République d'Haïti

UNIVERSITÉ D'ÉTAT D'HAÏTI

(UEH)

FACULTÉ D'AGRONOMIE ET DE MÉDECINE VÉTÉRINAIRE

(FAMV)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE RURAL

(DGNR)

Utilisation du SIG pour cartographier et quantifier les pertes de sols du bassin versant de la rivière Rouyonne (Léogâne)

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Préparé par : Deivi Abreu PERDOMO

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur-Agronome

Option : Génie Rural

Promotion : 2018-2023

Septembre 2024

Sujet de mémoire

Utilisation du SIG pour cartographier et quantifier les pertes de sols du bassin versant de la rivière Rouyonne (Léogâne)

RÉSUMÉ

Cette étude a été menée au niveau de la partie amont du bassin versant de la rivière Rouyonne (BVRR) (4645 ha) à Léogâne. Ce dernier fait face à des problèmes de déboisement, d'érosion hydrique et de diminution de la productivité des terres agricoles, et avec pour conséquences : envasement de la rivière et des canaux d'irrigation en aval, et augmentation du risque d'inondation. L'objectif de cette étude est de cartographier et de quantifier le phénomène d'érosion hydrique au sein du BVRR, d'estimer la part de matériaux déplacés qui arrivent jusqu'à l'exutoire, et de proposer des scénarios d'aménagement pouvant réduire son envergure.

Pour y parvenir, les données cartographiques (CNIGS, USGS EarthExplorer, FAO et WorldClim) et climatiques de UHM et WorldClim ont été collectées. L'équation Universelle de Pertes de Sols Révisée (RUSLE) couplée à un Système d'Information Géographique (SIG), a été mise à profit.

Les résultats obtenus, sur la base de la classification par le « Normal Difference Vegetation Index » (NDVI), ont montré que 42% de la surface du bassin versant ne sont protégés par aucun couvert végétal. L'analyse et l'interprétation des données relatives aux facteurs RUSLE ont permis d'aboutir à des résultats qui montrent que 64.14% de la surface du BVRR enregistrent des pertes de sols allant de 50 à 200 tonnes/ha/an. Par ailleurs, l'analyse de la carte résultante de pertes de sols a révélé un taux d'érosion moyen de 81.60 t/ha/an sur tout le BVRR, soit 379052.02 tonnes de sol érodés annuellement, ce qui correspond à une dégradation spécifique de 12.57 t/ha/an. Tous ces résultats suggèrent que le BVRR est fortement soumis au phénomène d'érosion hydrique.

Pour diminuer les pertes de sols subies par le BVRR, trois scénarios d'aménagement ont été envisagés : les cultures en courbe de niveau, les bandes enherbées et les terrasses. Comparées aux données de littérature, les terrasses apparaissent comme le type d'aménagement le plus prometteur car, avec un tel système, les pertes en sols seraient réduites de 81 % (soit en moyenne 15.56 tonnes/ha/an).

Mots-Clés : Bassin versant, Cartographie - GIS, Couvert végétal, Érodibilité du sol, Érosivité de la pluie, NDVI, RUSLE, USLE

ABSTRACT

This study was conducted in the upper part of the watershed of the Rouyonne River (BVRR) (4645 ha) in Léogâne. This area faces issues such as deforestation, water erosion, and decreased productivity of agricultural lands, resulting in sedimentation of the river and irrigation canals downstream, as well as an increased risk of flooding. The objective of this study is to map and quantify the phenomenon of water erosion within the BVRR, estimate the share of displaced materials that reach the outlet, and propose management scenarios to mitigate its extent.

To achieve this, cartographic data (CNIGS, USGS EarthExplorer, FAO, and WorldClim) and climatic data from UHM and WorldClim were collected. The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) was utilized in conjunction with a Geographic Information System (GIS).

The results obtained, based on classification using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), showed that 42% of the watershed area is not protected by any vegetation cover. The analysis and interpretation of data related to RUSLE factors led to results indicating that 64.14% of the BVRR area experiences soil losses ranging from 50 to 200 tons/ha/year. Furthermore, the analysis of the resulting soil loss map revealed an average erosion rate of 81.60 t/ha/year across the entire BVRR, amounting to 379,052.02 tons of soil eroded annually, corresponding to a specific degradation of 12.57 t/ha/year. All these results suggest that the BVRR is heavily subjected to the phenomenon of water erosion.

To reduce the soil losses experienced by the BVRR, three management scenarios were considered: contour farming, grassed strips, and terracing. Compared to literature data, terracing appears to be the most promising type of management, as this system could reduce soil losses by 81% (an average of 15.56 tons/ha/year).

Keywords : Watershed, Mapping - GIS, Vegetation Cover, Soil Erodibility, Rain Erosivity, NDVI, RUSLE, USLE

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACES i
REMERCIEMENTS ii
RÉSUMÉ iii
ABSTRACT iv
LISTE DES FIGURES viii
LISTE DES TABLEAUX ix
LISTE DES ANNEXES x
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS xi
1. INTRODUCTION 1
1.1. Généralités 1
1.2. Problématique 2
1.3. Objectifs 4
1.3.1. Objectif général 4
1.3.2. Objectifs spécifiques 4
1.4. Hypothèses de l'étude 5
1.5. Intérêt de l'étude 5
1.6. Limites de l'étude 5
2. REVUE DE LITTÉRATURE 6
2.1. Étude menée sur le bassin versant de la ravine Balan 6
2.2. Étude menée sur le bassin versant de la rivière Grise 6
2.3. Bassin versant 6
2.3.1. Types de bassin versant 7
2.3.2. Caractéristiques physiographiques d'un bassin versant 7
2.3.3. Caractéristiques géométriques d'un bassin versant 8
2.3.4. Caractéristiques topographiques d'un bassin versant 9
2.3.5. Caractéristiques hydrographiques d'un bassin versant 11
2.3.6. Le bassin versant, un espace dynamique, en constante modification 12
2.4. Quelques phénomènes naturels liés à la dégradation des bassins versants 12
2.4.1. Érosion 12
2.5. Méthodes d'estimation des pertes de sol au niveau d'un bassin versant 15
2.5.1. Équation universelle des pertes de sols (USLE) 15

2.5.2. Équation universelle des pertes en sol révisée (RUSLE) 15
3. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE 21
3.1. Situation géographique 21
3.2. Climat 22
3.2.1. Pluviométrie 22
3.2.2. Température 22
3.3. Hydrogéologie 23
3.3.1. Géologie 23
3.3.2. Ressources en eau 24
3.4. Aspects socio-économiques 24
3.4.1. Population 24
3.4.2. Éducation 24
3.4.3. Santé 24
3.4.4. Eau potable 24
3.4.5. Activités commerciales 25
3.4.6. Réseau routier 25
4. MÉTHODOLOGIE 26
4.1. Matériels utilisés 26
4.2. Méthode de travail 26
4.2.1. Recherche bibliographique 26
4.2.2. Collecte et validation des données 26
4.2.3. Traitement, analyse et interprétation des données 28
5. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 38
5.1. Délimitation de la partie amont BV de la rivière Rouyonne 38
5.2. Description du milieu biophysique du bassin versant 39
5.2.1. Caractéristiques géométriques du BV 39
5.2.2. Caractéristiques topographiques 40
5.2.3. Caractéristiques hydrographiques 42
5.2.4. Étude de la tendance des pluies satellitaires de WorldClim par rapport à celles de UHM 44
5.3. Cartographie et analyse des facteurs érosifs R, K, LS, C et P 49
5.3.1. Érosivité des pluies (Facteur R) 49
5.3.2. Érodibilité des sols (Facteur K) 50

5.3.3. Facteur LS 51
5.3.4. Le couvert végétal 53
5.3.5. Facteur des pratiques antiérosives (Facteur P) 55
5.4. Pertes de sols normales : Situation de référence 56
5.5. Potentiel érosif du BVRR 57
5.6. Pertes de sols réelles du BVRR 58
5.7. Corrélation entre les facteurs de contrôle de l'érosion hydrique 60
5.8. Délivrance en sédiments à l'exutoire du BVRR 61
5.9. Propositions pour atténuer les pertes de sols au niveau du BVRR 61
5.9.1. Scénario 1 (Cultures en courbe de niveau) 62
5.9.2. Scénario 2 (Bandes enherbées) 63
5.9.3. Scénario 3 (Terrasses) 63
6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 65
6.1. Conclusion 65
6.2. Recommandations 66
7. BIBLIOGRAPHIE 69
8. ANNEXES 76

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Délimitation de la zone d'étude 21
Figure 2 : Pluviométrie moyenne mensuelle à Léogâne (Climate-Data.org) 22
Figure 3 : Température moyenne mensuelle à Léogâne (Climate-Data.org) 23
Figure 4 : Représentation méthodologique de l'estimation des pertes de sol 32
Figure 5 : Délimitation du bassin versant de la rivière Rouyonne 39
Figure 6 : Carte de classe des pentes du BVRR 41
Figure 7 : Présentation du réseau hydrographique du BVRR 43
Figure 8 : Comparaison entre les données pluviométriques moyennes mensuelles de WorldClim et UHM 45
Figure 9 : Comparaison entre les données pluviométriques annuelles de WorldClim et UHM 45
Figure 10 : Méthode des doubles cumuls entre les données moyennes mensuelles WorldClim et UHM 46
Figure 11 : Méthode des doubles cumuls entre les données annuelles UHM et WorldClim 46
Figure 12 : Corrélation entre les données moyennes mensuelles de WorldClim et UHM 47
Figure 13 : Corrélation entre les données annuelles WorldClim et UHM 48
Figure 14 : Cartographie du facteur R 50
Figure 15 : Cartographie du facteur K 51
Figure 16 : Cartographie du facteur LS 53
Figure 17 : Cartographie du NDVI 54
Figure 18 : Cartographie du facteur C 55
Figure 19 : Carte des pertes de sols normales du BVRR 57
Figure 20 : Cartographie des pertes de sols potentielles du BVRR 58
Figure 21 : Cartographie des pertes de sols actuelles du BVRR 60
Figure 22 : Comparaison cartographique des 3 scénarios de réduction des pertes de sols avec les pertes de sols réelles du BVRR 64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Description de la classe des pentes 9
Tableau 2 : Classes des reliefs par rapport à l'indice de pente global 10
Tableau 3 : Classification du relief par rapport au dénivelé spécifique par l'ORSTOM 11
Tableau 4 : Valeurs de m dans l'équation de Wischmeier (1978) pour le calcul de LS . 18
Tableau 5 : Classification du NDVI selon Rizvi et al., 2009 20
Tableau 6 : Logiciels utilisés et leurs utilités 26
Tableau 7 : Présentation des caractéristiques géométriques du BVRR 39
Tableau 8 : Présentation des différentes classes d'altitude 40
Tableau 9 : Répartition de la superficie du BVRR par classe de pente 41
Tableau 10 : Présentation des paramètres relatifs à la pente BVRR 42
Tableau 11 : Présentation des paramètres relatifs au réseau hydrographique 43
Tableau 12 : Classification du facteur R pour le BVRR 49
Tableau 13 : Présentation de la classification des sols au niveau du BVRR 51
Tableau 14 : Présentation des valeurs du facteur K pour le BVRR 51
Tableau 15 : Présentation du facteur LS par classe pour le BVRR 52
Tableau 16 : Classification de l'occupation de sol du BVRR par le NDVI 54
Tableau 17 : Présentation du facteur C par classe pour le BVRR 55
Tableau 18 : Présentation des pertes de sols potentielles du BVRR 58
Tableau 19 : Présentation des pertes de sol actuelles du BVRR 59
Tableau 20 : Matrice de corrélation des facteurs de contrôle de l'érosion hydrique 61
Tableau 21 : Présentation de la délivrance en sédiments à l'exutoire du BVRR 61
Tableau 22 : Valeurs du facteur P selon différentes pratiques de conservation de terre 62

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Carte lithologique du BVRR 76
Annexe 2 : Carte des classes d'altitude du BVRR 76
Annexe 3 : Profil en long de la partie amont de la rivière Rouyonne 77
Annexe 4 : Présentation de la courbe hypsométrique 77
Annexe 5 : Récapitulatif des caractéristiques du BVRR 78
Annexe 6 : Récapitulatif sur les résultats des facteurs de l'érosion hydrique 79
Annexe 7 : Cartographie des facteurs C et K dans le BVRR 80
Annexe 8 : Cartographie des facteurs LS et R dans le BVRR 81
Annexe 9 : Carte avec image satellitaire utilisée pour l'analyse du facteur P 82
Annexe 10 : Cartographie des pertes en sols actuelles et potentielles dans le BVRR ... 83
Annexe 11 : Cartographie du facteur P et des pertes de sols pour le scénario 1 (Cultures en courbe de niveau) 84
Annexe 12 : Cartographie du facteur P et des pertes de sols pour le scénario 2 (Bandes enherbées) 85
Annexe 13 : Cartographie du facteur P et des pertes de sols pour le scénario 3 (Terrasses) 86
Annexe 14 : Données pluviométriques de UHM pour la commune de Léogâne (1960-1987) 87
Annexe 15 : Données pluviométriques de WorldClim pour la commune de Léogâne (1960-1987) 88

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

BD	: Base de Données
BDPA	: Bureau pour le Développement de la Production Agricole
BV	: Bassin Versant
BVRR	: Bassin Versant de la Rivière Rouyonne
DSMW	: Digital Soil Map of the World
EPFL	: École Polytechnique Fédérale de Lausanne
FAMV	: Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire
FAO	: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
IDW	: Inverse Distance Weighted
MARNDR	: Ministère de l'Agriculture des Ressources Naturelles et du Développement Rural
MNA	: Modèle Numérique d'Altitude
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
MPCE	: Ministère de la Planification et de la Coopération Externe
MUSLE	: Modified Universal Soil Loss Equation
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
ONU	: Organisation des Nations Unies
PNUD	: Programme des Nations Unies pour le Développement
RISCRUE	: Risques liés aux crues
RUSLE	: Revised Universal Soil Loss Equation
SAGA	: System for Automated Geoscientific Analyses
SIG	: Système d'Information Géographique
SWAT	: Soil and Water Assessments Tools
TM	: Tonne Métrique
UEH	: Université d'État d'Haïti
UNESCO	: Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture
USLE	: Universal Soil Loss Equation

1. INTRODUCTION

1.1. Généralités

L'érosion est la forme la plus courante du processus de dégradation des sols. Selon des estimations empiriques faites sur une base annuelle, elle entraîne en moyenne de 5 à 10 tonnes de sol par hectare en Afrique, en Europe et en Australie, de 10 à 20 tonnes par hectare sur tout le continent américain et près de 30 tonnes par hectare en Asie (Brown, et al., 1996).

Avec une pluviométrie annuelle de 1 400 mm/an, Haïti reçoit un volume de 40 milliards de mètres cubes (m^3) d'eau, dont 90% s'en vont dans la mer à cause de l'absence d'arbres, suscitant en même temps une forte érosion dite « érosion hydrique » (transport des particules de sols par ruissellement), seulement 10% s'infiltrent dans le sol pour réalimenter les aquifères (PNUD, 1998 ; cité par Jean-Pierre, 2022).

En Haïti, environ 85 % des bassins versants sont fortement dégradés, provoquant de fréquentes inondations, entraînant un épuisement des sols voire une disparition des facteurs de base de la production agricole et ayant des effets néfastes sur les infrastructures de production en aval (MARNDR, 2010). Cette dégradation fragilise les écosystèmes haïtiens riches en biodiversité, rend pénible le travail agricole dans les recoins du pays et augmente le risque d'inondation du fait de l'incapacité d'infiltration des eaux pluviales au niveau des versants et de l'envasement des cours d'eau (Marc-Donald, 2023). De plus, la situation topographique, combinée à l'agressivité des pluies et aux mauvaises pratiques culturales (cultures vivrières sur de fortes pentes) rend d'une acuité exceptionnelle le phénomène de l'érosion hydrique des sols en Haïti. Cet état de fait a des conséquences néfastes sur l'environnement pris dans son sens le plus large (PNUD, 1990).

L'érosion des terres conduisant à la désertification et le niveau de déboisement augmentent progressivement avec un risque d'érosion fort ou très fort sur 30 % du territoire haïtien (Terrier, 2016). En Haïti, des mesures scientifiques de l'érosion sont rares. Cependant, certaines études sur les pertes en terre pour certains bassins versants ont montré une variation de 7,5 TM/ha/an à 750 TM/ha/an (Banque mondiale, 1990). La

perte annuelle en terre pour l'ensemble du pays est évaluée à environ 37 millions de TM et ceci correspond à une perte moyenne avoisinant les 15 TM/ha/an (Bellande, 2009). Selon cette même étude, les variations seraient significatives selon la région considérée. À titre d'exemple, la région Ouest présenterait les vitesses d'érosion les plus élevées, avec en moyenne 18 TM/ha/an, la région Sud (comprenant les départements du Sud et de la Grande Anse) serait celle où les taux d'érosion sont les moins importants, avec une moyenne d'environ 11 TM/ha/an.

1.2. Problématique

Le bassin versant de la rivière Rouyonne dans la commune de Léogâne, en Haïti, n'est pas exempt des effets néfastes de dégradation accélérée, provoquant des problèmes environnementaux de tout ordre (Dorcilien, 2008). Il est dégradé par la surexploitation des ressources naturelles, la coupe abusive des ressources ligneuses, et les pratiques culturales érosives (MARNDR, 2006; cité par Geffrard, 2022). Sous l'influence d'une accumulation accrue de sédiments, la capacité hydraulique de la rivière Rouyonne diminue, ce qui, lors des crues de grandes importances, provoque l'inondation des terrains aux alentours (MARNDR, 2006). En effet, les événements de crues accélèrent l'érosion des bassins versants en augmentant le détachement, le transport et l'accumulation des sédiments, tandis que l'érosion du sol aggrave à son tour la fréquence et l'intensité des crues, car la capacité de rétention en eau du sol diminue considérablement.

Après le passage du séisme dévastateur du 12 Janvier 2010, dont la commune de Léogâne était l'épicentre, des travaux de réaménagement, notamment des travaux de curage, ont été entrepris sur les rives de la rivière Rouyonne afin de diminuer les effets des crues et des inondations dans la commune de Léogâne (PNUD, 2012). Cependant, ces interventions se sont avérées insuffisantes aboutissant à des résultats temporaires et non durables tandis que, la rivière Rouyonne continue de subir des changements morphologiques (Geffrard, 2022).

En effet, chaque année, d'énormes quantités de sédiments sont déposées dans le lit de la rivière Rouyonne, diminuant ainsi sa capacité de transport et augmentant par la même occasion les risques d'inondation de la ville de de Léogâne. En seulement 3 ans (2020 - 2023), environ 80 cm de sédiments se sont déposés en amont immédiat du pont Vincent

à Léogâne, comme illustré par la figure 1. Ces énormes quantités de sédiments proviennent en grande partie de l'érosion des versants du bassin versant de la rivière Rouyonne (Figure 2). Ces images témoignent du niveau de dégradation du bassin versant ainsi que la vitesse à laquelle la rivière Rouyonne subit une évolution morphologique considérable.

Photo 1 : Ensablement du lit de la rivière Rouyonne entre 2020 et 2023 (Crédit : Saint-Jean, 2023)

Photo 2 : Versants dénudés du BVRR (Crédit : Oreste Saint-Jean, mars 2022)

La ville de Léogâne est régulièrement inondée par la rivière Rouyonne, laissant ainsi des familles entières dans le désarroi le plus total et occasionnant des dégâts sur les infrastructures urbaines et surtout sur les parcelles agricoles environnantes (MARNDR-DDAO, 2014). En avril 2016, des intempéries ont rendu sinistrées plus de 900 familles selon un bilan de la Direction de la Protection Civile. Plus récemment, le 3 juin 2023, des intempéries auraient tué 42 personnes dans l'ensemble du pays dont 19 seulement à Léogâne (SNGRD, 2023).

Ainsi, ce présent mémoire de fin d'études s'inscrit dans le cadre du projet **RISCRUE (Risques liés aux crues),** qui se donne pour objectif de proposer des solutions innovantes dans la gestion des risques liés aux crues, aux inondations et au transport des sédiments. Ce travail propose de répondre aux questions suivantes:

- Quel est le niveau de dégradation actuelle du bassin versant de la rivière Rouyonne (BVRR)?
- Quelle est la quantité de sol perdue par année dans le BVRR?
- Quelles sont les zones à haut potentiel érosif dans le BVRR?
- Quelle est la part de sédiments charriés arrivant jusqu'à l'exutoire du BVRR?

1.3. Objectifs

Cette étude s'articule autour d'un objectif général et de plusieurs objectifs spécifiques.

1.3.1. Objectif général

L'objectif principal de cette étude est de contribuer à une meilleure compréhension de la situation environnementale et du processus de pertes de sols du bassin versant de la rivière Rouyonne en vue d'une meilleure gestion préventive des risques d'inondation de la ville de Léogâne par cette rivière.

1.3.2. Objectifs spécifiques

De manière spécifique, cette étude vise à :

- Caractériser biophysiquement le bassin versant de la rivière Rouyonne (BVRR);
- Déterminer les facteurs du modèle RUSLE pour estimer les pertes en sols du BVRR ;
- Estimer la part de sédiments acheminée vers l'exutoire du BVRR ;
- Faire des propositions pour atténuer les pertes en sols au niveau du BVRR.

1.4. Hypothèses de l'étude

Dans le cadre de ce travail, les hypothèses suivantes ont été formulées :

- La forte pente du BVRR influence grandement ses pertes en sols.
- La mise en œuvre de pratiques de gestion durable des terres dans le bassin versant pourrait réduire les pertes de sol de manière significative

1.5. Intérêt de l'étude

Cette étude revêt une importance cruciale car elle va contribuer à la compréhension du niveau de pertes en sol subi par le bassin versant de la rivière Rouyonne annuellement. En effet, elle va contribuer à la gestion durable des ressources hydriques et des terres dans le BV. En mettant en lumière les pertes de sol du BV, cette étude permet non seulement d'avoir une idée de la quantité de sol perdue par année, mais également d'identifier les zones à risque d'érosion, facilitant ainsi la mise en place de mesures de conservation de sol.

1.6. Limites de l'étude

Cette étude n'est pas réalisée sur la totalité du bassin versant de la rivière Rouyonne, mais seulement sur sa partie amont qu'on a nommé BVRR. Le MNT utilisé dans le cadre de ce travail est de résolution 30 m. Le modèle RUSLE utilisé dans cette étude donne de meilleurs résultats à l'échelle de la parcelle et du petit bassin versant, la perte de sols évaluée est ainsi une perte de sols théoriques. Il n'évalue que les pertes moyennes à long terme causées par l'érosion de surface (pluie et ruissellement). Il ne tient pas compte du ravinement, ni de la déposition dans les dépressions, les « baisseurs », les fossés ou les bordures des champs. Il ne peut pas prédire les pertes de sol d'une année particulière, d'une saison particulière ou d'un orage particulier. Mais il peut prédire la moyenne normale à long terme pour des années semblables, pour des saisons semblables ou des orages semblables.

Pour l'estimation du facteur couvert végétal « C », il n'y a pas suffisamment de données existantes et celles qui existent ne prévoient pas toutes les spécificités culturales et d'occupation des sols en Haïti, cela nous a contraint à trouver d'autres méthodes de calcul de ce facteur.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente un bref historique de quelques études déjà réalisées sur les pertes de sols de certains bassins versants en Haïti et la définition des termes clés ayant rapport avec le sujet d'étude.

2.1. Étude menée sur le bassin versant de la ravine Balan

En 1998, une étude a été menée par Kénel Délusca sur les pertes de sol du bassin versant de la ravine Balan dans. Cette recherche portait sur : l'« Estimation de l'érosion hydrique des sols à l'aide de l'Équation Universelle de Perte de Sol assistée d'un Système d'Information Géographique : Le cas du bassin versant de la ravine Balan, Haïti ». Le principal objectif poursuivi à travers cette étude était d'adapter et d'appliquer, dans les conditions spécifiques au bassin versant de la ravine Balan la méthodologie d'évaluation de l'érosion hydrique des sols à partir du couplage USLE / SIG. Cette étude a révélé que, d'une part, le bassin versant de la ravine Balan possède un haut potentiel érosif. Sur une superficie totale de 346.78 ha, environ 92% possède un potentiel érosif supérieur à 60 t/ha/an. D'autre part, elle a révélé que, avec les systèmes de production en vigueur, 79% du bassin versant accuse une érosion hydrique des sols qui dépasse le seuil tolérable de 11.5 t/ha/an généralement admis en Haïti.

2.2. Étude menée sur le bassin versant de la rivière Grise

En 2022, une étude titrée « L'influence de l'utilisation des sols sur les risques érosifs dans le Bassin Versant « Rivière Grise » : évaluation et propositions d'amélioration » a été réalisée par John Kély JEAN PIERRE. Partant de l'hypothèse que la perte de sols « actuelle » dépassait considérablement le niveau de perte de sols jugé « normal » pour le bassin versant de la Rivière Grise, Monsieur JEAN PIERRE a révélé que le BV accuse une perte de sols de 8.36 t/ha/an en moyenne. Cette perte de sols qu'il a trouvée dépasse de très loin la perte de sol de référence de ce bassin qu'il a estimé à seulement 0.03 t/ha/an en moyenne, ce qui atteste de la gravité extrême de la situation en termes d'érosion hydrique selon lui.

2.3. Bassin versant

Un bassin versant est un territoire géographique bien défini : il correspond à l'ensemble de la surface recevant les eaux qui circulent naturellement vers un même cours d'eau ou vers une même nappe d'eau souterraine. Il se délimite par des lignes de partage des eaux

entre les différents bassins. Ces lignes sont des frontières naturelles dessinées par le relief : elles correspondent aux lignes de crête. Les gouttes de pluie tombant d'un côté ou de l'autre d'une ligne de partage des eaux alimenteront deux bassins versants côte à côte distincts (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2008).

Le bassin versant est constitué d'une rivière principale, qui prend sa source le plus souvent sur les hauteurs en amont, au niveau de ce qu'on appelle la « tête de bassin ». Cette rivière s'écoule dans le fond de la vallée pour rejoindre la mer ou se jeter dans un fleuve, en aval, à l'exutoire du bassin versant. Sur son chemin, la rivière collecte l'eau provenant de tous les points du bassin versant : l'eau de ses affluents, l'eau de pluie, la fonte des glaciers, l'eau d'origine souterraine. L'eau de la rivière est donc chargée de toute l'histoire des pentes qu'elle a parcourues. Chaque bassin versant est unique de par ses caractéristiques propres : le type, la taille, la forme, l'orientation, le réseau hydrographique, le relief, la nature du sol, la structure du sous-sol, les paysages, le climat, les écosystèmes, la présence de plans d'eau mais également l'occupation du sol et la présence humaine (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2008).

2.3.1. Types de bassin versant

Il existe plusieurs types de bassin versant.

2.3.1.1. Bassin versant topographique

Le bassin est dit topographique s'il n'y a pas d'écoulement souterrain. Ce bassin tient compte uniquement des écoulements de surface et le cheminement de l'eau y est déterminé par la topographie puisqu'il considère que les sols sont imperméables (Geffrard, 2022).

2.3.1.2. Bassin versant hydrogéologique

Le bassin versant hydrogéologique prend au contraire en considération les écoulements souterrains et les échanges d'eau avec les rivières. Il s'agit du bassin versant « réel » (Geffrard, 2022).

2.3.2. Caractéristiques physiographiques d'un bassin versant

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. Pourtant, selon GIL (1986, cité par Saint-Jean, 2017), tout bassin versant est

constitué de quatre formes de terrain : les sommets, les flancs, les ravines et les zones de déposition.

2.3.2.1. Les sommets

Occupant les portions supérieures du bassin versant, ils consistent en des surfaces planes ou légèrement convexes, le plus souvent allongées, parfois étroites, situées de part et d'autre de la ligne de partage des eaux. De faible pente, 0-1%, elles ne sont pas surjettes à l'érosion (GIL, 1986 cité par Joseph, 2003 et Sydné, 2019).

2.3.2.2. Les flancs

Ce sont les parties latérales d'une montagne. Ils sont caractérisés par une forte pente le plus souvent rectiligne. À ce niveau, le ruissellement est très intense et l'érosion se fait par éboulement. Ces portions de terrain réclament grandement l'implantation de structures de mise en défense (Félix, cité par Deshormes 1998 et Saint-Jean, 2017).

2.3.2.3. Les ravines

On considère comme ravine, toute rigole ayant une profondeur minimale de 20 cm et servant fréquemment d'exutoire naturel aux eaux de ruissellement évacuées par les versants (GIL, 1996 cité par Joseph, 2003 et Sydné, 2019).

2.3.2.4. Les zones de déposition

Ce sont la partie du terrain ayant de très faibles pentes sur lesquels les eaux de crue perdent leur vitesse et une partie de leur capacité de charriage. Ainsi, une grande quantité de matériaux lourds peuvent être transportée vers l'aval à partir des zones érodées et des ravines actives. Ces zones comprennent les cônes de déjection, les piémonts, les vallées et les plaines (Félix, cité par Deshormes, 1998 et Saint-Jean, 2017).

2.3.3. Caractéristiques géométriques d'un bassin versant

Les caractéristiques géométriques d'un bassin versant se divisent en deux grandes parties. D'une part, il y a la taille du bassin versant qui regroupe le périmètre et la surface de celui-ci. D'autre part, il y a la forme du bassin versant qui affecte l'hydrogramme afférent à une averse donnée et en particulier le débit de pointe à l'exutoire du dit bassin. Cette dernière est en général déterminée à l'aide de l'indice de compacité de Gravélius ou l'indice de Horton.

2.3.4. Caractéristiques topographiques d'un bassin versant

L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin. La pente influe grandement sur la vitesse d'écoulement. Le relief se détermine lui aussi au moyen d'indices ou de caractéristiques suivants : la courbe hypsométrique, les altitudes maximale, minimale et moyenne, et médiane, la pente moyenne, l'indice de pente globale, et la dénivelée spécifique.

2.3.4.1. Les types de pente

Les indices de pente permettent, comme pour certains paramètres géométriques, de comparer plusieurs bassins versants entre eux.

a) Pente orographique

La pente orographique caractérise le relief. Elle favorise l'élévation de masse d'air en mouvement au-dessus des reliefs et provoque la condensation de l'humidité qu'elles contiennent.

b) Pente topographique

C'est la pente qui influence l'écoulement superficiel des eaux : ruissellement de surface et écoulement hypodermique. Elle accélère le ruissellement sur les versants et détermine en partie le temps de réponse du cours d'eau aux impulsions pluviométriques. La pente topographique se lit et se mesure sur la carte topographique à grande échelle (> 1/100000) ou à l'aide de MNT.

Tableau 1 : Description de la classe des pentes

Classe de pentes	Classes de pente (%)	Description
0	0 – 2 %	Très faible
1	2 – 5 %	Faible
2	5 – 12 %	Modérée
3	12 – 30 %	Assez forte
4	30 – 60 %	Forte
5	> 60 %	Escarpée

c) Pente hydrographique

La pente hydrographique, ou profil en long d'un cours d'eau, peut être mesurée sur la carte ou mesurée sur le terrain par un nivellement de précision. Cette pente exprimée généralement en m/Km conditionne la vitesse de l'eau dans le chenal, la vitesse de l'onde de crue et le tirant d'eau de la rivière.

d) Indice de pente global

Cet indice présente l'avantage d'être très simple et facile à calculer (Tableau 2). C'est le rapport de la dénivelée utile à la longueur du rectangle équivalent.

