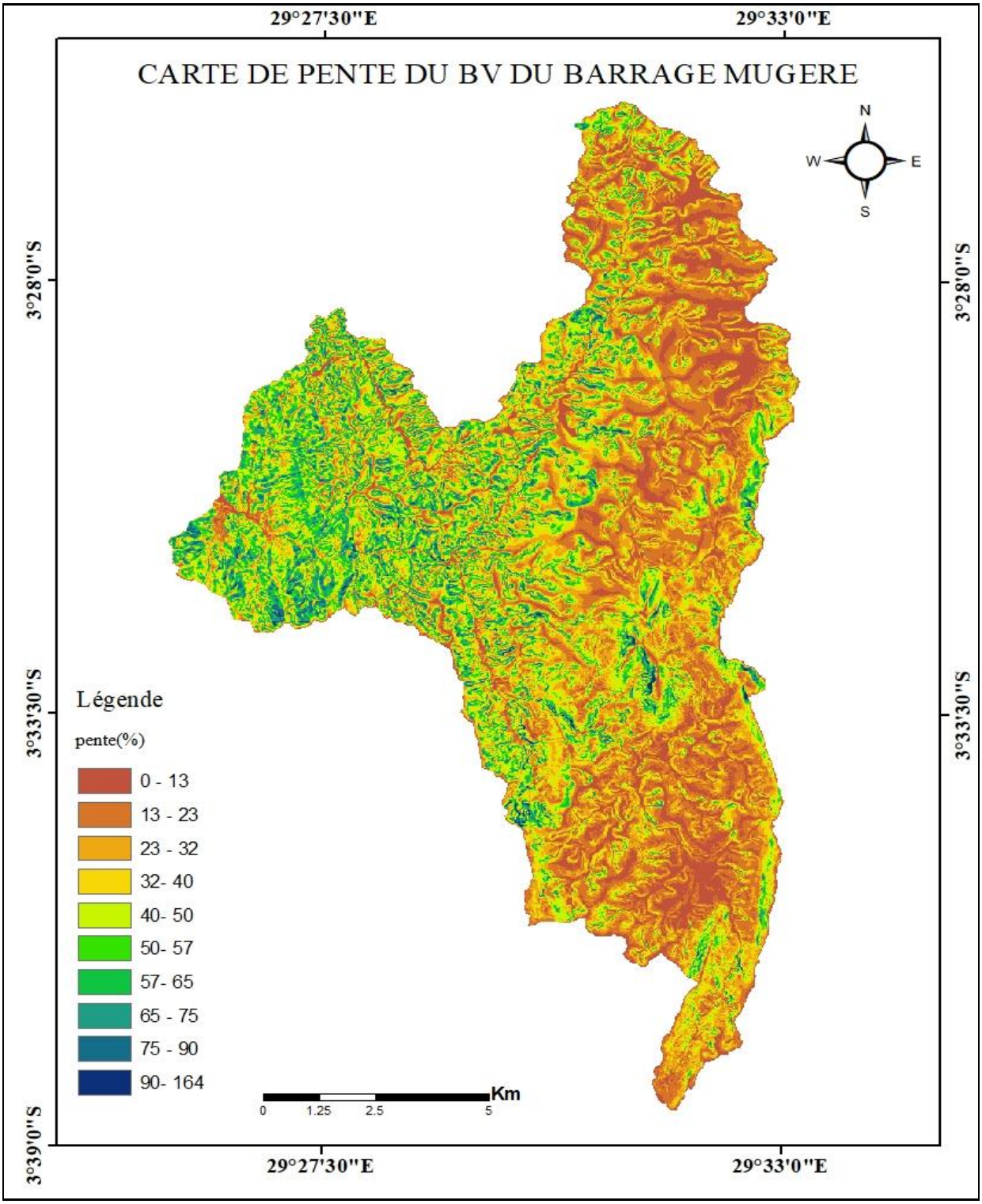


Figure 18: Carte des pentes du BV du barrage MUGERE

Rectangle équivalent

Est le rectangle de longueur L et de largeur l qui a la même surface et le même périmètre que le bassin versant.

$$L_{eq} = K_c \times \frac{\sqrt{A}}{1.12}\left[1 + \sqrt{1 - (1.12/K_c)^2}\right] \quad [27]$$

$$L_{eq} = 36.61Km$$

$$l = K_c \times \frac{\sqrt{A}}{1.12}\left[1 - \sqrt{1 - (1.12/K_c)^2}\right] \quad [28]$$

$$l = 3.94km$$

Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique est l'un des paramètres les plus essentiels dans l'étude du relief elle fournit une vue synthétique de la pente. Elle représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude [39]

Tableau II-4:Répartition des différentes surfaces en fonction des altitudes

Classes d'altitudes (m)	Centre de classe (Hi)	Surfaces partielles Si (km^2)	Surfaces partielles (%)	Surfaces Cumulée (%)	Hi*Si ($m*Km^2$)
1388–1520	1454	37.1291	25.78008699	100	3387.2384
1520 –1650	1585	33.055	22.95129091	74.21991301	5917.9145
1650 – 1780	1715	19.0893	13.25439654	51.2686221	17622.654
1780 – 1910	1845	16.5821	11.51355622	38.01422556	30593.9745
1910– 2040	1975	12.7556	8.85667785	26.50066934	37701.3675
2040 – 2170	2105	10.455	7.259287444	17.64399149	22007.775
2170 – 2290	2230	5.1378	3.567361744	10.38470405	82797.893
2290 – 2420	2355	3.7552	2.607372187	6.817342302	77844.525
2420– 2550	2485	3.7337	2.592443953	4.209970116	31697.666
2550–2675	2612.5	2.3296	1.617526163	1.617526163	9810.46
Somme		**144.0224**	100		**309571.0079**

A partir des données du tableau ci-dessus on peut représenter la courbe hypsométrique

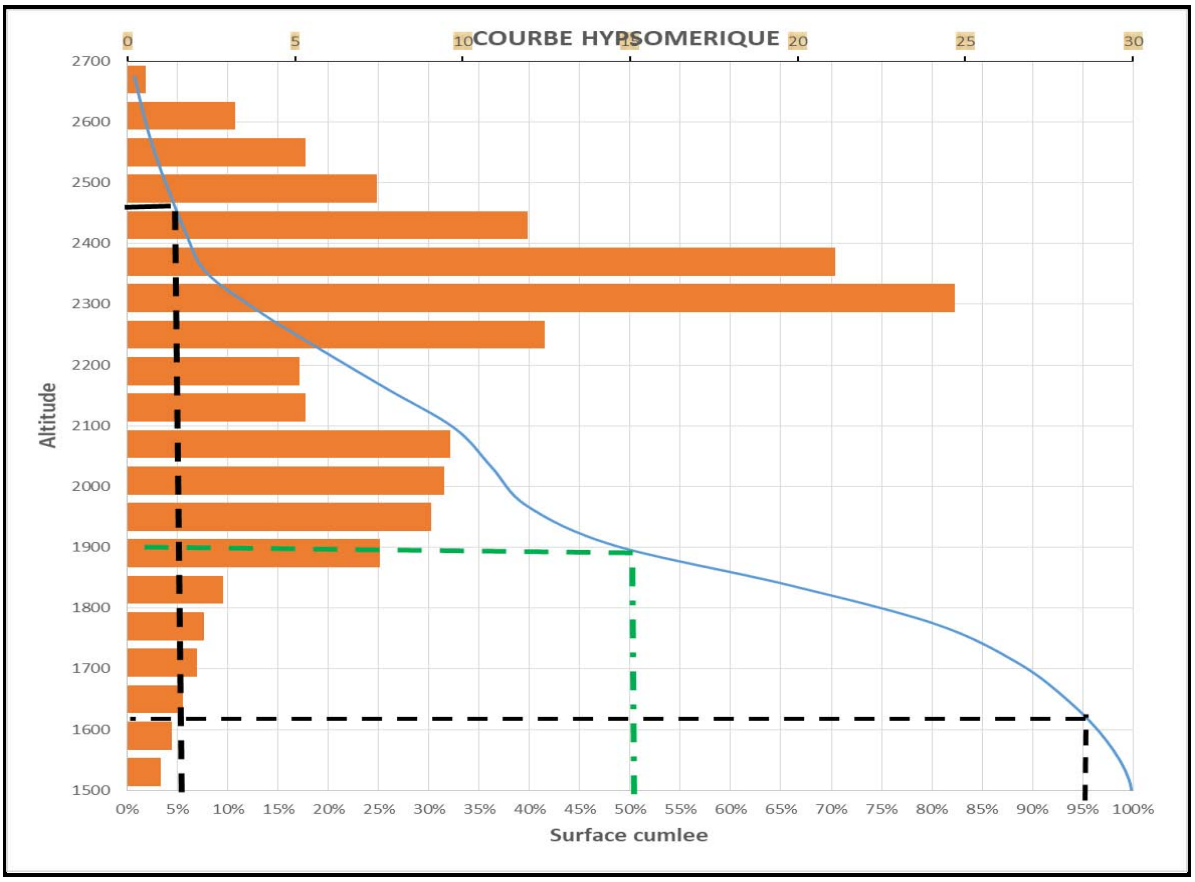


Figure 19: Courbe hypsométriques du BV du barrage MUGERE

Les altitudes caractéristiques

Les altitudes caractéristiques s'obtiennent à l'aide des cartes topographiques :

- L'altitude maximale : représente le point le plus élevé du bassin versant.
- L'altitude minimale : représente le point le plus bas du bassin versant, l'exutoire.
- L'altitude médiane (H50%) : est déterminé à partir de la courbe hypsométrique.
- L'altitude moyenne Hmoy : est calculée par la formule suivante : $\boldsymbol{Hmoy = \sum Hi * Si / St}$

$Hi = (H1 + n + Hn)/2$

Avec:

- Hi : $Altitude\ moyenne\ ente\ deux\ courbes\ de\ niveaux\ consécutives\ en\ m.$
- Si : $surface\ partielle\ comprise\ entre\ deux\ courbes\ de\ niveaux\ consécutives\ en\ Km2.$
- S : $surface\ totale\ du\ bassin\ versant\ en\ Km2.$

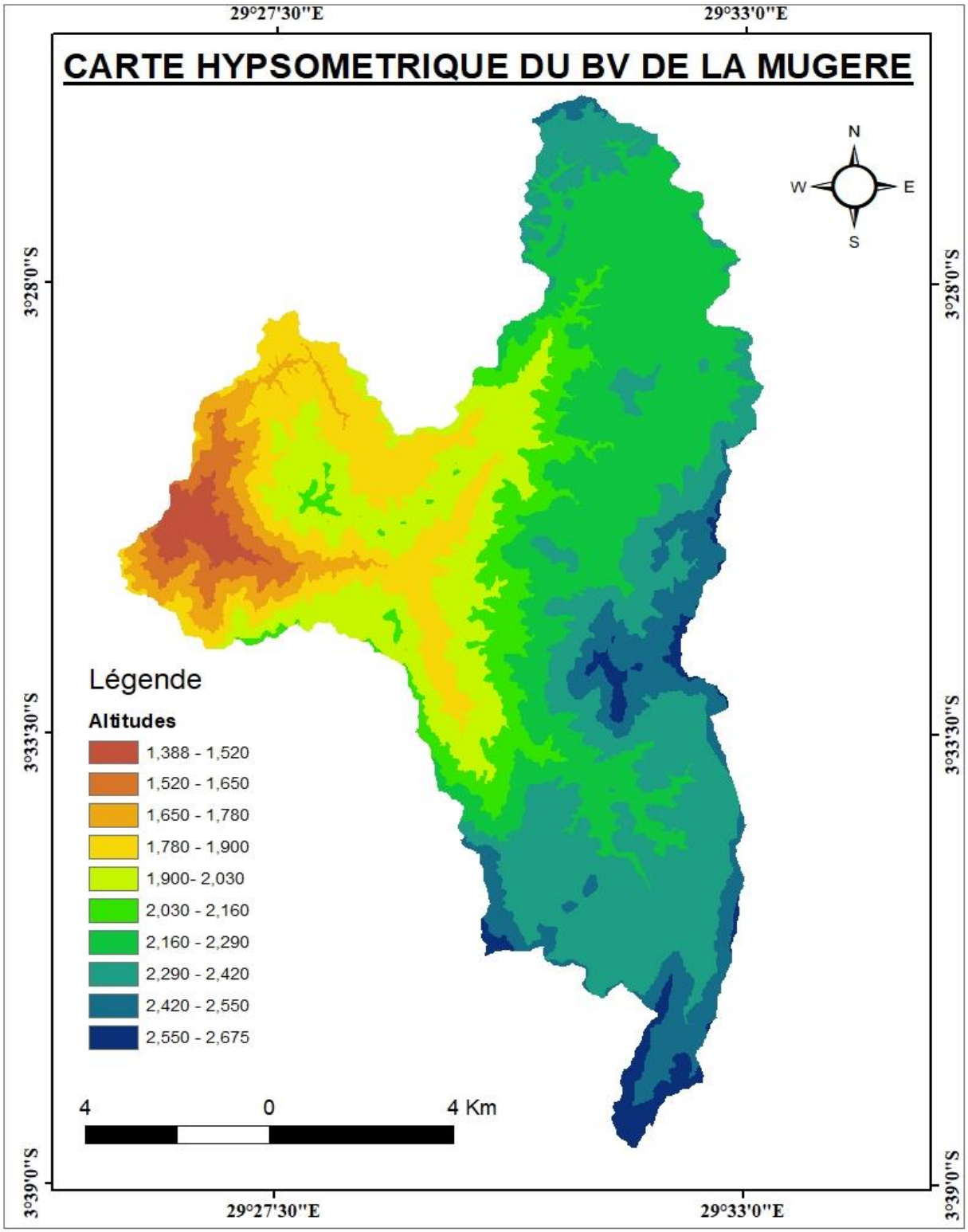


Figure 20: Carte hypsométrique du Bv du barrage MUGERE

En utilisant le logiciel Arc Gis et la courbe hypsométrique voilà les résultats trouvés.

