



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
.....
INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
D'ANTSIRABE VAKINANKARATRA



.....
Mention : Génie Minier

Parcours : Sciences et Techniques Minières

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur des Mines

Grade : **Master**

**CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE DES SOLS A
L'EROSION HYDRIQUE : CAS DES BASSINS VERSANTS
DANS LA COMMUNE DE MANANDONA**

Présenté par : RAZAFIMBOLOLONA Malalâtiana Harison

Rapporteur : Monsieur FABIEN Remi Roger

Promotion 2020



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
D'ANTSIRABE VAKINANKARATRA



Mention : Génie Minier

Parcours : Sciences et Techniques Minières

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur des Mines

Grade : Master



CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE DES SOLS A L'EROSION HYDRIQUE : CAS DES BASSINS VERSANTS DANS LA COMMUNE DE MANANDONA

Présenté et soutenu publiquement le 23 Septembre 2022 par :

RAZAFIMBOLOLONA Malalatiana Harison

Devant les membres de jury composés de :

Président des jurys : Professeur RAKOTONINDRAINY, Enseignant à l'IESAV

Rapporteur : Monsieur FABIEN Remi Roger, Enseignant à l'IESAV

Examineurs : Monsieur ZARAMPIRENENA Ratolojanahary, Chef de mention Génie Minier à l'IESAV

Monsieur RAKOTOARIVONIZAKA Ignace, Enseignant à l'IESAV

Monsieur RAKOTOARISOA Daniel, Enseignant à l'IESAV

Promotion 2020

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier le bon Dieu, sans qui je ne serais rien et je n'aurais rien accompli quoi que ce soit.

Mes remerciements s'adressent aussi principalement à :

- *Monsieur* Ononamandimby ANTSONANTENAINA, Directeur de l'IES-AV de m'avoir accepté comme étudiants dans son institut pendant mes années d'études universitaires ;
- *Monsieur* ZARAMPIRENENA Ratolojanahary, chef de la Mention Génie Minier à l'IES-AV, qui a bien voulu nous faire l'honneur d'examiner ce mémoire ;
- *Professeur* RAKOTONINDRAINY, qui a voulu présider les membres de jury de ce mémoire ;
- *Monsieur* RAKOTOARIVONIZAKA Ignace, enseignant chercheur à l'IES-AV et membre des jurys
- *Monsieur* RAKOTOARISOA Daniel, enseignant chercheur à l'IES-AV et qui fait partie des membres des jurys
- *Monsieur* Fabien Remi Roger, mon rapporteur, qu'il trouve ici ma gratitude, a bien voulu être mon encadreur pédagogique et de m'avoir assisté et aidé pendant la réalisation de ce mémoire ;
- *Monsieur* RASETRAHARISON Mihantaharimanana Tojonirina, Directeur de la Direction Inter-régionale de la Ministère des Mines et des Ressources Stratégique d'Analamanga, qui a accepté chaleureusement, malgré ses nombreuses occupations, d'assurer mon encadrement professionnel au sein du ministère et de m'avoir aidé sur les parties techniques durant la réalisation de ce mémoire.

J'adresse également mes remerciements à :

Tous les Enseignants de l'IES-AV, qui ont contribué à la réussite de ma formation par le partage de leurs connaissances, en particulier celle du Parcours Science et technique Minière.

Ma famille et mes proches qui m'ont toujours soutenu dans mes études et dans la préparation de ce mémoire ;

Toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leurs contributions à ce mémoire.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
GENERALITES	3
Chapitre I : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES	4
Chapitre II : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	17
Chapitre III : L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LA ZONE D'ÉTUDE	32
METHODOLOGIE.....	38
Chapitre IV : ANALYSES ET TRAITEMENTS DES DONNÉES.....	39
RESULTATS ET DISCUSSIONS	65
Chapitre V : RESULTATS	66
Chapitre. VI : DISCUSSIONS.....	75
CONCLUSION.....	82
ANNEXES	I
BIBLIOGRAPHIE.....	XI

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Bassin versant	4
Figure 2 : Distinction entre bassin versant topographique et réel	5
Figure 3 : Forme d'un bassin versant	7
Figure 4: Forme d'érosion dans un escarpement.....	11
Figure 5: Erosion éolienne	12
Figure 6: Erosion aratoire	13
Figure 7: Processus de l'érosion hydrique	14
Figure 8: Forme d'érosion hydrique	15
Figure 9: Carte de localisation de la zone d'étude	18
Figure 10: Carte d'occupation de sol dans la commune de Manandona.....	21
Figure 11: Le relief dans la commune de Manandona, Source : Auteur	22
Figure 12 : Carte des réseaux hydrographique dans la commune de Manandona.....	24
Figure 13: Carte géologique de la commune de Manandona	26
Figure 14: Démographie de la population dans les Fonkotany de Manandona.....	28
Figure 15: Courbe hypsométrique du bassin versant de Manandona	30
Figure 16: Coupe dans un lit abandonné par la rivière	32
Figure 17: Chenaux érodé, Source : auteur.....	35
Figure 18: Ravinement dans les versants.....	35
Figure 19 : Les lavaka sur une colline	36
Figure 20: Ensablement sur la RN7 et dans les champs	37
Figure 21: La rivière Manandona et sa carrière de sable dans le lit	37
Figure 22: Logo de QGIS	40
Figure 23: Interface principale de QGIS.....	41
Figure 24: Logo de GRASS GIS	41
Figure 25: Logo de SAGA GIS	42
Figure 26: Principe de la télédétection	44
Figure 27: Principe de la cartographie multicritère	46
Figure 28 : Les étapes méthodologiques.....	47
Figure 29: Image satellite de LANDSAT 9 par la composition 4-3-2.....	51
Figure 30: Carte du critère pente	53
Figure 31: Carte de critère lithologie	54
Figure 32: carte de critère pédologie	56
Figure 33: Carte de critère occupation de sol	57
Figure 34: Carte de critère hydrologie	58
Figure 35: Courbes des fonctions utiles sur les facteurs hydro et pente.....	63
Figure 36: Délimitation des bassins versants dans la commune de Manandona	66
Figure 37: Cartes des facteurs.....	67
Figure 38: Cartes des contraintes.....	68
Figure 39: Carte de vulnérabilité de l'érosion hydrique.....	69
Figure 40: Carte de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique dans les bassins versants de Manandona.....	71