Tableau 2 : Classes des reliefs par rapport à l'indice de pente global

Relief	Valeurs de l'indice de pente global	
1	Relief très faible	$I_g < 0,002$
2	Relief faible	$0,002 < I_g < 0,005$
3	Relief assez faible	$0,005 < I_g < 0,01$
4	Relief modéré	$0,01 < I_g < 0,02$
5	Relief assez fort	$0,02 < I_g < 0,05$
6	Relief fort	$0,05 < I_g < 0,1$
7	Relief très fort	$I_g < 0,1$

e) Dénivelé spécifique

Malgré sa simplicité, l'indice de pente global présente l'inconvénient de décroître pour un même bassin lorsque la superficie croit. Il permet la classification mais on ne peut pas s'en servir pour comparer des indices de pente des bassins versants de superficies différentes. Pour pallier à cette lacune, il serait préférable d'utiliser la dénivelée spécifique (Tableau 3).

Tableau 3 : Classification du relief par rapport au dénivelé spécifique par l'ORSTOM

Classe	Type de Relief	D_s
R_1	Relief très faible	< 10
R_2	Relief faible	10 - 25
R_3	Relief assez faible	25 – 50
R_4	Relief modéré	50 – 100
R_5	Relief assez fort	100 – 250
R_6	Relief fort	250 – 500
R_7	Relief très fort	> 500

2.3.5. Caractéristiques hydrographiques d'un bassin versant

Les caractéristiques hydrographiques renseignent généralement sur le réseau hydrographique du bassin versant et par conséquent sur l'ordre du réseau, de la densité de drainage, de la densité hydrographique, du coefficient de torrentialité et du temps de concentration.

2.3.5.1. Le réseau hydrographique

Par définition, un réseau hydrographique est un ensemble des canaux de drainage naturels ou s'écoulent les eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines soit sous forme de source, soit par restitution continue le long du lit du cours d'eau (Roche, 1963). C'est un cours d'eau naturel ou artificiel, temporaire ou permanent. Le réseau hydrographique se caractérise par les types d'écoulement, les types des lits fluviaux, l'ordre des cours d'eau, le débit solide et liquide, le temps de concentration, le mode de sédiment, la masse et la vitesse de ruissellement (Bravard & Petit, 2000).

a) Types de lits fluviaux

On distingue trois types de lits fluviaux (Larras, 1965).

- Le **lit mineur** : c'est la partie de la vallée que le cours d'eau continue à recouvrir à l'étiage. C'est donc la partie où se concentrent les basses eaux.
- Le **lit moyen** : c'est la partie de la vallée que le cours d'eau recouvre habituellement.
- Le **lit majeur** : c'est la partie régulièrement submergée ou inondée dès lors que le débit franchit un certain seuil. C'est donc la partie que le cours d'eau recouvre en temps de crue.

2.3.6. Le bassin versant, un espace dynamique, en constante modification

L'eau d'un bassin versant interfère avec les différents espaces qu'elle traverse, au travers de phénomènes de ruissellement, d'infiltration, d'érosion, de transport et de sédimentation. La morphologie d'un bassin est donc sans cesse modifiée : le parcours des rivières évolue au fil des saisons et des années (Agence de l'eau Loire-Bretagne , 2008).

2.4. Quelques phénomènes naturels liés à la dégradation des bassins versants

Les bassins versants sont généralement confrontés à des bouleversements de divers ordres.

2.4.1. Érosion

L'érosion a été définie de plusieurs façons selon les auteurs. On distingue deux catégories de définitions. Une, au sens strict, considère l'érosion comme étant le mécanisme de détachement des particules sédimentaires et des autres matériaux à la surface du sol (Fleming, 1977). Une autre, au sens large, fait appel à une trilogie pour définir l'érosion (Derrau, 1974, cité par Briot, 1981):

- processus d'arrachement (désagrégation et altération des roches, creusement de la surface du sol) ;
- transport de ces débris (sur les versants, dans les cours d'eau) ;
- dépôt de ces matériaux transportés (dans les cônes de déjection, lits des cours d'eau, vallées d'inondation, lacs et réservoirs).

2.4.1.1. Les types d'érosion

Elle présente deux aspects selon qu'elle est provoquée par l'eau (érosion hydrique) ou par le vent (érosion éolienne) (Duchaufour, 1997). Par ailleurs, certains auteurs parlent d'un troisième type : l'érosion géologique qui est considérée comme un phénomène naturel normal et se définit par une ablation des formations superficielles de la terre dues aux différents changements éco-climatiques au cours des millions d'années (Cabidoche, 1996 ; Lacoste et Salomon, 1996). Dans cette étude, l'érosion hydrique est la forme de dégradation qui nous intéresse. Par conséquent, un accent particulier sera mis son mécanisme.

2.4.1.2. Mécanisme de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique résulte de divers processus que sont le détachement, le transport et le dépôt ou la sédimentation (Roose, 1991).

a) Détachement

Le détachement des particules se produit à la surface du sol lorsque, sous l'effet de l'impact des gouttes de pluies (effet splash), des agrégats s'éclaboussent ou lorsque la force de cisaillement du ruissellement devient supérieure à la résistance au détachement du sol (Georges, 2008 ; cité par Jean-Pierre, 2022).

b) Transport

Le transport des particules de terre arrachées au sol se fait exclusivement par l'action du ruissellement. La naissance du ruissellement nécessite deux conditions (AREAS, 2008) :

- L'intensité des précipitations doit dépasser la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. La pluie ne s'infiltre plus, engendrant un excès d'eau.
- L'excès d'eau doit dépasser la capacité de stockage d'eau en surface. Selon les conditions de formation, deux types de ruissellement se distinguent:

− Le ruissellement de versant (ou ruissellement hortonien)

Il apparaît lorsque les intensités de pluie dépassent la capacité d'infiltration des sols. L'eau en excès reste en surface et peut s'écouler sous l'effet de la pente. Ce type de ruissellement est observé lors d'évènements pluvieux importants, sur des surfaces où le couvert végétal est peu développé (www.hydro-meteo.com, 2010).

− Le ruissellement sur surface saturée (ou ruissellement hewlettien)

Contrairement au ruissellement hortonien, la formation de ce ruissellement ne dépend pas de l'intensité mais du cumul des pluies et des conditions du milieu (il se produit généralement dans les zones à nappes superficielles). Le ruissellement hewlettien est observé en période humide sur des sols hydromorphes de fond de vallée (nappe phréatique proche de la surface). Les sols présentant un horizon superficiel imperméable (semelle de labour) génèrent aussi ce type de ruissellement

puisqu'ils sont plus rapidement saturés en eau (www.agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr, 2010).

Le transport de particules en suspension peut se traduire par des écoulements diffus en nappe (érosion diffuse) ou sous formes de rigoles et ravines (érosion linéaire) et former des coulées de boue lors de pluies intenses (mouvement de masse). Ces deux types de ruissellement sont présents généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux (Le Bissonnais et *al*., 2002 ; cité par Jean-Pierre, 2022). Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace.

c) Dépôt

Lorsque la force du ruissellement (fonction de la pente) diminue, sa capacité à transporter des particules de terres décroît. Autrement dit, le dépôt s'effectue lorsque l'énergie cinétique qui déplace les matériaux issus du détachement diminue ou s'annule. Le dépôt des sédiments s'effectue en fonction de la granulométrie : les éléments les plus grossiers auront tendance à se déposer en zone de replat, les éléments les plus fins arrivent le plus souvent jusqu'aux cours d'eau (Démangeot, 2000 ; cité par Jean-Pierre, 2022).

2.4.1.3. Intérêts de l'imagerie et des SIG pour l'étude de l'érosion

Selon Asri (2017), il existe deux principales méthodes pour étudier l'érosion :

- les études effectuées directement sur le terrain
- les analyses faites à l'aide des systèmes d'information géographique (SIG)

Par comparaison aux études effectuées sur le terrain, les SIG offrent l'avantage d'évaluer des problématiques sur de grandes superficies à moindre coûts grâce à l'utilisation des images satellites et des photographies aériennes. Les SIG permettent à la fois de collecter, de stocker, d'extraire, de transformer et de visualiser des données spatiales (Burrough, 1987). Les SIG ont permis des avancées intéressantes grâce à la manipulation et à l'analyse de couches de données spatiales de manière séparée dans plusieurs champs d'application. Les outils d'analyse et de modélisation permettent de créer des interactions

entre les différentes couches d'information (Bonham-Carter, 1994). Les avantages qu'offrent les analyses faites à l'aide des systèmes d'information géographique (SIG) font de cette méthode, celle la plus utilisée de nos jours.

2.5. Méthodes d'estimation des pertes de sol au niveau d'un bassin versant

L'évaluation des pertes de sol par bassin versant est un aspect crucial de la gestion des ressources en eau et de la préservation de l'environnement. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer les pertes de sol, qui varient en fonction de la complexité des données disponibles, des ressources et des objectifs de l'étude. Les méthodes couramment utilisées sont : les mesures In Situ, le prélèvement et l'analyse d'échantillons de sédiments, les modèles hydrologiques, les SIG ou l'imagerie satellitaire, les méthodes USLE /RUSLE/MUSLE.

2.5.1. Équation universelle des pertes de sols (USLE)

Les premières formules établissant les pertes de sols, sont apparues en 1940 pour le centre des USA. Zingg (1940) a été un des premiers à établir une équation reliant les pertes de sol à la pente et à sa longueur. Smith (1941) fait intervenir les types de cultures et les pratiques de conservation. Browing *et al.,* (1947) et Vandoren (1956) introduisent la notion d'érodibilité du sol. L'USLE a été obtenue suite à l'analyse statistique de données provenant de parcelles standards d'érosion (22.1 m de long par 1.8 m de large et inclinées à 9%) localisées aux États-Unis. Son principe est de comparer l'érosion d'un site quelconque à l'érosion de ces parcelles standards sur jachère nue, c'est-à-dire labourées périodiquement de manière à ce qu'aucune végétation ne puisse s'y développer et telles que le sol ne puisse former une croûte superficielle (Jean Pierre, 2022). L'objectif de Wischmeier et Smith 1960 et 1978, était d'établir un modèle empirique de prévision de l'érosion à l'échelle du champ cultivé (Roose, 1994).

2.5.2. Équation universelle des pertes en sol révisée (RUSLE)

Au fil des ans, les fondements scientifiques de l'érosion du sol n'ont cessé d'évoluer. C'est ainsi que l'outil le plus utilisé pour prévoir l'érosion hydrique, l'USLE (Wischmeier & Smith, 1978), a été modifiée et améliorée pour donner l'équation universelle révisée des pertes en sol (RUSLE) (Renard *et al.,* 1997). Le développement du RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) a été entrepris afin de mettre à jour les facteurs de l'USLE. Cette version améliorée se compose des cinq mêmes facteurs sauf que leur évaluation

repose sur des procédés raffinés, élaborés à partir de nouvelles mesures d'érosion en parcelles (Renard *et al.,* 1997). La RUSLE comprend de nombreuses améliorations, telles que l'utilisation des précipitations mensuelles et annuelles pour calculer l'érosivité des pluies, l'informatisation des algorithmes pour faciliter les calculs du facteur topographique LS (Renard *et al.,* 1997). Les diverses modifications de cette équation sont appliquées à l'estimation de la perte de sol à l'aide du SIG (Warren *et al.,* 1989).

2.5.2.1. Les facteurs de l'érosion hydrique

L'équation universelle des pertes de sol est une fonction multiplicative des cinq facteurs qui interagissent. Ces facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique sont: l'agressivité climatique ou érosivité des pluies (Facteur R), l'érodibilité des sols (Facteur K), le facteur topographique (Facteur LS), l'occupation des sols ou facteur de couverture végétale (Facteur C) et les pratiques antiérosives ou facteur des pratiques de conservation du sol (Facteur P).

Elle est exprimée par la formule :

$$A = R * K * LS * C * P$$

A : perte annuelle de sol (tonne/ha/an)

R : facteur d'érosivité des pluies ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.an^{-1}$)

K : facteur d'érodibilité du sol ($tonne.h.MJ^{-1}.mm^{-1}$)

LS : facteur topographique (adimensionnel)

C : facteur sans dimension de la couverture végétale et des pratiques culturales

P : facteur sans dimension de contrôle de l'érosion et des pratiques de conservation du sol.

- **L'érosivité de la pluie (Facteur R)**

L'agressivité climatique favorise l'érosion, ce qui amène à accorder au climat un effet dévastateur (Bou Kheir *et al.,* 2001). L'action des précipitations amplifie les forces motrices nécessaires à l'arrachement des particules du sol. L'indice (R) exprime la capacité des pluies à éroder. Les pluies, par leur intensité et leur énergie, sont le facteur

principal déterminant des pertes en terres. Wischmeier et Smith (1978) ont déterminé l'érosivité de la pluie pour un épisode pluvieux par l'équation suivante :

$$R = K_E * I_{30}$$

K_E : énergie cinétique des gouttes de pluie en Joules

I_{30} : intensité maximale de la pluie pendant 30 minutes consécutives exprimée en mm / h.

L'absence de séries de données de pluviographes a conduit certains auteurs à trouver des relations entre l'érosivité des pluies (R) et les précipitations annuelles. En revanche, des études précédentes (Payet, 2009 ; Morschel & Fox, 2004 ; Sadiki, *et al.*, 2004 ; Hurni, 1985) ont intégré des formules alternatives, basées sur les moyennes mensuelles et annuelles, proposées par Renard et Freimund (1994) ; Arnoldus (1980) ; Heusch (1970) ; Kalmen (1970) et Fournier (1960) dans l'équation universelle des pertes en sol (USLE).

- **L'érodibilité du sol (Facteur K)**

Le facteur K est une mesure quantitative de la sensibilité ou de la résistance inhérente d'un sol à l'érosion et de l'incidence du sol sur le volume et le débit de ruissellement. Il varie selon la texture et la structure du sol, la teneur en matières organiques et la saison. Les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des sols ainsi que leurs interactions qui affectent les valeurs de K sont caractérisées par leur grande variabilité spatiale. Ajoutées à celles-ci, chacun des mécanismes d'érosion agit sur une propriété spécifique du sol (Renard *et al.*, 1991). Cet état de fait rend complexe le calcul des valeurs de K pour les différents types de sol.

Cependant, plusieurs études ont été conduites afin de mesurer les valeurs de K relatives aux propriétés du sol parmi lesquelles on peut citer celles de Wischmeier (1971), de Young et Mutchler (1977), de EL-SwaiQ et Dangler (1976), de Romkens *et al.* (1973). De toutes ces études, la méthode synthétisée par le monogramme de sol construit par Wischmeier est la plus utilisée et la plus citée (Renard *et al.*, 1991). La valeur d'érodibilité de sol proche de 0 représente un sol moins sensible à l'érosion hydrique (Ganasri et Ramesh, 2015).

La valeur K d'un sol est donnée par la formule suivante (Wischmeier & Smith, 1978) :

$$100\ K = 2.1M^{1.14} * 10^{-4} * (12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3)$$

où :

M : (% de limon + % sable très fin) x (100 - % d'argile)

a est le pourcentage de matières organiques *b* est le code de structure des sols utilisé dans la classification des sols et *c* est classe de perméabilité des profils

- **Facteur topographique (LS)**

Dans l'équation universelle de pertes de sols, le facteur topographique réfère à la longueur de pente (L) et à l'inclinaison de la pente (S). Ces deux facteurs sont le plus souvent combinés en un facteur unique adimensionnel (LS). Le facteur LS est généralement défini comme étant le rapport de perte de sol entre deux parcelles ayant des conditions identiques à l'exception du degré et de la longueur de pente : l'une d'une longueur et d'un degré de pente donnés, l'autre ayant 22.1 m de long et 9% de pente (Wischmeier & Smith, 1978). Au moyen des données collectées au niveau des parcelles expérimentales, Wischmeier et Smith (1978) ont développé une relation, présentée sous forme de diagramme, qui permet de calculer la valeur de (LS).

Ce diagramme est basé sur l'hypothèse que les pentes ont essentiellement des gradients uniformes. Pour la construction du diagramme, l'équation suivante a été utilisée:

$$LS = (\frac{\gamma}{22.1})^m * (65.41\theta\ + 4.56\ sin\ sin\ \theta\ + 0.065)$$

Où LS est un facteur combiné adimensionnel de longueur et de degré de pente, γ est la longueur de la pente exprimée en m, θ est l'angle de la pente en (%), et m est un exposant qui dépend du degré de la pente (Tableau 4).

Tableau 4 : Valeurs de m dans l'équation de Wischmeier (1978) pour le calcul de LS

$m\ =\ 0.5$	$si\ \theta \geq 5\%$
$m\ =\ 0.4$	$si\ 3.5\% \leq \theta \geq 5\%$
$m\ =\ 0.3$	$si\ 1\% \leq \theta \geq 3.5\%$
$m\ =\ 0.2$	$si\ \theta < 1\%$

Cependant, pour les zones à topographie complexe, l'équation de Desmet et Govers (1996) est la plus appropriée (Panagos *et al.*, 2015). Cette équation est donnée par :

$$L_{i,j} = \frac{\left(A_{i,j-in} + D^2\right)^{m+1} - A_{i,j-in}^{m+1}}{D^{m+2} \times x_{i,j}^{m} \times 22.13^{m}}$$

Avec $L_{i,j}$, le facteur de la longueur de pente pour une cellule de grille de coordonnées (i,j); $A_{i,j-in}$ étant la surface d'accumulation des flux ou l'aire de contribution à la cellule de grille d'entrée (i,j) mesurée en m^2; D étant la taille de cellule de grille en mètre, $x_{i,j} = sin\ sin\ a_{i,j}\ + cos\ cos\ a_{i,j}$, $a_{i,j}$ étant la direction de l'aspect de la cellule de grille de coordonnées (i, j); m varie entre 0 et 1 et est donné par la relation :

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad avec\ \beta = \frac{\frac{sin\theta}{0.0896}}{0.56 + 3 \times (sin\ sin\ \theta\ )^{0.8}}$$

θ est l'angle de pente en degré.

- **Facteur du couvert végétal (C)**

Le couvert végétal est le facteur le plus actif, à notre portée, pour contrôler le risque d'érosion hydrique. Il fournit au sol une protection mécanique contre l'ablation en diminuant la force vive des eaux. La végétation agit comme un écran protecteur face à l'agressivité climatique en interceptant l'énergie libérée par les gouttes de pluie (Bou Kheir, 2002). Des études menées à l'échelle du bassin versant ont montré que les pertes en terre accroissent quand la végétation diminue (Battany & Grismer, 2000). Les secteurs dénudés sont soumis à l'érosion, tandis que les secteurs végétalisés sont protégés (Reid *et al.*, 1999). Les valeurs de C vont de 0.001 pour les sols bien couverts à 1 pour les sols nus (Wischmeier & Smith, 1978).

Une manière simple de déterminer ce facteur dans les zones où les stations expérimentales de suivi de pertes de sols ne sont pas encore installées, consiste à assigner des valeurs de C aux types d'occupation de sol en se référant sur les valeurs disponibles dans la littérature ou les valeurs de C trouvées dans la même région. Cependant, la définition des mesures de classes d'occupation des sols dépend d'un pays à l'autre. À titre illustratif, une classe forêt peut représenter une forêt tropicale dans un pays et une forêt à pin dans

un autre pays (Benavidez *et al.*, 2018). Pour pallier ce problème, une approche de détermination de C en se basant sur les valeurs de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) a été proposée par plusieurs auteurs (Van der Knijff *et al.*, 2000 ; Durigon *et al.*, 2014 ; De Jong, 1994). En 1994, De Jong a décrit l'intérêt de l'indice de végétation dans l'extraction du facteur C pour la modélisation de l'érosion. Il a stipulé qu'il y a une corrélation entre le NDVI et le facteur C du RUSLE. Le NDVI permet de distinguer les terrains nus de ceux boisés, en transformant la réflectance de la végétation en pourcentage de la couverture végétale (Jensen, 2000). L'une des plus récentes classifications proposées pour le NDVI est celle de Rizvi et al. (2009) (Tableau 5).

Tableau 5 : Classification du NDVI selon Rizvi et al., 2009

Caractéristiques	Plages de valeurs du NDVI
Eau (Profonde et peu profonde)	-0.4138 à -0.1040
Accumulations / Sable de rivière	-0.1040 à 0.0557
Jachère / Terre en friche / Sols nus	0.0557 à 0.2058
Cultures, herbes	0.2058 à 0.3704
Agroforesterie	0.3704 à 0.5107
Forêt	0.5107 à 0.8205

- **Facteur des pratiques antiérosives (P)**

Ce facteur est généralement considéré comme étant le rapport de pertes de sols entre une parcelle traitée par des structures de conservation des sols à celle d'une autre plantée en rangées orientées dans le sens de la pente. Le facteur P (adimensionnel) a une valeur qui varie entre 0 et 1, les valeurs qui se rapprochent de 0 indiquent de bonnes pratiques de conservation et les valeurs qui se rapprochent de 1 indiquent des pauvres pratiques de conservation (Ganasri et Ramesh, 2015). Ce facteur exprime l'effet des pratiques de conservation (paillage, afforestation, culture en courbe de niveau, aménagement des terrasses, etc.) sur la réduction de l'érosion.

3. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

3.1. Situation géographique

Situé à environ 32 km de Port-au-Prince, Léogâne, commune et chef-lieu de l'arrondissement du même nom, est une subdivision du département de l'Ouest de la République d'Haïti. La commune de Léogâne (Figure 1) se trouve entre 18° 19' 30'' à 18° 34' 30'' de latitude nord et 72° 27' 00'' à 72° 40' 30'' de longitude ouest et à environ 18 m d'altitude. Anciennement appelée « Yaguana » du temps des Indiens, la commune de Léogâne s'étend sur une superficie de 385.23 km^2. La commune de Léogâne fait partie de la région Des Palmes et est bornée au nord par le golfe de la Gonâve, au sud par le morne de la Selle de Jacmel, à l'est par la commune de Gressier et à l'ouest par la ville de Grand-Goâve. Subdivisée en 13 sections communales, cette commune est traversée par trois rivières principales : la rivière Momance, la rivière Rouyonne et celle de Cormier.

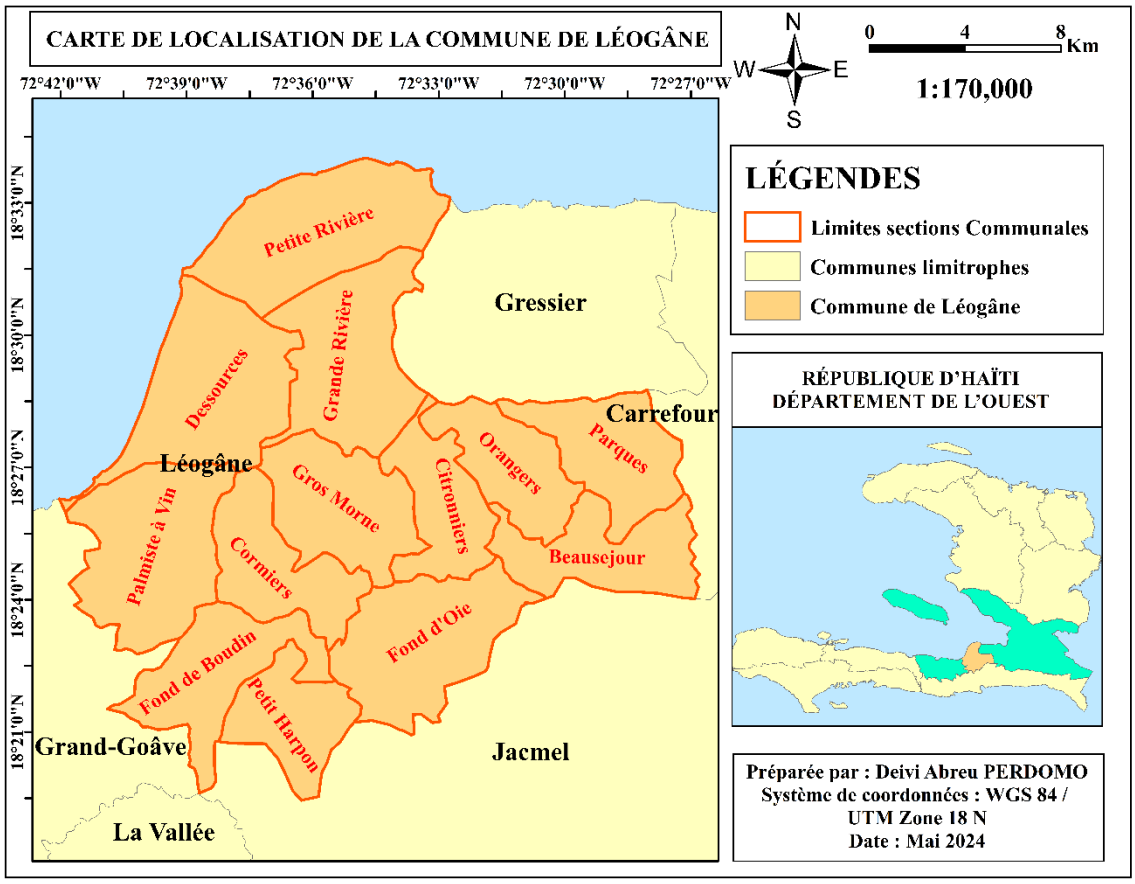


Figure 1 : Délimitation de la zone d'étude

3.2. Climat

Les conditions climatiques de Léogâne sont de nature tropicale. Par rapport à l'hiver, les étés ont beaucoup plus de pluie. La classification climatique de Koppen-Geiger identifie ce phénomène météorologique particulier comme appartenant à la catégorie Aw. Les sections 3.3.1 et 3.3.2 ci-dessous montrent respectivement la variation mensuelle de la pluviométrie et de la température au niveau de la commune.

3.2.1. Pluviométrie

À Léogâne, la pluviométrie moyenne annuelle (Figure 2) est de l'ordre de 1047 mm. L'hiver est caractérisé par des pluies moins importantes qu'en été. Le mois le plus sec est celui de Janvier et les mois de Mai et d'Octobre figurent les précipitations les plus importantes. L'amplitude moyenne annuelle de la pluviométrie est de 122 mm.

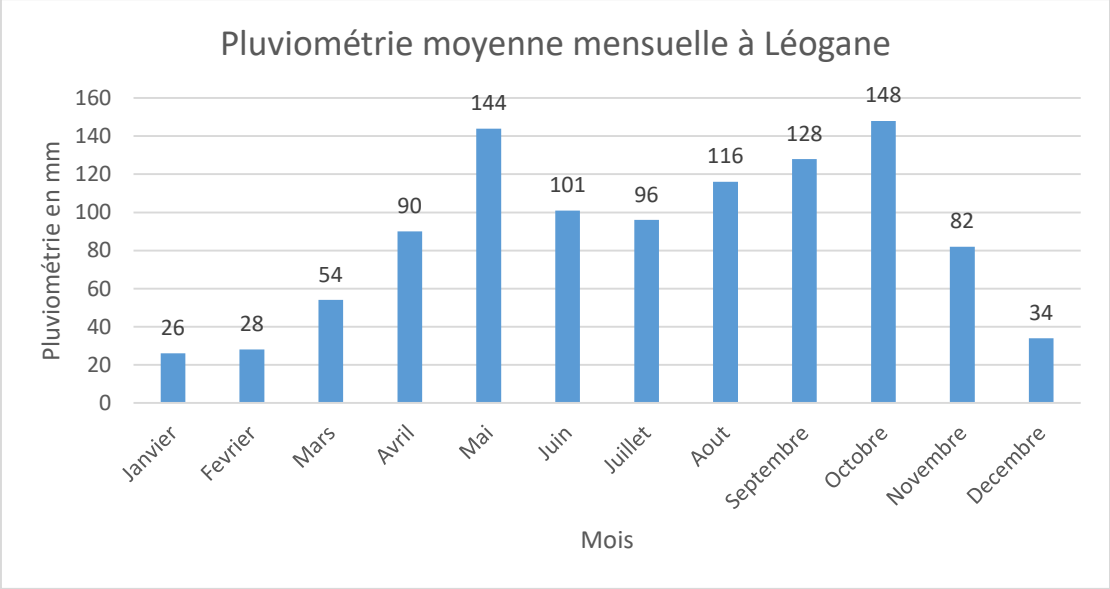


Figure 2 : Pluviométrie moyenne mensuelle à Léogâne (Climate-Data.org)

3.2.2. Température

La température moyenne annuelle (Figure 3) de la commune de Léogâne est de l'ordre de 25.62 ^{0}C. Les mois de Juillet et d'Août sont les plus chauds avec plus de 27 ^{0}C. Il fait plus froid en Janvier avec une température moyenne de 24.2 ^{0}C. L'amplitude moyenne annuelle de la température est de 2.9 ^{0}C.

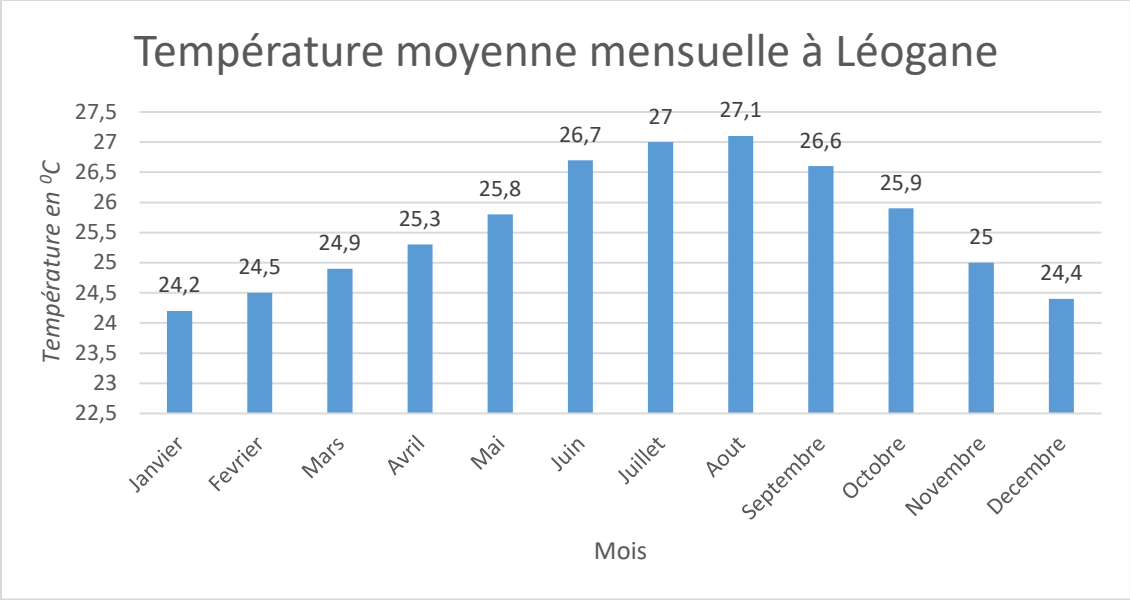


Figure 3 : Température moyenne mensuelle à Léogâne (Climate-Data.org)

3.3. Hydrogéologie

En plaine, la commune de Léogâne se repose sur des zones alluviales très productives et sur des formations aquifères à nappes en partie captives sous couverture semi-perméable. En amont, elle se place sur des formations cristallines, des aquifères karstiques, et des aquifères carbonatés à intercalations marneuses peu productifs (Geffrard, 2022).