Les altitudes caractéristiques	Les différentes valeurs correspondantes en m
Altitude maximale	2675
Altitude minimale	1388
Altitude médiane	1903
Altitude moyenne	2217.61

Indice de pente global Ig

Il est définit comme étant le rapport entre l'altitude comprise entre 5% et 95% de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalent. Les altitudes correspondantes au pourcentage de surface 5% et 95% sont lues sur la courbe hypsométrique. [39]

L'indice de pente globale est donné par la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L_{eq}} = (\mathrm{D5\%} - \mathrm{D95\%})/L_{eq}$$

Avec :

- D : *dénivelée entre* $H95\%$ *et* $H5\%$ *en* (m)
- Leq : *longueur du rectangle équivalent en* $Km.$
- $H95\%$ *et* $H5\%$: *sont respectivement les altitudes correspondantes* à $S95\%$ *et* $S5\%.$

$H_{5\%}$	$H_{95\%}$	$H_{5\%}$-$H_{95\%}$	L_{eq}	$I_{g\ (m/km)}$	Classification
2482	1646	836	36.61	22.8	

Dénivelé spécifique

Elle sert à la classification du bassin versant.

Sa formule est la suivante : $D_S = I_g \times \sqrt{A}$

D'où $D_S = 22.8 \times \sqrt{144.4} = \mathbf{274.40}$

Selon ORSTOM (Tableau I : 1), le bassin versant du barrage MUGERE est en relief fort en considérant que le barrage est à l'exutoire.

Temps de concentration

Le temps de concentration Tc est la durée maximale nécessaire à une goutte d'eau, tombée au point le plus éloigné du bassin versant, d'arriver à l'exutoire.il est composé de trois termes différents :

- Th temps d'humectation : temps nécessaire pour que le sol soit imbibe avant qu'elle ruisselle.
- Tc temps de ruissellement : temps qui correspond à la durée d'écoulement de l'eau
- Ta temps d'acheminement : le temps mis pour que l'eau arrive à l'exutoire.

Tableau II-5:Temps de concentration pour les différents auteurs

Auteurs	Formule	Temps de concentration(h)
Ventura	$0.1272 \times \frac{\sqrt[3]{S}}{I}$	**7**
Sokolovski	$L/(3.6 \times Vr)$	**4.81**
Turaza	$0.108 \times \frac{\sqrt[3]{S \times L}}{\sqrt{I}}$	**5.8**
Giandotti	$60(0.4\sqrt{S} + 0.0015 \times L)/0.8(\sqrt{LI})$	**4.4**
KIRIPICH	$T_C = 0.195.L^{0.11}.P^{-0.385}$	**0.88531**

Avec :

- S : Surface du bassin versant (Km2).
- Lt : Longueur du talweg principal (Km).
- Hmoy : L'altitude moyenne du bassin versant (m).
- Hmin : L'altitude minimale du bassin versant (m)

- I : Pente moyenne du talweg principal. (0.049)
- Vr : Vitesse d'écoulement pour les petits cours d'eau, elle est proche de 1.5 m /s.
- P : Pente du BV

On a considéré les résultants de la formule de Giandoti car elle intègre beaucoup de paramètre dans le bassin versant.

$$\boldsymbol{T_C = 4.43h}$$

Vitesse moyenne de ruissellement

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\boldsymbol{V_r = L/T_c}$$

Avec

L : Longueur du talweg principal (Km).

Tc : Temps de concentration (h).

$$\boldsymbol{Vr = 3.95 Km/h}$$

Tableau II-6: Synthèse des caractéristiques du bassin versant

Caractéristique du bassin versant	
1. Morphométrie	
Surface (Km^2)	144.0224
Périmètre (Km)	81.04
Longueur du rectangle équivalent(Km)	36.61
Largeur d rectangle équivalent(Km)	3.94
Indice de Gravelius	1.89
2. Relief	
Altitude maximale(m)	2675
Altitude minimale (m)	1388
Altitude moyenne(m)	2031.5
Altitude médiane (m)	1903
Indice de pente global(%)	0.022
Indice de pente de roche(%)	17.2
Dénivelé spécifique (m)	274.4
Pente moyenne du bassin versant(%)	60.9
3. Réseau hydrographique	
Ordre du cours d'eau	4
Longueur du cours d'eau (km)	26
Densité de drainage (Km^{-1})	0.656
Pente moyenne du cours d'eau principal (m/km)	48.18
Temps de concentration (h)	4.43
Vitesse de ruissellement (Km/h)	3.95

II.5 CADRE PEDOLOGIQUE

Une carte pédologique nous est fourni à l'aide d'une base de données mondiale harmonisée sur les sols établis par une collaboration entre la FAO avec l'IIASA, l'ISRIC-World Soil Information, l'Institut des sciences du sol, l'Académie chinoise des sciences (ISSCAS) et le Centre commun de recherche de la Commission européenne (JRC).

La base de données mondiale harmonisée sur les sols est une base de données matricielle d'une résolution de 30 arc secondes soit 1km avec plus de 15 000 unités de cartographie des sols différentes qui combine les mises à jour régionales et nationales existantes des informations sur les sols dans le monde entier (SOTER, ESD, Soil Map of China, WISE) avec les informations contenues dans le Carte mondiale des sols FAO-UNESCO à l'échelle 1:5 000 000 [40].

La base de données raster résultante se compose de 21600 lignes et 43200 colonnes, qui sont liées à des données harmonisées sur les propriétés du sol. L'utilisation d'une structure standardisée permet de relier les données d'attributs à la carte raster pour afficher ou interroger la composition en termes d'unités de sol et la caractérisation de paramètres de sol sélectionnés (carbone organique, pH, capacité de stockage de l'eau, profondeur du sol, cation capacité d'échange du sol et de la fraction argileuse, nutriments échangeables totaux, teneur en chaux et gypse, pourcentage d'échange de sodium, salinité, classe texturale et granulométrie).

D'après la base de données mondiale harmonisée(HWSD) sur les sols établis par une collaboration entre la FAO avec l'IIASA, l'ISRIC-World Soil Information, l'Institut des sciences du sol, l'Académie chinoise des sciences (ISSCAS) et le Centre commun de recherche de la Commission européenne (JRC),nous avons trouvé que notre bassin est généralement en argile et argile lourde.

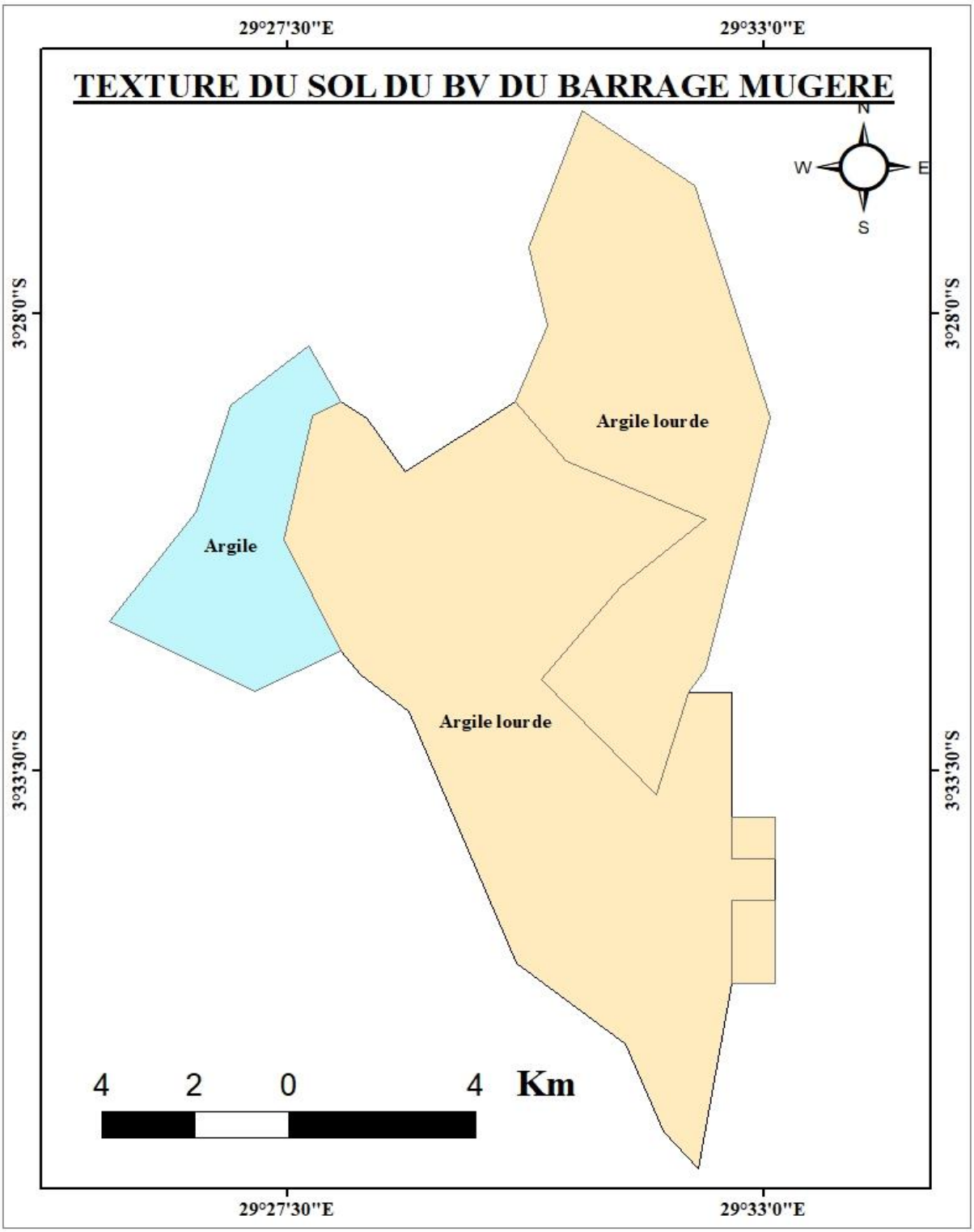


Figure 21: Carte pédologique du BV du barrage MUGERE

II.6 COUVERTURE ET UTILISATION DES SOLS

II.6.1 Acquisition

La disposition des données d'occupation et du couvert du terrain résulte le plus souvent de l'analyse et du traitement par télédétection des images satellitaires. L'image satellitaire utilisée est celle du Landsat 8, le huitième satellite du programme spatial d'observation de la terre destiné à des fins civiles, Landsat, développé par la NASA à l'instigation de l'USGS. Les données de Landsat 8 de 2021 de la zone d'étude ont été téléchargées gratuitement depuis le site du USGS en suivant le lien *http://earthexplorer.usgs.gov*..