Figure 41: Identification des Lavaka et des sols nus	73
Figure 42: Barrage en gabion.....	76
Figure 43: Plan d'un fossé.....	77
Figure 44: Plan d'une terrasse en mur de pierre et en talus gazonné.....	78
Figure 45: Disposition de la banquette végétale	79
Figure 46: Bande de sédimentation	79
Figure 47: Reboisement dans les versants	80
Figure 48: Reboisement et paillage, Source : Auteur	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: caractéristique d'un relief selon l'indice global Ig.....	10
Tableau 2: Appellation des formes d'érosions hydriques	15
Tableau 3: Causes et facteurs de l'érosion hydrique.....	16
Tableau 4: Activités principales des populations actives (INSTAT 2015).	28
Tableau 5 : Caractéristique morphométrique du bassin versant de Manandona	31
Tableau 6: Caractéristique de LANDSAT 9.....	49
Tableau 7: Caractéristique de chaque bande de LANDSAT 9	50
Tableau 8: Classification des critères	59
Tableau 9: Pondération des facteurs	60
Tableau 10: Degré de criticité selon les valeurs de contraintes des sols	61
Tableau 11: Degré de criticité par rapport à la distance des cours d'eaux.....	62
Tableau 12: Degré de criticité par rapport aux pentes.....	62
Tableau 13: Fonctions utiles.....	63
Tableau 14: Intensité de risque selon la valeur des pixels.....	70
Tableau 15: Tableau statistique de chaque intensité de risque sur une unité de surface	72
Tableau 16: Identification des Lavaka actifs et Lavaka stabilisés.....	74

LISTE DES ABREVIATIONS

°C : Degré Celsius

AMC : Analyse multicritère

BD : Base de Données

BV : Bassin Versant

FTM: Foiben'ny Taosaritanin'i Madagasikara

GRASS: Geographic Resources Analysis Support System

Ha : Hectare

INSTAT : Institut National de la Statistique

Km : Kilomètres

m : mètre

Ma : Million d'années

MNT : Modèle Numérique de Terrain

QGIS : Quantum GIS

RN 7: Route Nationale numéro 7

ROI : Region Of Interest

SAGA: System for Automated Geoscientific Analysis

SIG : Système d'Information Géographique

SQC : Schiste Quartzo-calcaire

SRTM : Shuttle Radar Topography Mission

USGS : United States Geological Survey

µm: micron mètre

GLOSSAIRE

Alluvionnement : Accumulation ou apport d'alluvions.

Alluvions : Sédiments d'un cours d'eau, à granulométrie liée au débit, et composé de galets, de gravier et de sable en dépôts, la fraction fine correspond aux argiles et limons

Bassin versant : c'est l'espace drainé par un cours d'eau et ses affluents. L'ensemble des eaux qui tombent dans cet espace convergent vers un même point de sortie appelé exutoire.

Erosion : C'est l'ensemble des phénomènes externes qui, à la surface du sol ou à faible profondeur, enlèvent tout ou partie des terrains existants et modifient ainsi le relief.

Escarpement : Versant en pente raide (supérieur à 30°) qui limite une surface topographique plane ou incliné

Lavaka : C'est une excavation à parois très abruptes qui crève brutalement la surface topographique

Ravin : petite vallée constituée d'une dépression allongée, profonde et généralement étroite.

Sillon : Une dépression étroite et allongée (par rapport à la morphologie)

INTRODUCTION

L'érosion des sols constitue un vrai problème environnemental, plusieurs régions de Madagascar souffrent de ce phénomène surtout dans les domaines ruraux. Il en résulte que l'érosion a des impacts environnementaux négatifs qui affectent l'approvisionnement en eau, la capacité de stockage des réservoirs et la productivité agricole et écologique. Des estimations avancent des chiffres de 200–400 tonnes/ha/an de la couche arable du sol qui sont entraînées par les eaux de ruissellement, alors que la moyenne mondiale serait de 11 tonnes/ha/an [15]. Les conditions physiques de Madagascar, avec un climat tropical contrasté à deux saisons (une saison des pluies de novembre à avril et une saison sèche de mai à octobre), et des pluies cycloniques chaque année, favorisent aussi cette érosion.

En plus des conditions physiques et climatiques favorables à l'érosion, la saturation et la stagnation de la productivité des zones irriguées conduisent à une mise en culture de plus en plus fréquente et l'exploitation importante des bassins versants à Madagascar. L'érosion et le ruissellement peuvent alors engendrer la dégradation des sols fragiles et causer des dégâts sur les infrastructures et les rendements des cultures en aval.

La commune de Manandona, qui se situe à 21 Km au Sud d'Antsirabe dans la région de Vakinankaratra, est réputée par sa rivière la *Manandona*. Ses reliefs sont remarquables et le sillon domine le long de la route nationale RN7, dont ce dernier joue un rôle important dans l'activité de la population locale et aussi dans le capital de la région de Vakinankaratra. La rivière de la Manandona figure parmi les rivières importantes qui drainent le bassin d'Antsirabe en allant vers le Sud où elle va confluer avec la Mania. D'autant qu'on constate des nombreux signes de produit d'érosion (des alluvions et des ensablements) aux bords de la rivière et sur la RN7. On pense que ses ensablements proviennent en amont dans les bassins versants de la commune.

Dans la commune de Manandona, les aléas climatiques, les aspects topographique et hydrologiques, et la géomorpho-pédologique sont les facteurs principaux de l'érosion hydrique entraînant ainsi la dégradation du sol et l'évolution de son occupation. L'anthropisation ne fait qu'accélérer le processus d'érosion.

La présente étude pose la problématique de l'érosion hydrique des sols dans les bassins versants de la commune de Manandona. Nous proposons une approche cartographique qui porte sur l'intégration dans un SIG et de la télédétection.

L'objectif de ce mémoire est avant tout de déterminer les zones vulnérables à l'érosion hydrique dans les bassins versants de la commune de Manandona à partir des données ouvertes et accessible publiquement. En recourant à l'analyse multicritère, la finalité est une carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique dans les bassins versants. Ainsi, ce mémoire de Master en Génie Minier s'intitule :

« CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE DES SOLS A L'EROSION HYDRIQUE : CAS DES BASSINS VERSANTS DE LA COMMUNE DE MANANDONA ».

Ce travail sera généralement présenté en trois parties :

- Les généralités qui constituent les revues bibliographiques et la présentation de la zone d'étude.
- Présentation des données et des logiciels utilisés et la méthodologie basée sur le processus de traitement des critères.
- Le résultat, composés des cartes des critères d'érosion hydriques et la carte finale qui est la cartographie des zones de vulnérabilité de risques d'érosion hydrique des bassins versants dans la commune de Manandona, suivi d'une discussion.