3.3.1. Géologie

Selon des études environnementales exécutées par l'UNOPS en 2015, cité par Geffrard (2022), à Léogâne, le sol est constitué de formations géologiques sédimentaires et magmatiques inégalement représentées.

- Formations sédimentaires
  - Éocène : cette période est représentée par des calcaires massifs (terre rouge), et par des calcaires crayeux blancs.
  - Miocène : il est constitué de formations détritiques surtout conglomératiques à galets calcaires, de sables, de grès, et de calcaires tendres.
  - Pléistocène : cette période est représentée par des alluvions.
- Formations magmatiques
  - Ces formations très peu représentées datent du Crétacé et sont constituées de basaltes, de dolérites et de roches basiques métamorphiques.

3.3.2. Ressources en eau

Par ailleurs, le réseau hydrographique des eaux de surface dans la commune de Léogâne est important et est principalement constitué de trois rivières naturelles permanentes qui sont Momance, Cormier et Rouyonne. De plus, les enquêtes de terrain réalisées antérieurement au niveau de la commune ont permis de répertorier deux ravines qui sont Tiby et Belloque et plusieurs sources dont la source de Mme Verguier, de Baussan, de Bellevalle, de Failler et de Lapoudrière (MSPP, 2015, cité par Geffrard, 2022).

3.4. Aspects socio-économiques

3.4.1. Population

Selon les études démographiques réalisées par l'IHSI en 2015, la population totale de la commune de Léogâne s'élevait aux environs de 199 189 habitants avec une forte concentration de la population au niveau des trois sections communales en zone de plaine. La population féminine était estimée à plus 50 % de la population totale soit 100 603 habitants. La part de la population active estimée était de 107 567 habitants près de 54% de l'ensemble de la population (Geffrard, 2022).

3.4.2. Éducation

À Léogâne, le système éducatif est représenté par des écoles privées et publiques dont la plus connue est le lycée Anacaona situé à l'entrée de la ville. Ces institutions sont sous la supervision d'un bureau d'inspection scolaire qui représente le Ministère de l'éducation nationale. Pour l'enseignement universitaire, dans un souci de bénéficier une formation de meilleure qualité, les gens qui ont les moyens nécessaires préfèrent se rendre à Port-au-Prince faire leurs études (Geffrard, 2022).

3.4.3. Santé

Selon la liste des institutions sanitaires publiée en 2015 par le Ministère de la Santé Publique et de la Population (MSPP), le système de santé au niveau de la commune de Léogâne est constitué de 25 institutions dont 6 hôpitaux 3 dispensaires, 12 centres de santé sans lits et 4 centres de santé avec lits. Parmi ces 25 institutions, sont inventoriées 14 qui fonctionnent en privée, 6 à fonction publique et 5 sont mixtes (Geffrard, 2022).

3.4.4. Eau potable

L'eau potable est disponible à Léogâne, notamment depuis la mise en œuvre d'un projet de l'Agence Japonaise de Coopération Internationale. Ce projet visait à faire passer le

taux d'alimentation en eau potable de 2,8% au début du projet en 2013, à 43% en 2020 soit cinq ans après l'achèvement du projet (DINEPA, 2014).

3.4.5. Activités commerciales

Le commerce, l'agriculture et l'agro-industrie sont les principaux centres d'activités enregistrés au niveau de la commune. Le commerce va de la vente en gros et au détail de produits divers. En plaine, les exploitations agricoles valorisent davantage la culture de la canne-à-sucre en vue d'approvisionner quantitativement la sucrerie de Darbonne situé à environ 4 km de la ville. Des cultures comme la banane, la mangue, le café, le cacao, les légumineuses et les tubercules sont mises en valeurs majoritairement en zones montagneuses mais à petite échelle. On dénombre aussi 250 usines de sucre brut et 250 Guildives ou rhumerie dans la commune (Geffrard, 2022).

3.4.6. Réseau routier

La route nationale #2 est l'artère principale qui relie la commune de Léogâne au reste du pays. Les sections communales en montagnes sont reliées entre elles par des routes régionales discontinues et peu carrossables tandis que les autres sections en plaines sont desservies par des routes relativement bonnes (Geffrard, 2022).

4. MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente les matériels et les méthodes de travail utilisés en vue d'atteindre les objectifs spécifiques fixés précédemment.

4.1. Matériels utilisés

Dans le cadre de ce travail, quatre (4) logiciels ont été utilisés (Tableau 6).

Tableau 6 : Logiciels utilisés et leurs utilités

LOGICIELS UTILISÉS	UTILITÉS
MS Word 2013	Rédaction du mémoire.
MS Excel 2013	Traitement et analyse des données pluviométriques extraites de WorldClim
ArcGIS version 10.7.1 et QGIS version 3.22.4	Traitement des données photographiques et pour les réalisations cartographiques.

4.2. Méthode de travail

Pour la réalisation de l'étude, la méthode de travail suivante a été utilisée :

a) Recherche bibliographique ;
b) Collecte des données ;
c) Vérification des données ;
d) Analyse et traitement des données ;

4.2.1. Recherche bibliographique

Afin de mieux comprendre les termes liés au sujet de la recherche, des ouvrages, des rapports, des mémoires, des articles scientifiques sur Internet ont été consultés. Ces recherches ont permis de recueillir des données pertinentes sur la caractérisation des bassins versants et sur les différentes méthodes d'évaluation des pertes de sol.

4.2.2. Collecte et validation des données

Pour cette étude, les données ont été d'abord collectées puis validées quand c'est nécessaire.

4.2.2.1. Collecte des données

Pour cette étude, les données collectées proviennent d'institutions et d'organismes spécialisées telles que UHM, CNIGS, WorldClim, FAO et U.S. Geological Survey.

Pour UHM, il s’agit des données pluviométriques mesurées au sol permettant de faire une étude comparative avec les données pluviométriques extraites de WorldClim.

Pour CNIGS, il s’agit du MNT du BVRR, de la limite du BV, des couches de limites administratives et des couches de données lithologiques. Ces données ont notamment servi à la délimitation de la zone d'étude et du bassin versant et la cartographie du facteur topographique LS.

Pour WorldClim, FAO et U.S. Geological Survey, il s’agit de l’acquisition de couches de données cartographiques (pluviométrie, types de sol, occupation de sol), destinées à la modélisation des facteurs de l’érosion hydrique.

4.2.2.2. Extraction des données pluviométriques de WorldClim

Les données de pluie satellitaire de WordClim, avec une résolution spatiale de 2.5 minutes d’arc (21 km^2), ont été téléchargées sous format maillé (GeoTiff) par période de 10 ans (120 mois). Chaque période est représentée par un fichier contenant 120 images cartographiques au format raster, un pour chaque mois. L’extraction des données pour la commune de Léogâne pour chaque image a été faite avec le logiciel ArcGIS. Dans le cadre de cette étude, 480 images cartographiques, correspondant à 40 années de données, divisées en 2 parties (1960-1987 et 2010-2021) ont été analysées. La première partie des données (1960-1987) a permis de faire une étude sur la tendance des données de pluies satellitaires de WorldClim par rapport à UHM. Le choix de cette période se justifie par le fait que, c’est uniquement pour celle-ci qu’on a retrouvé plusieurs années des données ininterrompues à l’UHM. La deuxième partie des données (2010-2021) a permis de cartographier l’un des facteurs de l’érosion hydrique.

4.2.2.3. Étude de la tendance des données de pluies satellitaires de WorldClim par rapport à UHM

Les données extraites de WorldClim ont été validées selon les mêmes méthodes utilisées pour la validation de données de pluie satellitaires par TALEB & GABANI (2019) (critère de biais, RSME, corrélation), EL ORFI et al. (2020) (corrélation, RSME, critère de biais), ZIDANE (2022) (corrélation, RSME), Konaté et al. (2022) (méthode de double masse et corrélation) et Bernard Guillot (1999) (corrélation, critère de biais, RSME, variabilité moyenne mensuelle). Ainsi, dans cette étude, nous avons comparé les données

pluviométriques de WorldClim (2.5 mn d'arc, 21 Km^2 avec les données des précipitations mesurées au sol par l'UHM pour la même période : 1960-1987. Cette comparaison s'appuie sur les résultats d'une analyse statistique basée sur les tests précédemment cités.

4.2.3. Traitement, analyse et interprétation des données

Les données recueillies de différentes sources ont été dépouillées, traitées et analysées au moyen des logiciels ArcGIS, QGIS et Ms Excel et PowerBI. Ces données analysées ont permis de faire la caractérisation biophysique du BV et de produire des cartes thématiques sur les 5 facteurs de RUSLE. Cette analyse a trait à la détermination des caractéristiques biophysiques du BV, l'estimation des pertes de sols au niveau du BV, la cartographie du facteur A de RUSLE et la délivrance en sédiments du BV.

4.2.3.1. Détermination des caractéristiques biophysiques du BV

Pour décrire le milieu biophysique du BV, les paramètres suivants ont été déterminés : caractéristiques géométriques, topographiques et hydrographiques.

4.2.3.1.1. Caractéristiques géométriques

Pour les caractéristiques géométriques, il s'agit notamment de périmètre, surface, largeur moyenne du BV, indice de compacité de Gravelius et rectangle équivalent.

a) Périmètre, surface et largeur moyenne du BV, calculés directement à partir du logiciel ArcGIS.

b) Indice de compacité de Gravelius

Cet indice représente la plus ou moins grande compacité du bassin. Il est donné par la formule :

$$K_G = (0{,}28 \times P)/\sqrt{A}$$

Où A et P sont respectivement, la superficie (km^2) et le périmètre stylisé (km) du bassin étudié.

Si $K_G < 1{,}12$, le BV est de forme carrée, si $K_G = 1{,}12$, le BV est de forme compacte et si $K_G > 1{,}12$, le BV est de forme allongée.

c) Rectangle équivalent

C'est une transformation géométrique où le BV devient un rectangle caractérisé par sa longueur (L_e en km) et sa largeur (l_e en Km). Il est calculé à l'aide des formules ci-dessous :

$$L_e = \frac{K_G \times \sqrt{A}}{1{,}128}\left[1 + \left(1 - \left(\frac{1.128}{K_G}\right)^2\right)^{1/2}\right] \; et \; l_e = \frac{A}{L_e}$$

Où A est la surface (km^2) et K_G l'indice de compacité de Gravelius.

4.2.3.1.2. Caractéristiques topographiques

Pour les caractéristiques topographiques, il s'agit notamment de la courbe hypsométrique, de la pente moyenne du BV, de l'indice global et de la dénivelé spécifique.

a) Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique a été tracée directement sur le logiciel QGIS. Les altitudes minimale, moyenne, maximale et médiane ont été déduites de la courbe hypsométrique.

b) Pente moyenne

La pente moyenne donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct, donc sur le temps de concentration et influence directement sur le débit de pointe lors d'une averse.

$$I_m = \frac{D \times L}{A}$$

Où I_m est la pente moyenne [m/km] ; L est la longueur totale des courbes de niveau [km], D est la distance entre deux courbes de niveau [m] et A est la surface du bassin versant [km^2].

c) Indice de pente global et dénivelée spécifique

L'indice de pente global (I_g), exprimé en m/km, est donné par le rapport de la dénivelée utile (D, en m) ; estimée à partir de la courbe hypsométrique; à la longueur du rectangle équivalent en km (L_e), d'où :

$$I_g = \frac{D}{L_e} = \frac{|Z_{95\%} - Z_{5\%}|}{L_e}$$

La dénivelée utile (D) est estimée, à partir de la courbe hypsométrique, par la différence des altitudes correspondant à 5 et 95% de la superficie totale du bassin étudié ; altitudes dénotées, respectivement, par $Z_{5\%}$ et Z_{95}.

La dénivelée spécifique est le produit de l'indice global de pente et la racine carrée de la superficie du bassin versant en Km^2.

$$D_s = I_g \times \sqrt{A}$$

4.2.3.1.3. Caractéristiques hydrographiques

Pour les caractéristiques hydrographiques, il s'agit notamment de l'ordre du BV, de la pente moyenne du cours d'eau principal, de la densité de drainage, de la densité hydrographique, du coefficient de torrentialité et du temps de concentration.

a) Ordre du bassin versant

La classification de Strahler (1952) est utilisée pour déterminer l'ordre du BV. Elle consiste à classer les cours d'eau et d'affecter un ordre à chacun d'entre eux suivant la règle : "Est considéré d'ordre (x+1) tout cours d'eau formé par la réunion de deux cours d'eau d'ordre (x); tout cours d'eau sans affluent étant d'ordre 1". L'ordre du bassin versant correspond à l'ordre du tronçon à l'exutoire.

b) Pente moyenne du cours d'eau principal

La pente moyenne du cours d'eau P_{moy} détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend dans l'exutoire du bassin versant, donc le temps de concentration. Elle est déterminée par la formule :

$$P_{moy} = \frac{\Delta H_{max}}{L}$$

Où ΔH_{max} est la dénivellation maximale de la rivière en m et L est la longueur du cours d'eau principal en Km.

c) Densité de drainage (D_d) et densité hydrographique (F)

Exprimée en km/km^2, la densité de drainage se définit comme étant le rapport de la longueur totale (L_x), en km, des cours d'eau à la superficie totale du bassin versant (A), en km^2.

$$D_d = \frac{\sum_{x=1}^{n} L_i}{A}$$

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.

$$F = \frac{\sum_{x=1}^{n} N_i}{A}$$

Où F est la densité hydrographique en Km^{-2}, N_i est le nombre de cours d'eau, A est la superficie du bassin versant en km^2.

d) Coefficient de torrentialité

Ce coefficient reflète le caractère torrentiel des averses dans le bassin. Il est d'autant plus élevé que la lithologie du terrain est peu ou pas perméable et/ou le couvert végétal n'est pas important. Il est fortement lié à la densité de drainage et à la fréquence des drains par la relation :

$$C_T = F_1 \times D_d$$

Où F_1 est la fréquence des drains d'ordre 1 définie par le rapport du nombre des drains d'ordre 1 à la superficie du bassin versant et D_d est la densité de drainage.

e) Temps de concentration

C'est le temps mis par la première goutte de pluie tombée sur le point le plus éloigné du bassin pour atteindre l'exutoire. Plusieurs formules existent pour calculer le temps de concentration, mais dans le cadre de cette étude la formule proposée par Kirpich, adaptée aux petits bassins versants (moins de 100 Km^2) et ayant une pente relativement forte et un écoulement rapide a été utilisée.

$$T_c = 0.000325 \times L^{0.77} \times I^{-0.385}$$

Où T_c est le temps de concentration en heures, L est la longueur du cours d'eau principal en m et I est la pente moyenne du BV en m/m.

4.2.3.2. Estimation des pertes de sol au niveau du BV

Pour estimer les pertes moyennes annuelles de sols au niveau du BV, l'équation universelle révisée de pertes en sols (RUSLE) de Renard *et al.* (1997) a été utilisée. La méthodologie adoptée pour le modèle RUSLE a été divisée en deux étapes importantes.

D'abord, il y a eu le traitement des données collectées des différents facteurs du modèle RUSLE et ensuite la représentation cartographique de toutes les couches d'informations requises au moyen des logiciels ArcGIS et QGIS. Pour le bon déploiement de l'analyse spatiale, les cartes thématiques ont été géo référencées et calées (en fonction du système de coordonnées de référence de la zone, WGS 84, UTM Zone 18 N) ensuite transformées en format Raster afin d'affecter une valeur numérique à chaque maille. Les cultures sous abri, les roches à nues, les plans d'eau et les tissus urbains ont été exclus des analyses pour mieux estimer la couverture végétale. Ensuite, il y a eu la quantification de l'érosion hydrique, à partir de la combinaison des cartes thématiques en format raster (l'érosivité de la pluie, l'érodibilité du sol, la topographie, l'occupation des sols et les pratiques antiérosives). Le RUSLE a permis de mesurer la répartition spatiale du taux de pertes en terre pour chaque pixel, exprimé en tonne/ha/an (Figure 4).

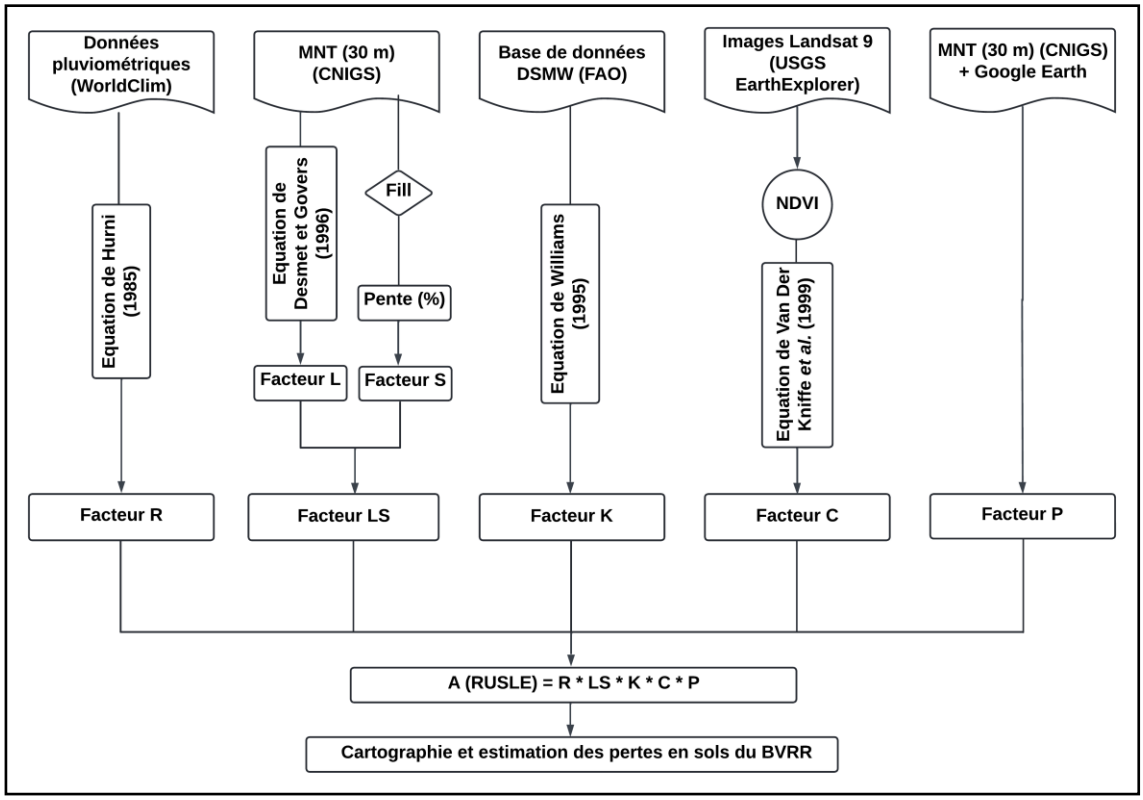


Figure 4 : Représentation méthodologique de l'estimation des pertes de sol

- **Facteur d'érosivité de la pluie (R)**

Dans le cadre de cette étude, l'équation de Hurni (1985), basée sur les données de précipitations moyennes annuelles, préalablement développée pour le contexte de l'Éthiopie, a été utilisée.

$$R = -8.12 + 0.562 \times P$$

Le choix de cette équation se justifie par le fait qu'elle est applicable dans les zones montagneuses jouissant d'un climat tropical ou subtropical. En effet, cette équation a été appliquée dans des zones montagneuses où les précipitations moyennes annuelles varient entre 1024 mm et 2091 mm (Gashaw *et al.*, 2017). Pour la commune de Léogâne où se situe le BVRR, ni l'Unité Hydrométéorologique (UHM) ni le Centre National des Informations Géo Spatiales (CNIGS) n'ont pu fournir des données ou des couches de données enregistrées par plusieurs stations météorologiques. Disposant des données de précipitations moyennes mensuelles uniquement pour une seule station pour l'ensemble de la commune de Léogâne, les données recueillies à l'UHM n'ont pas été utilisées pour le calcul du facteur R; auquel cas on aurait obtenu une valeur unique de R pour tout le BVRR. De ce fait, le facteur R a été calculé en utilisant les précipitations moyennes mensuelles provenant des couches de données de pluies satellitaires de Wordclim[1] de 2010 à 2021 afin de tenir compte de la variabilité spatiale des précipitations dans ce secteur.

Pour la cartographie du facteur R dans le logiciel ArcGIS, après avoir délimité la commune de Léogâne, chaque pixel de l'image ainsi obtenue a été d'abord converti en points. Cette conversion en points a permis d'obtenir plusieurs points équidistants répartis sur la toute la surface du BV, agissant chacun comme des stations pluviométriques. Ensuite, ces points ont été interpolés via l'outil IDW sur ArcGIS pour obtenir une carte de la répartition pluviométrique sur la commune de Léogâne. Enfin, le BVRR a été coupé dans la commune de Léogâne et l'équation de Hurni a été appliquée pour avoir la carte du facteur R.

- **Facteur d'érodibilité du sol (K)**

[1] WordClim est une base de données météorologique et climatique mondiale à haute résolution spatiale mise au point par Fick SE et Hijmans RJ.

Faute de données de terrain disponibles, on a dû recourir à des cartes de sol mondiales existantes pour estimer le facteur K. Pour ce faire, la carte numérique des sols de la FAO dénommée “FAO Digital Soil Map of the World (DSMW[2])” a été utilisée. Puisqu’il n’y a pas eu d’analyse de sol, on a dû se passer de l’équation de Wischmeier et Smith (1978) et considérer celle proposée par Williams (1995). L’équation proposée par Williams (1995) est énoncée comme suit :

$$K_{USLE} = f_{csand} \times f_{cl-si} \times f_{orgc} \times f_{hisand}$$

Avec

$$f_{csand} = 0.2 + 0.3 * exp\left(-0.256 * ms * \left(1 - \frac{msilt}{100}\right)\right)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{msilt}{mc + msilt}\right)^{0.3}$$

$$f_{org} = 1 - \frac{0.036 * orgC}{orgC + exp\big(3.72 - (2.95 * orgC)\big)}$$

$$f_{hisand} = 1 - \frac{0.7 * \left(1 - \frac{ms}{100}\right)}{\left(1 - \frac{ms}{100}\right) + exp\left(-5.51 + 22.9 * \left(1 - \frac{ms}{100}\right)\right)}$$

Où :

- f_{csand} est un facteur de correction pour la proportion de sable grossier dans le sol
- $f_{cl\text{-}si}$ est un facteur de correction pour la proportion relative d'argile et de limon dans le sol
- f_{org} est un facteur de correction pour la proportion de matière organique dans le sol
- f_{hisand} est un facteur de correction pour la proportion de sable fin dans le sol
- ms est le pourcentage en sable;
- msilt est le pourcentage de limon;
- mc est le pourcentage en argile;
- orgC est le contenu en carbone organique (%).

[2] DSMW : DIGITAL SOIL MAP OF THE WORLD / FAO, Version 3.6, complétée en Janvier 2003

Le facteur K est calculé en utilisant les propriétés des sols telles que le taux d'argile, de sable, de limon et la fraction de carbone organique. Ces données ont été extraites dans la base de données DSMW de la FAO. Cette base des données comprend un shapefile (polygone) des unités pédologiques dont la table attributaire contient les propriétés des sols des pays du monde. Le shapefile clipé du BVRR a permis d'extraire (découper) la carte des unités pédologiques du BV.

Les valeurs du facteur K dans l'équation de Williams (1995) sont exprimées en tonne/acres (Système US) et nécessitent d'être converties dans le système international. Donc, un facteur de 0.1317 est multiplié à chaque valeur de K. La dimension de K dans le SI est : t.ha.h/ ha.MJ.mm.

- **Facteur topographique (LS)**

Pour le BVRR, le facteur LS a été calculé à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) obtenu au CNIGS de 30 m de résolution spatiale, grâce à l'outil de géotraitement « *Basic terrain analysis* » de « *SAGA GIS 2.3.2 (System for Automated Geoscientific Analyses)* » suivant l'équation de Desmet et Govers (1996). Dans un premier temps, un prétraitement par remplissage des cuvettes a été réalisé dans le logiciel QGIS grâce à l'outil « *fill sink* ». Ensuite, le module *terrain analysis hydrology* de *SAGA GIS* a permis de faire le calcul du facteur LS en choisissant l'équation de Desmet et Govers (1996).

- **Facteur du couvert végétal (C)**

La carte d'occupation du sol a été élaborée à partir d'une image Landsat 9[3], de résolution 30 m, qui a été préalablement traitée, en utilisant le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Cela a permis de distinguer les terrains nus de ceux boisés, en transformant la réflectance de la végétation en pourcentage de la couverture végétale (Jensen, 2000). Le NDVI varie entre -1 et 1, et est donné par la relation :

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

PIR : bande proche infrarouge (0.85 – 0.88 µm) (Bande 5, Landsat 9)

[3] Cette image provident directement du site de la commission géologique des États-Unis (USGS) (https://earthexplorer.usgs.gov/)

R : bande rouge (0.64 – 0.67 µm) (Bande 4, Landsat 9)

La réalisation d'une classification non supervisée, suivie d'une classification supervisée ont permis d'avoir la répartition de la couverture végétale dans la zone d'étude. Le facteur C est estimé par la relation de régression de Van Der Kniffe *et al.* (1999) :

$$C = exp\left(-\alpha * \left(\frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right)\right)$$

α et β, respectivement 1 et 2, étant les paramètres de forme de la courbe C-NDVI.

- **Facteur des pratiques antiérosives (P)**

Pour attribuer une valeur au facteur P dans le BVRR, l'image satellitaire GoogleEarth (2024) de très haute résolution a été analysée. Un repérage des types de pratiques culturales (culture en bande ou en terrasse, cultures dans le sens de la pente ou non) dans la zone d'étude et un repérage d'éventuels aménagements anti érosifs ont été faits. Si les paramètres cités précédemment sont retrouvés dans le BVRR, des valeurs allant de 0.3 à 1 seront attribuées par zone et par type de pente selon la classification proposée par Wischmeier et Smith (1998) pour le facteur P.

4.2.3.3. Cartographie de l'érosion hydrique des sols

À partir des données relatives aux cinq (5) facteurs de l'érosion hydrique calculés précédemment et des logiciels QGIS et ArcGIS, trois (3) cartes de pertes en sol, qui renseignent sur les pertes minimales, moyenne et maximales du BV, ont été produites. La première carte a permis de calculer les pertes de sol du BVRR pour une situation de référence (normale), c'est-à-dire les pertes de sols minimales que le BV aurait subies s'il était idéalement boisé. La seconde a permis de calculer les pertes en sols maximales que le BVRR subirait s'il parvenait à être complètement dénudé; et la dernière les pertes en sols actuelles du BVRR.

4.2.3.4. Délivrance en sédiments du BVRR

Le modèle RUSLE ne permet d'estimer que l'érosion produite sur les versants. Pour évaluer la part de sédiments (particules fines et grossières) acheminée vers l'exutoire du bassin versant, il est impératif de tenir compte du taux de délivrance des sédiments (SDR), rapport entre la dénivelée du BV et la longueur du cours d'eau principal. Dans un bassin versant donné, le SDR indique la capacité à stocker et à transporter le sol érodé. Ce

coefficient (ou delivery ratio) a été défini par Hession et Shanholz (1988) selon l'équation suivante :

$$SDR = 10 \times D/L$$

avec :

SDR le coefficient de transport ou ratio de délivrance des sédiments à l'exutoire du BV (sans unité); D la dénivelée du bassin versant ou écart topographique (m); et L la longueur du thalweg principal (cours d'eau principal) (m).

La dégradation spécifique des sols (DS) en t/ha/an à l'exutoire du BV à été calculée en multipliant sa production totale en sédiments (A_{RUSLE}) par son ratio de délivrance (SDR).

$$DS = A \times SDR$$

5. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre présente les résultats du travail et les discussions. Cela concerne la délimitation du BV de la rivière Rouyonne, la description du milieu biophysique du BV, la quantification des pertes de sol du BV et des propositions pour atténuer les pertes en sols.

5.1. Délimitation de la partie amont BV de la rivière Rouyonne

La partie amont du BV de la rivière Rouyonne a été délimité avec le MNT (résolution 30 mètres) de la commune de Léogâne au moyen du logiciel ArcGIS. Dans la littérature, plusieurs superficies ont été proposées pour le bassin versant de la rivière Rouyonne : 49 Km^2 (Dorcilien, 2008) et 48,18 Km^2 (Geffrard, 2022). Cependant, la délimitation faite dans le cadre de cette étude a montré que le BV accuse une superficie de 46,45 Km^2 (4645 ha). La superficie trouvée lors de la délimitation d'un bassin versant n'est pas exhaustive et dépend de plusieurs paramètres, dont les deux plus importantes : la couche de données utilisée, la résolution de la couche de données et le logiciel utilisé.

Le BVRR traverse 5 sections communales de la commune de Léogâne : Dessources, Grande Rivière, Orangers, Cormier, Gros morne et Citronniers. En aval du bassin versant, c'est par la section communale de Dessources que transite la rivière Rouyonne avant d'atteindre la mer. Le réseau hydrographique principal et ses différents affluents de la rivière Rouyonne sont illustrés dans la figure ci-dessous (Figure 5).