II.6.2 Traitement : Elaboration de la carte d'occupation du terrain

La classification des caractéristiques de l'image des bandes d'images 2 à 7 combinées après être chargées dans ArcGIS avec comme affichage le composite des couleurs naturelles RGB) pour sa bonne visualisation constitue une étape cruciale pour l'élaboration de la carte d'occupation de la zone d'étude. Cette classification consiste à identifier les groupes homogènes des pixels qui représentent des classes dominantes de la zone d'étude en utilisant l'information spectrale contenue dans l'image des bandes combinées. Ayant déjà connaissance des classes d'occupation du terrain à assigner aux différents groupements spectraux de l'image à savoir la végétation pauvre, l'agriculture, le terrain nu et la zone résidentielle – la méthode de classification supervisée par l'algorithme de vraisemblance maximum a été utilisée pour effectuer la classification de l'image d'occupation du terrain à l'aide de l'outil de classification des images dans ArcGIS. La carte d'occupation du terrain résultant est donnée à la *Figure 22*

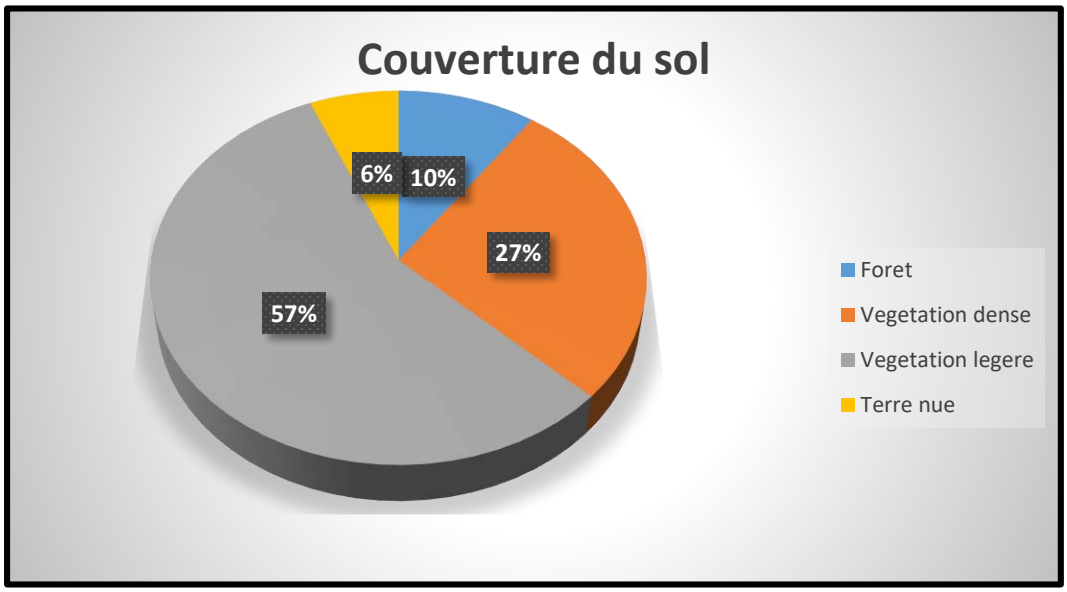


Figure 22: Répartition de la couverture du sol dans le BV du barrage MUGERE

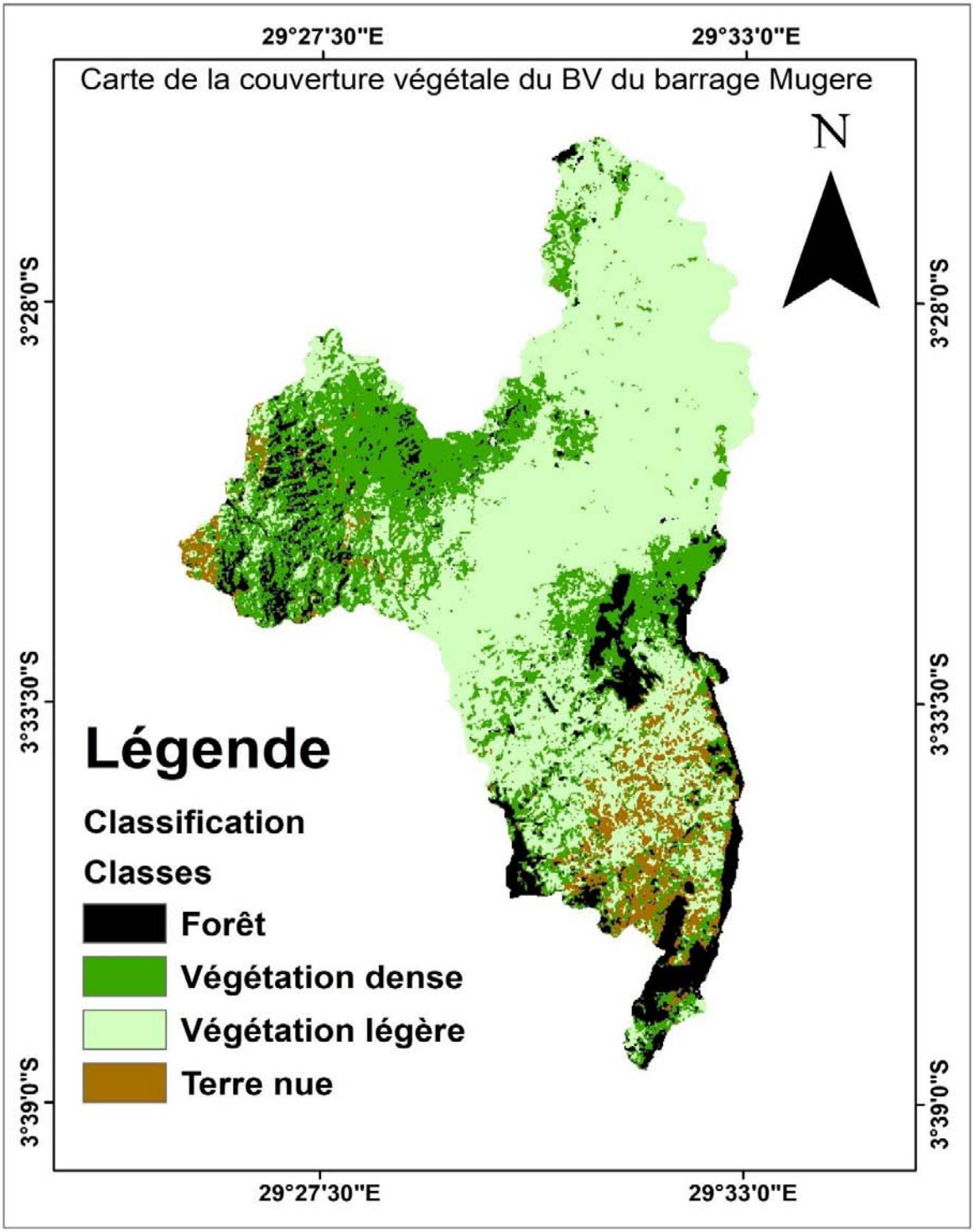


Figure 23:Carte d'occupation du sol

Conclusion

En partant du modèle numérique de terrain issu du Bureau de Centralisation Géomatique (BCG), Il a été remarqué que la rivière MUGERE traverse plusieurs communes depuis sa source jusqu'à l'exutoire. On constate que le bassin versant du barrage MUGERE est allongé comme le montre le coefficient de Gravelius formule [4] ce qui a un impact sur le temps de concentration. Plus le bassin est allongé, plus le temps de concentration est grand.

Il a été vu que la rivière MUGERE est longue de 23.5km depuis sa source dans la commune MUGAMBA jusqu'à l'exutoire en commune MUTAMBU exactement au niveau du barrage MUGERE. En réalité, l'exutoire de la rivière MUGERE ne se trouve au niveau du barrage mais plutôt au niveau du lac TANGANYIKA dans le quartier RUZIBA. Mais pour pouvoir déterminer la quantité des sédiments qui se qui se déposent au niveau du barrage, on a subdivisé le bassin versant de la rivière MUGERE en sous bassin en considérant que l'exutoire se trouve au niveau du barrage MUGERE.

CHAPITRE III : EVALUATION DES TRANSPORT SOLIDES

III.1 EROSION

L'érosion a plusieurs conséquences comme les pertes des terres fertiles, l'envasement des retenues des barrages, etc.

Devant l'ampleur de ces différents problèmes causés par l'érosion, les chercheurs ont tenté dans ce domaine pour pouvoir trouver la quantité des sédiments érodés par an et ils ont trouvé des différentes formules de quantifications qui sont les suivantes :

1. **Fournier**

$$E = \frac{1}{36} * (\frac{{P_X}^2}{P_a})^{2.65} * (\frac{h^2}{s})^{0.46}$$ [29]

Où

E : $Apport\ solide\ annuel\ moyen\ spécifique$

Px : $Pluviométrie\ moyenne\ mensuelle\ du\ mois\ le\ plus\ pluvieux$`

Pa : $Pluviométrie\ moyenne\ annuelle\ en\ mm$

h : $Dénivelé\ moyenne\ du\ bassin\ versant\ en\ m$

S : $Superficie\ du\ BV\ en\ km2$

D'après les données de l'IGEBU, le mois le plus pluvieux es celle d'avril avec une lame de 190.66mm.Sur cette même station la pluviométrie moyenne annuelle est de 1382.25mm.Sur la courbe hypsométrique, la dénivelé moyenne trouvée du bassin est de 579.15m

D'où $\boldsymbol{E = \frac{1}{36} * (\frac{198.55^2}{1382.25})^{2.65} * \left(\frac{579.15^2}{144.4}\right)^{0.46} = 6387.1424\ t/km^2/an}$

Donc le nombre total de terre perdu par an est de **1015397.785t/an**

En prenant que le poids volumiques des matériaux charriés est de 1700kg/m^3, on peut directement trouver le volume de charriage qui est de **597292.815 m3**

En considérant que ce volume a été perdu uniformément sur toute la surface du bassin versant, nous constatons que l'épaisseur perdue est de **4.1mm**.

2. Formule de KARAMBIRI

$$\boldsymbol{D = 137 * \left(\frac{P}{700}\right)^{-2.02} * S^{-0.05} * (0.25 + 1.13 * (h + r))^{1.15}} \quad \textbf{[30]}$$

$$\boldsymbol{V_s = D * S * n}$$

Avec

H : paramètre anthropique, pris ceci égale à 0.50 (bassin versant comportant des petits villages et des voies routières) **;**

R : paramètre morphologique, pris égal à 0.50 (relief moyennement accidente) ;

P : la pluviométrie moyenne annuelle (mm)=1382.25mm ;

S : La superficie du bassin versant (km^2)=144.02km^2 ;

n : La durée de vie de l'ouvrage égal à 50ans.

D : la dégradation spécifique annuelle ($m^3/km^2/an$) ;

$D = 42.77 m^3/km^2/an$

$s = 308035.197 m^3$

3. Formule de GOTISCHALK

$$\boldsymbol{V = D \times S \; Avec \; D = 260 \times S^{-0.1}} \quad \textbf{[31]}$$

Avec

v : volume des dépôts solides en m^3/an

D : Dégradation spécifique annuelle en $m^3/km^2/an$

S : Superficie du bassin versant en km^2

$V = 22780.0 m^3/an$

4. Formule de CIEH-EIER (GRESILLON)

$$\boldsymbol{V_e = D * S \; Avec \; D = 700 \times \left(\frac{P}{500}\right)^{-2.2} \times S^{-0.1}} \quad \textbf{[32]}$$

Avec

$\boldsymbol{Ve}$: $Volume\ de\ dépôt\ solide\ en\ m3/an$

D : Dégradation spécifique annuelle en $m^3/km^2/an$

S : Superficie du bassin versant en km^2

	FOURNIER	**KARAMBIRI**	**GOTISCHALK**	**GRESILLON**
Dégradation spécifique annuelle en $m^3/km^2/an$	4147.29	42.77	158.17	50.07
volume des dépôts solides en m^3/an	**597292.815**	**307986.77**	22780	7210.76

III.2 Evaluation de transport solide par le modèle RUSLE

a. Erosivité

La pluie est l'un des principaux facteurs de l'érosion des sols, ceci se produit lorsque les eaux pluviales ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol et arrachent les particules du sol en les emportant [5]

Selon les différentes formules utilisées pour calculer l'érosivité [16], [17] et [18], nous avons utilisé la formule de Kassan pour trouver les résultats. La pluie utilisée a été trouvé en faisant l'interpolation de deux stations en Arcgis.

Pi	**R1**
1396.5	509.22

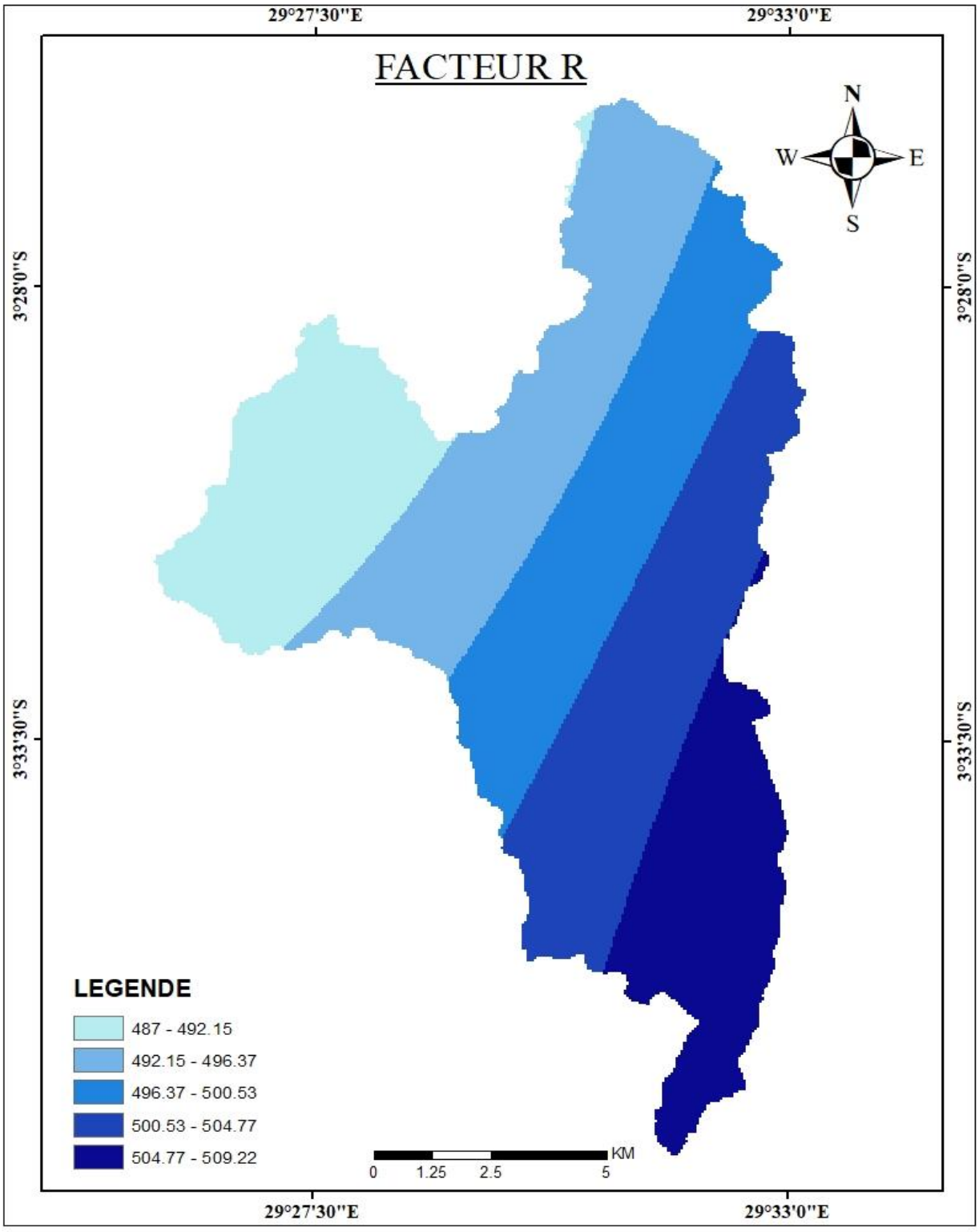


Figure 24: Facteur d'érosivité R dans le bassin versant

b. **Facteur K**

Nous avons trouvé la valeur de K en utilisant le tableau I -2 qui donne sa valeur en fonction de la texture du sol. Pour l'argile nous avons pris la valeur de **0.03** et pour l'argile lourde nous avons pris une valeur de 0.01