Partie I

GENERALITES

Chapitre I : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

I. Notion sur le bassin versant :

Un bassin versant désigne l'unité spatiale délimitée par la ligne de partage des eaux et dans laquelle toutes les eaux de surface sont drainées vers un même cours d'eau jusqu'à son embouchure ou exutoire. Plus précisément, le bassin versant qui peut être considéré comme un " système " est une surface élémentaire hydrologiquement close, c'est-à-dire qu'aucun écoulement n'y pénètre de l'extérieur et que tous les excédents de précipitations s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire. Dans cette surface s'écoulent les eaux tombant sur ce territoire (Pluie, neige...) ainsi que les éléments dissous ou en suspension tels que les sédiments ou les pollutions. Un bassin versant est alors défini comme la totalité de la surface topographique drainée par un exutoire. Généralement, la ligne de partage des eaux correspond à la ligne de crête. Enfin, chaque bassin versant se subdivise en un certain nombre de bassins élémentaires parfois appelés « sous-bassins versant » correspondant à la surface d'alimentation des affluents se jetant dans le cours d'eau principal. [5]

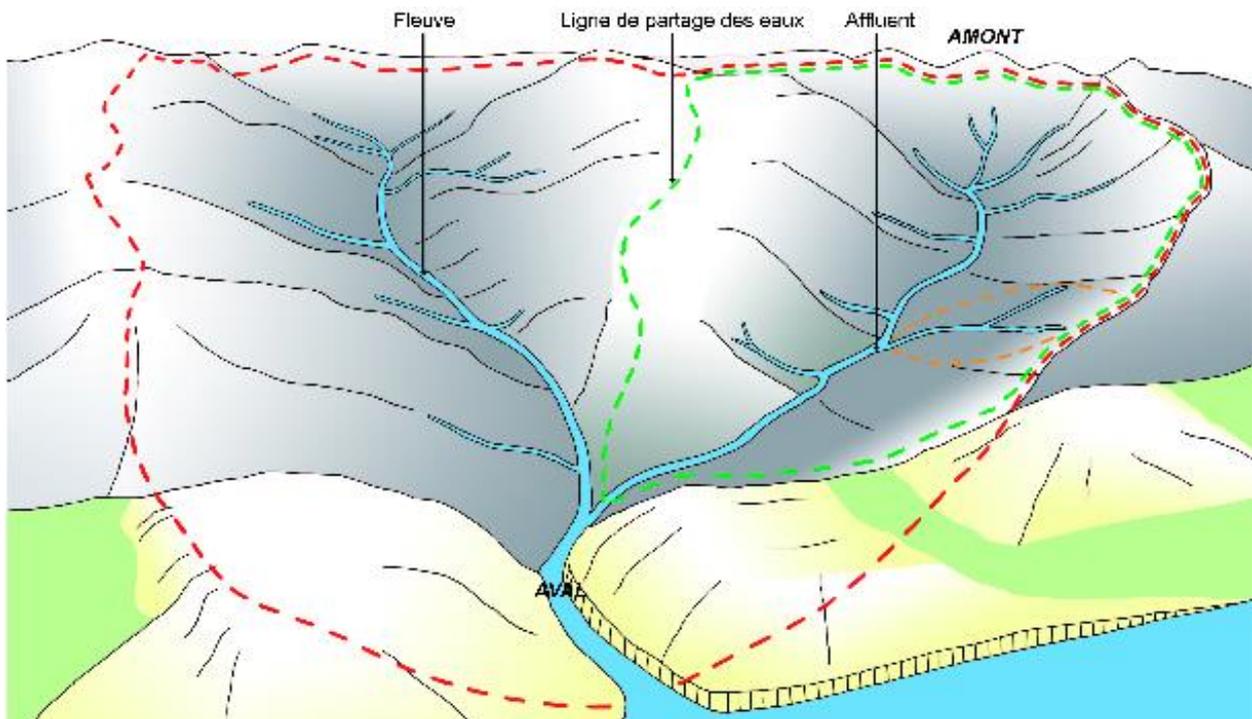


Figure 1: Bassin versant [W9]

La topographie n'est pas toujours suffisante pour définir un bassin versant. Il faut prendre en compte les sols (perméables ou non) et les écoulements souterrains, dans ce cas on parle de bassin versant réel. Quant au bassin versant topographique, ce dernier ne prend en compte que la surface du bassin versant.

1. Délimitation d'un bassin versant

- Bassin versant topographique :

Les terrains géologiques du bassin sont de nature imperméable, l'eau est alors acheminée selon la topographie. Dans cette condition précise, les limites du bassin versant topographique sont définies par la ligne de crêtes topographiques isolant le bassin versant d'un cours d'eau et de ses affluents (ligne de plus grande altitude), et par la ligne de plus grande pente.

- Bassin versant réel :

Les terrains géologiques qui forment le bassin sont en totalité ou en partie perméables. Une partie des eaux de précipitation peut s'infiltrer et alimenter souterrainement un autre bassin. De même dans le cas contraire un bassin versant peut recevoir des eaux souterraines à travers la frontière avec un autre bassin sous forme de sources. Par conséquent, la délimitation du bassin ne se base pas uniquement sur la topographie mais tient compte des limites réelles d'alimentation, basées sur la nature géologique du terrain et le sens des écoulements souterrains. Dans le cas de bassin versant de grande taille, les apports et les pertes souterraines ont tendance à se compenser et le bassin versant hydrogéologique peut être confondu au bassin versant topographique.

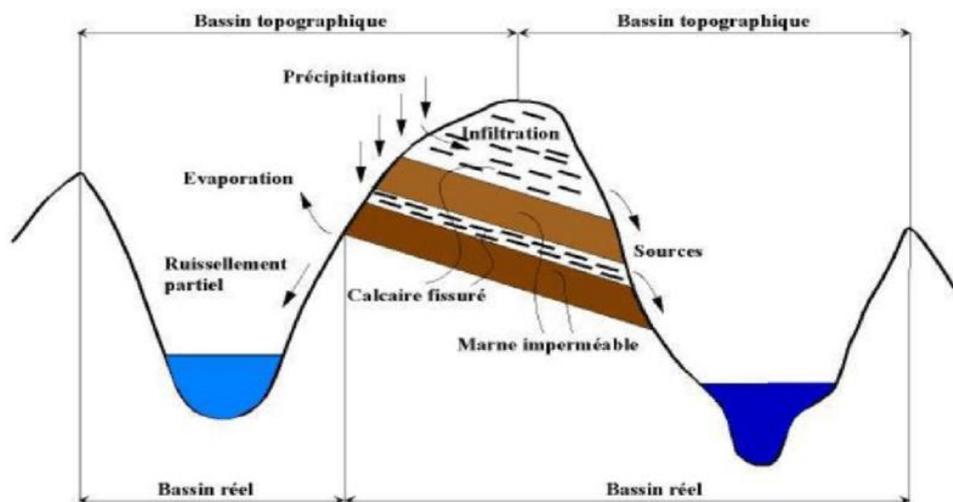


Figure 2 : Distinction entre bassin versant topographique et réel [W8]

2. Caractéristique morphométrique d'un bassin versant [6]

La détermination des caractéristiques morphométriques (physiographiques) est nécessaire pour déterminer et analyser le comportement hydrologique d'un bassin versant.

a) *Dans le Plan :*

- La surface :

La surface constitue l'aire de réception des précipitations qui alimentent un cours d'eau par écoulement. Elle peut être mesurée par planimétrie en utilisant un planimètre qui sert à mesurer une surface plane, en superposant la surface à une grille dessinée sur papier transparent. Ou tout simplement, la surface sera déduite d'une formule en connaissant les autres paramètres physiographiques d'un bassin versant. Mais le moyen le plus pratique de nos jours est de déterminer la surface d'un bassin versant par un modèle numérique, ce qui va être notre cas où l'on va créer avec l'aide de SAGA GIS.

$$P = 2(L + l) \text{ et } S = L \times l$$

P : périmètre du bassin versant (km),

L : longueur du rectangle équivalent (km),

l : largeur du rectangle équivalent (km),

S : surface du bassin versant (km²).