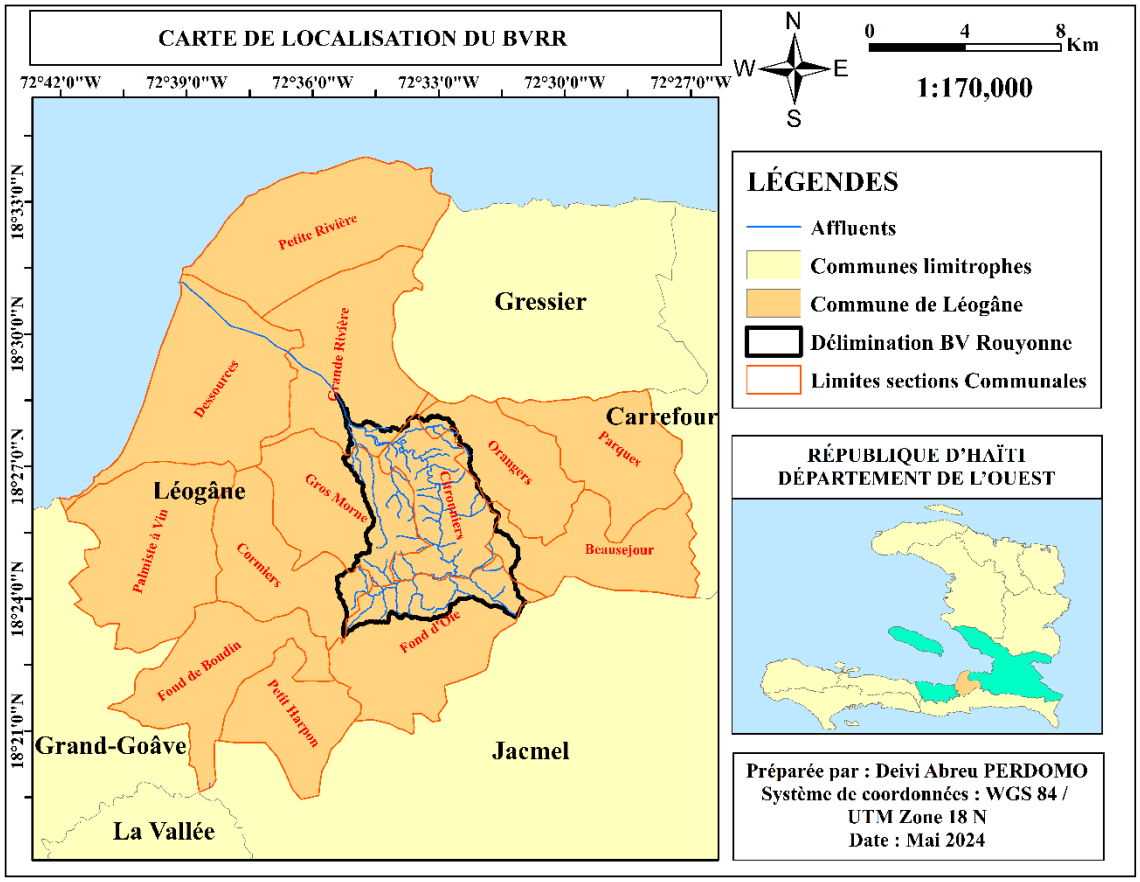


Figure 5 : Délimitation du bassin versant de la rivière Rouyonne

5.2. Description du milieu biophysique du bassin versant

La description du milieu biophysique du BV renvoie à la description des caractéristiques géométriques, hydrographiques et topographiques et l'occupation de sol.

5.2.1. Caractéristiques géométriques du BV

Le BVRR a un périmètre de 52.31 Km et un coefficient de Gravélius supérieur à 1.12, ce qui traduit que le bassin versant est de forme allongée, et accuse une largeur moyenne de 2.74 Km. Ce résultat (Tableau 7) est cohérent avec celui trouvé par Dorcilien (2008) pour la forme BV de la rivière Rouyonne.

Tableau 7 : Présentation des caractéristiques géométriques du BVRR

Nom BV	Surface (Km^2)	Périmètre (Km)	K_G	Rectangle équivalent		Largeur moyenne (Km)
				L_e (Km)	l_e (Km)	
Rouyonne	46.45	52.31	2.15	24.24	1.92	2.74

5.2.2. Caractéristiques topographiques

Les caractéristiques topographiques du bassin versant font appel au relief, à la pente, à la courbe hypsométrique.

5.2.2.1. Relief

Le BVRR présente un relief assez mouvementé, l'altitude varie de 50 à 956 mètres. Le BV présente un paysage avec des versants convexes, des lignes de crêtes et des vallées étroites qui s'ouvrent sur une plaine alluviale de faible déclivité, la plaine de Léogâne. De plus, par sa forme concave et son allure, la courbe hypsométrique (Annexe 4) montre que le BVRR est jeune, c'est-à-dire que la superficie est faible par rapport au changement d'altitude initial, ce qui est très caractéristique des bassins abrupts.

Les différentes classes d'altitudes (Annexe 2) ont été déterminées directement à l'aide du MNT du BVRR dans le logiciel QGIS, et de la courbe hypsométrique. Les valeurs trouvées pour les différents types d'altitudes sont présentées dans le tableau 8.

Tableau 8 : Présentation des différentes classes d'altitude

Altitude (m)			
Minimum	Moyenne	Médiane	Maximum
50	323	380	956

5.2.2.2. Pente

Le BVRR est caractérisé par des pentes variables pouvant aller au-delà de 60%. Près de 42 % du BV ont une pente inférieure ou égale à 30% pour une superficie totale de 19.35 km^2. De plus, un peu plus de 50 % de la superficie du BV ont une pente comprise entre 30 et 60%. Seulement 3.77% de la superficie du BV ont une pente supérieure à 60% (Tableau 9). La pente moyenne du BVRR est donc de 34.70%. Les résultats trouvés pour la classe des pentes (Tableau 8) sont différents de ceux trouvés par Dorcilien (2008) dans son étude sur le BVRR. En effet, dans son étude, il a été révélé que plus de la moitié de la superficie totale du BV, soit 52%, a une pente comprise entre 12 et 30%, alors que cette présente étude démontre que seulement 32.80 % de la superficie total du BV a une pente comprise entre 12 et 30% (Figure 6).

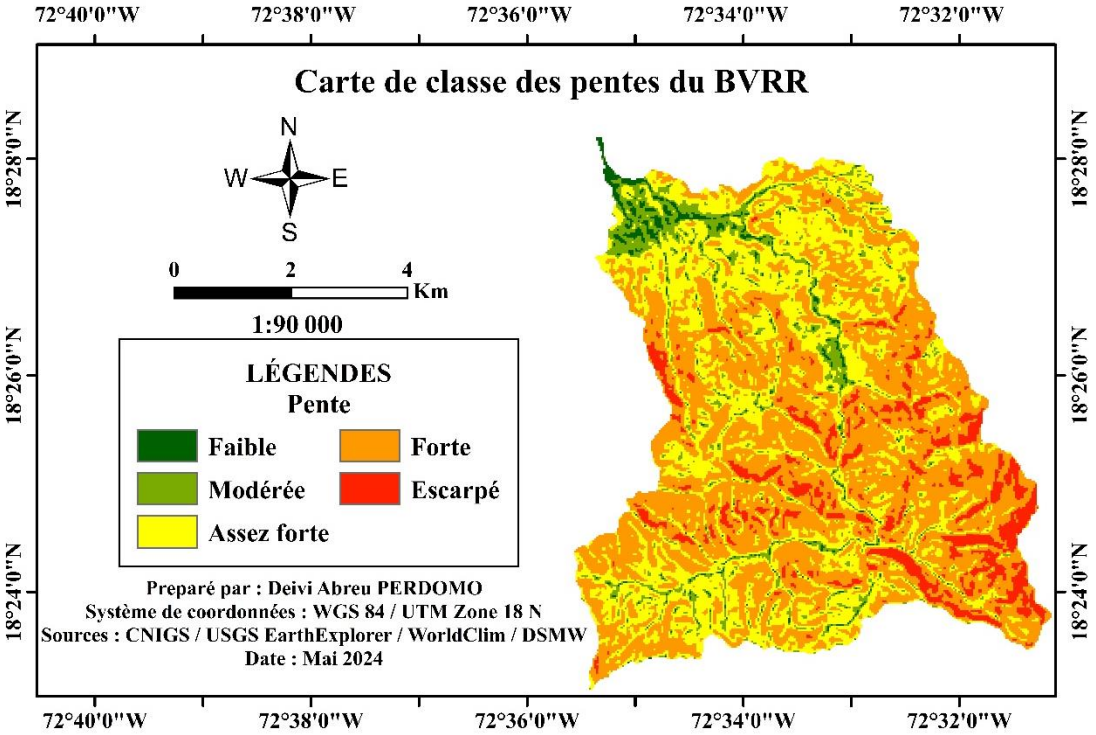


Figure 6 : Carte de classe des pentes du BVRR

Tableau 9 : Répartition de la superficie du BVRR par classe de pente

Classe	Pente (%)	Description	% de la superficie totale	Superficie (km^2)
I	≤ 5 %	Faible	1.98 %	0.92
II	5 – 12 %	Modérée	6.89 %	3.20
III	12 – 30 %	Assez forte	32.80 %	15.23
IV	30 – 60 %	Forte	50.20 %	23.32
VI	> 60 %	Escarpée	8.13 %	3.77

Source : Délusca, 2008

L'indice de pente global est compris entre 0.02 et 0.05 m/m, dans ce cas on peut affirmer que le relief du BVRR est assez fort. Ce résultat est en accord avec celui trouvé pour la dénivelée spécifique du BVRR, compris entre 100 et 250 m, ce qui traduit aussi un relief assez fort, selon la classification de l'ORSTOM. Le coefficient orographique étant supérieur à 6, la pente est dite accentuée dans ce cas. Le tableau ci-contre (Tableau 10) présente les principaux paramètres relatifs à la pente du BV.

Tableau 10 : Présentation des paramètres relatifs à la pente BVRR

Nom BV	L (km)	I_{max} (%)	I_m (%)	I_g (m/m)	D_s (m)	C_M
Rouyonne	76.57	176	34.70	26.33	190.43	39.39
Signification des symboles						
L (km)	I_{max} (%)	I_m (%)	I_g (m/km)	D_s (m)		C_M
Longueur totale des courbes de niveau	Pente maximale	Pente moyenne	Indice de pente global	Dénivelée spécifique		Coefficient orographique

5.2.3. Caractéristiques hydrographiques

Le BVRR, délimité avec un MNT de 30 mètres de résolution spatiale, est doté d'un réseau de drainage très dense (Figure 7). Il est assuré principalement par la rivière Rouyonne et est alimenté par plusieurs ravines qui prennent naissance à partir des versants adjacents situés à une altitude moyenne de 700 mètres. La rivière atteint sa plus grande force à la rencontre des rivières tamarin à l'est, et les ravines Corail et Basilier à l'ouest (Dorcilien, 2008). Les affluents comme la ravine Sonnianm, la ravine Basilier et la ravine Tamarin ont un régime permanent, tandis que la plupart des autres ravines ont un régime torrentiel. Ce sont ces ravines qui sont à la base des plus grands problèmes d'inondations dans la commune de Léogâne lors des périodes de grandes crues (Dorcilien, 2008).

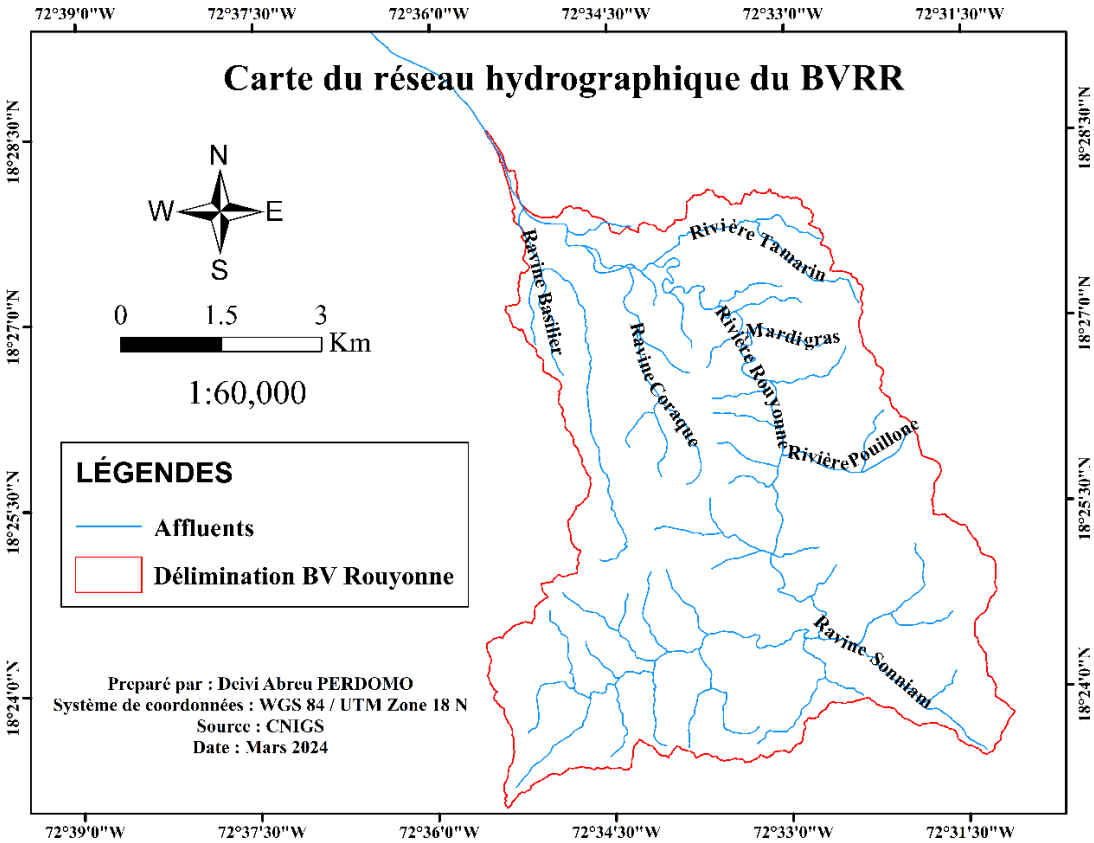


Figure 7 : Présentation du réseau hydrographique du BVRR

Le BVRR compte au total 51 affluents, pour une longueur totale de 97.28 Km. Le cours d'eau principal de la partie amont du BV, la rivière Rouyonne, mesure 12.33 km de long. Le BVRR à une densité de drainage de 2.03 Km/Km^2, ce qui implique qu'il est situé dans une région où l'écoulement n'a atteint qu'un développement très limité et se trouve centralisé. En moyenne, la première goutte de pluie prend 2.97 heures pour sortir du sommet du BV pour arriver à l'exutoire (Tableau 11).

Tableau 11 : Présentation des paramètres relatifs au réseau hydrographique

Paramètres	L (Km)	L_{tot} (km)	P_{moy} (m/km)	D_d (Km/Km^2)	O_{BV}	D_h (n/Km^2)	C_T	T_c (Heures)
Valeurs	12.33	97.28	0.016	3.08	4	7.17	19.24	2.97
Signification des symboles								
L / L_{tot}		Longueur du talweg principal / Longueur totale des cours d'eau						

P_{moy}		Pente moyenne du cours d'eau principal
D_d / D_h		Densité de drainage / Densité hydrographique
O_{BV} / C_T		Ordre du bassin versant / Coefficient de torrentialité
T_c		Temps de concentration
n / km^2		Nombre de canaux d'écoulement par km^2

Le profil en long de la rivière principale du BV (Annexe 3), la rivière Rouyonne, présente une forme quasi linéaire. Ce profil en long va du point amont le plus élevé de la rivière (Distance =0 m et Altitude=245 m) au point aval le plus bas (Distance = 19 100 m par rapport au point amont et Altitude = 50 m). La rivière Rouyonne accuse une pente moyenne de 0.016 m/Km.

5.2.4. Étude de la tendance des pluies satellitaires de WorldClim par rapport à celles de UHM

L'analyse des graphiques de variabilité moyenne mensuelle et annuelle entre les données WorldClim (résolution 2.5 minutes d'arc, 21 km^2) et UHM pour la même période (1960-1987) a montré que, globalement, il n'y a pas d'écart significatif entre les données mesurées au sol par l'UHM et les données satellitaires de WorldClim (Figures 8 et 9). Il peut être constaté que, en général, les données WorldClim montrent une sous-estimation modérée de la quantité moyenne mensuelle de précipitations observée entre 0 et 150 mm/mois ; alors qu'il tend à surestimer ces valeurs au-delà de 150 mm/mois. De même, en général, WorldClim tend à surestimer les valeurs annuelles de précipitation au-dessus de 1400 mm.

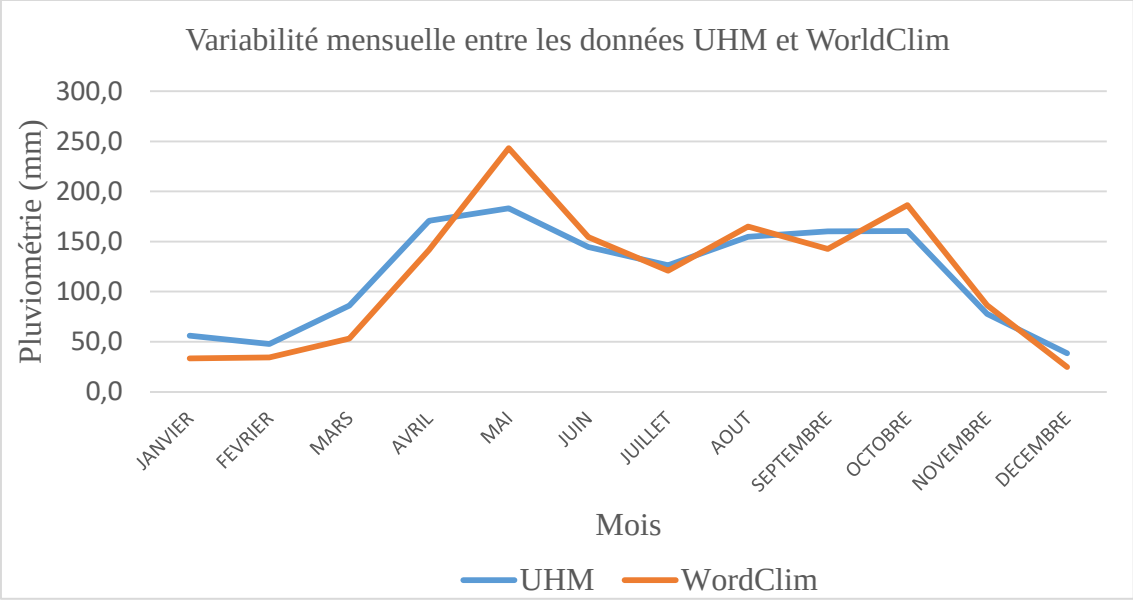


Figure 8 : Comparaison entre les données pluviométriques moyennes mensuelles de WorldClim et UHM

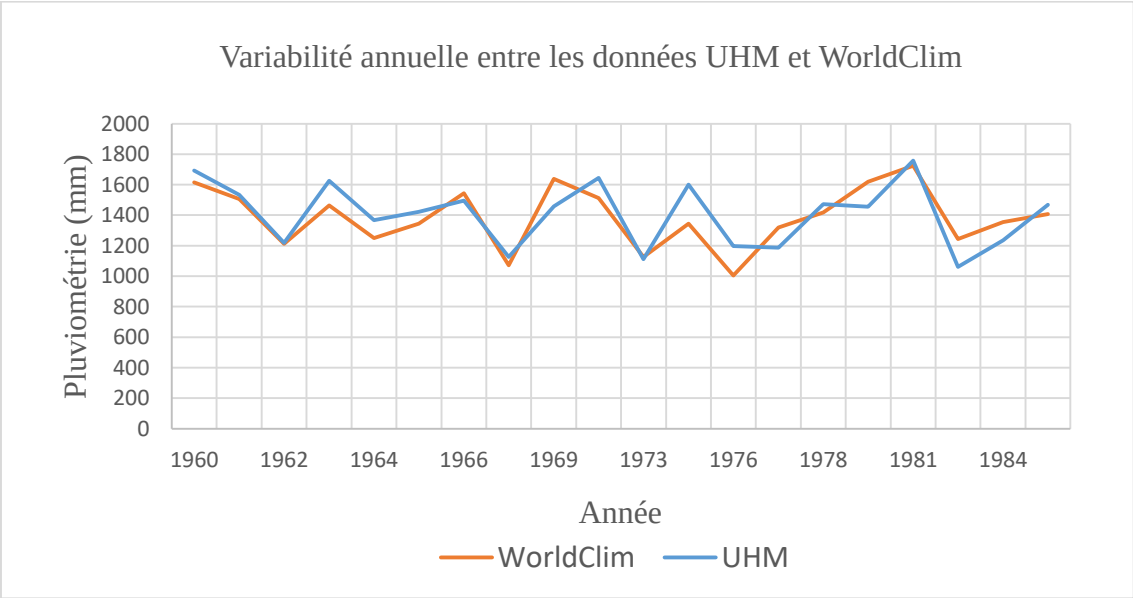


Figure 9 : Comparaison entre les données pluviométriques annuelles de WorldClim et UHM

5.2.4.1. Méthode des doubles masses

La droite de pente des cumuls mensuels et annuels des pluies au sol et des pluies de WorldClim ne présente aucune rupture ou discontinuité (Figures 10 et 11). Ces données montrent plutôt une évolution proportionnelle des différentes pluies cumulées au cours des mois et des années successifs. La continuité de la droite de pente montre bien une

homogénéité des données de pluies de WorldClim dans la zone d'étude. De plus, on constate que le coefficient de détermination R^2 est très proche de 1 (0.9983 pour le cumul mensuel et 0.9996 pour le cumul annuel), ce qui indique que le modèle de régression explique entièrement la variance de la variable dépendante, signifiant une adéquation parfaite.

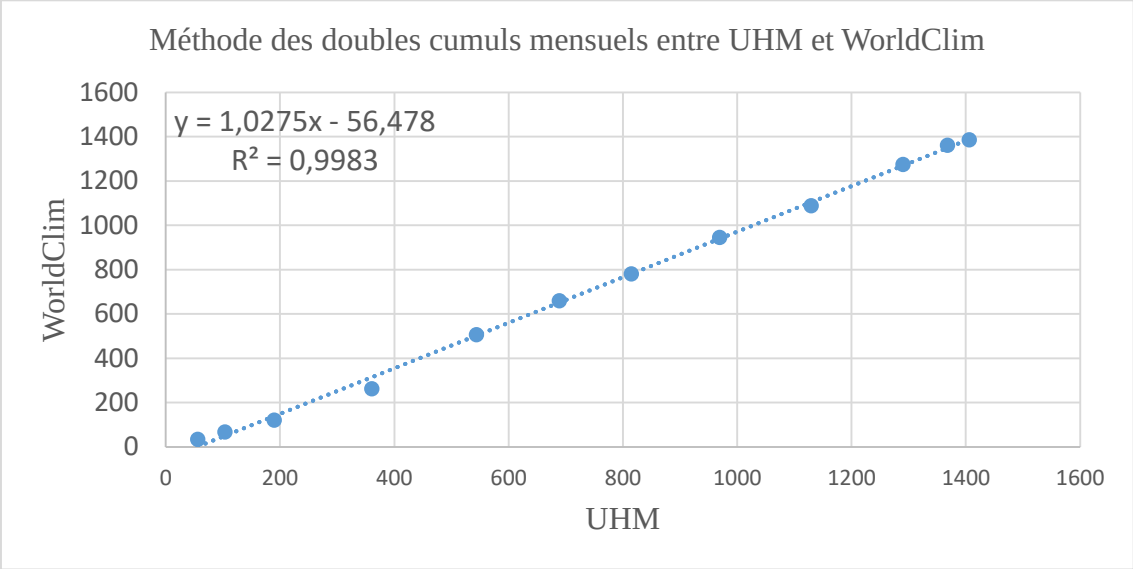


Figure 10 : Méthode des doubles cumuls entre les données moyennes mensuelles WorldClim et UHM

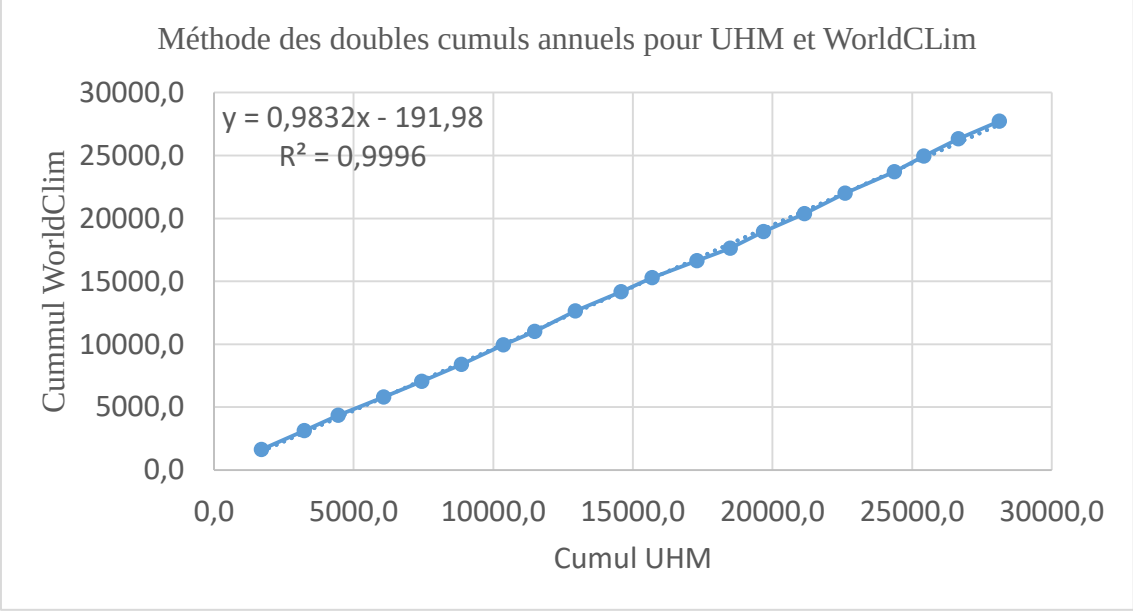


Figure 11 : Méthode des doubles cumuls entre les données annuelles UHM et WorldClim

5.2.4.2. Corrélation entre pluies au sol et pluies satellitaires

Une dispersion des points tout au long de leur droite de tendance linéaire respective peut être observée au niveau des figures 12 et 13. Cet alignement des points le long de leur droite de tendance montre distinctement que les moyennes mensuelles et annuelles des pluies de WorldClim et les données au sol évoluent dans le même sens. Cette observation suggère une très bonne corrélation linéaire mensuelle (R2 = 0.889) et annuelle (R2 = 0.652) entre ces deux (2) catégories de pluies. En outre, le test de corrélation entre les données de pluies satellitaires et pluies au sol a donné une bonne corrélation (r = 0.94 / mensuel et r = 0.81 / annuel) entre les moyennes mensuelles et annuelles de ces données.

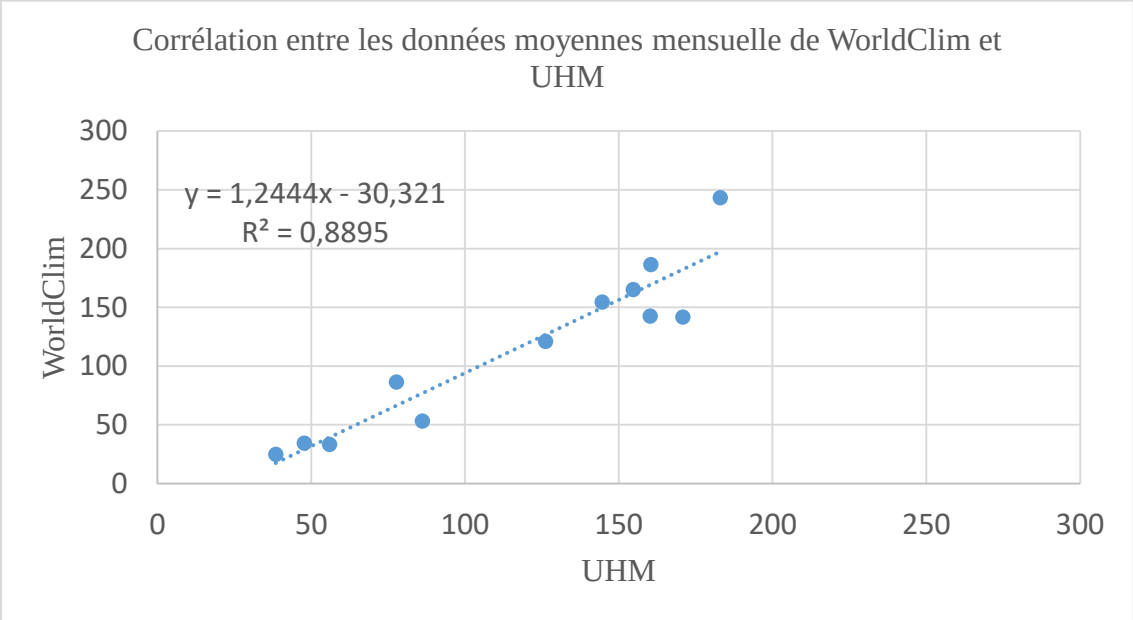


Figure 12 : Corrélation entre les données moyennes mensuelles de WorldClim et UHM

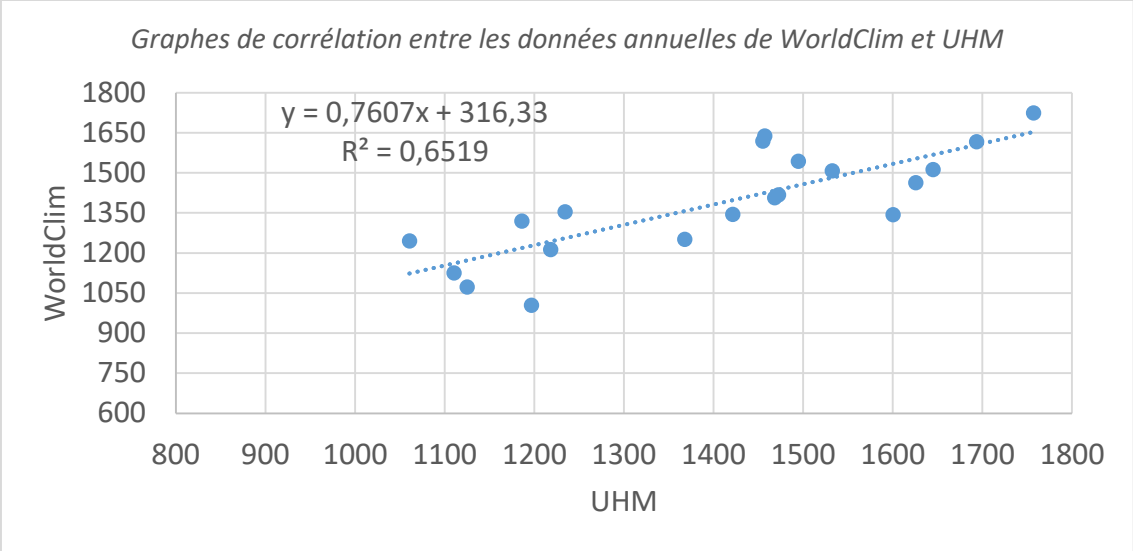


Figure 13 : Corrélation entre les données annuelles WorldClim et UHM

5.2.4.3. Les critères de biais et RSME

Ces indicateurs décrivent la fidélité des données de WorldClim par rapport aux données de l'UHM, c'est-à-dire montre quand WorldClim surestime ou sous-estime systématiquement les valeurs des pluies mesurées au sol (Voir figure 12). L'analyse des biais a montré que les données présentent des biais avec une moyenne de -8.44% mensuellement et une moyenne de -4.21% annuellement. Ces valeurs des biais indiquent que, globalement, WorldClim a plus tendance à sous-estimer les données qu'à les surestimer. Elles peuvent être considérées comme acceptables à l'image de l'intervalle d'acceptabilité des biais (± 15%) proposé par Ashouri et al. (2015) pour la validation des données de pluies satellitaires.

Cependant, le biais n'indique que des écarts et ne donne pas d'information sur l'amplitude de ces écarts, vu que les valeurs positives et négatives de crise se compensent dans la moyenne. L'erreur quadratique moyenne (RSME) pour les données mensuelles indique que l'amplitude des écarts est de 25.35 mm. Cette valeur se trouve dans le seuil d'acceptabilité du RMSE proposé par Khan et al. (2011) (RMSE < 30mm/mois). De plus, le RMSE pour les précipitations annuelles est de 124.94 mm. Cette valeur se trouve dans le seuil d'acceptabilité du RMSE proposé par Su et al. (2008) (RMSE inférieur à 15% de la moyenne annuelle).