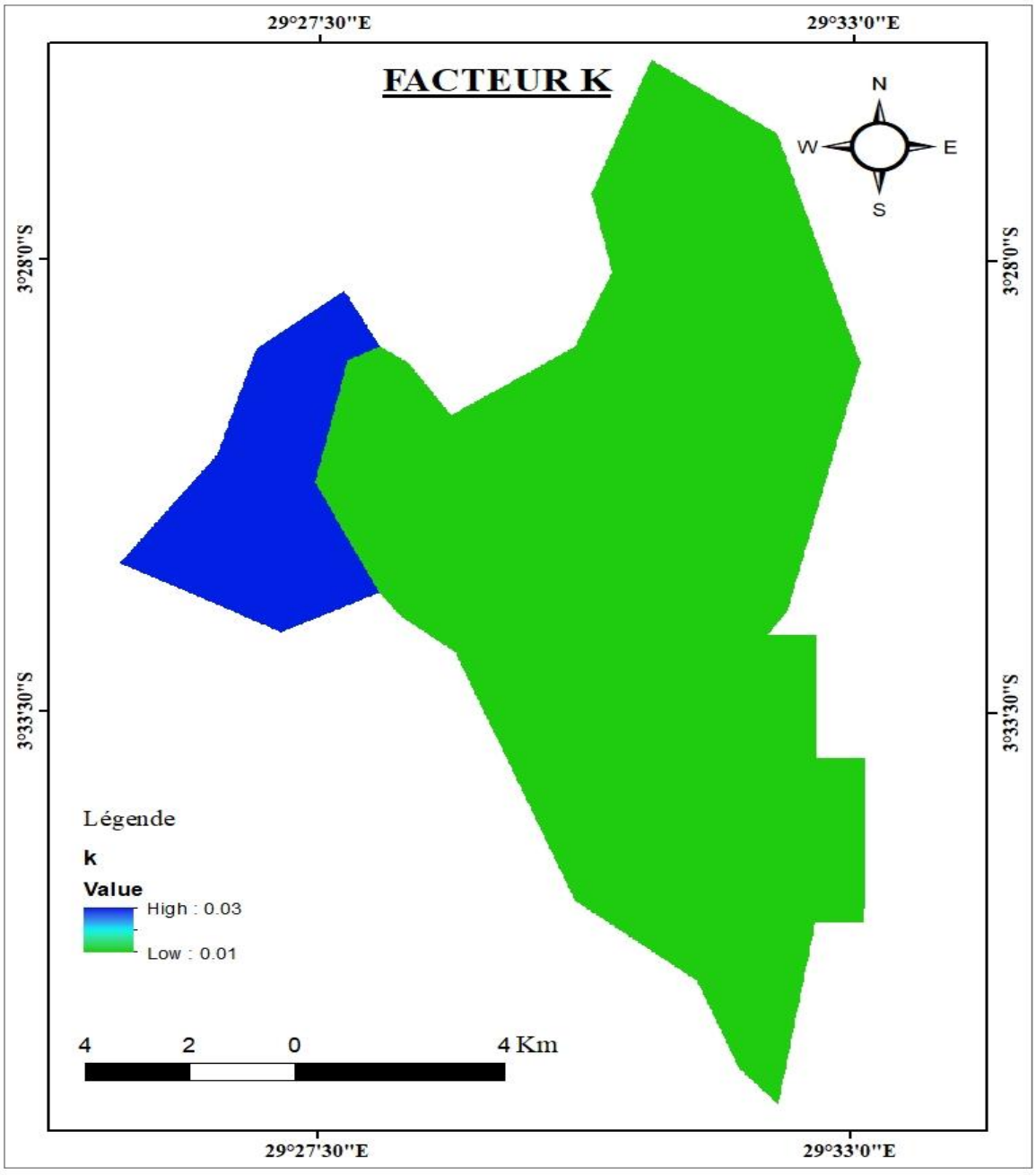


Figure 25: Facteur d'érodabilité k dans le bassin versant

c. Facteur LS

Dans notre cas, ce facteur sera calculé à l'aide du logiciel Arc Gis à partir d'un modèle numérique du terrain de 10 × 10 m de résolution à notre disposition en se basant sur les outils Raster Calculator et Flow Accumulation et Slope (Pente). Selon la formule [24]

$$LS = Power[(\text{Flow Accumulation}) \times \text{Cellsize}/22.11,0.6] \times Power\left\{sin\left[(slope \times \frac{0.01745}{0.0896}),1.3\right]\right\} \times 1.4$$

Avec $Cells\ size$: $Résolution\ de\ l'image$

$Slope$: $Les\ pentes\ du\ BV$

$Power$: $Puissance$

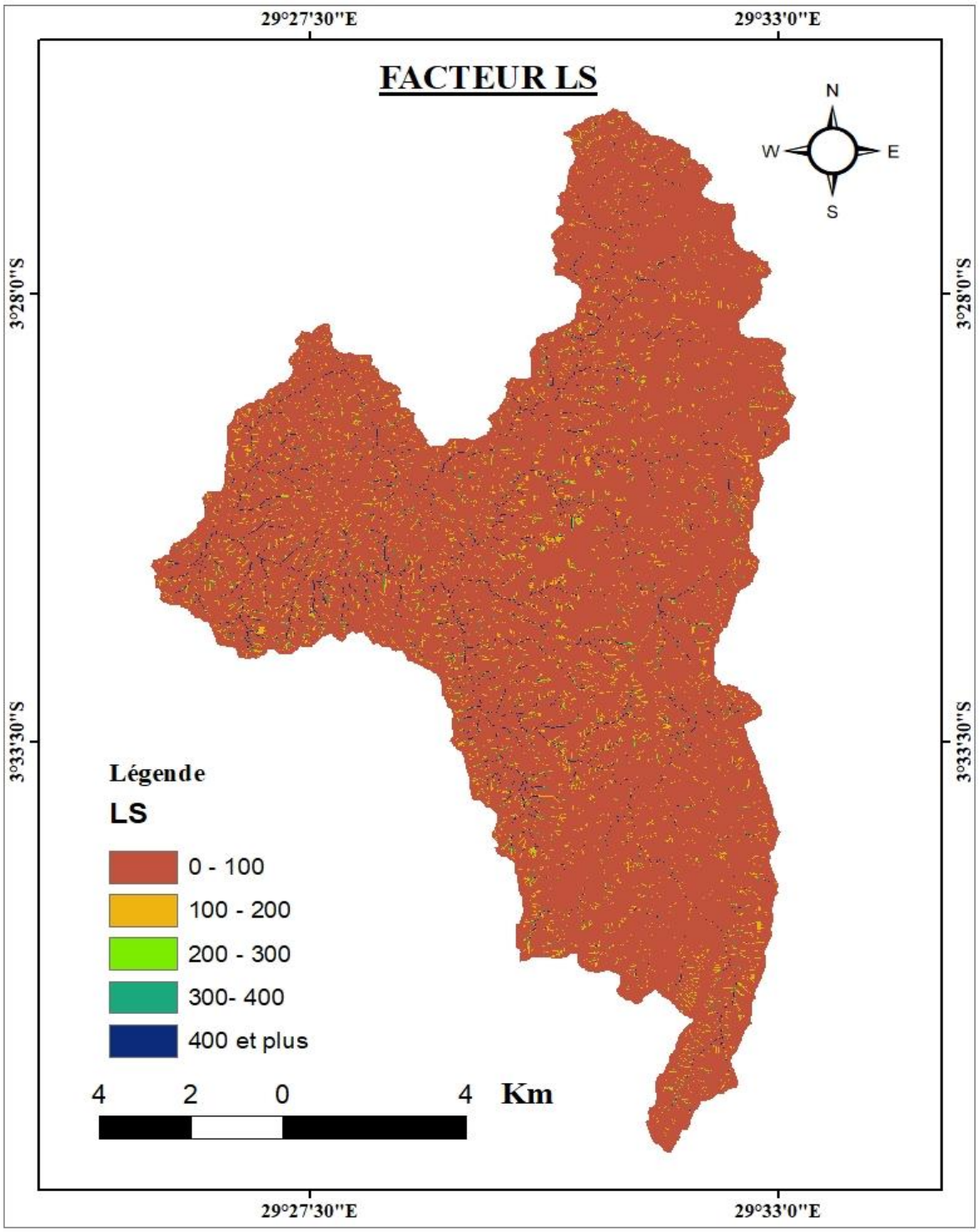


Figure 26: Carte facteur LS

d. Facteur c

Pour trouver le facteur c, nous avons utilisé les images de landsat8 sur les différentes bandes Toutefois, plusieurs chercheurs ont adopté les calculs par des nouvelles approches simplifiées : utilisation de la carte d'occupation des sols et l'attribution de classe pour chaque entité [29], ou utilisation des techniques de télédétection comme la classification d'images satellites [30]et les indices de végétation [31]

Le NDVI est un indice de végétation par différence normalisé. Il est utilisé en agriculture pour évaluer la vigueur et la quantité de végétation par analyses des mesures de télédétection. Le NDVI est souvent utilisé dans des outils d'aide à la décision en agriculture de précision.

Donc l'indice de végétation est déterminé par la relation suivante [41]:

$$\boldsymbol{NDVI = \frac{PIR - Rouge}{PIR + Rouge}} \qquad [33]$$

- Proche de 1 : Présence de végétation avec une forte activité chlorophyllienne et une forte densité (forêt)
- Proche de 0 : Pas de feuille vertes, représente généralement des sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge,
- Les valeurs négatives sont essentiellement générées par les nuages, l'eau et la neige, pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge

En se basant sur les affirmations de De Jong (1994), l'indice de végétation NDVI peut donc être utilisé pour calculer le facteur C, telles que sa valeur en un point i est donnée par le système

Dans notre cas, le facteur C sera déterminé à partir du NDVI avec la formule proposée en zones tropicales par DURIGON et al (2014) :