- Le périmètre :

Le périmètre est la caractéristique de longueur la plus utilisée. Il peut être mesuré directement sur la carte topographique par curvimètre ou indirectement en utilisant la longueur du rectangle équivalent. Ce dernier étant un rectangle de longueur L et de largeur l qui a la même surface et le même périmètre que le bassin versant.

Pour le rectangle équivalent, il s'agit de représenter le bassin réel dans un rectangle où la superficie et le périmètre seront conservés. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles au petit côté du rectangle.

$$P = \frac{KG\sqrt{S}}{0.28} = 2(L + l)$$

$$L = \frac{KG\sqrt{S}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{KG}\right)^2} \right]$$

$s = L \times l$ Avec \longrightarrow

$$l = \frac{KG\sqrt{S}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{KG}\right)^2} \right]$$

KG : Coefficient de Gravelius

L : longueur du rectangle équivalent

l : Largeur du rectangle équivalent

- La forme :

- Le coefficient de Gravelius

Le coefficient de Gravelius ou le coefficient de compacité donne la forme d'un bassin versant. Cette forme a une grande influence sur l'écoulement global et surtout sur l'allure de la courbe que va donner le débit en fonction du temps résultant d'une pluie donnée. Le coefficient de compacité est le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface :

$$KG = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

$KG > 1$: Bassin de forme allongée.

$KG \approx 1$: Bassin de forme ramassée.

Ainsi, Le coefficient KG de Gravelius est supérieur à 1 lorsque la forme du bassin est allongée, et proche de 1 pour un bassin versant de forme circulaire.

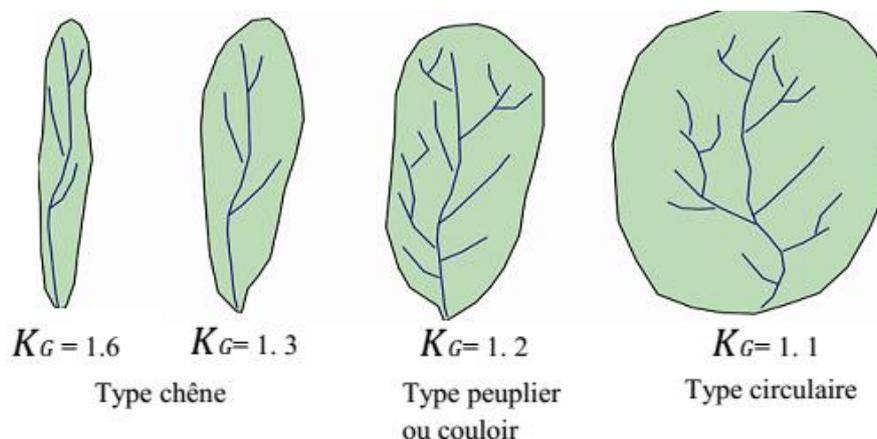


Figure 3 : Forme d'un bassin versant [6]

- Indice de forme de Horton

C'est le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal.

$$KH = \frac{S}{Le^2}$$

KH : Indice de Horton sans dimension.

$KH < 1$: Bassin de forme allongée.

$KH > 1$: Bassin de forme ramassée.

S : Surface du bassin versant (Km²).

Le : Longueur du cours d'eau principal (Km).

b) L'altitude :

La plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont relatifs à l'altitude. L'altitude est décrite par la courbe hypsométrique qui représente la surface en km² (ou le pourcentage de la surface) en fonction des altitudes supérieures à une côte Z donnée. La courbe hypsométrique traduit la répartition des altitudes à l'intérieur du bassin versant et permet, en outre, de déterminer les altitudes caractéristiques.

$$H_{moy} = \frac{1}{S} \left[\sum_{i=1}^n S_i \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right]$$

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant en m

S : Surface du bassin versant en Km²

S_i : Surface comprise entre deux courbes de niveau en Km²

h_i, h_{i+1} : Altitudes haut et bas qui délimite la surface S_i en m.

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

Altitude la plus fréquente : c'est l'altitude correspondante au maximum de superficie sur la courbe hypsométrique.

Détermination de la courbe hypsométrique :

Afin de décrire et d'expliquer les formes du relief, on doit réaliser des courbes dites "hypsométriques". Pour cela, on dispose de cartes topographiques à partir desquelles on procède à la répartition de la superficie du bassin par tranche d'altitude. Ensuite, le report du cumul des aires élémentaires et des valeurs altimétriques sur une échelle arithmétique permet

de tracer la courbe hypsométrique du bassin. Cette dernière est susceptible de changer avec le temps au fur et à mesure que le bassin est consommé par l'érosion.

Dans certains cas, il convient d'utiliser, au lieu de la surface cumulée, le cumul du pourcentage, par rapport à la superficie totale, des aires élémentaires.

Le plus souvent, une courbe hypsométrique peut être remplacée sinon associée à un histogramme des fréquences altimétriques.

Indices de pentes :

- La pente moyenne détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration.
- Cette variable influence donc le débit maximal observé.
- Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel et l'action érosive de l'eau.
- Une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie dans le sol et favorise le dépôt de la charge solide dans l'eau.

➤ **Indice de pente global I_g (m/km) :**

Cet indice présente l'avantage d'être très simple et facile à calculer. 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), d'où :

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

D : Dénivelée sur la courbe hypsométrique

L : Longueur du rectangle équivalent

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 $Z_{95\%}$. Ceci dit que 90% de la superficie s'étend entre ces altitudes.

Malgré sa simplicité, l'indice de pente global présente l'inconvénient de décroître pour un même bassin lorsque la superficie croît. Il permet la classification mais on ne peut pas s'en servir pour comparer des indices de pente des bassins versants de superficies différentes.

➤ **Dénivelée spécifique :**

Pour pallier à cette lacune, il serait préférable d'utiliser la dénivelée spécifique

$$Ds = Ig \times \sqrt{S}$$

Dénivelée spécifique (DS) : exprimée en mètre

La dénivelée spécifique peut servir pour comparer le relief des bassins versants de superficies différentes.

Tableau 1: caractéristique d'un relief selon l'indice global I_g

Relief très faible	$I_g < 0.002$
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.1$
Relief très fort	$0.1 < I_g$

Pour un même bassin, l'indice global I_g décroît lorsque la surface augmente. Or si I_g s'accroît on aura une forte probabilité d'érosion dans le bassin versants.

Ainsi sont présentées comment déterminer manuellement les caractéristiques morphométriques d'un bassin versant. Mais dans notre cas, notre méthode se fera sur le logiciel de SIG sur SAGA GIS.