Tous les tests statistiques réalisés sur les 2 séries de données montrent qu'elles sont substituables en absence de données de terrain réelles. Par conséquent, les couches de données cartographiques de la pluie extraites de WorldClim seront utilisées.

5.3. Cartographie et analyse des facteurs érosifs R, K, LS, C et P

5.3.1. Érosivité des pluies (Facteur R)

Le BVRR jouit d'un climat tropical qui est contrasté par le relief. La cartographie du facteur R (Figure 14) montre que l'érosivité de la pluie tout comme la précipitation et l'altitude augmentent progressivement du Sud au Nord. Le facteur R est plus élevé dans les zones de forte altitude. L'interpolation des points obtenus grâce à la couche de données pluviométriques de WordClim dans ArcGIS a permis de déterminer que le facteur R varie entre 720 et 820 MJ.mm/ha.h.an avec une moyenne de 782.62 MJ.mm/ha.h.an (Tableau 12). La valeur moyenne de R trouvée pour le BVRR est très loin de celle trouvée par Délusca (1998) pour la ravine Balan 8097.96 MJ.mm/ha.h.an. Néanmoins, elle est un peu plus proche de celle trouvée par Jean-Pierre (2022) pour le BV de la rivière Grise 1 247.33 MJ.mm/ha.h.an. La variation du facteur R entre plusieurs bassins versant dépend en grande partie des jeux de données disponibles, ce qui conditionne le choix de la formule à utiliser.

Tableau 12 : Classification du facteur R pour le BVRR

Classe	Facteur R (MJ.mm/ha.h.an)	% de superficie	Superficie en km^2
I	720 – 760	16.87 %	7.84
II	760 – 780	24.60 %	11.43
III	780 – 800	38.04 %	17.67
IV	800 – 820	20.49 %	9.51

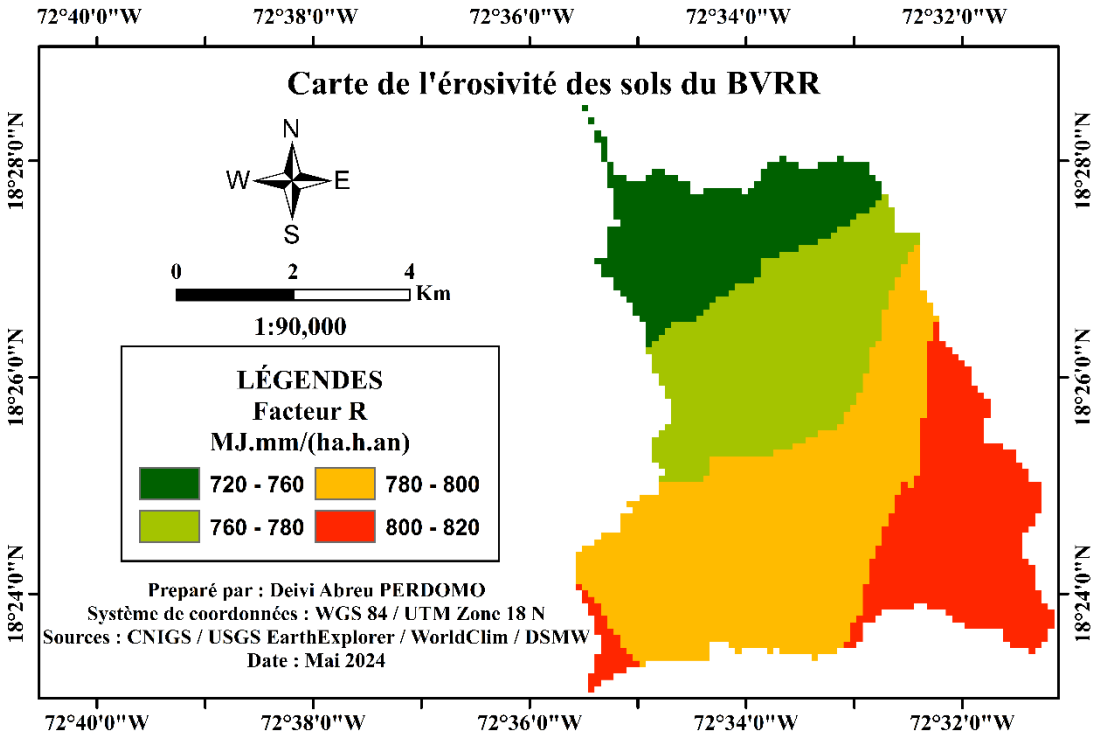


Figure 14 : Cartographie du facteur R

5.3.2. Érodibilité des sols (Facteur K)

La carte des sols de la FAO utilisée a permis de trouver 2 types de sols présents au niveau du BVRR : les cambisols chromiques (BC) et les nitosols distriques (ND) (Figure 15). L'érodibilité varie en fonction des types de sols dans le BVRR. Les nitosols distriques (ND) (K = 0.0227 t.ha.h/ha.MJ.mm) sont majoritairement présents dans tout le bassin versant et occupent 94.01 % de la superficie totale. Les cambisols chromiques (BC) (K = 0.0388 t.ha.h/ha.MJ.mm) sont retrouvés dans la partie la plus élevée du BVRR, au Sud-Est. La moyenne du facteur K dans tout le bassin versant est de l'ordre de 0.0237, avec un écart-type de 0.0038 (Tableaux 13 et 14). Selon Roose *et al.* (1990), lorsque le facteur d'érodibilité d'un sol est de 0.025 t.ha.h/ha.MJ.mm, ce sol est considéré comme un sol moyennement sensible à l'érosion. La moyenne du facteur K étant inférieur à 0.025, cela indique que les sols du BVRR sont relativement résistants à l'érosion.

Les valeurs trouvées pour le facteur K dans le BVRR sont dans l'intervalle de celles trouvées par Durosier (1990) pour le BV de la rivière Bouyaha en Haïti où K varie entre 0.004 et 0.150 t.ha.h/ (ha.MJ.mm), inférieures à la moyenne de l'érodibilité trouvée par

Délusca (1998) qui est de 0.046 t.ha.h/ (ha.MJ.mm), supérieures à l'intervalle trouvé pour par Jean-Pierre (2022) pour le BV de la rivière Grise 0.0145 à 0.0172 t.ha.h/ (ha.MJ.mm).

Tableau 13 : Présentation de la classification des sols au niveau du BVRR

Classification des sols	Code FAO	Superficie	% sable	% Limon	% argile	% C. Org
Cambisols chromiques	BC	43.66 km^2	40.1	21.5	38.4	1.44
Nitosols distriques	ND	2.79 km^2	38.9	17.6	43.6	1.57

Tableau 14 : Présentation des valeurs du facteur K pour le BVRR

Code FAO	f_{csand}	$f_{cl\text{-}si}$	f_{org}	f_{hisand}	K_{RUSLE}	$K_{Converti}$
BC	0.3340	1.0749	0.8226	0.9999	0.2953	0.0388
ND	0.2001	0.8895	0.9713	0.9999	0.1729	0.0227

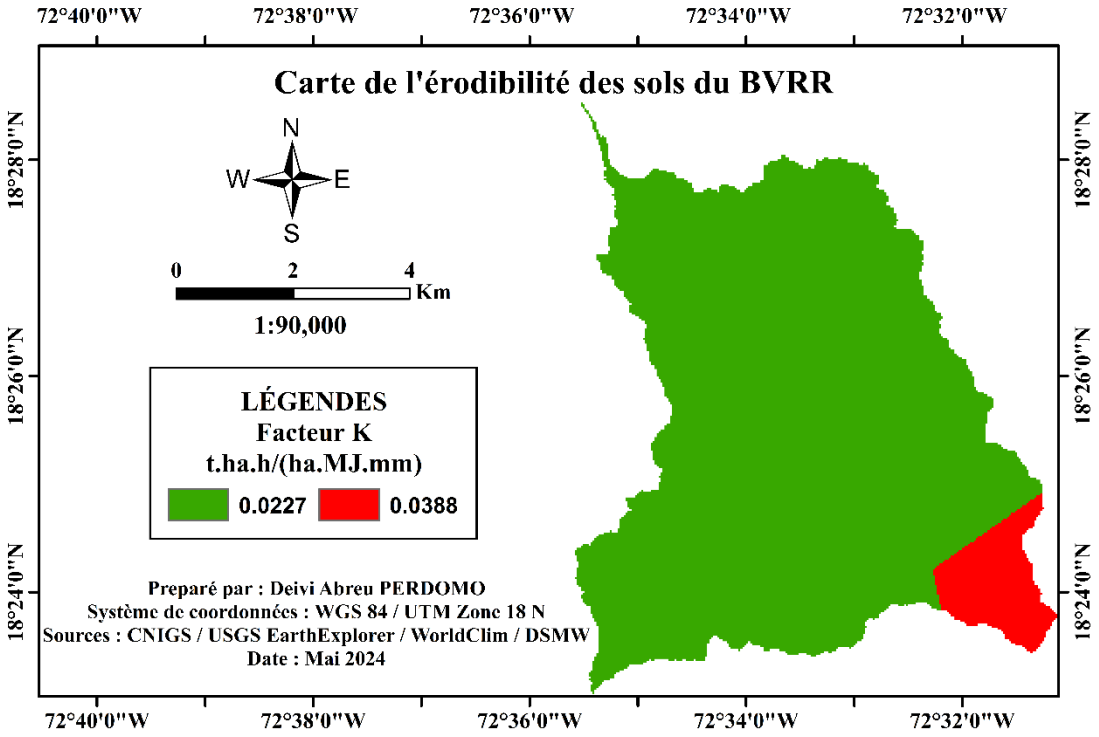


Figure 15 : Cartographie du facteur K

5.3.3. Facteur LS

L'influence de la longueur de la pente et de son inclinaison sur les processus érosifs exprimée par le facteur LS montre que les valeurs se répartissent entre 0.040 et 115 (Tableau 15 et Figure 16). Plus de 75 % des valeurs du facteur LS trouvées sont

inférieures à 10. Dans le BVRR, la valeur moyenne du facteur LS est de 7.12, avec un écart-type de 5.292. La valeur trouvée est proche, mais légèrement inférieure, de celle trouvée par Délusca (1998) à Ravine Balan, Haïti (7.49), supérieure à celle trouvée par Jean-Pierre (2022) pour le bassin versant de la rivière Grise (Haïti) (1.36) et inférieure à celle trouvée par Payet *et al.* (2012) sur le BV Fiherenana à Madagascar (11.07) qui jouit des mêmes conditions de pente. Les valeurs élevées du facteur LS exhibent des zones ayant de forts gradients de pentes qui ont une grande influence sur le facteur LS par rapport à la longueur de la pente. De manière générale, les zones ayant de forts gradients de pente ont des valeurs élevées du facteur LS du fait que le gradient de pente est le contrôle majeur des valeurs de LS. Par ailleurs, les surfaces concaves (zones d'accumulation des flux) ont des valeurs de LS supérieures au plan convexe (Desmet & Govers, 1996).

Tableau 15 : Présentation du facteur LS par classe pour le BVRR

Classe	Facteur LS	Superficie en ha	Pourcentage de superficie
1	< 5	1564.307	33.67
2	5 – 10	2084.228	44.87
3	10 – 20	890.338	19.16
4	20 – 40	96.183	2.07
5	> 40	10.458	0.23

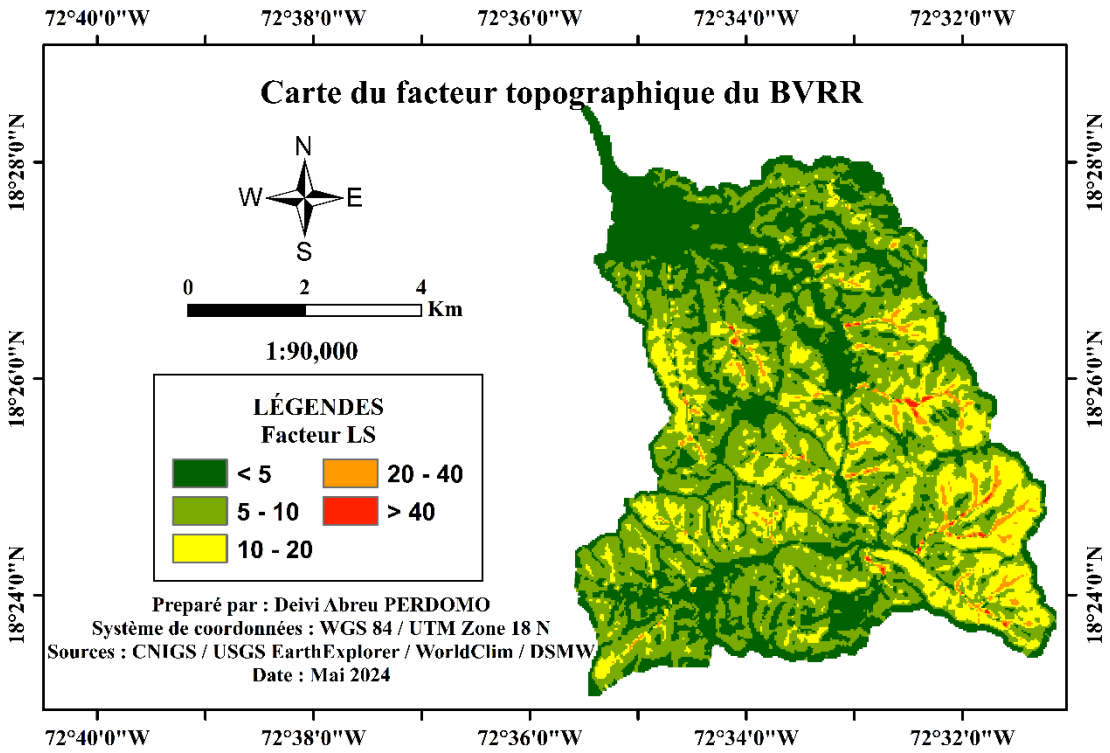


Figure 16 : Cartographie du facteur LS

5.3.4. Le couvert végétal

La cartographie du couvert végétal pour le bassin versant de la rivière Rouyonne a été obtenue en cartographiant d'abord le NDVI (Normal Difference Index Vegetation) pour tout le BVRR.

5.3.4.1. Le NDVI

L'image NDVI pour le BVRR a été réalisée pour distinguer les valeurs NDVI pour différentes caractéristiques ou occupations de sol. Elle montre des valeurs allant de 0.0094 à 0.4995, inférieures aux valeurs généralement admises pour les forêts naturelles (Rizvi *et al.*, 2009) (Tableau 16).

La carte de NDVI obtenue (Figure 17) a permis de répartir l'occupation de sol au niveau du BVRR en 4 classes : accumulations et sable de rivière, jachère / terre en friche et sols nus, culture et herbe, agroforesterie. Elle montre que le BVRR est couvert sur 50.9% de sa surface par des cultures et des herbes. De plus, 42.1% de la superficie du BV ne sont protégés par aucun couvert végétal, et seulement 3% de la superficie concernent l'agroforesterie (Tableau 16).

Tableau 16 : Classification de l'occupation de sol du BVRR par le NDVI

Classes	NDVI	% de superficie	Superficie (ha)
Accumulations/Sable de rivière	0.0094 – 0.0557	1.23	57
Jachère/Terre en friche/Sols nus	0.0557 – 0.2058	40.87	1898
Culture et herbe	0.2058 – 0.3704	50.90	2550
Agroforesterie	0.3704 – 0.4995	3.00	140

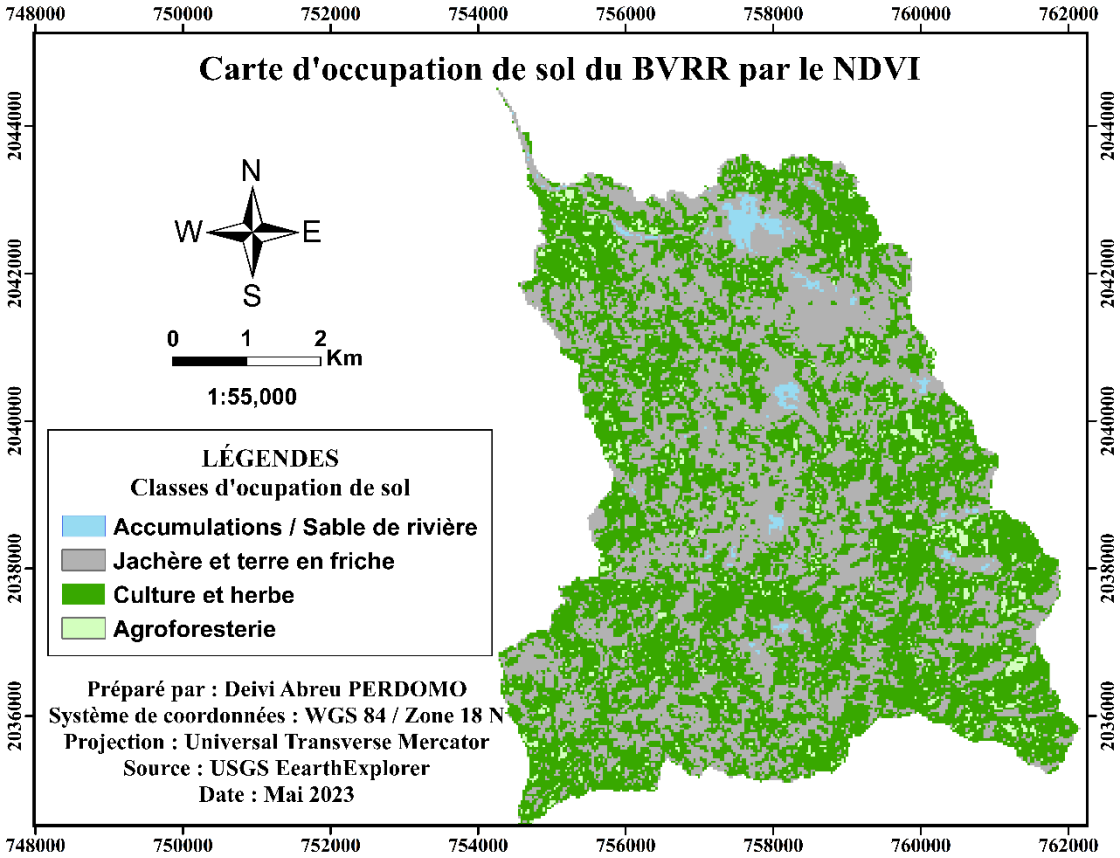


Figure 17 : Cartographie du NDVI

5.3.4.2. Facteur C

La faible couverture végétale qui caractérise le BVRR explique en partie l'état actuel de l'érosion. La carte du facteur C obtenu à l'aide du NDVI (Figure 18) montre des valeurs comprises entre 0.135 et 0.981 avec une moyenne de 0.561 et un écart-type de 0.134. Les valeurs proches de 1 démontrent que la partie du bassin versant concernée est complètement dénudée ou dénudée partiellement. À l'inverse, plus on se rapproche de la valeur minimale de référence de Wischmeier et Smith pour le facteur C (0.001), plus le

bassin versant est bien couvert. Un peu plus de 70% de la superficie du bassin versant ont un facteur C compris entre 0.3 et 0.65. De plus, il est pertinent de constater qu'un peu plus de 25 % du BV (Tableau 17) peut être considérés comme complètement dénudés.

Tableau 17 : Présentation du facteur C par classe pour le BVRR

Classe	Facteur C	Superficie en ha	% de superficie
1	< 0.3	116.62	2.51
2	0.3 – 0.5	1333.96	28.71
3	0.5 – 0.65	2006.92	43.20
4	0.65 – 0.75	866.01	18.64
5	> 0.75	322.36	6.94

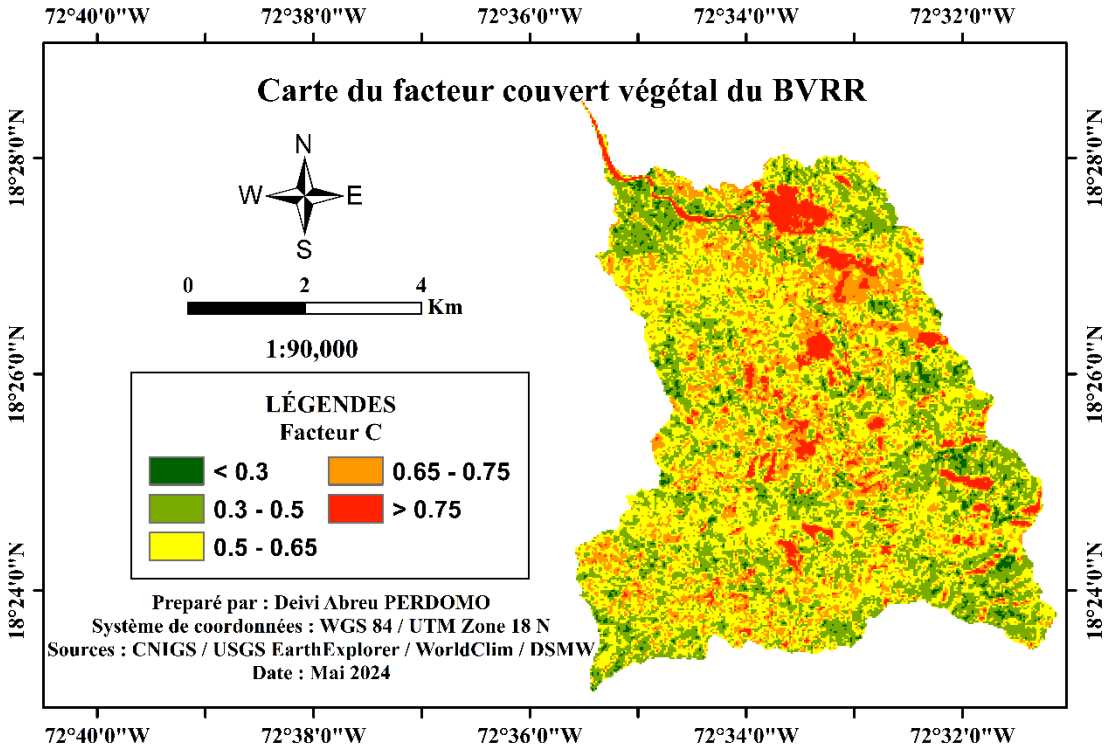


Figure 18 : Cartographie du facteur C

5.3.5. Facteur des pratiques antiérosives (Facteur P)

Les valeurs de P sont inférieures ou égales à 1. La valeur 1 est attribuée aux terrains sur lesquels aucune des pratiques culturales n'est utilisée. Pour attribuer une valeur au facteur P dans le BVRR, une image satellitaire de très haute résolution (3000 dpi : 35078 pi * 24803 pi) (Annexe 9), prise avec Google Satellite sur le logiciel QGIS, a été minutieusement analysée afin de repérer les types de pratiques culturales et d'éventuels

aménagements anti érosifs. Après analyse, on a constaté que, dans tout le bassin versant de la rivière Rouyonne, il n'y pas de pratiques culturales particulières, ni d'aménagements antiérosifs. De plus, on a remarqué que les cultures ne sont jamais parallèles aux courbes de niveau. Dans ce contexte, la valeur maximale (P = 1) a été attribuée à toute la superficie du bassin versant.

L'image obtenue a permis non seulement d'attribuer une valeur au facteur P, mais aussi d'avoir une image nette de l'état de dégradation du BVRR. En 2008, Dorcilien a mis en évidence les facteurs à la base de la dégradation du BV dont les principaux : la coupe abusive des arbres et des arbustes pour la fabrication du charbon et du bois de chauffage pour l'alimentation des guildives et des « Dry Cleaning » et l'exploitation abusive de la terre sans discrimination des pentes.

5.4. Pertes de sols normales : Situation de référence

Les pertes de sols « normales » font référence à l'érosion qui se produirait si le bassin versant était complètement couvert, c'est-à-dire idéalement boisé avec un facteur C minimal fixé par Wischmeier et Smith dans le modèle USLE (C = 0,001). C'est la perte minimale en sol que peut enregistrer le BV sans tenir compte de l'anthropisation.

Les résultats obtenus au cours de cette étude montrent que, en condition idéale, le bassin versant de la rivière Rouyonne aurait perdu moins de 0.7 tonne/hectare/an sur 99.8% de sa superficie. Ainsi, le BVRR aurait perdu en moyenne 0.14 tonne/hectare/an, soit une perte moyenne totale de 653.45 tonnes/an (Figure 19).

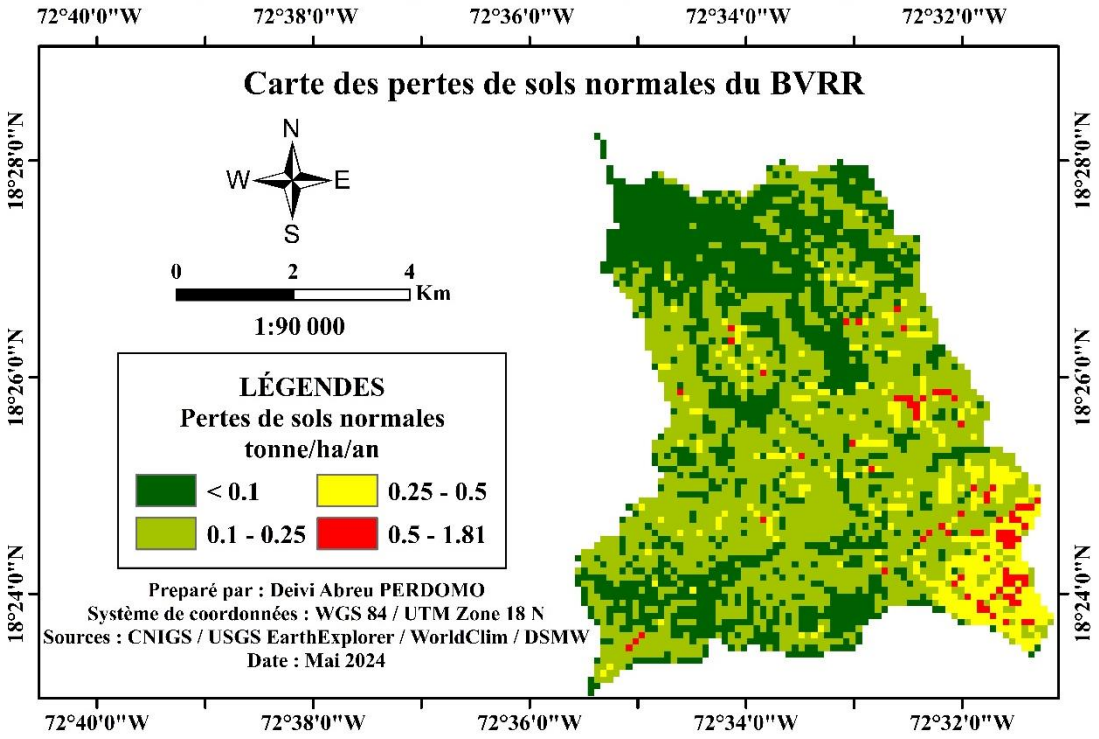


Figure 19 : Carte des pertes de sols normales du BVRR

5.5. Potentiel érosif du BVRR

Mathématiquement parlant, dans l'équation du potentiel de pertes de sol, les facteurs C et P sont équivalents à 1, car on considère que le BV est complètement dénudé et sans pratiques de protection des sols. Potentiellement, le BVRR, pourrait perdre en moyenne 147.54 tonnes/ha/an sur toute sa surface, soit une perte moyenne annuelle totale de 685298.33 tonnes. En effet, 68.86% de la surface du BV auraient accusé des pertes de sols comprises entre 50 et 200 tonnes/ha/an. De plus, moins de 13% du BVRR auraient accusé des pertes de sols inférieures à 50 tonnes/ha/an et seulement 5.32 % du BV accuseraient des pertes en sols supérieures à 200 tonnes/ha/an (Tableau 18). La cartographie du potentiel érosif du BVRR (Figure 20) montre que le plus haut potentiel érosif se trouve au Sud-Est, là où le BV atteint une altitude de plus de 850 m et la pente dépasse les 60%.

Tableau 18 : Présentation des pertes de sols potentielles du BVRR

Classification des pertes de sol	Valeurs de pertes de sol (t/ha/an)	Moyenne Pertes de sols par classe (t/ha/an)	Total Pertes de sols (par classe) (t/an)	Superficie par classe	
				Km^2	%
Faible	< 10	7.02	547.65	0.78	1.26
Moyen	10 – 25	17.04	2759.87	1.62	3.91
Élevé	25 – 50	37.21	13023.71	3.50	7.53
Très élevé	50 – 200	121.62	389057.23	31.99	68.86
Critique	> 200	326.80	279737.50	8.56	5.32
Total général			685298.33	46.45	100
Moyenne générale		147.54			

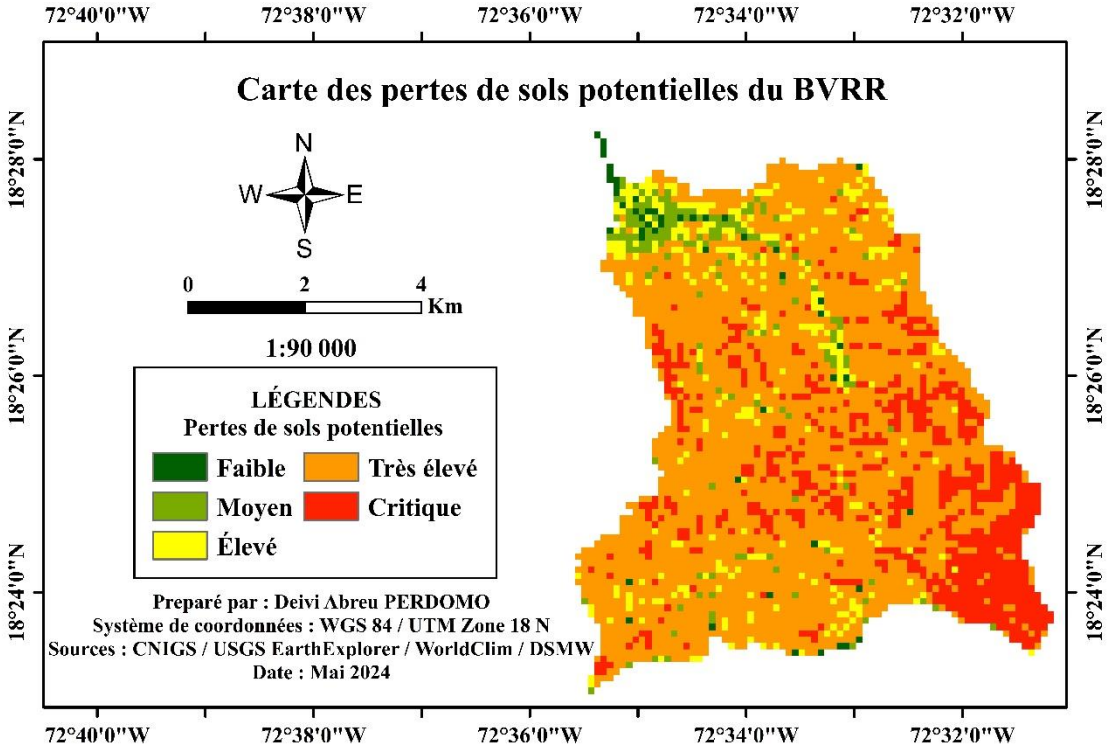


Figure 20 : Cartographie des pertes de sols potentielles du BVRR

5.6. Pertes de sols réelles du BVRR

La détermination des principaux facteurs (R, K, LS, C) intervenant dans l'érosion hydrique des sols a permis d'obtenir la carte des pertes en sols du bassin versant étudié. Celle-ci montre des valeurs allant de 0.92 à 951.05 t/ha/an (Tableau 19). Ces valeurs sont proches de celles que Jean-Pierre (2022) a trouvées pour le bassin versant de la rivière

Grise en Haïti (0 à 1 277 t/ha/an). La moyenne de pertes de sols retrouvée au niveau du BVRR (81.60 tonnes/ha/an, soit 379052.02 t/an) est plus de 4 fois supérieure aux pertes de sols moyennes de la région Ouest en Haïti 18 tonnes/ha/an (Bellande, 2009), dont le BV fait partie.