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

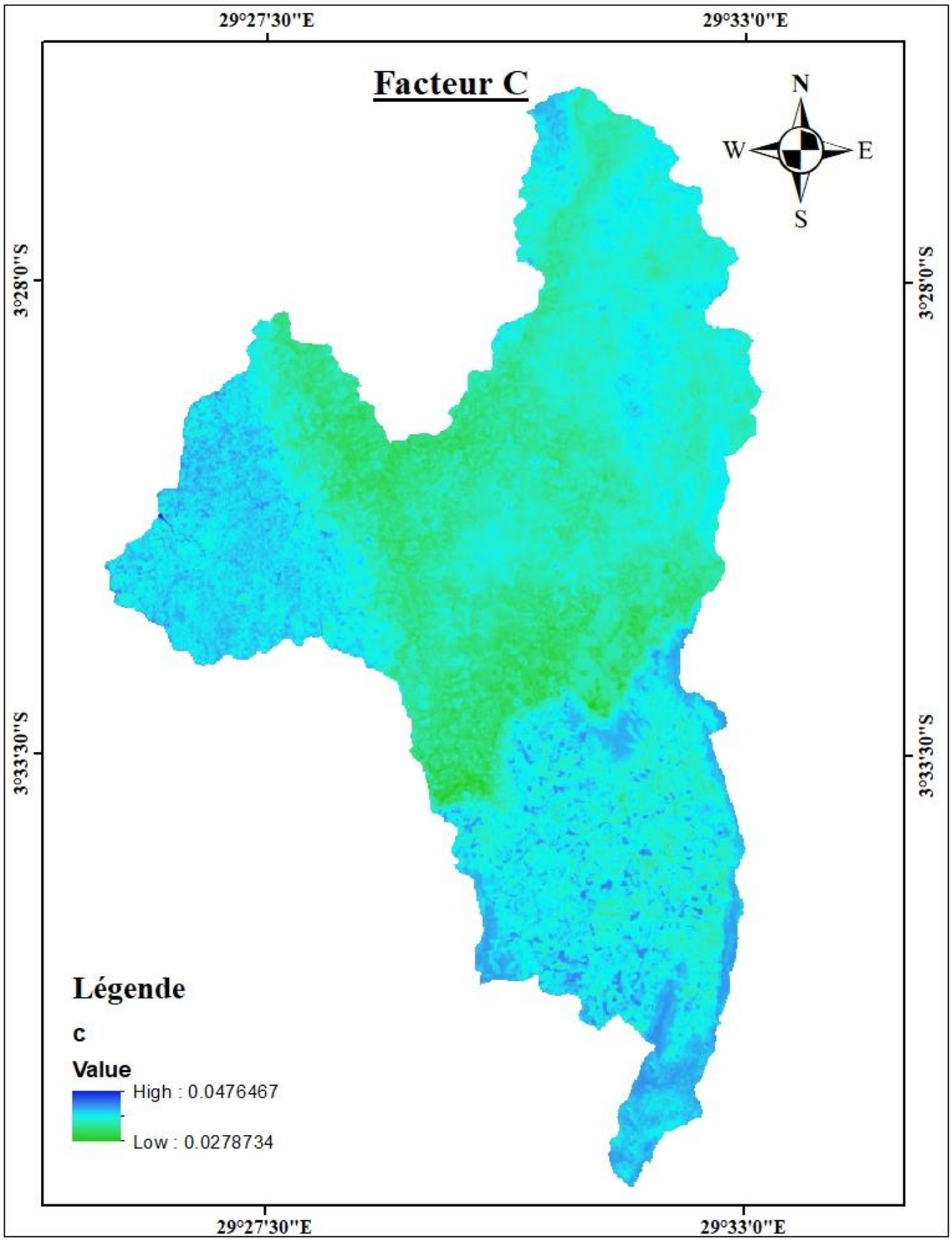


Figure 27:Carte Facteur C

La valeur de 0.0278 montre la zone où il Ya risque d'érosion car le sol est presque nu
La valeur de 0.047 montre la zone à couver végétal donc dans cette dernière il n'ya pas de risque d'érosion car le couvert végétal est d'autant plus efficace qu'il absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie et diminue le ruissellement.

e. Facteur de pratique anti érosive p

Les pratiques antiérosives sont adimensionnelles. Ce facteur représente la protection du sol en fonction des techniques culturales antiérosives réduisant la vitesse de ruissellement et diminuant ainsi le risque de l'érosion hydrique. Il varie en fonction des aménagements effectués, à savoir les cultures en courbe de niveau, en bandes alternées ou en terrasse, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage [14]. Les valeurs de P sont comprises entre 0 et 1, dans lequel la valeur 0 représente un très bon milieu de résistance à l'érosion et la valeur 1 montre une absence de pratique anti érosive [33].
Donc dans notre cas nous avons considéré que le bassin versant à une absence de pratique anti érosive donc la **valeur est de 1**.

III.3 Quantification de perte des terres moyenne dans le bassin versant de la MUGERE

La modélisation des facteurs implique dans l'érosion permet de quantifier le phénomène d'érosion dans le bassin versant du barrage de MUGERE.
Le modèle RUSLE permet de déterminer la moyenne des pertes en terres en t/ha/an en utilisant les 5 facteurs déjà cités ci haut. Cette modélisation est essentiellement faite par le logiciel de cartographie arc Gis. Nous avons utilisé une résolution spatiale de 10mx10m.

Les couches sont superposées pour procéder de calcul de pixel comme le montre l'équation des pertes de terres Universelles en utilisant l'outil Rasta Calculator et la fonction Map algebra pour déterminer la perte moyenne dans tout le Bassin Versant.

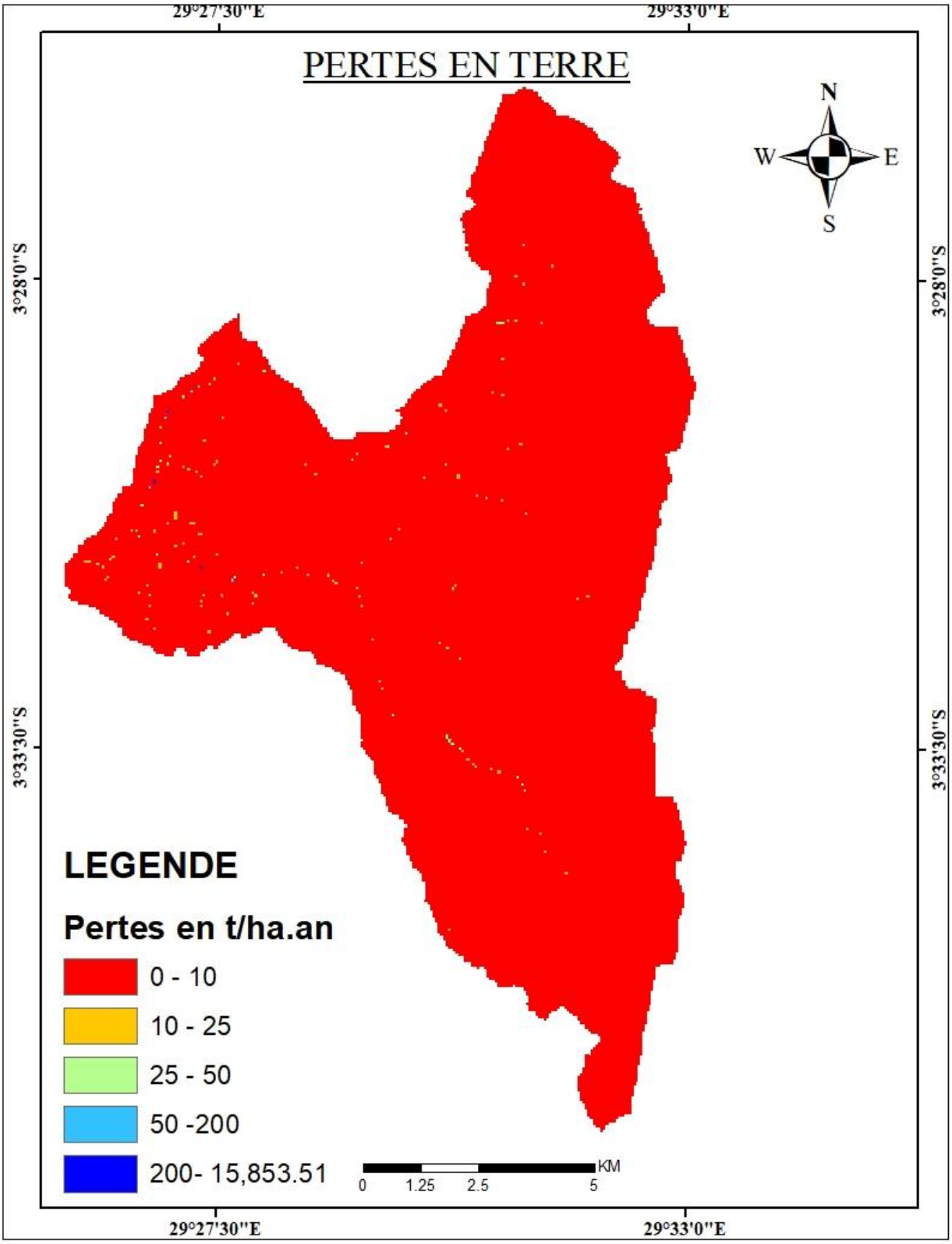

PERTES EN TERRE
29°27'30"E
29°33'0"E
3°28'0"S
3°33'30"S
N
W
E
S
LEGENDE
Pertes en t/ha.an
0 - 10
10 - 25
25 - 50
50 -200
200- 15,853.51
0
1.25
2.5
5
KM

Figure 28:Carte d'érosion du BV du barrage MUGERE

VALUE	AREA	MIN	MAX	SUM
1	102500100	0	10	236787.068
2	22478400	10	25	234801.0986
3	7706700	25	50	182102.7954
4	3465900	50	200	205363.0245
5	956700	200	15853.51	578362.3134
	137107800			**1437416.3**

Les pertes en terre évaluées selon le modèle RUSLE couplé avec le système d'information géographique par calculateur de raster (Rasta calculator) sont de **1.437.416,3**tonnes/an. En considérant la masse volumique des matériaux charriés à 1700 kg/m3, on trouve que le volume total des matériaux charriés est de **845539 m3 /an.** Si nous ramenons ce volume à toute la surface du bassin versant, on trouve que la perte en terre moyenne est environ égale à **5.86**mm/an soient **6mm/an.**

Commentaire sur les résultats trouvés :

En analysant les résultats trouvés du chapitre précédent, ils sont beaucoup plus grands soient des milliers de tonnes. Il a été observé que cette quantité de tonnes charriées est dues à une grande pente qui se présente dans le bassin versant du barrage MUGERE mais aussi du type du sol qui s'y présente .L'autre facteur qui cause cette érosion est que la grande surface est cultivée ce qui favorise le ruissellement au lieu de l'infiltration.

Analyse spatiale des pertes en terres dans le BV du barrage MUGERE

L'érosion est un phénomène qui peut être accéléré ou non par des divers facteurs .Dans le présent travail pour faire une analyse spatiale des taux de pertes en terres, nous nous sommes basés sur les différents facteurs suivants : perte en terre selon le degré de pente, altitudes, couverture végétales, types du sol.

a. Pente

La pente est l'un des facteurs qui influencent l'érosion plus il y'a une grande pente il y'a l'érosion, plus pente diminue les sédiments qui ont été charriés vont se déposer.

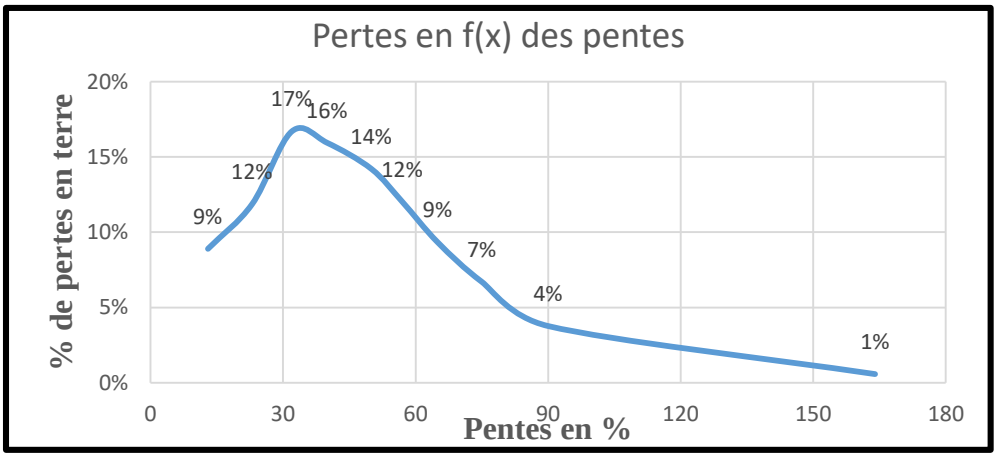


Figure 29:Taux de pertes en terres selon le degré de la pente

b. Altitudes

Le pic se trouve dans l'intervalle de 1388-1520 comme le montre la figure et aussi sur la courbe hypsométrique cet intervalle occupe une grande surface dans le BV du barrage MUGERE soit 25,78% .A partir de 1650m d'altitude les pertes en terres commencent à diminuer. Donc au les zones au-delà de 16500 présentent un faible taux de perte de terre. Au-delà de 1770m d'altitude, toutes ces zones présentent un taux de pertes en terres inferieurs à 10 %.