II. NOTION SUR L'ÉROSION :

1. Définition :

Erosion vient de “ERODERE”, verbe latin qui signifie “ronger”. L'érosion ronge la terre comme un chien s'acharne sur un os. D'où l'interprétation pessimiste de certains auteurs qui décrivent l'érosion comme une lèpre qui ronge la terre jusqu'à ne laisser qu'un squelette blanchi : les montagnes calcaires qui entourent la Méditerranée illustrent bien ce processus de décharnement des montagnes dès lors qu'on les défriche et que l'on brûle leur maigre végétation. En réalité, c'est un processus naturel qui certes, abaisse toutes les montagnes mais en même temps, l'érosion engraisse les vallées, forme les riches plaines qui nourrissent une bonne partie de l'humanité. Il n'est donc pas forcément souhaitable d'arrêter toute érosion, mais de la réduire à un niveau acceptable ou tolérable.

En général, L'érosion est le processus qui se traduit en trois phases : le détachement des matériaux, leur transport et le dépôt des sédiments. Le résultat est la dégradation du sol. Ce dernier provient de l'altération des roches préexistantes. Les agents de l'érosion sont l'eau, le vent, la glace.



Figure 4: Forme d'érosion dans un escarpement[W10]

2. Types d'érosion

Il existe trois types d'érosion : l'érosion éolienne, l'érosion aratoire ou mécanique sèche et l'érosion hydrique [17], [18] :

c) *L'érosion éolienne :*

Le vent exerce sur les particules solides au repos une pression sur la surface exposée au flux d'air, appliquée au-dessus du centre de gravité, auquel s'oppose un frottement centré sur la base des particules. Ces deux forces constituent un couple tendant à faire basculer et rouler les particules lourdes (0,5 à 2 mm), de plus, la différence de vitesse entre la base et le sommet des particules provoque leur aspiration vers le haut. Les particules les plus légères s'élèvent à la verticale jusqu'à ce que le gradient de vitesse ne les porte plus. Elles retombent alors, poussées par le vent, suivant une trajectoire subhorizontale. En retombant, ces grains de sable transmettent leur énergie à d'autres grains de sable (comme dans un jeu de boules) où se dégradent les agrégats limono-argileux en dégageant de la poussière.

L'érosion éolienne prend de l'importance dans les zones tropicales sèches, là où la pluviosité annuelle est inférieure à 600 mm, où la saison sèche s'étend sur plus de six mois et où la végétation de type steppique laisse de larges plaques de sol dénudé. Ailleurs, elle peut aussi se développer dans des conditions de préparation du sol qui amènent une pulvérisation importante des matériaux superficiels secs.



Figure 5: Erosion éolienne [W6]

a) *L'érosion aratoire ou mécanique sèche*

Ce phénomène d'érosion n'est pas dû à l'intervention de l'eau, c'est le travail du sol qui arrache les particules, les transporte et les dépose soit en bas de parcelle, soit en talus.

Les facteurs sont en effet : Le type d'outil, la fréquence des passages et la pente. Plus la pente est forte, plus les mottes de terres détachées roulent vers le bas. C'est ce qui explique que les sommets des collines sont souvent décapés.



Figure 6: Erosion aratoire [6]

b) *L'érosion hydrique :*

L'érosion hydrique des terres est un processus impliquant le détachement de particules de sol puis leur transport sous l'action de l'eau vers un lieu de dépôt.

L'élément déclencheur de ce type d'érosion est la pluie, qui provoque le détachement des particules élémentaires du sol.

Par effet de *splash*, l'énergie cinétique des gouttes qui tombent à un pouvoir érosif des pluies. L'impact des gouttes crée un détachement des particules de sol très fines qui se trouvent ainsi piégées entre les éléments plus grossiers et peuvent obstruer les pores de la couche supérieure du sol ainsi que de réduire considérablement le taux d'infiltration.

Le transport des particules du sol détachées est effectué par les eaux de ruissellement. Lorsque les eaux de pluie ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol, l'érosion des sols poursuit ses étapes en ruisselant en surface et en emportant les particules de terre. Cela apparaît quand l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration de la surface du sol, ou lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe d'eau.

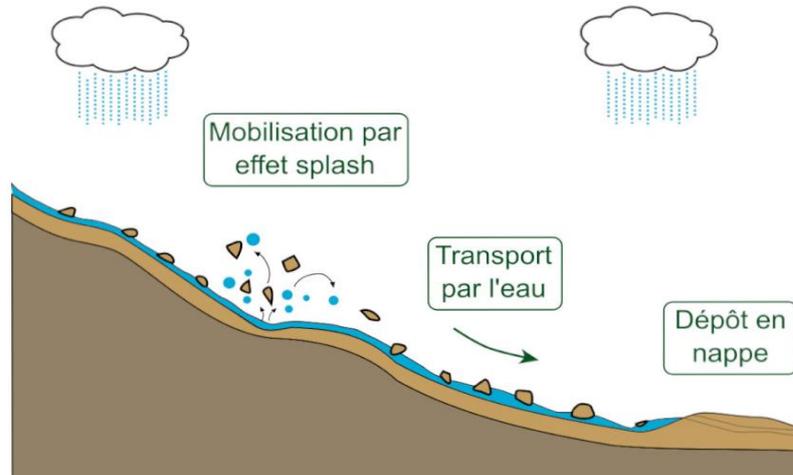


Figure 7: Processus de l'érosion hydrique [W7]

L'eau de ruissellement est toujours l'agent responsable de la sédimentation. Les particules arrachées du sol se déposent entre le lieu d'origine et l'aval en fonction de leur dimension, de leur densité et de la capacité de transport du ruissellement ou du cours d'eau. Les particules se déposent dans l'ordre décroissant du grossier aux particules fines. Ainsi, du bas de l'échelle se trouve le sable, suivi du sable fin, superposé par du limon. Les argiles et l'humus colloïdal sont généralement transportés jusqu'à l'embouchure du cours d'eau où il se dépose soit après évaporation de l'eau, soit après floculation.

Et il existe plusieurs types d'érosion hydrique :

- Erosion en nappe

Elle est caractérisée par une eau de ruissellement sans griffes ou rigoles visibles. Sous l'effet de l'impact des gouttes de pluies (effet splash), les particules sont arrachées et transportées. Ce phénomène est observé sur les pentes faibles où l'eau ne peut pas se concentrer. Dans un premier temps, c'est l'impact des gouttes qui va arracher les particules. La battance des gouttes de pluie va envoyer des gouttelettes dans toutes les directions. Seulement, sous l'effet de la gravité les gouttelettes auront une vitesse plus importante vers l'aval que vers l'amont. Si l'on réalise une moyenne sur l'ensemble des gouttelettes, la vitesse sera dirigée de l'amont vers l'aval. A partir de là, il y aura formation de flaques et débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre ce qui entraînera un ruissellement en nappe.

L'érosion en nappe dépend de :

- L'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement
- L'énergie cinétique des pluies qui détachent les particules
- La durée des pluies et/ou l'humidité avant les pluies, c'est à dire l'état du sol.