En effet, 64.14% de la surface du BVRR enregistrent des pertes allant de 50 à 200 tonnes/ha/an. Seulement 4.95 % de la surface du BV enregistrent des pertes inférieures au seuil de pertes de sols tolérables généralement admises en Haïti (11.5 tonnes/ha/an) (Délusca, 1998), dont seulement 2.95 % correspondent aux pertes de sols jugées tolérables par Wischmeier (7.5 tonnes/ha/an).

Les plus faibles valeurs de pertes de sol s'observent surtout dans les zones où les pentes sont moins fortes et associées à un couvert végétal plus ou moins protecteur où les pluies deviennent moins agressives (Figure 21). Ces zones sont surtout localisées au Nord du BV, à proximité de l'exutoire. À l'inverse, les plus fortes valeurs de pertes en sols peuvent être remarquées dans la partie Sud-Est du bassin versant, la ou les pentes sont très fortes.

Tableau 19 : Présentation des pertes de sol actuelles du BVRR

Classification des pertes de sol	Valeurs de pertes de sols (t/ha/an)	Moyenne Pertes de sols (par classe) (t/ha/an)	Total Pertes de sols (par classe) (t/an)	Superficie par classe	
				Km^2	%
Faible	< 10	5.99	1137.69	2.35	4.96
Moyen	10 – 25	17.28	691.07	8.71	7.00
Élevé	25 – 50	38.27	12438.87	14.80	19.41
Très élevé	50 – 200	92.83	276526.47	16.44	64.14
Critique	> 200	290.15	60351.63	3.03	4.49
Total général			379052.02	46.45	100
Moyenne générale		81.60			

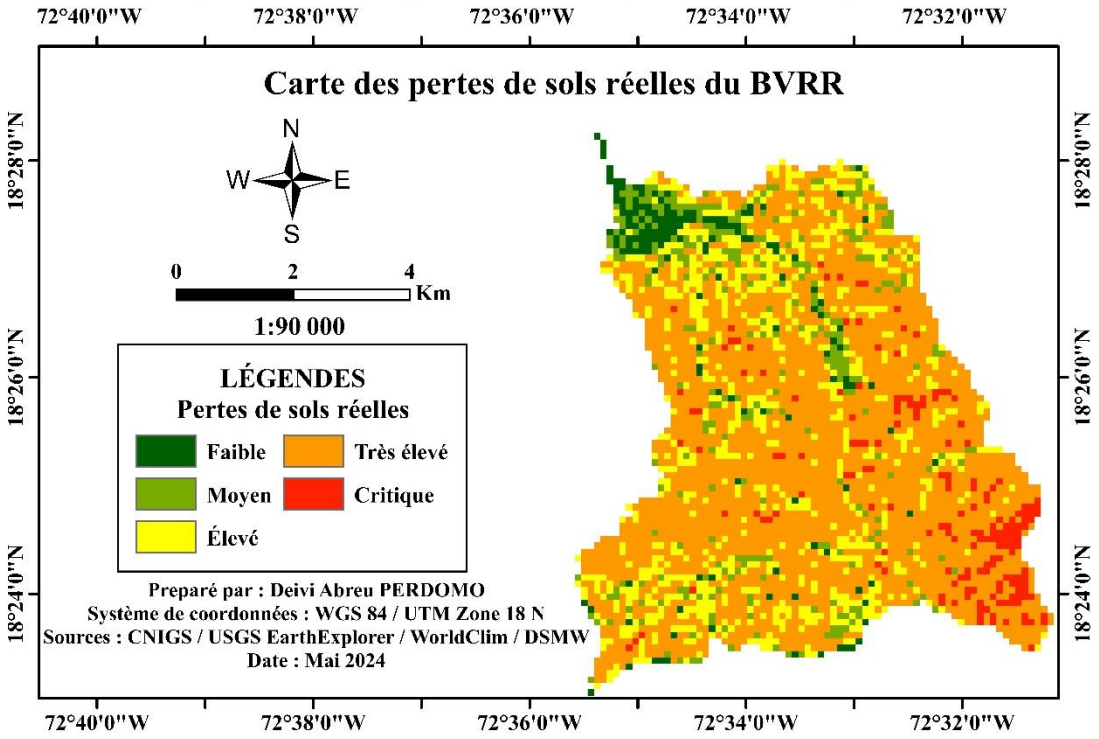


Figure 21 : Cartographie des pertes de sols actuelles du BVRR

5.7. Corrélation entre les facteurs de contrôle de l'érosion hydrique

Les facteurs de contrôle de l'érosion hydrique des sols ont été largement discutés à différentes échelles spatio-temporelles au cours de cette étude. Sur le bassin versant de la rivière Rouyonne, les résultats obtenus montrent une forte corrélation entre le facteur LS et les pertes en sols A avec un coefficient $r = 0.84$ (Tableau 20). Cela explique que l'érosion hydrique des sols est largement contrôlée par le facteur topographique. Maïga-Yaleu *et al.* (2015) et Zhang *et al.* (2019) ont examiné le mécanisme de l'érosion hydrique des sols sur des parcelles expérimentales situées respectivement sur le bassin versant de Tougou au Burkina Faso et le bassin versant de Liudaogou en Chine. Ces derniers ont observé que l'érosion hydrique des sols est fortement dépendante de la topographie et qu'une augmentation de l'ajustement du gradient de la pente agit significativement sur les pertes en sols et la mobilisation des sédiments.

L'érodibilité des sols constitue le second facteur influençant l'érosion hydrique des sols dans le BVRR avec un coefficient de corrélation $r = 0.44$. Cette érodibilité des sols tropicaux est associée aux propriétés physico-chimiques et à la nature lithologique des

formations (Roose, 1994). Avec un coefficient de corrélation $r = 0.36$, l'érosivité des pluies est le troisième facteur influençant l'érosion hydrique des sols dans le BVRR. Cette agressivité climatique est la résultante des mutations récentes associées au régime pluviométrique.

Tableau 20 : Matrice de corrélation des facteurs de contrôle de l'érosion hydrique

Facteurs	A	C	R	K	LS	P
A	1	0.21	0.36	0.44	0.84	-
C	0.21	1	-0.12	-0.1	-0.06	-
R	0.36	-0.12	1	0.26	0.27	-
K	0.44	-0.1	0.26	1	0.18	-
LS	0.84	-0.06	0.27	0.18	1	-
P	-	-	-	-	-	-

5.8. Délivrance en sédiments à l'exutoire du BVRR

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude montrent que le BVRR à un taux de délivrance en sédiments de 15.4% (Tableau 21). Cela signifie que 15.4% des pertes en sols du BV passent par le cours d'eau principal pour être acheminés vers l'exutoire. En effet, en moyenne, 12.57 tonnes de matériaux érodés par hectare annuellement passent par le lit de la rivière Rouyonne. Cela montre également que 84.6% des matériaux érodés vont être déposés à nouveau au niveau du BV, un peu plus loin de leur lieu de détachement. En moyenne annuelle, le BVRR peut délivrer 58374.01 tonnes de matériaux érodés jusqu'à l'exutoire.

Tableau 21 : Présentation de la délivrance en sédiments à l'exutoire du BVRR

Description	Unité	Valeur
Ratio de délivrance en sédiments (SDR)	%	15.4
Production moyenne en sédiments (A_{RUSLE})	tonne/ha/an	81.60
Dégradation spécifique (D)	tonne/ha/an	12.57

5.9. Propositions pour atténuer les pertes de sols au niveau du BVRR

La carte de l'érosion potentielle est essentielle pour déterminer le risque d'érosion maximale dans le secteur et pour établir différents scénarios de pertes de sols en fonction du changement d'usage des terres (Pradhan *et al*., 2012). Ceci permet de mieux prendre

les décisions d'aménagement et surtout pour réduire les pertes en sols. Bien qu'on ne peut agir que sur les facteurs C et P du USLE (ou du RUSLE), il existe toutefois plusieurs scénarios d'aménagement pouvant réduire la superficie couverte par les zones dont l'érosion hydrique est très élevée (Délusca, 1998). La valeur du facteur P, qui était 1 sans les structures de conservation des sols, sera donc inférieure à 1. Pour la présente étude, trois scénarios de réduction de pertes en sols ont été envisagés : des cultures en courbe de niveau, des bandes enherbées et des terrasses. Pour déterminer l'influence des différentes méthodes de protection de sol sur les pertes en sols, les valeurs du paramètre P en fonction de la pente (Tableau 22) telles que proposées par Shin (1999) et Karamage *et al*. (2016) ont été utilisées.

Tableau 22 : Valeurs du facteur P selon différentes pratiques de conservation de terre

Pente (^{0})	Valeurs du facteur P		
	Cultures en courbe de niveau	Bandes enherbées	Terrasses
< 7.0	0.55	0.27	0.10
7.0 – 11.3	0.60	0.30	0.12
11.3 – 17.6	0.80	0.40	0.16
17.6 – 26.8	0.90	0.45	0.18
> 26.8	1	0.50	0.20

Source : SHIN, 1999

5.9.1. Scénario 1 (Cultures en courbe de niveau)

Il s'agit simplement d'orienter les techniques culturales selon les courbes de niveau. En faisant cela, on oriente la rugosité du sol due aux mottes et aux petits creux, on les oriente perpendiculairement à la pente de telle sorte que l'on ralentit au maximum la nappe d'eau qui pourrait ruisseler (Sadiki *et al.*, 2004). Dans le cas du BVRR, cette méthode proposée par SHIN (1999) permettrait de réduire les pertes en sols de 10 à 45 % là où la pente est inférieure ou égale à 26.8^0, ce qui concerne environ 40 % de la superficie du BV. Ainsi, environ 60% de la superficie du BVRR conservent la valeur maximale du facteur P. Pour ce scénario, les valeurs de P varient entre 0.55 et 1 avec une moyenne de 0.93 pour tout le BVRR (Annexe 11). En appliquant les nouvelles valeurs du facteur P au modèle RUSLE pour le scénario 1, les pertes en sols seraient comprises entre 0.50 et 951.05 tonnes/ha/an, avec une moyenne de 77.84 tonne/ha/an (Figure 22). Cela représente une diminution moyenne des pertes en sols de 4.61 % par rapport aux pertes en sols réelles du BVRR. Cette situation s'explique par la présence de fortes pentes (supérieures à 20%)

au niveau du bassin versant. En effet, il a été déterminé que de telles structures ne sont efficaces que dans les zones où les pentes sont généralement inférieures à 10% (Wischmeier & Smith, 1978). Ces structures, pour jouer leur rôle de protection, doivent être régulièrement maintenues, ce qui implique une certaine disposition de main-d'œuvre et certains équipements élémentaires appropriés.

5.9.2. Scénario 2 (Bandes enherbées)

Ce sont des bandes de cultures pérennes (espèces fourragères, etc.) plantées en courbes de niveau afin de fractionner la longueur de la pente et ainsi diminuer l'énergie générée par les ruissellements qui arrachent les particules des sols (STITI M., 2009). Cette méthode proposée par SHIN (1999) permettrait de réduire les pertes en sols de 50 à 73 % en fonction de la pente sur tout le BVRR. Pour ce scénario, les valeurs de P varient entre 0.27 et 0.50 avec une moyenne de 0.47 (Annexe 12). En appliquant les nouvelles valeurs du facteur P au modèle RUSLE pour le scénario 2, les pertes en sols seraient comprises entre 0.24 et 475.52 tonnes/ha/an, avec une moyenne de 38.92 tonne/ha/an (Figure 22). Cela représente une diminution des pertes en sols de 52.3 % par rapport aux pertes de sols réelles du BVRR.

5.9.3. Scénario 3 (Terrasses)

Cette structure consiste essentiellement en une série de bandes horizontales ou quasi-horizontales s'étendant à travers du champ et soutenues par des talus abrupts (Délusca, 1998). Cette méthode, tout comme la méthode des bandes enherbées, permet de réduire les zones à haut risque d'érosion et d'accroître les zones à faible risque. La méthode de protection des sols par des terrasses est la plus appropriée pour réduire le risque d'érosion (Jean Nacishali, 2020). Dans le cas du BVRR, elle peut permettre de réduire les pertes en sol de 80 à 90 % pour un facteur P compris entre 0.1 et 0.2, avec une moyenne de 0.19 (Annexe 13). En appliquant les nouvelles valeurs du facteur P au modèle RUSLE pour le scénario 3, les pertes en sols seraient comprises entre 0.09 et 191 tonnes/ha/an, avec une moyenne de 15.56 tonne/ha/an (Figure 22). En effet, cela représenterait des pertes en sols plus de 5 fois inférieures aux pertes de sols actuelles, ce qui correspondrait à une baisse considérable de 81 % sur tout le BVRR.

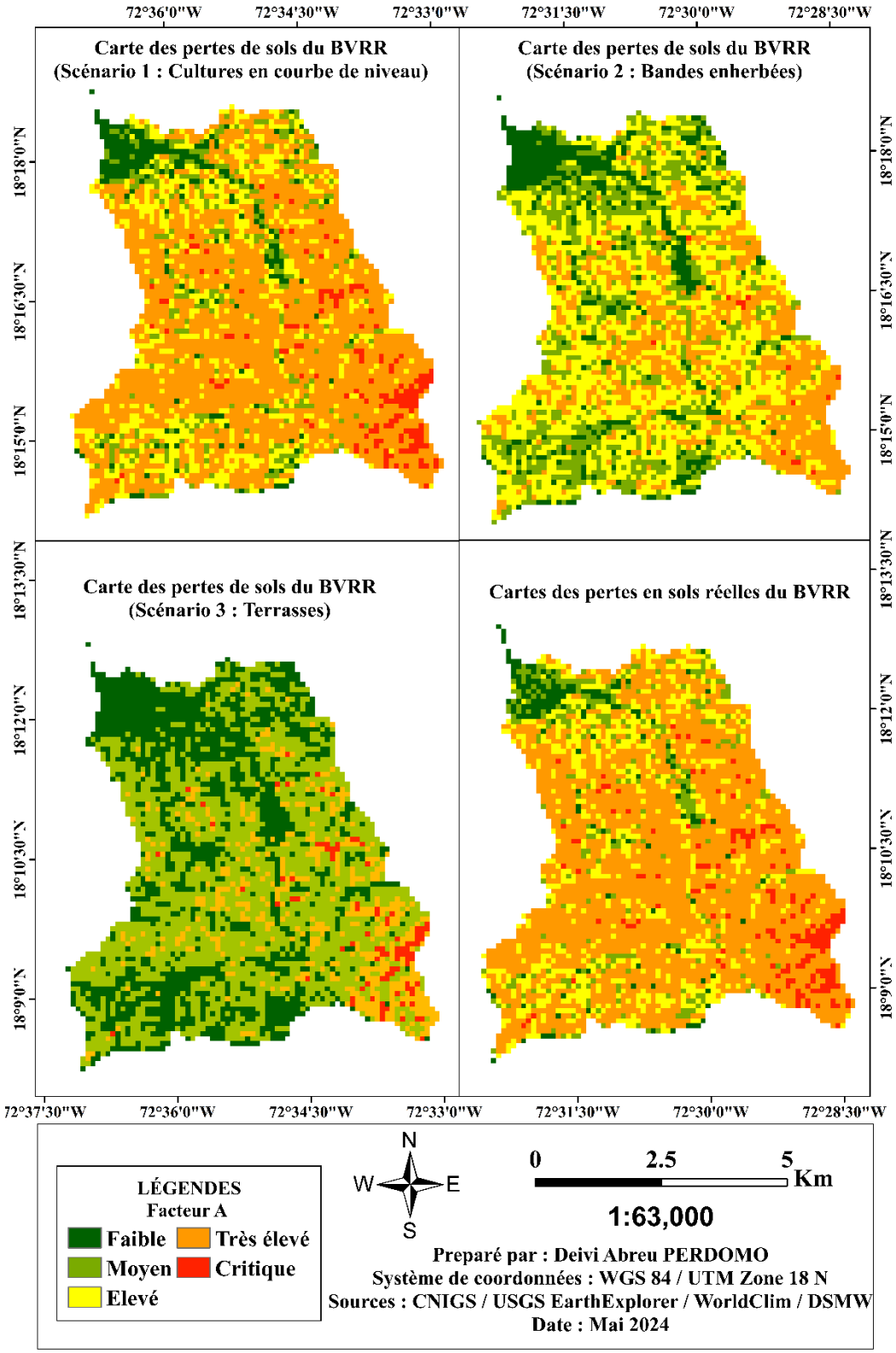


Figure 22 : Comparaison cartographique des 3 scénarios de réduction des pertes de sols avec les pertes de sols réelles du BVRR

6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1. Conclusion

Cette étude, dont l'objectif est d'analyser le transport sédimentaire dans la rivière Rouyonne et d'évaluer les pertes de sols dans son bassin versant, a permis d'estimer les pertes en sols subies annuellement par le bassin versant de la Rivière Rouyonne et de cartographier les zones à haut potentiel érosif dans le BV, en s'appuyant sur l'Équation universelle de pertes en sol (USLE) dans sa version Révisée (RUSLE), et des données de télédétection intégrées à un SIG.

Les résultats obtenus, sur la base de la classification par le Normal Difference Vegetation Index (NDVI), ont montré que 42% de la surface du bassin versant ne sont protégés par aucun couvert végétal. Par ailleurs, les pertes de sol, obtenue à partir de la méthode RUSLE, ont permis de montrer que le BVRR est soumis aux menaces de l'érosion hydrique dont le taux moyen est de 81.60 t/ha/an avec des taux de dégradation spécifique de 12.57 t/ha/an. Les analyses de ces résultats par rapport aux différents paramètres ont permis d'avoir une approche plus qualitative des facteurs amplifiant ce phénomène, et de classer ainsi par ordre d'influence chaque paramètre du modèle RUSLE. Ainsi, il a été démontré que le facteur topographique (facteur LS) est celui avec la plus grande influence sur les pertes de sols dans le BVRR, ce qui confirme la première hypothèse formulée.

Sur la base de ces résultats, trois scénarios de réduction de pertes de sols ont été proposés : cultures en courbes de niveau, bandes enherbées et terrasses. Néanmoins, l'étude a révélé que la méthode d'aménagement par des terrasses est la plus appropriée car elle pourra conduire à une réduction considérable de 81% des pertes de sols dans le BVRR.

Ces résultats révèlent l'intérêt de la télédétection et du SIG dans l'évaluation de la vulnérabilité à l'érosion dans les zones à fort gradient de pente qui est sans doute d'une grande utilité dans la recherche des solutions adéquates. Ce travail peut servir de modèle pouvant être généralisé sur de nombreux petits bassins versants qui souffrent de la même problématique en Haïti. Ainsi, la carte de vulnérabilité à l'érosion synthétisée pourrait constituer un document de base pour tous les programmes et les actions futures d'aménagement et de gestion prévus pour atténuer ce fléau et ses conséquences néfastes sur le fonctionnement des écosystèmes agro-pastoraux de la région. Cependant, la validité

des résultats obtenus peut être sujette à des discussions, car ces valeurs peuvent varier d'un modèle à l'autre selon les méthodes de calculs adoptées. Des améliorations peuvent être apportées dans le but d'optimiser la précision des résultats.

6.2. Recommandations

En fonction des contraintes et des résultats obtenus au cours de la réalisation de cette étude sur le bassin versant de la Rivière Rouyonne, il est primordial de formuler des recommandations pour une meilleure approche sur l'estimation et la compréhension de l'érosion hydrique.

- **Considérations générales**

Le choix approprié d'un modèle pour l'estimation des pertes de sols par BV est très complexe. Il faut tenir compte à chaque fois de plusieurs paramètres tels que : un modèle adapté au contexte local, les jeux de données disponibles, etc. Tenant compte de cela, il est primordial de développer des formules propres, en parallèles aux formules préexistantes, mieux adaptées au contexte local afin d'obtenir des résultats plus précis et plus satisfaisants. Dans le cadre du modèle RUSLE, il est aussi primordial que plus de chercheurs s'y intéressent, ce qui permettrait de développer des formules propres à chaque paramètre, pour différentes zones, particulièrement pour le facteur d'érosivité de la pluie (facteur R) qui est le plus difficile à appréhender et qui peut varier considérablement d'une région à une autre. De nombreux pluviomètres doivent être placés à différents endroits dans les bassins versants afin de mieux apprécier la répartition spatiale de la pluie, ce qui permettra d'avoir plus de précision dans le calcul du facteur R. De plus, des études approfondies peuvent être menées sur les effets des pratiques agricoles, des choix de cultures, sur la conservation des sols afin de pouvoir attribuer une valeur au facteur C correspondant à chaque cas spécifique. Des analyses de sol sur le BV sous-étude pourront renseigner sur la texture, la structure, le taux de matière organique et la perméabilité du sol, pour l'obtention de données plus précises sur l'érodibilité des sols.

- **Considérations spécifiques**

Spécifiquement, il faudrait faire des interventions directes sur la zone d'étude afin de réduire les pertes en sols du BVRR en prenant en compte trois aspects : l'aspect préventif,

l’aspect curatif et la participation communautaire. Il convient d'agir en priorité sur le premier (techniques culturales - prévention) car on considérera que dans une région à dominance agricole, il est à l'origine même de l'érosion, le second aspect n'intervenant que pour limiter les conséquences engendrées par le travail du sol. En fait, toute modification de la structure du sol entraîne une variation de sa stabilité dans le temps et de son comportement vis-à-vis des précipitations.

a) L'aspect agronomique (préventif) qui englobe les techniques culturales (couverture du sol, structure du sol)

Il faudrait installer sur les parcelles ayant des pentes comprises entre 10 et 30 % des structures antiérosives. Celles-ci pourraient être des bandes végétales et de haies vives constituées avec des espèces comme le vétiver, les ananas, l’herbe éléphant, etc. Pour augmenter leurs capacités antiérosives, les bandes végétales pourraient être installées sur des courbes effectuées avec des niveaux « A » ou autres instruments topographiques. Quant aux cultures vivrières, elles devraient être installées sur des billons entre les bandes végétales. Ces billons seraient également en courbes de niveau comme les bandes végétales. En même temps, il est recommandé de pratiquer l’agroforesterie sur les pentes comprises entre 30 et 60 % et d’installer des parcs naturels et des forêts de protection là où la pente dépasse 60 %.

b) L'aspect hydraulique (curatif) : aménagements divers...

Pour diminuer les conséquences négatives des eaux charriées par la rivière et les ravines du BVRR, des plantations de bambou, de vétiver peuvent être installées sur les berges pour lutter contre le sapement des berges des rivières et des ravines. Toutefois, en fonction de la gravité de la situation, des travaux en maçonnerie ou en gabions peuvent être nécessaires notamment dans les grosses ravines ou les berges des rivières.

c) Participation communautaire

La participation communautaire comme troisième aspect est tout aussi important que les deux premiers car elle permet une meilleure compréhension des enjeux locaux liés au phénomène d’érosion hydrique. Elle favorise la mise en place de solutions adaptées aux besoins spécifiques de chaque région, en impliquant les habitants dans le processus

décisionnel. De plus, cette participation renforce le sentiment d'appartenance à la communauté et encourage la responsabilisation individuelle et collective face à la préservation de l'environnement. En mobilisant les ressources humaines, matérielles et financières disponibles localement, elle rend les actions de lutte contre l'érosion hydrique plus efficaces et durables.

7. BIBLIOGRAPHIE

1. Agence de l'eau Loire-Bretagne. (2008). Le bassin versant - Cahier pédologique No. 5. 36 p.

2. AREAS. (2008). Brochure « Inondation, Érosion, Turbidité : un large choix de solutions pour les agriculteurs ». Chambres d'agriculture de la Seine Maritime et de l'Eure : 20 fiches. 62 p.

3. Ashouri, H., Hsu, K., Sorooshian, S., Braithwaite, D., Knapp, K. R., Cecil, L. D., & Prat, O. P. (2015). PERSIANN-CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multisatellite Observations for Hydrological and Climate Studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 96 p.

4. Banque mondiale. 1990. Gestion des ressources naturelles en vue d'un développement durable, 2005. Making poor Haitians count, 2005. Système d'exploitation et potentialités pour l'intensification de l'agriculture en Haïti.

5. Battany, M., & Grismer, M. (2000). Rainfall runoff and erosion in Napa Valley vineyards: effects of slope, cover and surface roughness. Hydrol. Processes 14. p. 1119-1129

6. Bellande, A. (2009). Impact socio-économique de la dégradation des terres en Haïti et interventions pour la réhabilitation du milieu cultivé. 73 p.

7. Benoit, C., & Gabriel, M. (2021). Guide technique pour la mesure et la modélisation du transport solide. 164 p.

8. Bonham-Carter, G. (1994). Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. The Netherlands, Elsevier Butterworth Heinemann. p. 398-402

9. Bou Kheir, R. (2002). Étude des risques d'érosion hydrique des sols par télédétection et SIG : Application à une région représentative du Liban. Thèse de doctorat en sciences biologiques fondamentales et appliquées. Paris: Institut national agronomique Paris-Grignon. 262 p.

10. Bou Kheir, R., Shaban, A., Girard, M., & MC., K. (2001). Impact des activités humaines sur l'érosion hydrique des sols dans la région côtière montagneuse du Liban. Science et changements planétaires / Sécheresse. p. 157-166

11. Bravard, J.-P., & Petit, F. (1997). Les cours d'eau : Dynamique du système fluvial. Armand Colin. 222 p.

12. Brown, L.,Abramovitw J., Bright C., Flaving C., Gardner G., Kane H., Platt A., Postel S., Roodman D., Sachs A., Starke L. (1996). L'état de la planète. Paris: Editions Economica. 10 p.

13. Burrough, P. (1987). Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. 3 p.

14. Chevallier, P. (1995). Érosion, transport solide et sédimentation dans le cycle continental de l'eau : Cours pour le Cycle Postgrade interuniversitaire en hydrologie et hydrogéologie. Montpellier. 77 p.

15. Chevallier, P., Planchon, O., & Quinn, P. (1988). La modélisation hydrologique. 17 p.

16. Comité Interministériel d'Aménagement du Territoire. CIAT. (2011). Guide méthodologique pour les études de diagnostic des bassins versants. 52 p.

17. Délusca, K. (1998). Estimation de l'érosion hydrique des sols à l'aide de l'Équation Universelle de Perte de Sol assistée d'un Système d'Information Géographique : Le cas du bassin versant de la ravine Man, Haïti. 122 p.

18. Démangeot, J. (2000). Les milieux naturels du globe. 364 p.

19. Dennis, F. (2008). La dégradation des sols dans le monde.

20. Derrau, M. (1974). Précis de géomorphologie 6e Edit. . Masson et Cie. 453 p.

21. Desmet, & Govers, P. (1996). GIS procedure for automatically calculating the ULSE LS factor on topographically complex landscape units. J. Soil Water Conserv. p. 427-433

22. Diello, P., Paturel, J.-E., Mahe, G., Barbier, B., Karambiri, H., & Eric, S. (2006). Méthodologie et application d'une démarche de modélisation hydrologique prenant en compte l'évolution des états de surface en milieu sahélien d'Afrique de l'ouest. 9 p.

23. DINEPA. (2014). Rapport de l'étude préparatoire du projet de rétablissement du système d'approvisionnement en eau pour la reconstruction de la ville de Léogâne en République d'Haïti. 159 p.

24. Dorcilien, D. (2008). Diagnostic de la dégradation du bassin versant de la rivière Rouyonne (Léogâne) en vue de son aménagement, Mémoire de fin d'études. Leogane. 65 p.

25. Duchaufour, P. (1997). Abrégé de pédologie : sol, végétation, environnement. Paris: 5e éd, Masson. 220 p.

26. El KHaki, E. M. (2015). Apport de la modélisation hydrologique dans la caractérisation de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau au niveau du bassin versant de l'Oued El Abid (Haut Atlas Central, Maroc). 56 p.

27. El Orfi et al. 2020. Comparaison des données de précipitation satellitaires avec les données mesurées dans le bassin versant de l'Oued Oum Er Rbia en amont du barrage Ahmed El Hansali (Maroc). 7 p.

28. Evens Emmanuel, & Per Lindskog. (2000). Regards sur la situation des ressources en eau de la République d'Haïti. p. 27

29. Fick, S., & Hijmans, R. (2017). WorldClim 2 : nouvelles surfaces climatiques à résolution spatiale de 1 km pour les zones terrestres mondiales. Revue internationale de climatologie. 37, p. 4302-4315

30. Fleming, G. (1977). The sedimentation problem. Un. Strath Clyge. pp. 10-81

31. Fournier, F. (1960). Climat et érosion. La relation entre l'érosion du sol par l 'eau et les précipitations atmosphériques. Paris: Presses universitaires de France. 206 p.

32. Ganasri, B., Ramesh H. 2015. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin, Geoscience Frontiers. 9 p.

33. Gashaw, T., Tulu, T., & Argaw, M. (2017). Erosion risk assessment for prioritization of conservation measures in Geleda watershed, Blue Nile basin, Ethiopia, Environmental Systems Research . 14 p.

34. Geffrard, F. A. (2022). Contribution à l'effort de modélisation du charriage dans la rivière Rouyonne (Commune de Léogâne), Mémoire de fin d'études. Léogâne. 73 p.

35. Georges, Y. (2008). Contribution à l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de la rivière Grise pour un meilleur plan d'aménagement, Mémoire de master, Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique. 80 p.

36. Gil, N. (1986). Aménagement des bassins versants et conservation des sols et des eaux. In bulletin pédologique de la FAO, pp. 13-18.

37. Guillot, B. 1994. Problèmes de validation des méthodes d'estimation des précipitations par satellite en Afrique Intertropicale. 232 p.

38. Hassan, H. E., Touchart, L., & Faour, G. (2013). La sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique dans l'ouest de la Békaa au Liban. M@ppemonde. 17 p.

39. Hurni, H. (1985). Erosion-productivity-conservation systems in Ethiopia. In: Paper presented at the 4th international conference on soil conservation, 3-9 Nov. 1985. Maracacy, Venezuela. 20 p.