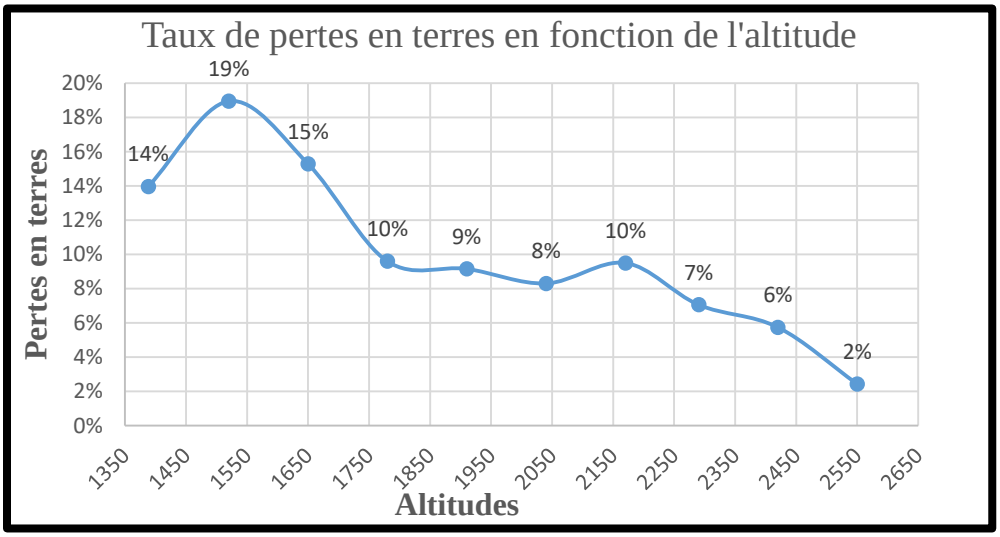


Figure 30:Taux de pertes en terres en fonction de l'altitude

c. Types du sol

Dans notre bassin versant nous avons trouvés deux types de sols argile et argile lourde qui occupent respectivement la surface de 12% et 88%.Donc selon le logiciel Arcgis avec l'onglet zonal statistics nous avons trouvé les pertes de terres par chaque types du sol respectivement de 46% et 54% comment le montre la figure suivante

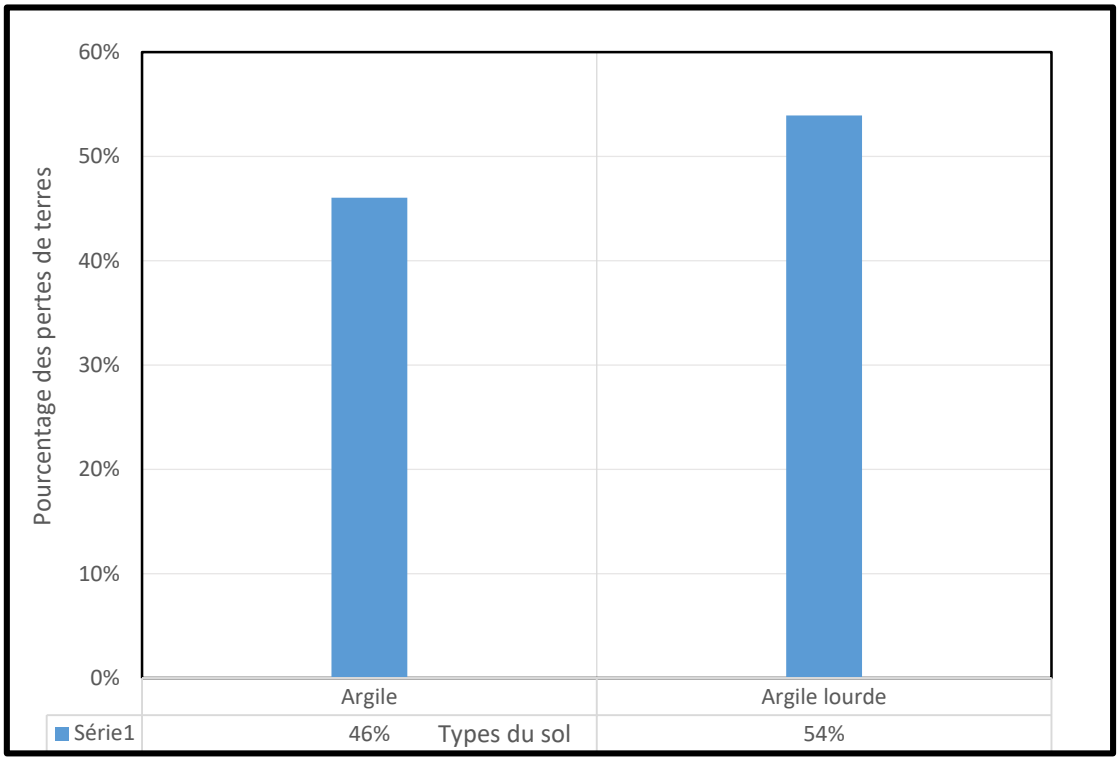


Figure 31:Taux des pertes en terre selon le type du sol

d. COUVERURE DU SOL

La couverture du sol à un rôle dans la réduction des effets du ruissellement en amortissant l'impact des eaux de pluie sur une surface [14].Donc cela signifie que le sol ayant le couvert végétal comme la forêt, la végétation dense, n'est pas susceptible à l'érosion.

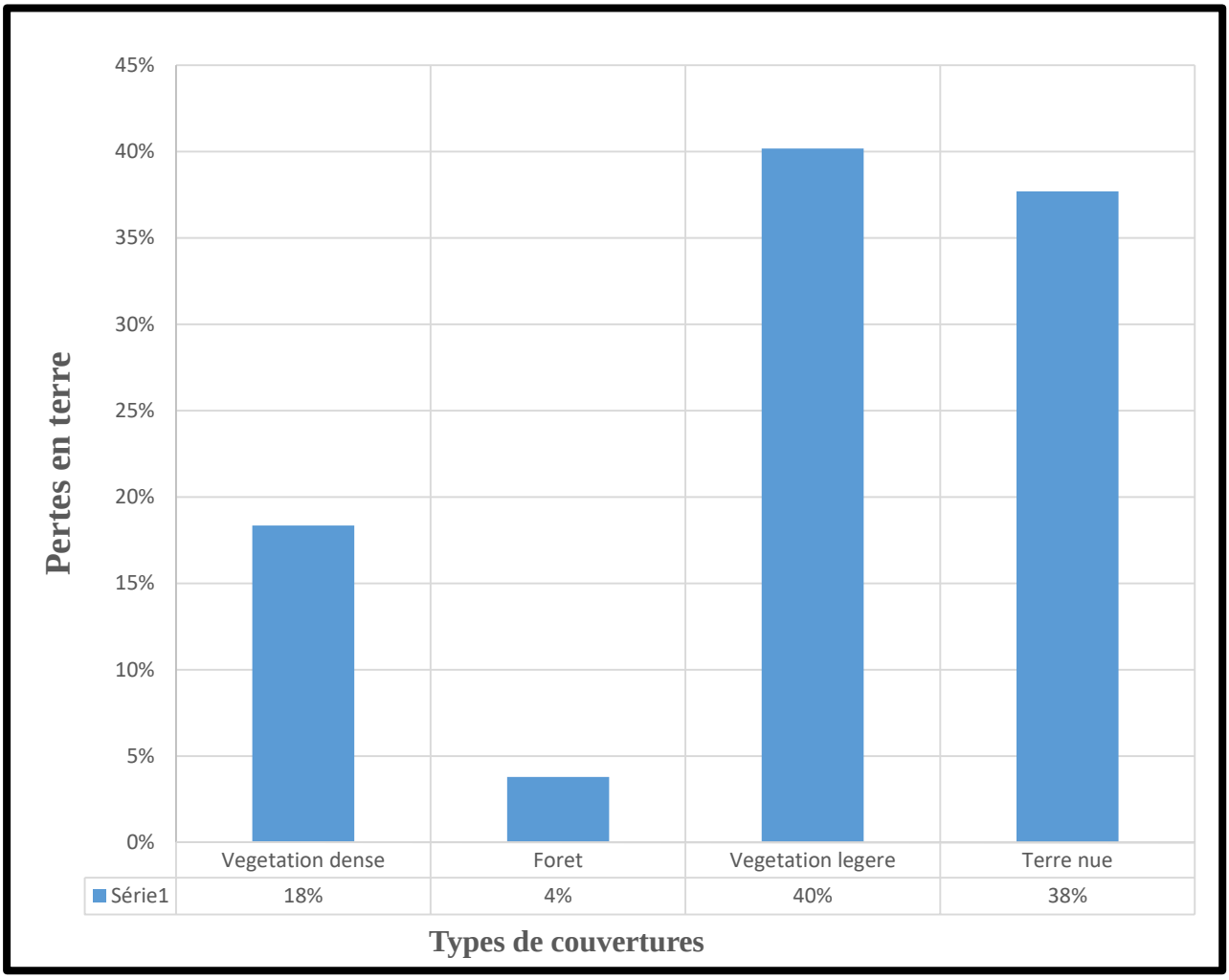


Figure 32:Taux des pertes en terres selon la couverture du sol

III.4 Perspectives et voies d'amélioration

Au terme de ce travail, nous avons constaté que ce sont les fortes pentes de ce bassin versant qui causent les fortes érosions quantifiées. La quantité de terre érodée est directement charriée vers le dos du barrage ce qui réduit considérablement le volume d'eau utile pour la production hydroélectrique. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé des bassins de retentions dont les dimensions sont en fonction du volume des sédiments trouvés. Nous recommandons à ceux qui vont faire l'étude sur le Bassin Versant du barrage de voir l'influence des sédiments sur le barrage quand on fait le traçage des courbes antis érosives. J'inviterais à d'autres chercheurs de faire l'analyse granulométriques pour connaitre les vraies dimensions du déssableur afin de faire le

dimensionnement du bassin .Dans le but de protéger le barrage nous proposons un bassin de rétention de forme rectangulaire en partant par des formules suivantes :

$$T = \frac{h}{u} \quad \textbf{[34]}$$

Avec $h =$ La hauteur du bassin

$u =$ La vitesse de décantation d'une particule.

Et

$$U = \left[\frac{4gd}{3c} \times \frac{(\rho_d - \rho)}{\rho}\right]^{0.5} \quad \textbf{[35]}$$

Où $g = 9.81 m/s^2$

$d = Diamètre\ de\ la\ particule$

$\rho_d = masse\ volumique\ de\ la\ particule$

$\rho = masse\ volumique\ du\ liquide$

$c = coefficient\ de\ frottement$

La longueur minimale du bassin est déterminée par

$$L = \frac{hv}{u} \quad \textbf{[36]}$$

En prenant que c=0.4 coefficient de frottement pour le béton

V=3.9km/h soient 1.08m/sec

U=0.26m/s

L=3m largeur du bassin dans le cours d'eau.

H=2m

Supposons que les diamètres retenues est de 1/10 du volume charrié soient 84553.9m3

Le volume à retenir par mois est de $\frac{84553.9}{12} = 7046.158m^3$

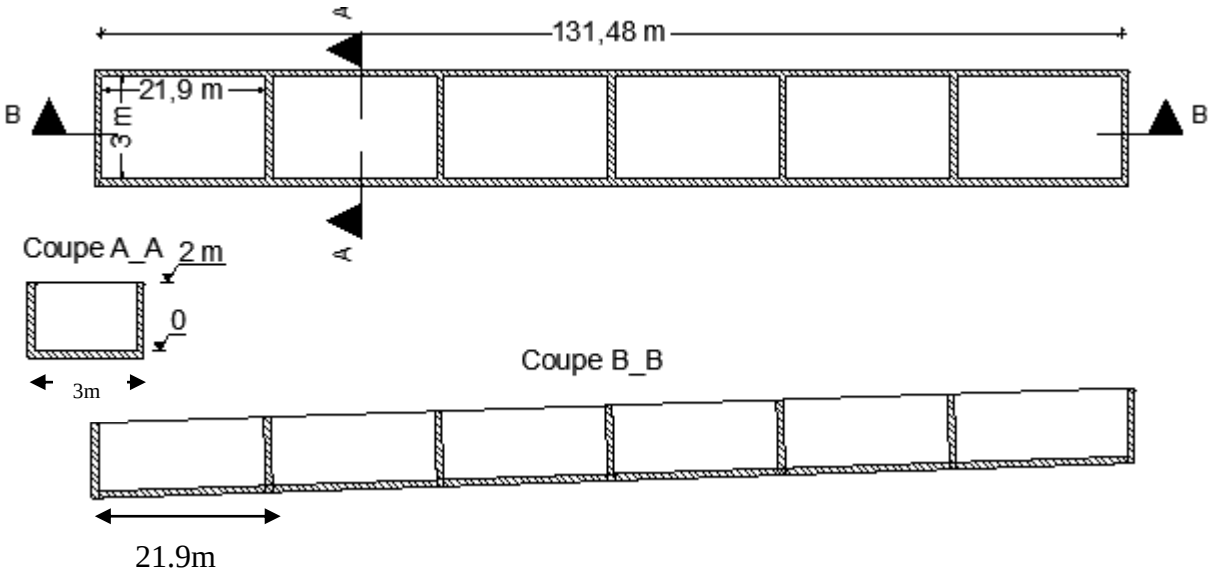
Si on fait le curage à 4 mois le volume est de 2348.719m3