Les signes qui permettent de caractériser l'érosion en nappe sont l'apparition de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés et la remontée de cailloux à la surface du sol, les conséquences de l'érosion en nappe sont :

- Le nivellement de la surface du sol.
- La squelettisation des horizons superficiels.
- Le décapage entraînant l'apparition de taches claires.
- Erosion linéaire, en griffes ou en rigoles

Ce type d'érosion intervient à la suite du ruissellement. Dans un premier temps, des flaques se forment. En débordant, les flaques communiquent entre elles et des lignes d'écoulement limitées dans l'espace apparaissent selon la ligne de plus grande pente : selon la profondeur de ces lignes, le vocabulaire employé est différent. Dans le tableau, nous donnons les différentes formes d'érosion hydrique.

Tableau 2: Appellation des formes d'érosions hydriques

Profondeur	Appellation
Quelques centimètres	Griffes
Supérieur à 10 Cm	Rigoles
10 à 20 Cm quelques mètres de larges	Nappes ravinant
Supérieur à 50 Cm	Ravines

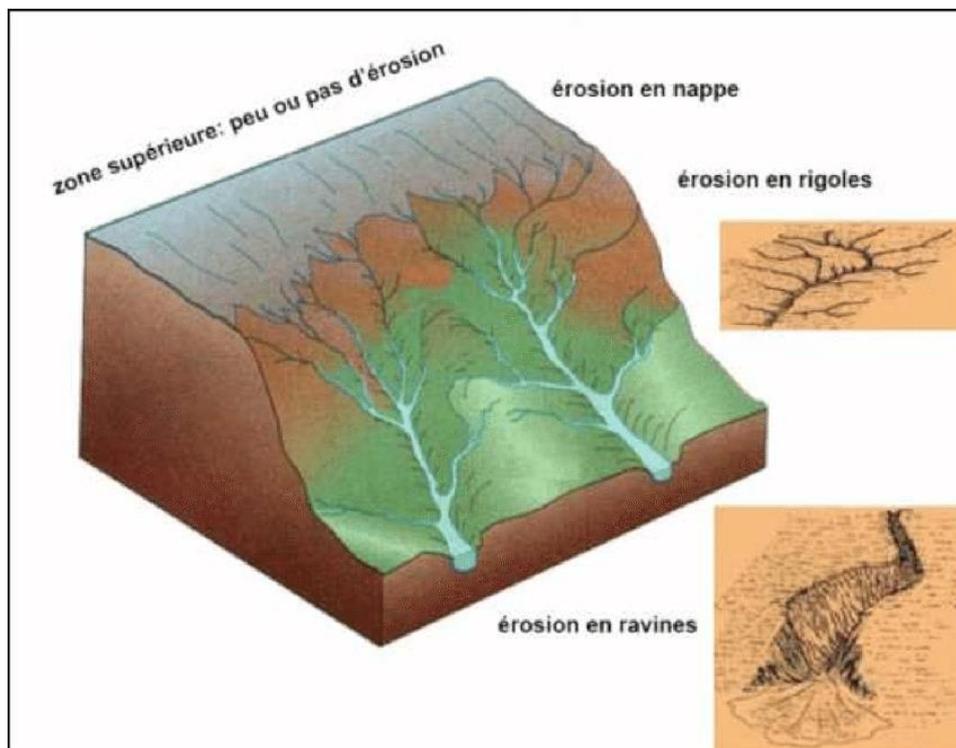


Figure 8: Forme d'érosion hydrique [W7]

Les causes et facteurs :

Le sol est souvent menacé par les problèmes d'érosion en géomorphologie. Le processus de dégradation et de transformation du relief, et donc des roches, qui est causé par tout agent externe (donc autre que la tectonique). C'est ainsi qu'on distingue par exemple l'érosion hydrique qui est causée par l'eau et l'érosion éolienne causée par le vent.

Le tableau suivant présente les processus de dégradation, les causes ainsi que les facteurs de l'érosion hydrique.

Tableau 3: Causes et facteurs de l'érosion hydrique [17]

Les processus de dégradation et d'érosion et leurs formes	Les causes : différentes sources d'énergie	Les facteurs de résistance du milieu
Érosion mécanique sèche Forme : creeping	Gravité et poussée par Les outils de travail du sol	- fonction de l'intensité du travail du sol, c'est-à-dire de la fréquence des travaux et du type d'outil - fonction de la pente et de la cohésion du terrain
Érosion en nappe Forme : nappe de sable, pellicule de battance ou de sédimentation, "demoiselle coiffée", micro-falaise	Battance des gouttes de pluie	- le couvert végétal, - la pente, - le sol, - les techniques et structures antiérosives
Erosion linéaire Formes : griffes, rigoles, Ravines	L'énergie du ruissellement dépend du volume du ruissellement et de sa vitesse au carré $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mgH$	- la vitesse du ruissellement est fonction de la pente et de la rugosité, - le volume ruisselé est fonction de la surface du bassin versant et de la capacité d'infiltration, - résistance du profil du sol et des racines

Chapitre II : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

I. Monographie de la commune de Manandona :

1. Délimitation administrative :

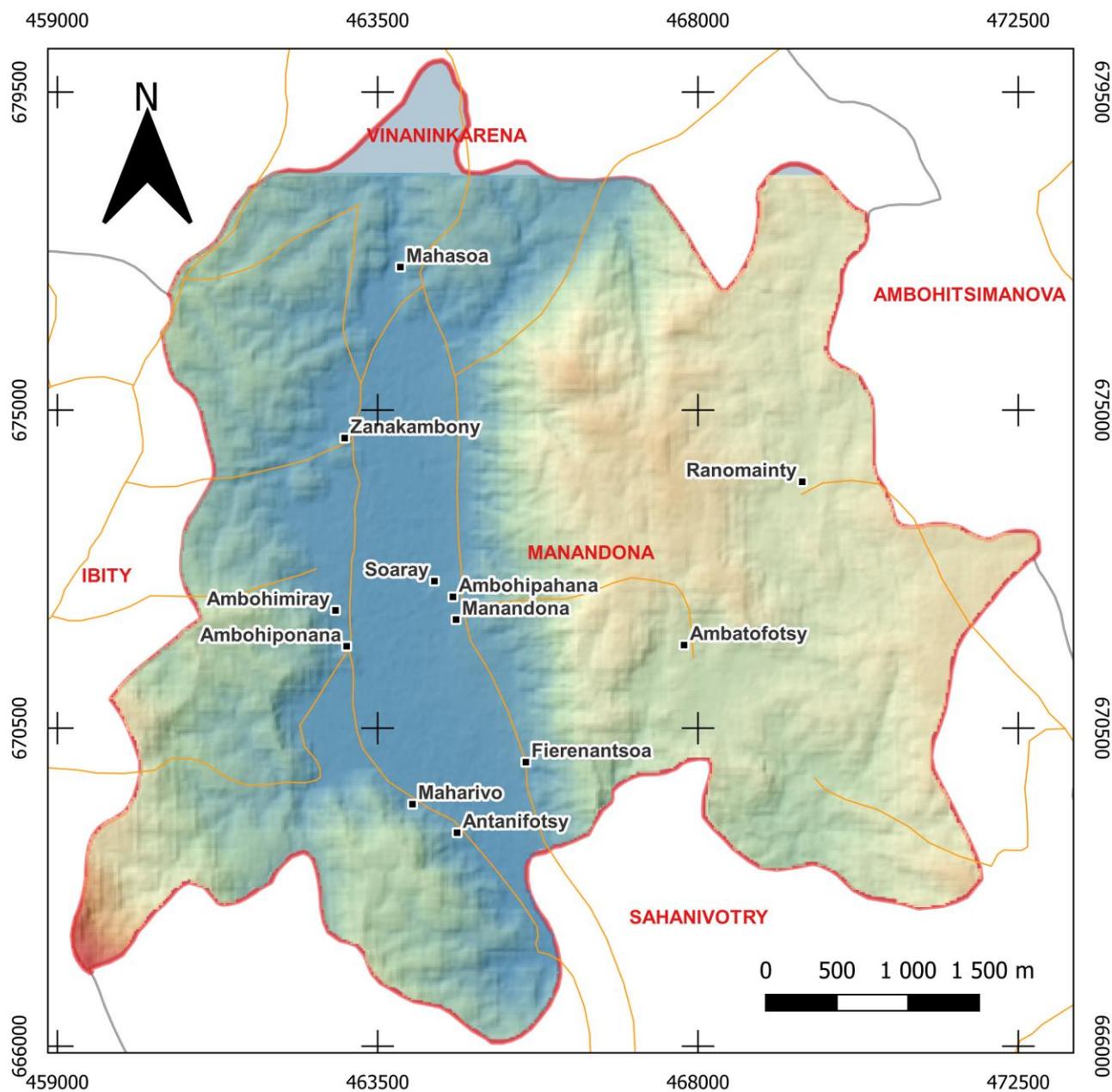
Manandona est une commune rurale de la région du Vakinankaratra se situant à une altitude à 1065 m. Le Chef-lieu de la commune est Manandona. Située entre 20° 03'' 00' latitude Sud et 47° 04'00'' de longitude Est.