40. Jean Nacishali, N. (2020). Cartographie de l'érosion hydrique des sols et priorisation des mesures de conservation dans le territoire d'Uvira (République démocratique du Congo). 35 p.

41. Jean Pierre, J. K. (2022). Influence de l'utilisation des sols sur les risques érosifs dans le Bassin Versant Rivière Grise : évaluation et propositions d'amélioration. Mémoire de fin d'études. 95 p.

42. Khan, S. I., Hossain, F., Yilmaz, K. K., & Hong, Y. (2011). Satellite-based global rainfall estimation for river basin scale applications of water resources management in the developing world. Advances in Water Resources, 34(3), 403-416.

43. Konate L. et al. 2020. Évaluation du niveau de significativité des données satellitaires de pluies TAMSAT en comparaison aux données de pluies au sol : Cas du district d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire). 12 p.

44. Larras, J. (1965). L'aménagement des cours d'eau. Presses universitaires de France. 242 p.

45. Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Bardet, C., & Daroussin, J. (. (2002). L'érosion hydrique des sols en France. Rapport INRA et IFEN. 106 p.

46. Marc-Donald, V. (2023). Haïti : entre 12 à 17 % de forêts de 2000 à 2020 (Vol. 1). Centre de Recherche Intégrée et Scientifique d'Haïti (CRISH). 9 p.

47. MARNDR. (2006). Préparation du Programme national de gestion des bassins versants. Document Technique : Diagnostic, actions et zones prioritaires. 87 p.

48. MARNDR. (2010). Composante aménagement des bassins versants et foresterie dans Haïti : Plan national d'investissement agricole. 17 p.

49. MARNDR-DDAO. (2014). Programme des travaux sur les rives de la rivière Rouyonne.

50. Mathieu, C. (2020). La dégradation des sols en France et dans le monde, une catastrophe écologique ignorée. Planet Terre. pp 412-425

51. Morschel, J., & Fox, D. (2004). Une méthode de cartographie du risque érosif : application aux collines du Terrefort Lauragais. M@ppemonde, 12 p.

52. MPCE. (2011). Projet de la réhabilitation d'urgence et de l'appui à la reconstruction pour la République d'Haïti : Rapport final. 62 p.

53. Musy, A., & Higy, C. (2004). Hydrologie 1 : Une science de la nature / Une gestion sociétale. PPUR presses polytechniques. 314 p.

54. Mutiviti, P. G. (2004). Indicateurs de la qualité physique des sols en relation avec l'érosion hydrique : impact des pratiques culturales. Louvain-la-Neuve. 72 p.

55. Négrel, P., & Rigollet, C. (2011). Dynamique de l'eau, de l'érosion à la sédimentation. 9 p.

56. Nguyen, H. T., Duchesne, S., Villeneuve, J.-P., Toumbou, B., & Kokutse, N. (2018). Modélisation du régime hydrologique à l'échelle du bassin versant dans le cas de données restreintes : cas de la rivière Cau au Vietnam. Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE). 16 p.

57. Nouvelot, J. F. (1992). Érosion mécanique, transport solide et sédimentation dans le cycle de l'eau. Montpellier. 126 p.

58. Payet, E. (2009). Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du Sud-Ouest de Madagascar : le Fiherenana, Mémoire de master 2. 26 p.

59. PNUD. 1990. Haïti : Les pays les moins avancés. Port-au-Prince, Haïti.

60. PNUD. (1998). La gestion de l'environnement en Haïti : Réalités et perspectives. (Vol. UNOPS/PNUD/HAI/92/001). Haïti Econet. Edition spéciale. 244 p.

61. PNUD. (2012). Projet de lancement des travaux d'aménagement de la rivière Rouyonne à Léogâne. Haïti Press Network.

62. Pongsai, S., Dietrich, S. V., Rajendra, P. S., Roberto, S. A., & Eiumnoh, A. (2010). Calibration and validation of the Modified Universal Soil Loss Equation for estimating sediment yield on sloping plots: A case study in Khun Satan catchment of Northern Thailand. Tailand: Can. J. Soil Sci. 13 p.

63. Recking, A. (2020). Équations et concepts utilisés pour le calcul du transport solide en rivières. 83 p.

64. Recking, A. (2008). PGRN. Évaluation des formules de transport solide en rivières avec prise en compte de l'échelle temporelle. Rapport Final. 41 p.

65. Reid, K., Wilcox, B., Breshears, D., & MacDonald, L. (1999). Runoff and erosion in a Pinon-Juniper woodland: influence of vegetation patches. Soil Sci. Soc. Am. J. 63 p.

66. Renard, K., Foster, G., Weesies, G., & Porter, J. (1991). RUSLE: revised universal soil loss equation. J Soil Water Conserv. 22 p.

67. Renard, K., Foster, G., Weesies, G., Mccool, D., & Yoder, D. (1996). Predicting Soil Erosion by Water – A guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US Department of Agriculture. Agriculture Handbook N° 703. 403 p.

68. Rizvi, R. H., Singh, R., Yadav, R. S., Datt, K., Khan, I. A., & Dhyani, S. K. (2009). Spectral analysis of remote sensing image for assessment of agroforestery areas in Yamunanagar District of Haryana. 7 p.

69. Roose, E. (1991). Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone soudano-sahélienne. In « La jachère en Afrique de l'Ouest » Floret, C. et Serpantié, G. édit. scient. Montpellier: ORSTOM, séries olloques. 12 p.

70. Roose, E. (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau et des sols (Vol. 70). (B. F. Sols, Éd.) Rome. 438 p.

71. Sadiki, A., Bouhlassa, S., Saïdati., Auajjar, J., Faleh, A., & Macaire, J. (2004). Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Équation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab. Rabat: Bulletin de l'Institut Scientifique, section Sciences de la Terre, n° .26. 11 p.

72. Sahani, M. (2011). Le contexte urbain et climatique des risques hydrologiques de la ville de Butembo (Nord-Kivu/RDC), Thèse Université de Liège, Belgique. 300 p.

73. Saint-Jean, O. (2017). Caractérisation des sous-bassins versants des principaux affluents du fleuve de l'Artibonite en amont du barrage de Canneau et du lac de Péligre, Mémoire de fin d'études. 64 p.

74. Saint-Jean, O. (2021). Rapport d'avancement des travaux de recherche doctorale. Version préliminaire. Laboratoire Traitement des Eaux et Pollution - Université Libre de Bruxelles. 85 p.

75. Saint-Jean, O. (2023). Rapport d'état d'avancement des travaux de terrain. Projet RISCRUE, UEH-ULB. 12 p.

76. Smucker, G., Bannister, M., D'Agnes, H., Gossin, Y., Portnoff, M., Timyan, J. C., Toussaint, J. (2006). Vulnérabilité environnementale en Haïti : Conclusions et Recommandations. USAID. 150 p.

77. SNGRD. 2023. Intempéries des 02 et 03 juin 2023. Rapport de situation #2. Centre d'opérations d'urgence national, Système National de Gestion des Risques de Désastres. 9 p.

78. Su, F., Hong, Y., & Lettenmaier, D. P. (2008). Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. Journal of Hydrometeorology, 9(4), 622-640.

79. Sydne, B. (2019). Caractérisation biophysique du bassin versant de la rivière Courjolle (Arcahaie, département de l'Ouest d'Haïti) en vue des propositions d'aménagement, Mémoire de fin d'études.

80. Taleb N. & Gabani M. 2019. Évaluation et calage des produits de précipitations satellitaires Application au Nord Est Algérien. 92 p.

81. UNESCO. (1986). Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants. 152 p.

82. Weissenberger, S. (2018). Haïti : vulnérabilité, résilience et changements climatiques, Haïti perspectives. 8 p.

83. Williams, J. (1995). The EPIC model, in Computer Models of Watershed Hydrology, edited by V. P. Singh,. Colorado, USA. 1144 p.

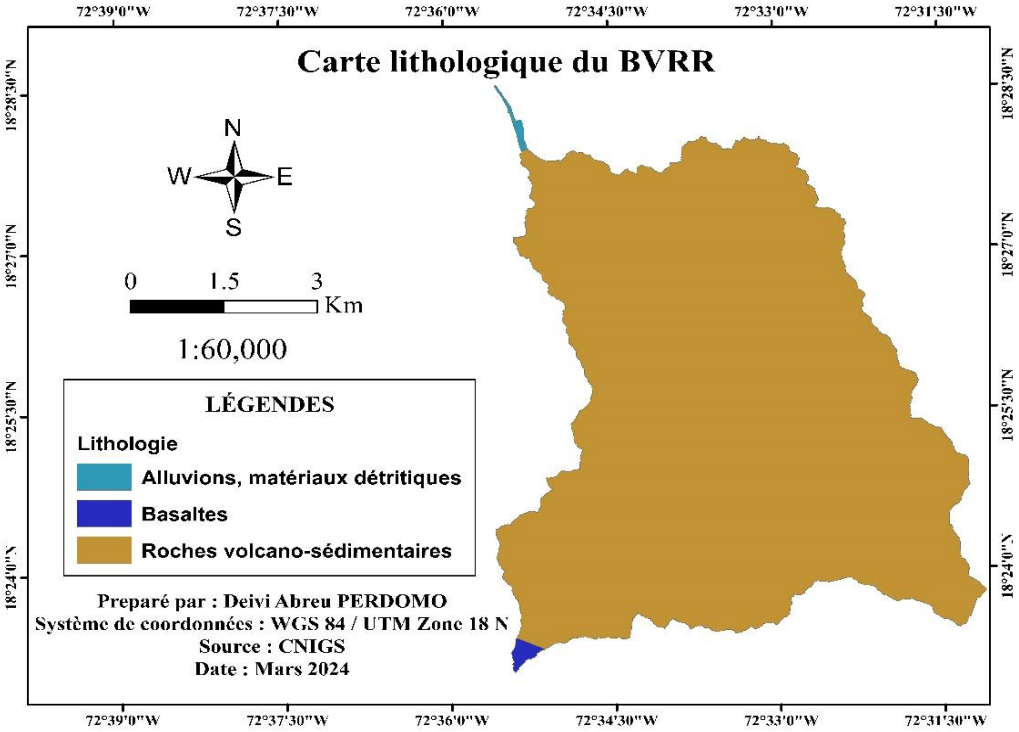
84. Wischmeier, V. H., & Smith, D. (1976). Use and misuse of the universal soil loss equation. J. Soil and Water Cons. 31 p.

85. Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses - Guide to Conservation Planning. Washington, Department of Agriculture Science and Education Administration,Washington, District of Columbia USA. U.S..: Agriculture Handbook, n° .537. 67 p.

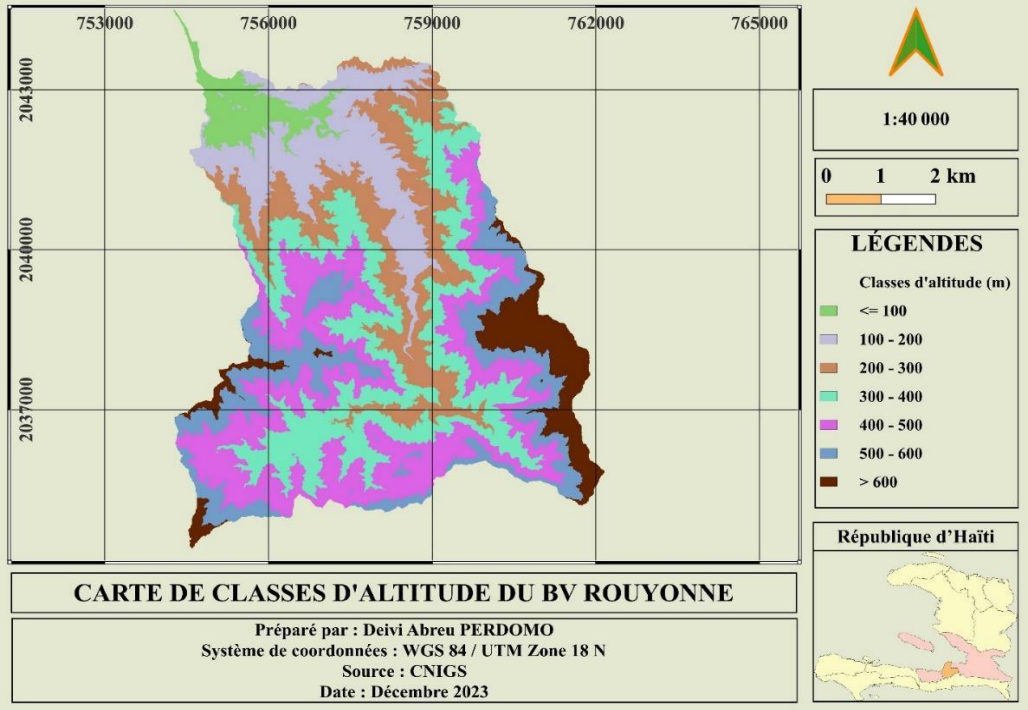
86. Zidane R. 2022. Exploration et validation des données climatiques CHIRPS. 86 p.

8. ANNEXES

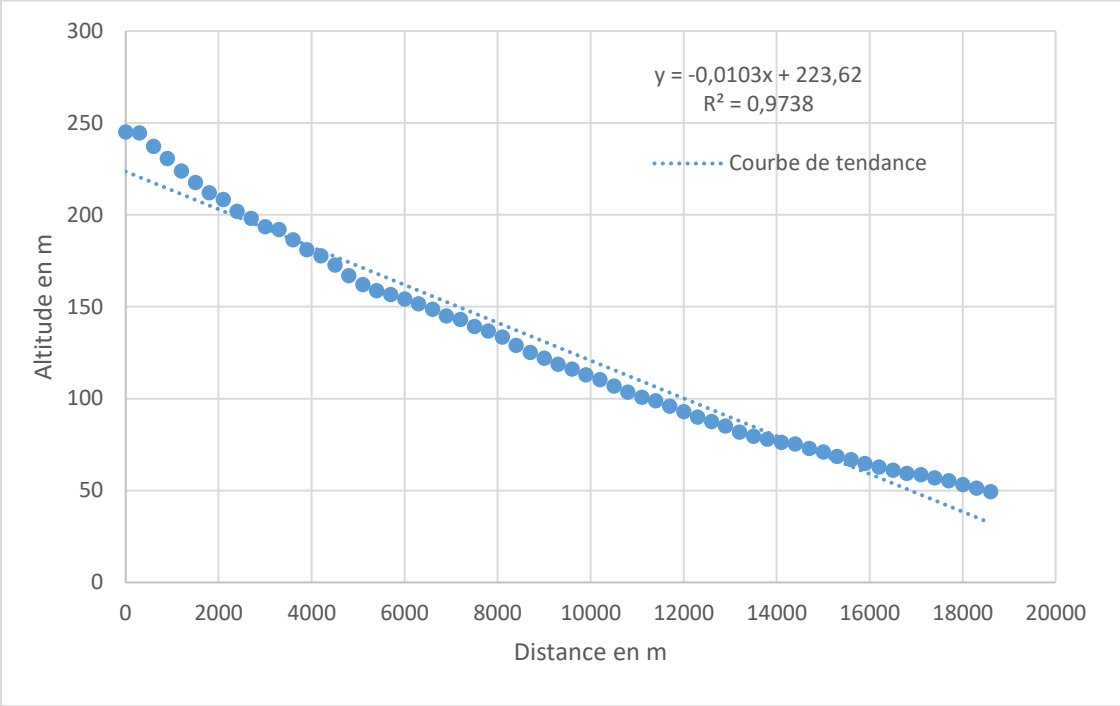
Annexe 1 : Carte lithologique du BVRR



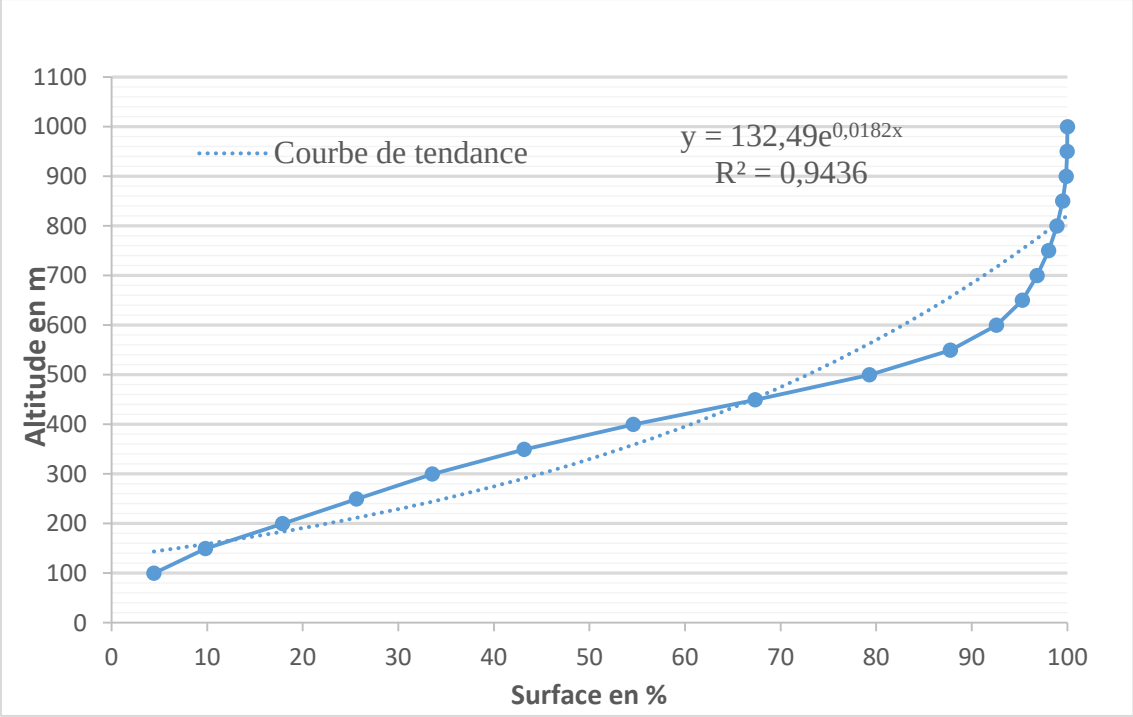
Annexe 2 : Carte des classes d'altitude du BVRR



Annexe 3 : Profil en long de la partie amont de la rivière Rouyonne



Annexe 4 : Présentation de la courbe hypsométrique



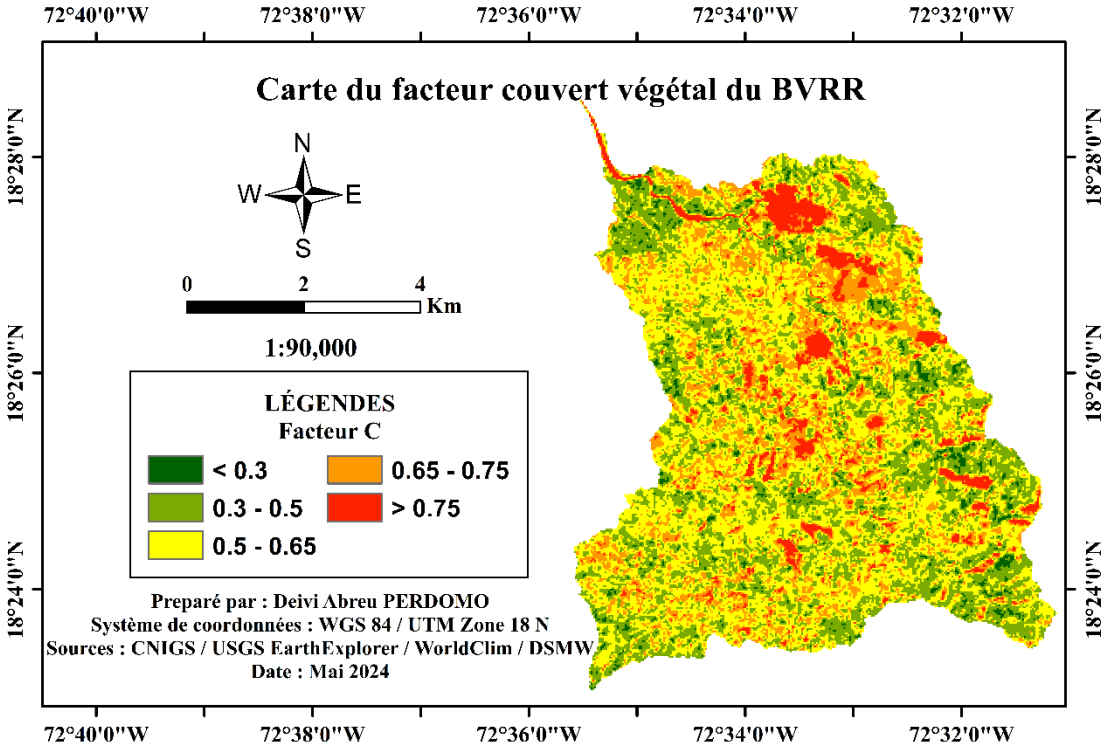
Annexe 5 : Récapitulatif des caractéristiques du BVRR

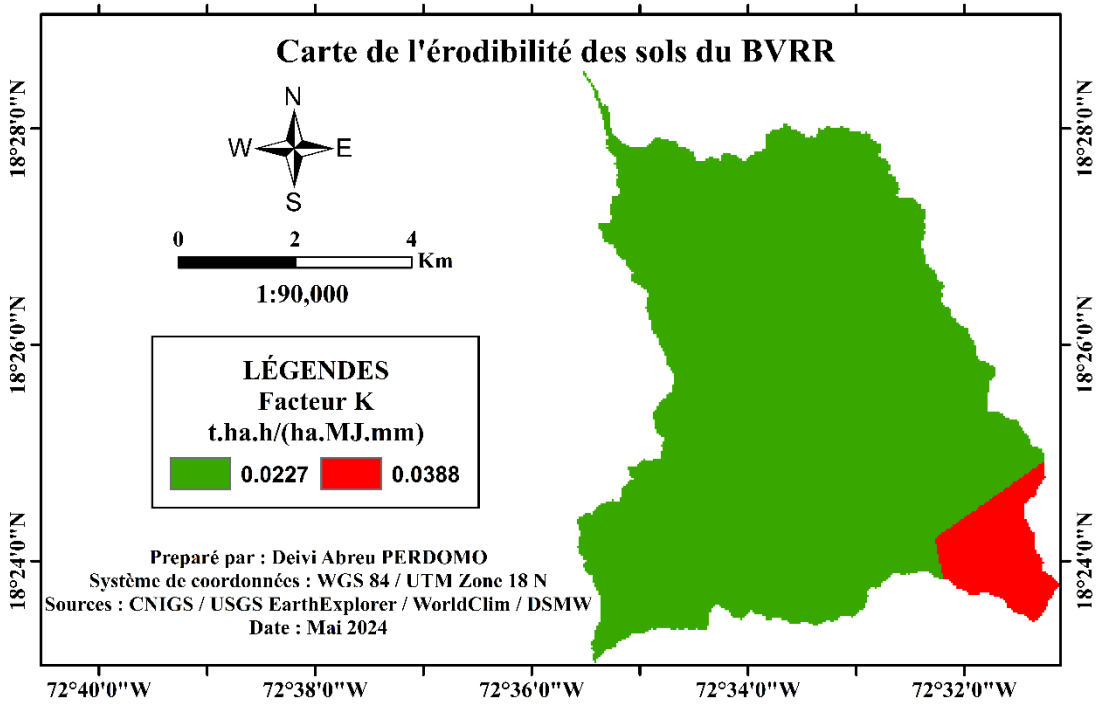
Caractéristiques	Paramètres	Valeurs	Unité
Géométriques	**Surface**	46.45	Km^2
	Périmètre	52.31	Km
	Largeur moyenne du BV	2.74	Km
	Indice de Gravélius	2.15	---
	Longueur rectangle équivalent	24.24	Km
	Largeur rectangle équivalent	1.92	Km
	Longueur du cours d'eau principale	12.33	Km
Topographiques	**Dénivelé spécifique**	190.43	m
	Coefficient orographique	39.39	---
	Pente maximale	83.00	%
	Pente moyenne	30.00	%
	Indice de pente global	26.33	m/m
	Longueur totale des courbes de niveau	76.57	km
	Altitude max	956.00	m
	Altitude min	50.00	m
	Altitude moyenne	323.00	m
	Altitude médiane	380.00	m
	Z (95%)	645.00	m
	Z (5%)	105.00	m
Hydrographiques	**Longueur du talweg principal**	12.33	Km
	Longueur totale des cours d'eau	97.28	Km
	Z max	245.00	m
	Z min	50.00	m
	Pente moyenne du cours d'eau principal	15.82	%
	Densité de drainage	2.09	Km/Km
	Ordre du bassin versant	4.00	---
	Nombre de cours d'eau	51.00	---
	Densité hydrographique	1.10	n/Km^2
	Nombre de drains d'ordre 1	290.00	---
	Coefficient de torrentialité	13.08	---
	Temps de concentration	2.97	heures

Annexe 6 : Récapitulatif sur les résultats des facteurs de l'érosion hydrique

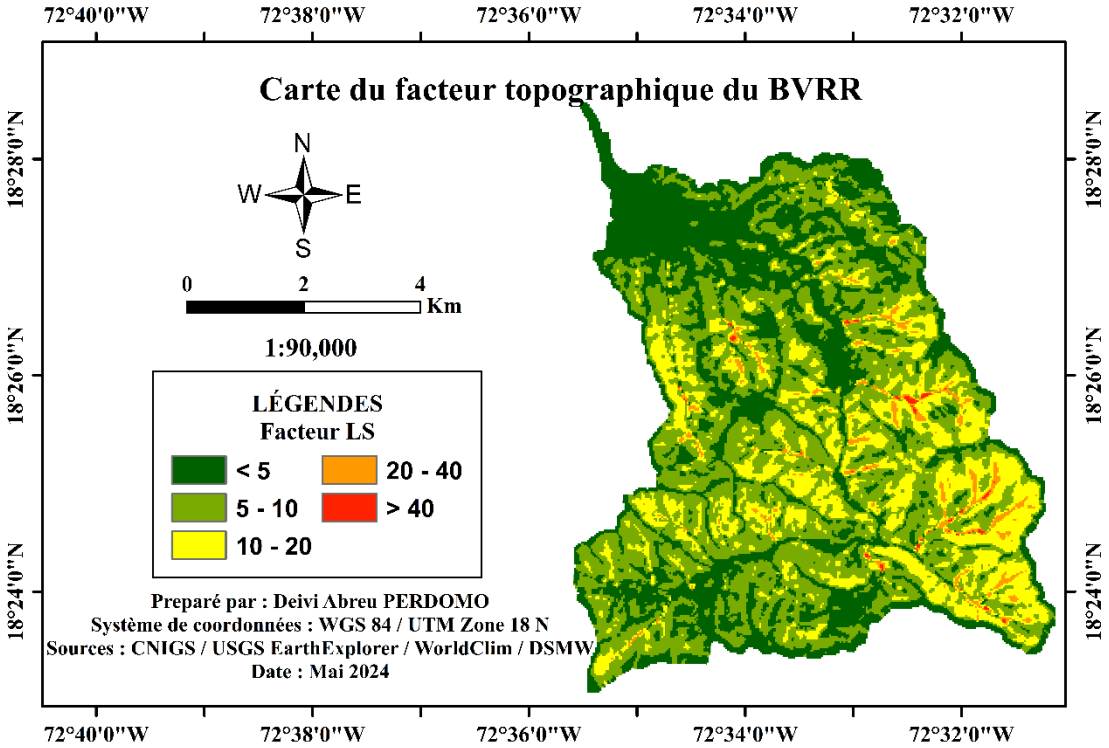
	Symbole	**Valeurs moyennes**	**Unité**
Érosivité de la pluie	R	782.62	MJ.mm/(ha.h.an)
Érodibilité des sols	K	0.0237	Tonne.ha.h/(ha.MJ.mm)
Couvert végétal	C	0.561	---
Longueur de la pente et inclinaison	LS	7.12	---
Pratiques anti érosives	P	1	---
Pertes en sols normales	A normale	0.14	Tonne/ha/an
		643.45	Tonne/an
Pertes en sols potentielles	A potentielle	147.54	Tonne/ha/an
		685298.33	Tonne/an
Pertes en sols actuelles	A actuelle	81.60	Tonne/ha/an
		379052.02	Tonne/an

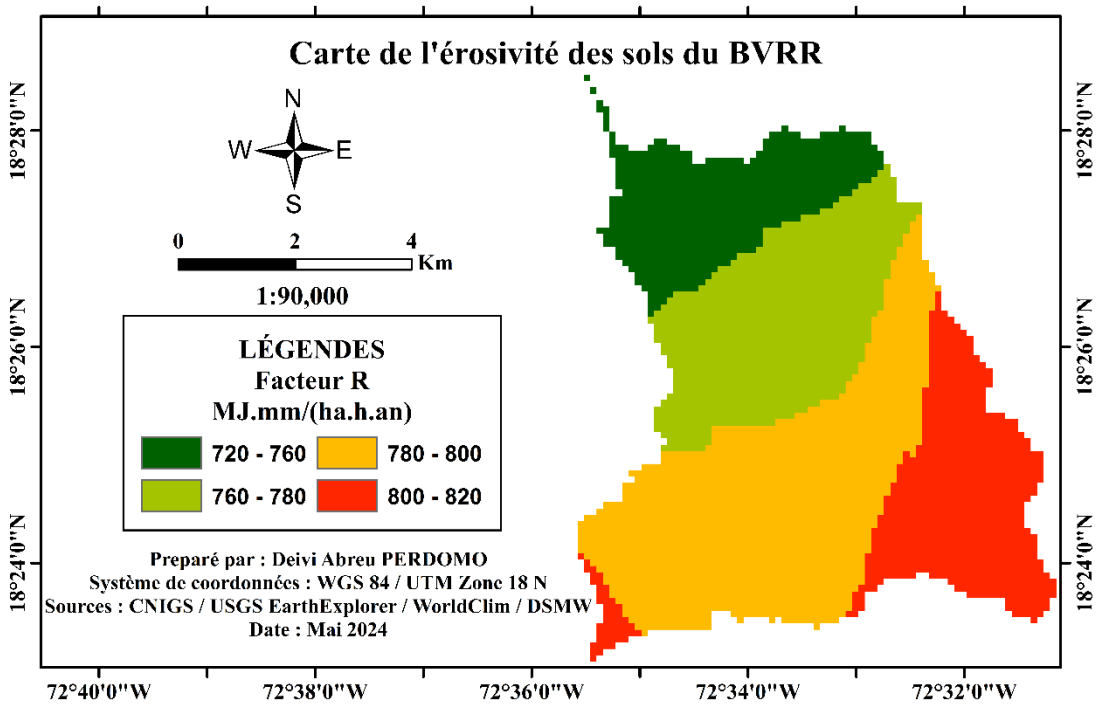
Annexe 7 : Cartographie des facteurs C et K dans le BVRR