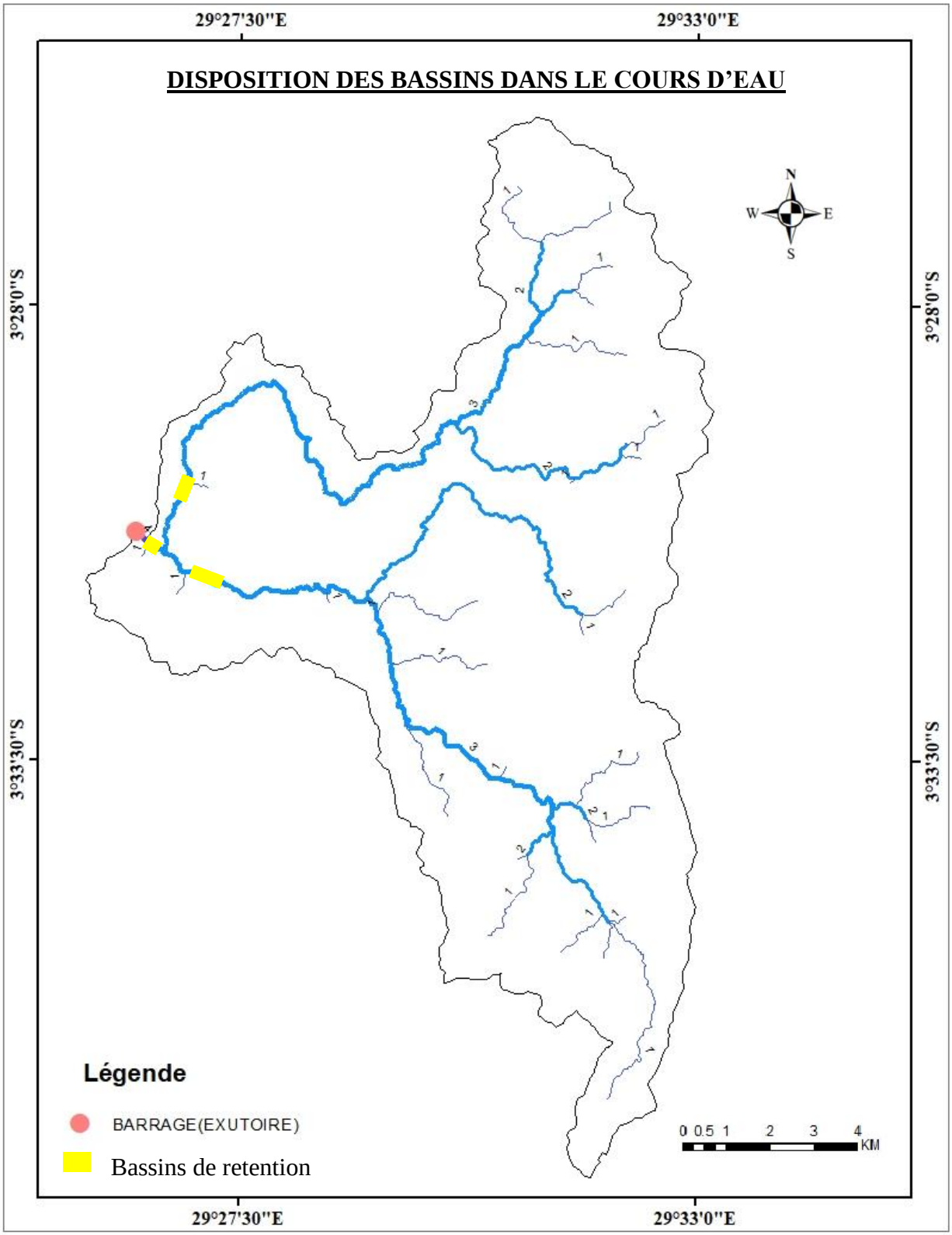
Nous proposons trois bassin de rétention l'un dans l'affluent principal et les deux autres dans lit majeur du cours d'eau.

$$V\ d'un\ seul\ Bassin = \frac{2348.719}{3} = 782.9m^3$$

$$Longueur\ de\ chaque\ bassin = \frac{volume\ d'unbassin}{6m^2} = 130.484m$$

Plan et coupe des bassins de rétention




29°27'30"E
29°33'0"E
DISPOSITION DES BASSINS DANS LE COURS D'EAU
3°28'0"S
3°33'30"S
N
W
E
S
Légende
BARRAGE(EXUTOIRE)
Bassins de retention
0 0.5 1 2 3 4
KM

CHAPITRE IV : CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATION

IV.1 Conclusion générale

Au moment où je m'achemine au terme de ce travail, je tiens à rappeler que les objectifs principaux de ce travail étaient la quantification des matières solides qui s'accumulent au dos du barrage hydroélectrique de MUGERE ainsi que la proposition des dispositifs de protection de ce barrage.

Après le calcul, les résultats nous ont montré qu'une quantité égale à **1.437.416,3** tonnes/an, est charriée par l'érosion ayant eu lieu sur l'ensemble du bassin versant de la rivière MUGERE. Et toute cette quantité est susceptible de s'acheminer vers le dos du barrage hydroélectrique de MUGERE. Ce qui fera que les dispositifs de protection du barrage seront dimensionnés en tenant compte du volume total des matières solides érodées.

Comme les pertes moyennes de terres sont de **1.437.416,3** tonnes/an et sachant que la masse volumique des matériaux charriés de 1700 kg/m3, on trouve que le volume total des matériaux charriés est de **845539 m3/an.** En ramenant ce volume à toute la surface du bassin versant, on trouve que la perte en terre en moyenne (épaisseur uniformément repartie sur toute la superficie du bassin) est d'environ **5.86**mm/an soient **6mm/an.** La vitesse de décantation des particules est de 0.26m/s avec un temps de séjour d'une minute (1 min).Les dimensions du bassin de rétention proposé sont les suivantes : L=130.484m, l=3m, H=2m.Ce bassin joue aussi le rôle de décantation des particules solides en amont du réservoir.

Dans le but de diminuer les pertes en terre et limiter l'érosion dans le bassin versant du barrage MUGERE nous proposons l'usage des haies anti érosives. Cela permettra de de limiter les charriages en amont du barrage et les dépôts solides dans le réservoir du barrage

Nous proposons aussi de faire le reboisement et plantation des arbres à racine profondes comme les bambous surtout sur les talus instables en amont du barrage.

Certes, ce travail a atteint un des objectifs que nous nous étions fixés qui est entre autre la quantification des matières solides perdues par an sur toute l'étendue du Barrage hydroélectrique de la rivière MUGERE, cependant la proposition des vraies dimensions des ouvrages a été sommaire à cause du manque de temps suffisant. En principe, les vraies dimensions des différents ouvrages doivent tenir compte de l'analyse granulométrique des matières solides charriées, ce qui n'a pas eu lieu.

IV.2 Recommandation

Après les résultats trouvés et les difficultés rencontrées durant le parcours de notre travail de fin d'étude, nous recommandons ce qui suit :

- ✓ **A l'institut Géographique du Burundi**

- De disponibiliser les données hydrométriques et météorologiques des différents bassins versants surtout sur les rivières sur lesquelles on trouve des ouvrages de grandes importances.
- De réparer les différentes stations qui ne fonctionnent plus
- De faciliter les étudiants à l'accès des données afin qu'ils terminent leur travaux de fin d'étude dans les délais fixés par l'Université.

- ✓ **A l'université du Burundi**

- De financer les travaux de fin d'étude dans le but de bien approfondir la recherche à tel point que les résultats de cette dernière soient finis pour être utilisés dans la résolution des problèmes pratiques dans le futur.

- ✓ **Au ministère de l'environnement, de l'Agriculture et de l'élevage**

- De faire des haies anti érosives pour limiter l'érosion dans le bassin versant du barrage MUGERE afin de limiter les dégâts que ces derniers peuvent causer au barrage.
- De faire le reboisement et plantation des arbres à racine profondes surtout sur les talus instables en amont du barrage.

- ✓ **A la Regideso**

- De disponibiliser les fonds afin que les essais au laboratoire des ouvrages hydrauliques proposés aient lieu dans le but de vérifier les résultats théoriques trouvés dans ce travail ;
- De mettre en œuvre les résultats de ce travail après leur vérification au laboratoire.

- ✓ **Aux étudiants et autres chercheurs**

- De continuer à faire les recherches en intégrant d'autres données comme celles géologiques, les données sur les glissements ainsi que celles de l'analyse granulométrique au laboratoire.

Références bibliographiques

[1] J.P. LABORDE, ELEMENTS D'HYDROLOGIE DE SURFACE, Paris: Université de Nice, 2009, p. 250.

[2] Girard et al, "Sols et environnement," p. 816, 2005.

[3] Foster et Meyer, 1972, Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation.

[4] Ellison, 1944, "A Simple Device to Evaluate the Influence Parameters of the Water Erosion of Bare Sandy-Clay Soils of the City of Douala," *Engineering*, vol. 11, no. 12, 2019.

[5] Le bissonnais,Boiffin, "L'érosion hydrique des sols," p. 106, 1988.

[6] Bergasme et al.1996, Terminology for soil conservation erosion, ISSS.

[7] S. Leguedois, Mécanismes de l'érosion diffuse des sols : modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés, Orleans, 2003, p. 205.

[8] Chaplot&Bissonnais 2000, Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés.

[9] Kaurak Leiete 1990, MODELISATION DE L'EROSION HYDRIQUE DANS LE BV DU SILIANA PAR LE MODELE DE KINEROS2, Tunis: Université De Tunis El Manar .

[10] Roose Eric, Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)., Rome: FAO, 1994, p. 438.

[11] Foster,Moore & Foster., Multiscale Soil Erosion Simulations For Land Use Management, Caroline: Carolina State University, 1990, p. 322.

[12] Ludwing et al. 1996, Etat de surface structure hydrographique et érosion en rigole des bassins versants cultivés du nord de la France, Eude et gestion des sols.

[13] Hadir, odélisation du ruissellement et de l'érosion par le modèle STREAM dans le bassin versant de l'Oued Saboun,Rif occidental - Maroc, Rabat: Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, 2010.

[14] Wischmeier and Smith, Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning, Uniersity of Viriginie, 1978.

[15] Salle et al.2000, Mecanisme de l'erosion diffuse, 2000, p. 1994.

[16] HUDSON, l'érosion hydrique du sous bassin versant de Oued Saida, 1973, p. 93.

[17] Abir BEN SLIMANE, Rôle de l'érosion ravinaire dans l'envasement des retenues collinaires dans la Dorsale tunisienne et le Cap Bon, Tunis: Insitut national D'agronomie en Tunisie, 2013.

[18] Mansouri, 1991, Modélisation du ruissellement et de l'érosion par le modèle, Rabat: Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, 2010.

[19] Bochet et al,1998, Dynamiques végétales et érosion hydrique sur les marnes dans les Alpes françaises du Sud, Paris: université Paris 7, 2005.

[20] Ben Slimane, 2013)., Etude de l'envasement de quelques lacs collinaires au bassin versant de la Medjerda, Tunis, 2015.

[21] Jetten et al., 2003, Using soil surfqce observqtion to generate infiltration qnd roughness values in agricultures catchements.Meeing of the reseau erosion, Montpillier.

[22] Compony Redmond 1996, Possibilités d'extraction d'un paramètre physique du ruissellement, la rugosité (Modélisation et Expérimentations, L. g. e. s. d. l. terre, Ed., Université de Bourgogne, p. 254.

[23] Wall et all 2002, Equation universelle révisée Manuel pour l'évaluation des pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada, Direction generale de la recherche Agriculture et agroalimentaire canada .

[24] Marcey et Berville., 2003, bilan des connaissances sur l'érosion et les phénomènes de ruissellement, Sinfotech, p. 28.

[25] Sadiki et al. 2004, *Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : Cas du bassin versant de l'Oued Boussouab.,* Rabat: section Sciences de la Terre, 2004, pp. 69-79.

[26] Jones et all 1996, Calculating Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), C. f. E. M. o. M. L. D. o. F. Science, Ed., Colorado State University, p. 184.

[27] Bolline et Rousseau (1978), L'érodibilité des sols de Moyenne et Haute Belgique. Utilisation d'une méthode de calcul du facteur K de l'équation universelle de perte de sol, bruxelle, 1978.

[28] Haan et al. 1994, Design Hydrology and sedimentology for small catchments, p. 356.

[29] Borrelli et al, 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, 2014.

[30] Karydas et al, Lazzari et al, Integrated approach of RUSLE, GIS and ESA Sentinel-2 satellite data for post-fire soil erosion assessment in Basilicata region (Southern Italy), 2015,2009.

[31] (Vatandaşlar and Yavuz,). , Modeling cover management factor of RUSLE using very high-resolution satellite imagery in a semiarid watershed, rtvin Coruh University, 2017.

[32] Jensen, Effects of freshwater hyperoxia and hypercapnia and their influences on subsequent seawater transfer in Atlantic salmon (Salmo salar) smolts, Montreal: anadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2000.

[33] Lufafa et al, Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using GIS-based Universal Soil Loss mode, Technological University Dublin - City Campus, 2003.

[34] Chehhbouni et al,1994, A modified soil adjusted vegetation index., Elsevier science, 1994.

[35] (Lacombe J et al,). , 2007.

[36] A.Midekor et J.Wellens, "Initiation à ENVI dans le cadre du projet Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou," p. 84, 2013.

[37] Tomi, Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédetection et SIG, Algerie: Journal des Sciences Hydologiques, 2013.

[38] .Jean Léonard METTIN (1994), Calcul de la lame d'eau précipitée sur le bassin versant de l'Oubangui à Mongoumba (1972-1992). Bangui, Bangui: Faculte des lettres et sciences humaines, 1994, p. 131.

[39] BLIN Pierrick, Développement d'une nouvelle méthode de cartographie du risque unitaire d'inondation (crue) pour des résidences., 2001.

[40] Ann VERDOODT,Geert BAERT,Eric VAN RANST, "Soil Mapping in Africa at the Crossroads," FAO, 1971-1980.