Elle est située à 21 km au sud de la ville d'Antsirabe et est reliée au chef-lieu de la région Vakinankaratra par l'intermédiaire de la route nationale n°7. Ayant une superficie de 282 km², elle est composée de 11 « Fokontany » dont : Soaray, Ambohipanana, Manandona, Ambohimiray, Zanakambony, Fierenantsoa, Ambohiponana, Ambohitrimanjato, Maharivo, Mahasoa, Ambatofotsy, Ranomainty.

Elle est limitée :

- Au Nord par la commune de Vinaninkarena
- A L'Est par la commune d'Ambohitsimanova
- A l'Ouest par la commune d'Ibity
- Au Sud par la commune de Sahanivotry

CARTE DE LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE



Légende:

Commune de Manandona
 Fokontany

Communes limitrophes
 Routes

Elevation

 2 238
 1 342

Source:

FTM , SRTM

Figure 9: Carte de localisation de la zone d'étude

2. Climat :

Le climat est caractérisé par une saison sèche qui s'étend entre le mois d'Avril jusqu'au mois d'octobre et une saison de pluie très marquée entre le mois de novembre et le mois de Mars.

La moyenne thermique est de 16° C. Pour les mois les plus chauds, les maxima moyens sont supérieurs à 20 °C. Le maximum de température se situe au mois d'Octobre. Mais comme il y a l'influence de l'altitude, le maximum de température ne dépasse pas les 30° 8. Pour les minima, elles s'observent durant la saison sèche et fraîche, de mai à septembre. La température la plus faible s'observe au mois de Juillet avec 5° 4 C. Par ailleurs, durant la saison fraîche, il y a également une forte amplitude diurne de la température. La température est proche de 0 °C la nuit et au petit matin tandis qu'à midi, la température dépasse les 20 °C. Donc il y a une variation thermique assez forte pendant la saison fraîche.

Cette notion de variation diurne de la température est importante dans la mesure où elle entre en jeu dans le processus de l'érosion. En effet, ces fortes variations sont responsables de la désagrégation des roches nus sur les versants donc de l'apport de sédiments dans la rivière Manandona.

Concernant les précipitations, l'année se divise en 2 saisons distinctes : une saison « sèche » allant de Mai à Septembre et une saison pluvieuse vers la fin du mois d'octobre jusqu'en Avril où tombent 92,5 % des précipitations annuelles. Le maximum se trouve en décembre avec 276,5 mm tandis que le mois de juin enregistre la valeur la plus faible avec seulement 7,7 mm et la moyenne interannuelle est de 1305mm.[15]

3. Occupation de sol et couverture végétal :

La formation végétale est formée surtout par un pseudo steppe, causé par l'actions des feux de brousse. Les formations graminéennes couvrent une grande superficie. Ces formations semblent seulement constituer une étape ultime de l'évolution du couvert végétal à la suite de la dégradation des sols par l'érosion et de l'élimination des autres espèces par les feux de brousse répétés. Les principales graminées rencontrées sont : *Aristide multicaulis* (bozaka), *Clenium concinum*, *Trachypogon polymorphus*, *Hyparrhenia rufa* (vero), *Loudetiua madagascariensis*, l'une de ces espèces forme souvent 70 à 80 % du couvert végétal. [3]

Sur les versants, sur l'escarpement de Manandona ou sur le massif d'Amboropotsy-Ibity, il y a la présence d'une plantation disparate de conifères (*pinus patula*, *pinus merkusii*) et d'eucalyptus, vestiges des campagnes de reboisement durant la première république. On note aussi la présence de quelques pieds de tapia (*Uapaca bojeri*) rabougris sauf à l'entrée du village de Sahanivotry où les tapia occupent tout un versant.

Au bas des versants, la végétation est surtout constituée de broussailles et d'arbustes comme : les fougères, les goyaviers, les *hyparhaenia rufa* (vero), les mimosas (*Acacia dealbata*), les Taretra (*Fourcroya gigantea*) et de bambou sur les berges. [3]

4. Cadre morpho-structurale :

Le paysage dans la commune de Manandona est une dichotomie entre versants et une plaine alluviale au niveau de la commune rurale de la Manandona. Ce paysage est beaucoup plus fermé au-delà de la plaine. [1]

La commune est caractérisée par un relief relativement bordé par des puissants massifs : à l'Est par la faille de Manandona et à l'Ouest par le massif de l'Ibity-amborompotsy (2061 m) avec quelques sommets comme Sarobaratra (1755 m), Andriatsilazaina (2038 m).

Les reliefs en hauteur, caractérisés par une forte valeur des pentes, supérieures à 25 %. A l'Est, comme il a été dit, il y a l'escarpement de Manandona, c'est un escarpement de faille qui constitue un prolongement de la faille de Betampona qui débute aux alentours d'Ambohibary Sambaina à plusieurs km au nord. Cet escarpement est de direction N45° 18. A l'ouest se trouve le massif de l'Ibity-Amborompotsy, avec sommets rocaillieux et dénudés sur du quartzite. [10]

Puis un relief relativement plan légèrement incliné vers l'ouest qui constitue le sillon de la Manandona, long de 17 km et drainé par la rivière du même nom. C'est un bassin issu de la tectonique active dans la région, la faille de Betampona à l'Est, mais aussi de l'érosion différentielle entre granites porphyroïdes et gneiss migmatitiques [10].