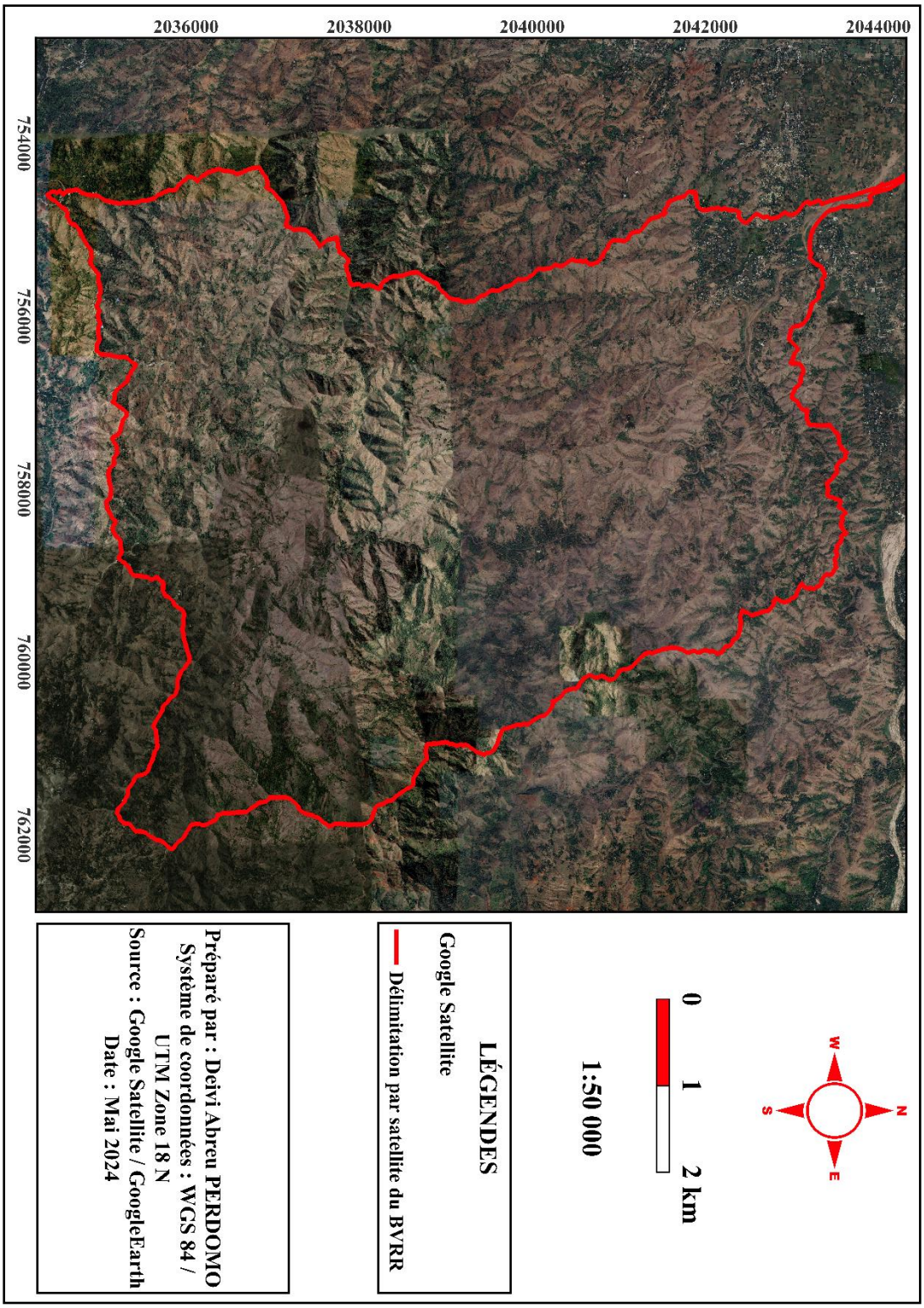


Annexe 8 : Cartographie des facteurs LS et R dans le BVRR

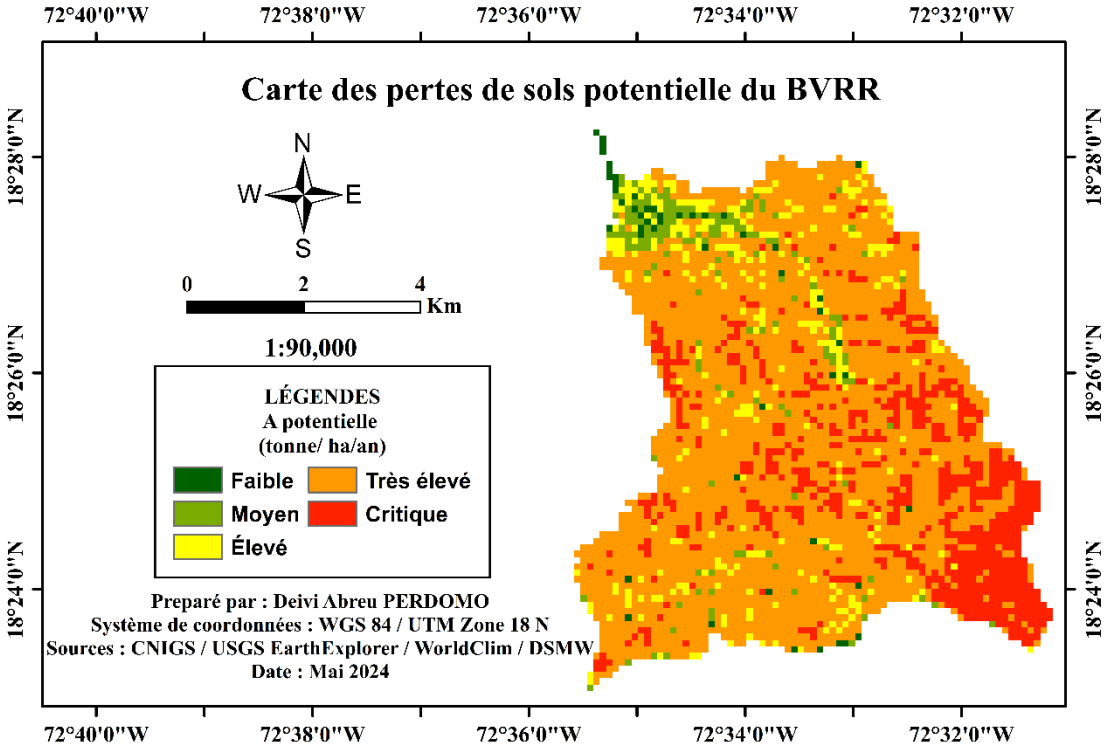


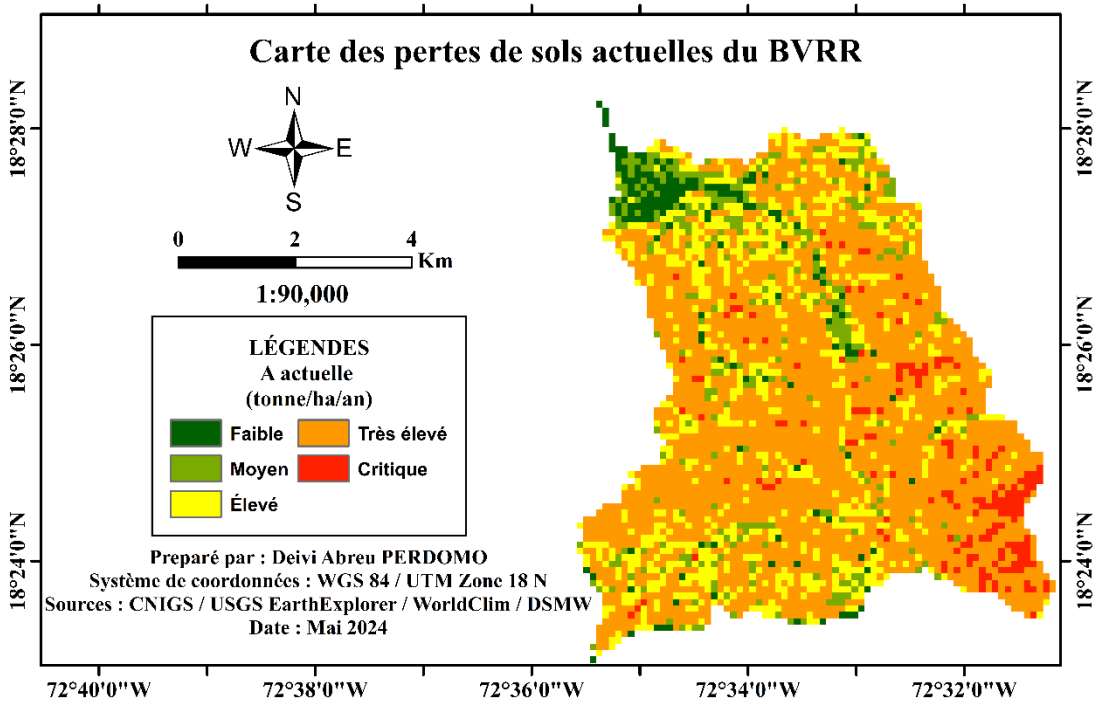


Annexe 9 : Carte avec image satellitaire utilisée pour l'analyse du facteur P

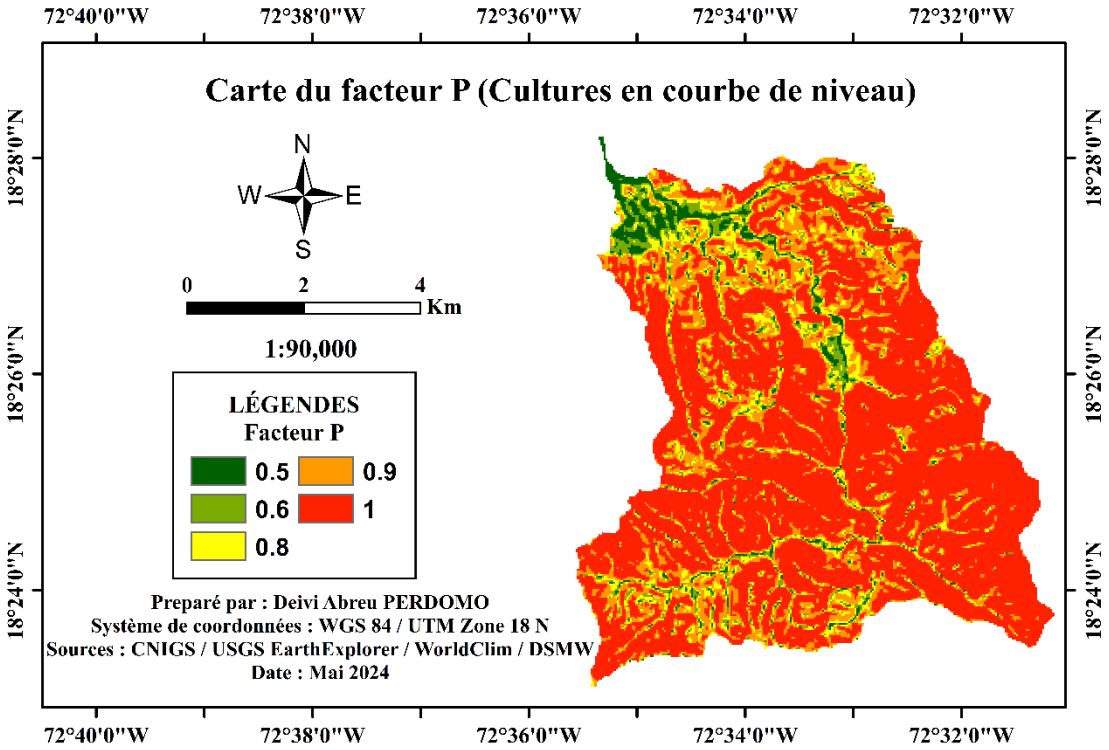


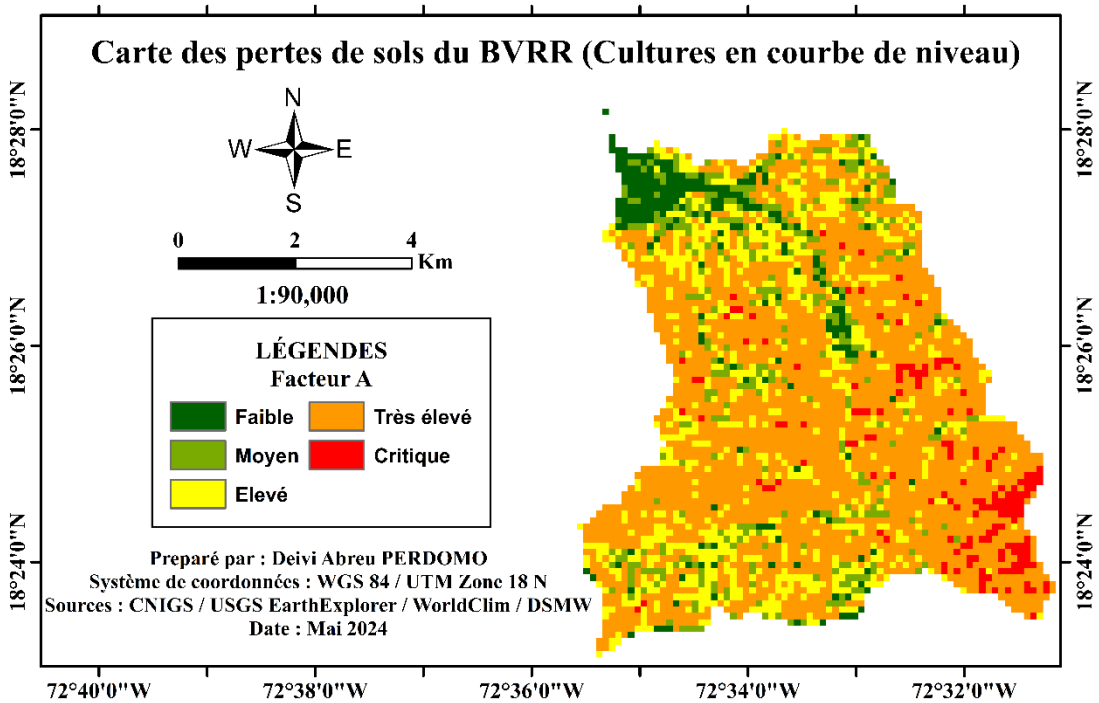
Annexe 10 : Cartographie des pertes en sols actuelles et potentielles dans le BVRR



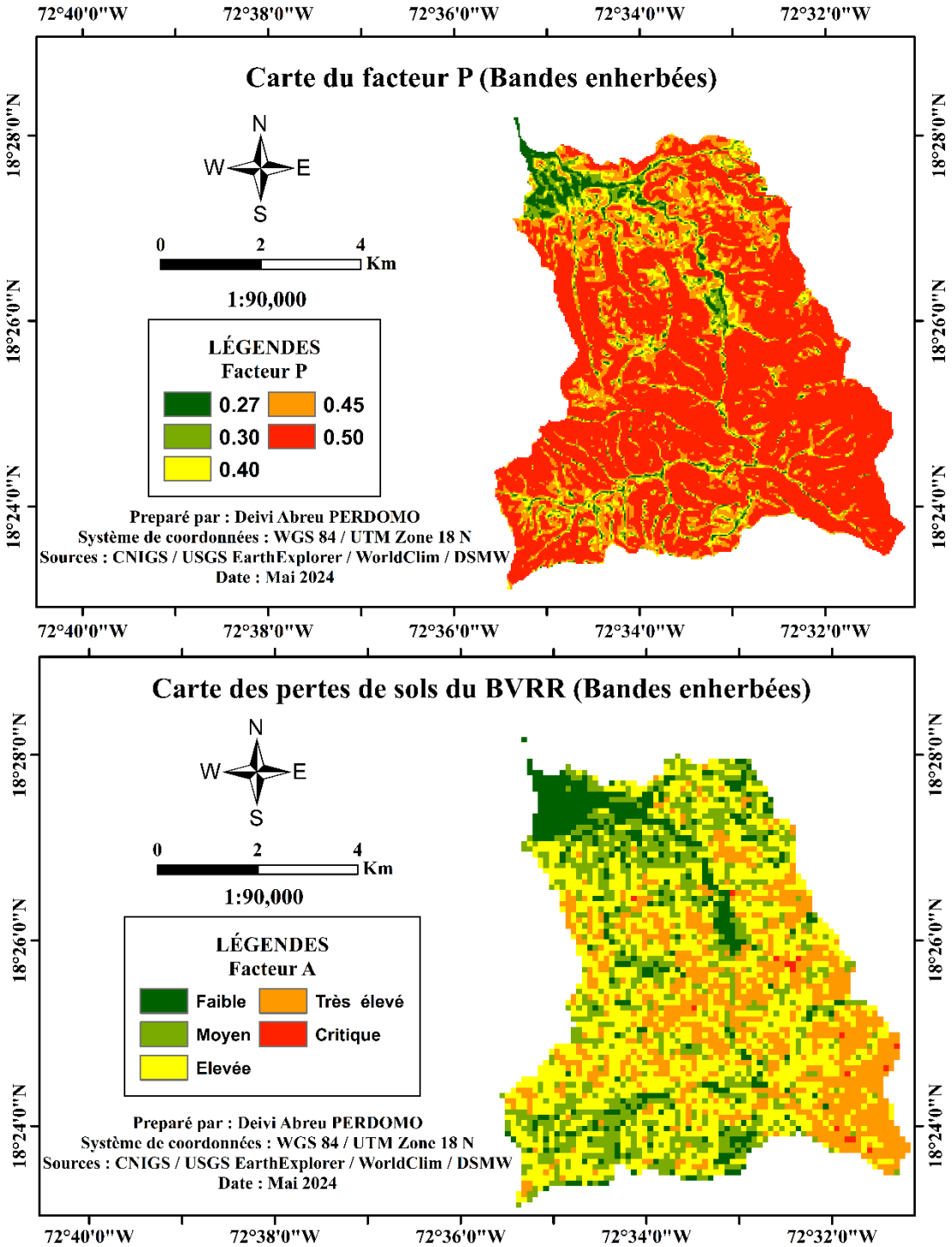


Annexe 11 : Cartographie du facteur P et des pertes de sols pour le scénario 1 (Cultures en courbe de niveau)

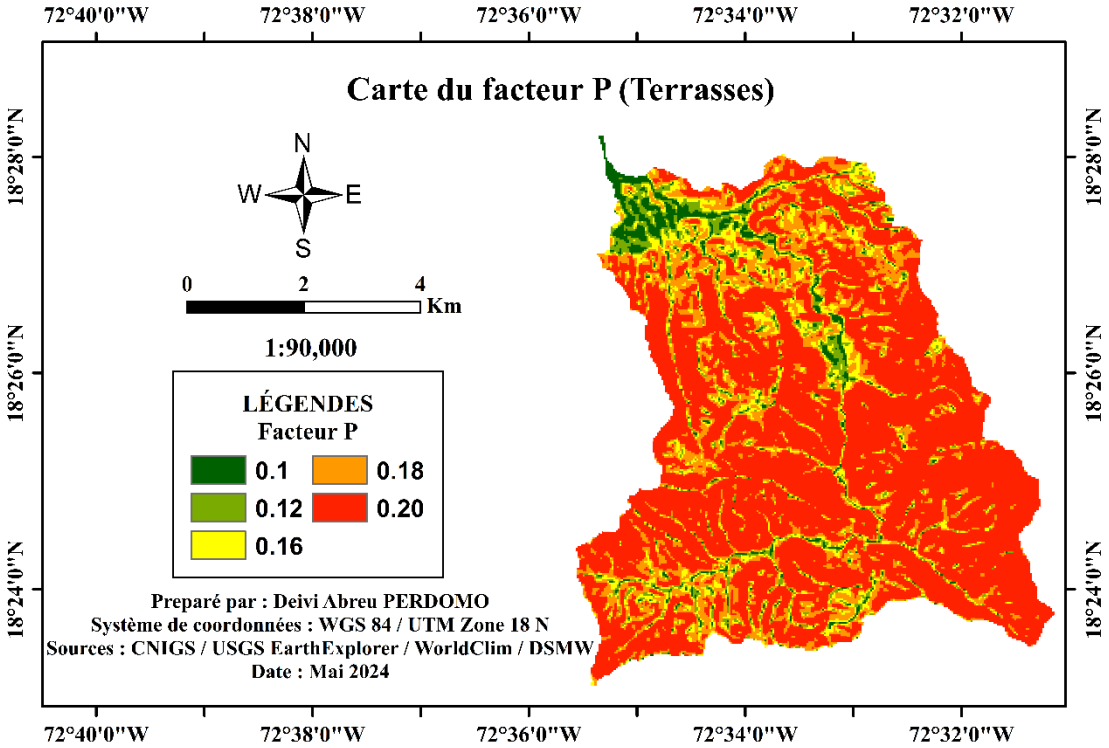


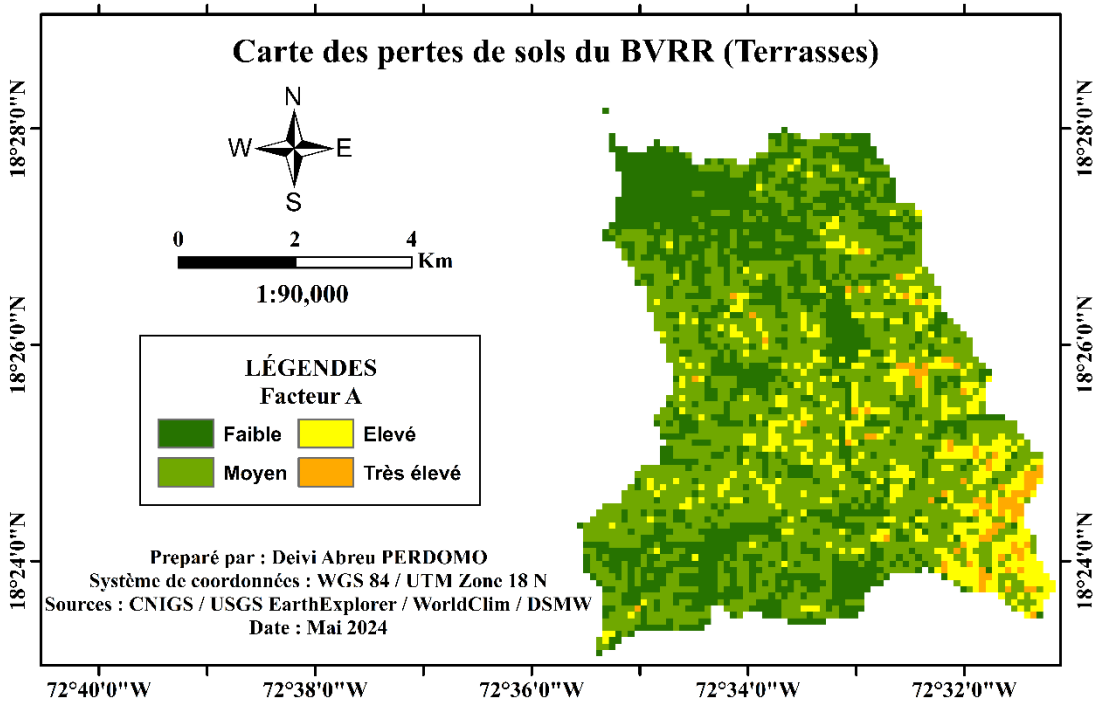


Annexe 12 : Cartographie du facteur P et des pertes de sols pour le scénario 2 (Bandes enherbées)



Annexe 13 : Cartographie du facteur P et des pertes de sols pour le scénario 3 (Terrasses)





Annexe 14 : Données pluviométriques de UHM pour la commune de Léogâne (1960-1987)

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
1960	34.6	27.0	117.0	377.0	135.0	281.0	160.1	142.5	231.7	66.5	94.0	27.0	1693.4
1961	33.6	128.4	87.6	153.8	174.3	150.0	132.0	181.4	163.6	165.7	156.1	5.8	1532.3
1962	10.9	34.5	17.2	159.0	135.5	139.9	48.8	262.5	66.7	276.4	51.9	14.9	1218.2
1963	60.5	83.3	153.8	58.1	275.6	86.3	168.8	146.9	113.4	355.9	91.8	31.3	1625.7
1964	2.0	49.8	63.0	283.3	71.9	154.5	201.9	170.7	148.1	168.0	46.7	8.0	1367.9
1965	28.0	7.5	52.2	133.7	245.1	109.8	139.4	159.5	220.2	173.2	152.8	0.0	1421.4
1966	112.2	10.0	77.5	77.9	321.1	117.8	180.7	78.0	228.2	154.3	82.8	54.0	1494.5
1967	22.4	53.3	53.0	15.9	164.4	56.9	189.4	183.3	221.3	232.3	126.5	24.4	1343.1
1968	3.0	45.5	90.7	27.8	197.4	197.0	156.0	144.6	91.8	87.4	53.2	30.7	1125.1
1969	21.9	19.2	19.9	302.3	151.9	164.3	53.5	245.8	153.9	228.5	77.0	18.8	1457.0
1970	39.9	10.3	10.4	86.1	164.1	116.5	64.2	155.2	323.0	145.3	59.7	0.0	1174.7
1971	124.9	98.5	60.5	118.5	299.1	88.5	155.3	147.5	197.2	152.7	130.2	72.2	1645.1
1972	29.0	42.9	219.7	154.3	136.6	71.2	87.1	162.7	123.7	95.1	178.1	21.6	1322.0
1973	5.7	37.2	151.2	15.7	124.7	266.0	81.0	164.2	114.1	60.8	57.4	32.5	1110.5
1974	18.8	119.2	260.7	164.1	100.7	210.1	126.3	119.9	221.0	179.7	69.7	10.0	1600.2
1975	21.2	13.6	106.2	280.2	156.1	90.2	85.6	204.6	155.8	124.0	109.1	32.7	1379.3
1976	25.0	45.9	166.2	149.6	73.8	23.7	111.1	187.3	159.1	155.3	40.5	59.3	1196.8
1977	31.1	8.5	25.1	311.6	246.6	2.5	85.5	127.5	155.2	60.0	91.6	41.0	1186.2
1978	204.0	65.0	24.7	228.4	223.3	154.5	55.5	91.0	158.0	169.0	99.0	0.0	1472.4
1979	1.5	68.0	126.0	89.8	272.0	95.2	56.5	56.5	135.0	122.0	116.7	3.5	1142.7
1980	19.5	24.0	55.0	216.4	167.5	66.3	191.6	174.0	290.0	118.5	30.0	102.0	1454.8
1981	201.0	32.3	18.0	170.0	195.5	145.0	132.0	249.9	142.5	187.2	60.6	223.1	1757.1
1982	37.0	11.0	90.3	256.0	92.8	136.3	99.4	100.6	26.9	154.4	54.6	1.3	1060.6
1983	32.6	9.4	69.3	78.8	210.7	102.9	116.3	113.0	47.9	121.8	6.5	30.2	939.4
1984	40.2	88.3	23.8	28.5	200.5	224.7	102.8	61.4	251.0	158.9	17.4	36.9	1234.4
1985	84.6	29.1	171.1	120.6	85.4	49.4	75.9	116.7	216.0	133.3	150.9	0.0	1233.0
1986	105.1	20.8	168.1	184.9	228.7	174.4	142.1	139.1	70.9	136.3	97.7	0.0	1468.1
1987	5.3	38.2	17.8	153.6	142.0	193.8	110.7	75.9	97.9	141.3	86.2	108.2	1170.9
Moy.	48.4	43.6	89.1	157.0	178.3	131.0	118.2	148.7	161.6	154.4	85.3	35.3	1351.0

Annexe 15 : Données pluviométriques de WorldClim pour la commune de Léogâne (1960-1987)

	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dece	Total
1960	43.8	45.8	132.3	127.2	202.3	307.7	94.2	186.5	197.0	175.1	77.2	26.6	1615.7
1961	15.1	33.3	67.8	105.1	239.4	153.8	197.2	188.4	92.0	288.8	91.8	34.1	1506.8
1962	38.8	13.1	36.5	137.1	202.8	144.9	86.6	129.2	103.1	214.0	84.9	21.4	1212.6
1963	33.9	24.1	75.8	148.8	242.8	99.1	114.7	128.9	142.8	310.8	108.1	33.6	1463.5
1964	23.6	30.7	37.5	142.1	206.3	135.7	153.8	169.3	186.9	94.6	54.9	15.3	1250.8
1965	25.1	10.0	37.7	49.6	446.5	101.9	101.3	141.0	128.5	150.6	124.8	27.6	1344.8
1966	38.2	9.7	75.2	132.8	250.5	126.1	212.6	198.0	115.1	194.9	169.0	20.6	1542.7
1967	30.8	30.8	65.9	71.6	62.4	203.7	63.2	93.5	115.4	132.7	60.6	7.1	937.7
1968	35.9	41.1	24.8	46.0	117.8	136.1	175.0	121.7	67.2	99.1	167.6	39.7	1072.1
1969	38.8	27.0	24.6	198.5	304.3	319.6	118.0	160.8	117.7	215.2	97.3	16.4	1638.1
1970	60.3	74.2	32.7	35.4	234.1	140.7	175.9	274.0	206.1	256.1	71.7	16.2	1577.4
1971	21.0	59.8	45.7	231.7	167.4	119.0	135.1	246.8	230.2	184.2	54.0	17.0	1512.0
1972	37.2	47.8	92.1	211.5	352.7	183.2	119.4	222.6	118.5	223.6	30.3	27.6	1666.6
1973	35.5	34.3	56.5	100.2	99.9	121.7	121.6	119.4	138.7	240.7	34.4	22.2	1125.3
1974	30.0	56.3	60.4	122.7	227.9	56.9	94.5	174.8	197.2	220.2	85.3	17.2	1343.4
1975	13.6	15.0	39.3	33.1	126.9	46.4	91.5	71.3	225.4	131.1	104.0	52.8	950.3
1976	33.4	41.3	31.8	114.0	48.2	164.6	91.7	97.7	167.0	171.2	33.6	9.9	1004.4
1977	17.2	27.8	15.5	188.7	401.0	43.8	58.5	186.0	102.8	111.2	137.0	30.2	1319.7
1978	46.7	48.2	97.7	241.4	168.9	109.9	95.3	163.9	129.2	235.3	70.9	9.8	1417.3
1979	18.7	51.0	123.3	164.8	259.0	262.5	289.4	297.1	304.2	224.6	86.0	13.4	2094.1
1980	28.0	41.4	32.4	165.7	354.4	186.3	130.6	304.8	171.6	119.4	31.8	52.6	1618.9
1981	42.4	46.3	74.5	130.9	342.9	178.8	151.1	251.4	154.2	209.3	87.8	54.6	1724.2
1982	48.9	32.3	17.2	92.6	427.6	75.1	97.7	69.3	141.7	152.6	68.7	20.9	1244.5
1983	31.6	18.2	123.2	122.2	275.9	170.1	118.5	142.3	143.9	179.8	77.7	21.4	1424.8
1984	30.0	48.5	27.9	127.0	112.1	236.3	137.2	114.0	206.3	241.1	56.9	17.0	1354.3
1985	21.0	37.0	68.4	131.3	214.4	73.7	129.3	218.2	216.1	313.1	80.4	9.6	1512.5
1986	38.8	15.1	92.8	230.5	299.7	271.5	51.9	148.1	60.9	99.7	88.8	9.4	1407.2
1987	41.0	53.9	31.3	264.0	289.9	207.7	81.9	88.3	204.5	216.5	124.4	38.7	1642.3
Moy.	32.8	36.2	58.6	138.1	238.5	156.3	124.6	168.1	156.6	193.1	84.3	24.4	1411.6