[41] FAO, "Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for soybean biomass and nutrient uptake estimation in response to production systems and fertilization strategies," FAO, Rome, 2019.

[42] Léonidas NIBIGIRA, Etude des risques naturels liés aux interactions entre les mouvements de masse et le, Bruxelle, 2018, p. 263.

[43] Pringle et I.J. Shelton, Équation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada., 2002..

[44] Djockic et Maidment 1993, Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information System, Redland: Esri, 2000, p. 216.

[45] Hawkins,1978 et 1979, Effets du pâturage sur le couvert végétal et la qualité des sols dans les parcours des zones arides.

[46] Renard et al,1991, "Evaluation Des Risques D'érosion Hydrique Et Cartographie Des Zones Vulnérables Par La Méthode RUSLE Couplée Aux SIG Et À La Télédétection Dans Le Bassin Versant d'Agoudal," Vols. Vol.17, No.21, 2021.

[47] "L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen. Méthode expérimentale pour l'étude des quantités de terre érodée à l'échelle du champ.," CNRS, 1971.

[48] Horton(1932), "Drainage basin characteristics," pp. 355-361.

[49] De Ploey, 1968, Contribution à l'étude de l'érosion par le splash. Z., pp. 12:174-193.

[50] Rejeski 1993, « GIS and risk: a three-culture problem », Oxford: Oxford Universty Press, pp. 318-331.

[51] Jaoued, 2007, Effet de l'endossement par les c´el´ebrit´es sur l'image de marque marque : Rˆole m´ediateur de la congruence avec l'imagede soi.

[52] Takken et al., 1999, Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM)., Catena.

[53] Robin F et al., Introduction a la realisation de spation cartes, Université de Strasbourg.

[54] Gineste 1998, "Cartographie Et Identification Des Activites Sources De Nuisances Et De Pollutions Dans Le Bassin Versant Du Barrage Du Kan De Bouake".

[55] Puech et al.1995, "Télédétection et régionalisation de l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des sols en Afrique sahélienne et nord-soudanienne," pp. 205-228, 1995.

[56] Toy et al,1998, Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control, New York: Wiley.

[57] Crawford et Linsley, 1966, Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV., P. Alto, Ed., Calfornia: Stanford University, July 1966..

[58] Saavedra 2005, "Spatially distributed erosion and sediment yield modeling in the upper Indus River basin," vol. 46, no. 10.1029/2009, August 2010.

[59] Ambroise, 1991, Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré, Dijon: Séminaire du Conseil Scientifique du Département "Science du sol" de l'INRA, 1991, p. 34.

[60] Beasley et al., 1982, "Modelling sediment yields from agricultural," *Journal of Soil and Water Conservation,* pp. 113-117.

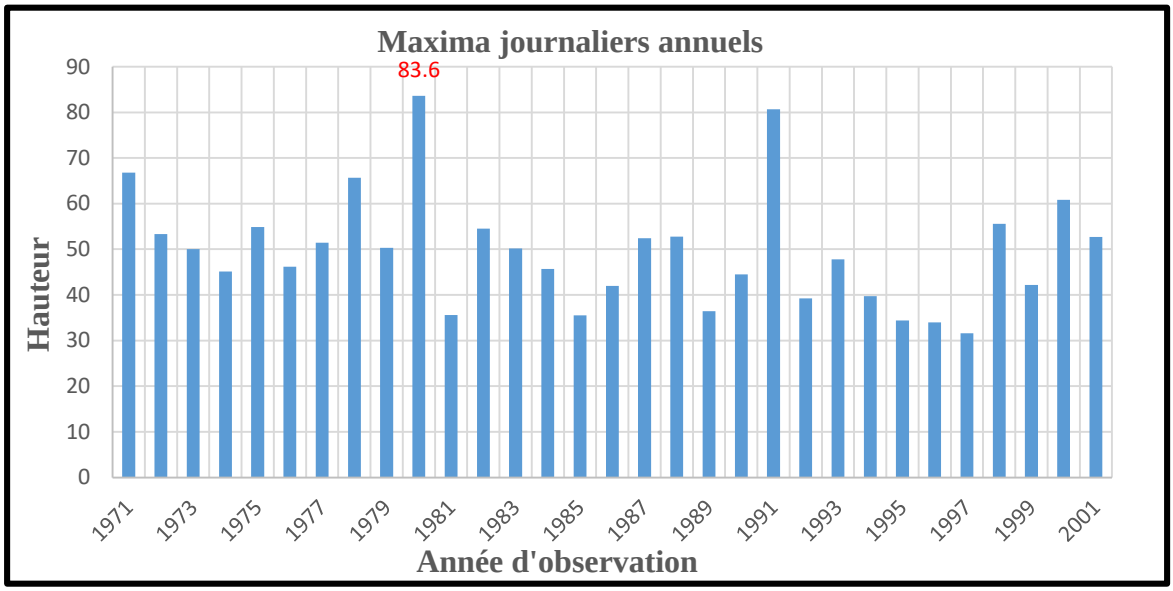
[61] "Towards integrating GIS and catchment models," *Environmental Modelling & Software,* no. 15, pp. 451-459.

[62] Perrin et al,2001 Santos et al,2003, "Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments," *Journal of Hydrology,* no. 242, pp. 275-301, 2001.

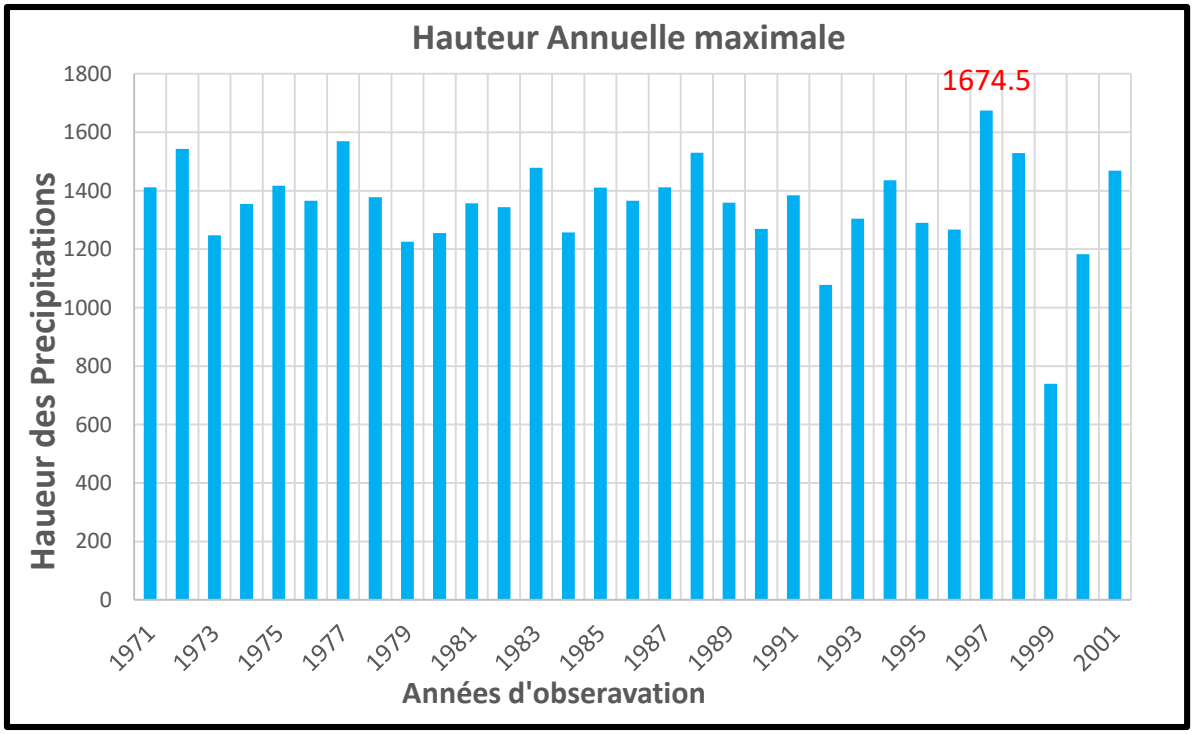
[63] Wassenaar, Reconnaissance des états de surface du sol en milieu viticole méditerranéen par télédétection à très haute résolution spatiale, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 2001, p. 205.

ANNEXE

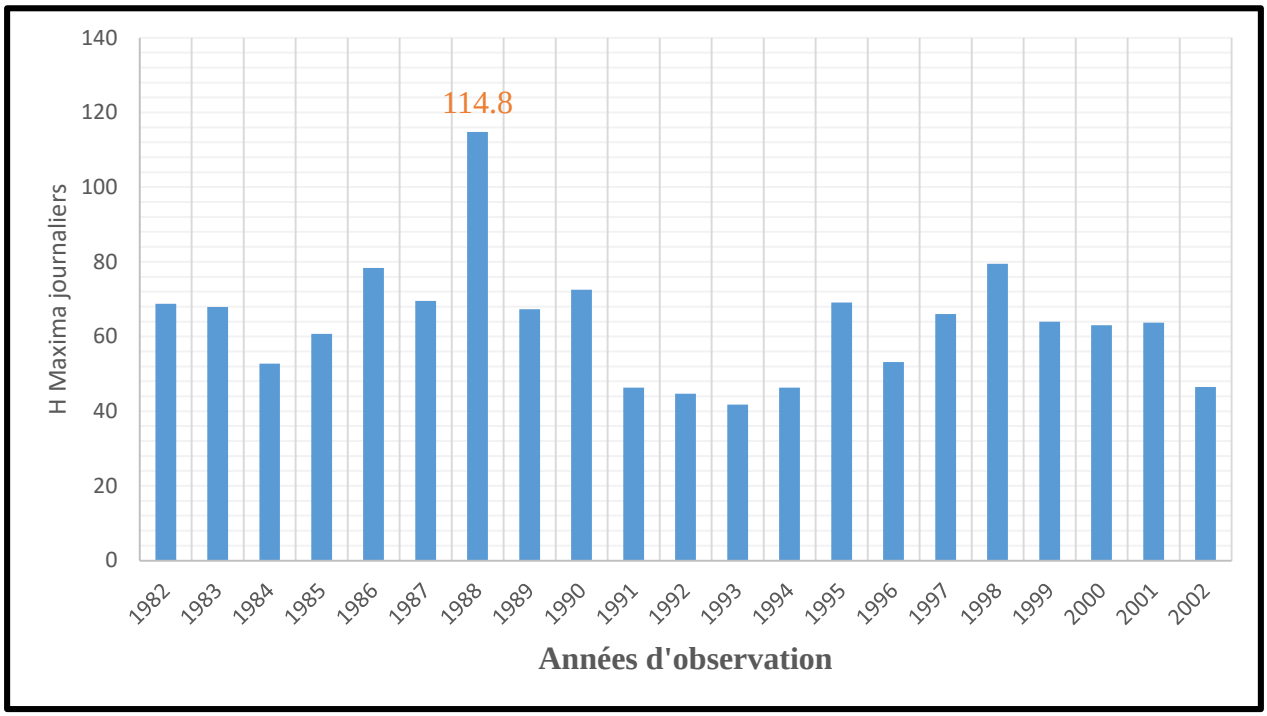
Annexe1:***variation des précipitations maximales journalières annuelles station de Buhonga***



Annexe 2 : Variation *des Hauteurs maximales annuelles station de Buhonga*



Annexe 3 : **Variation des précipitations maximales journalières annuelles station de Gisozi**



Annexe 4 : **Caractéristiques des images Landsat 8**

Landsat-7 Capteur ETM+				Landsat-8 Capteurs OLI and *TIRS*			
Bande		**Résolution spatiale**	**Bande spectrale (µm)**	**Bande**		**Résolution spatiale**	**Bande spectrale (µm)**
				1	Coastal/Aérosol	30m x 30m	*0.435 - 0.451*
1	bleu	30m x 30m	*0.441 - 0.514*	2	bleu	30m x 30m	*0.452 - 0.512*
2	vert	30m x 30m	*0.519 - 0.601*	3	vert	30m x 30m	*0.533 - 0.590*
3	rouge	30m x 30m	*0.631 - 0.692*	4	rouge	30m x 30m	*0.636 - 0.673*
4	PIR	30m x 30m	*0.772 - 0.898*	5	PIR	30m x 30m	*0.851 - 0.879*
5	SWIR-1	30m x 30m	*1.547 - 1.749*	6	SWIR-1	30m x 30m	*1.566 - 1.651*
6	TIR	60m x 60m	*1.031 - 12.36*	10	TIR-1	100m x 100m	*10.60 - 11.19*
				11	TIR-2	100m x 100m	*11.50 - 12.51*
7	SWIR-2	30m x 30m	*2.064 - 2.345*	7	SWIR-2	30m x 30m	*2.107 - 2.294*
8	Pan	15m x 15m	*0.515 - 0.896*	8	Pan	15m x 15m	*0.503 - 0.676*
				9	Cirrus	30m x 30m	*1.363 - 1.384*
1 capteur embarqué ETM+ Enhanced Thematic Mapper Plus				2 capteurs embarqués OLI (Operational Land Imager) TIRS (Thermal Infrared Sensor)			