Le fond est plat et est converti en rizières. L'origine peut s'apparenter à une origine fluvio-palustre notamment par la présence encore visible de marécages avec la végétation qui les caractérise. Mais l'apport de sédiments par des cônes latéraux est aussi important avec les deux puissants reliefs en bordure du sillon. Ce dernier est drainé par la rivière Manandona avec une direction Nord-Sud. [1]



Figure 11: Le relief dans la commune de Manandona, Source : Auteur

5. Hydrographie :

La commune rurale de Manandona est traversée par deux cours d'eau dont Manandona, qui traverse la commune du nord au sud avec une longueur de 28 km, et Sahalombo.

La rivière Manandona prend sa source dans les contreforts méridionaux de l'Ankaratra puis longe l'escarpement du Betampona qui la limite à l'Est ensuite traverse l'escarpement du Mandray avant de traverser enfin le sillon de la Manandona.

Long de 28 km, la rivière Manandona traverse la plaine de même nom du nord au sud en suivant une direction subméridienne. Elle reçoit ses affluents tant de rive gauche ou droite comme le ruisseau Iloatra à Amboalefaka, le ruisseau Faraherana au niveau d'Antanety, la rivière Ankoka à ambatofierenana puis la rivière Sahanivotry au niveau du village de même nom situé à 7 km au Sud sur la RN7. Puis à l'entrée du village de Talaviana, la rivière change de direction pour aller vers l'Ouest vers Sahamalola, avant de traverser les gorges étroites et le seuil rocheux de Farasotrina qui limite le cours moyen de la rivière. Au-delà du seuil et des gorges, c'est la vallée inférieure de la Manandona puis son exutoire, sa confluence avec la rivière Mania. L'altitude au niveau du pont à l'entrée de la Commune de Manandona est de 1355 m contre 1340 m au niveau du seuil de Farasotrina soit une dénivellation topographique de 15 m. [1]

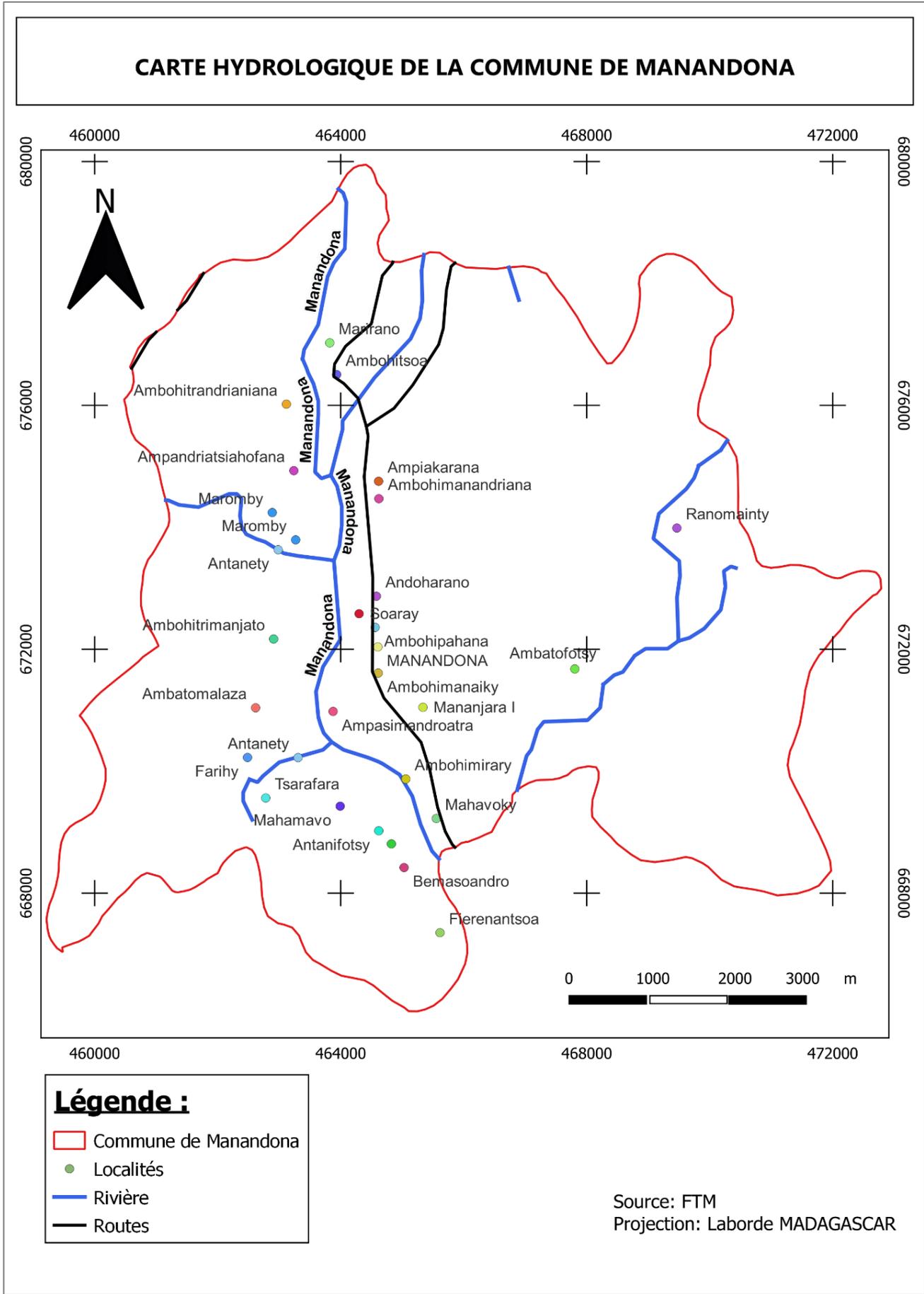


Figure 12 : Carte des réseaux hydrographique dans la commune de Manandona

6. Contexte géologique :

❖ Appartenance au vieux socle Précambrien de Madagascar

Manandona se trouve sur le socle cristallin des Hautes Terres Centrales Malgaches. Un socle qui a subi plusieurs fois un métamorphisme. [3], [10]

Ce sont les travaux de Collins (2006) qui sont les plus récents concernant le socle malgache. La partie où s'écoule la rivière Manandona se trouve d'après cet auteur dans le Bloc Antananarivo. [6]

Ce bloc se compose de trois (03) unités :

- Les Granitoïdes (2250-2500 Ma) qui sont interpénétrées par des volumineux granites, syénites et gabbros d'âges 824-710 Ma
- Après cette première unité s'en suit entre 700 et 532 Ma un métamorphisme à granulites et à gneiss
- Parallèlement, dans la bordure sud-ouest, il note la présence des roches sédimentaires constituées de marbres, de quartzites et de pélites et qui correspondent au SQC de Besairie (1968-1971) et qui constituent les roches du groupe de l'Itremo.

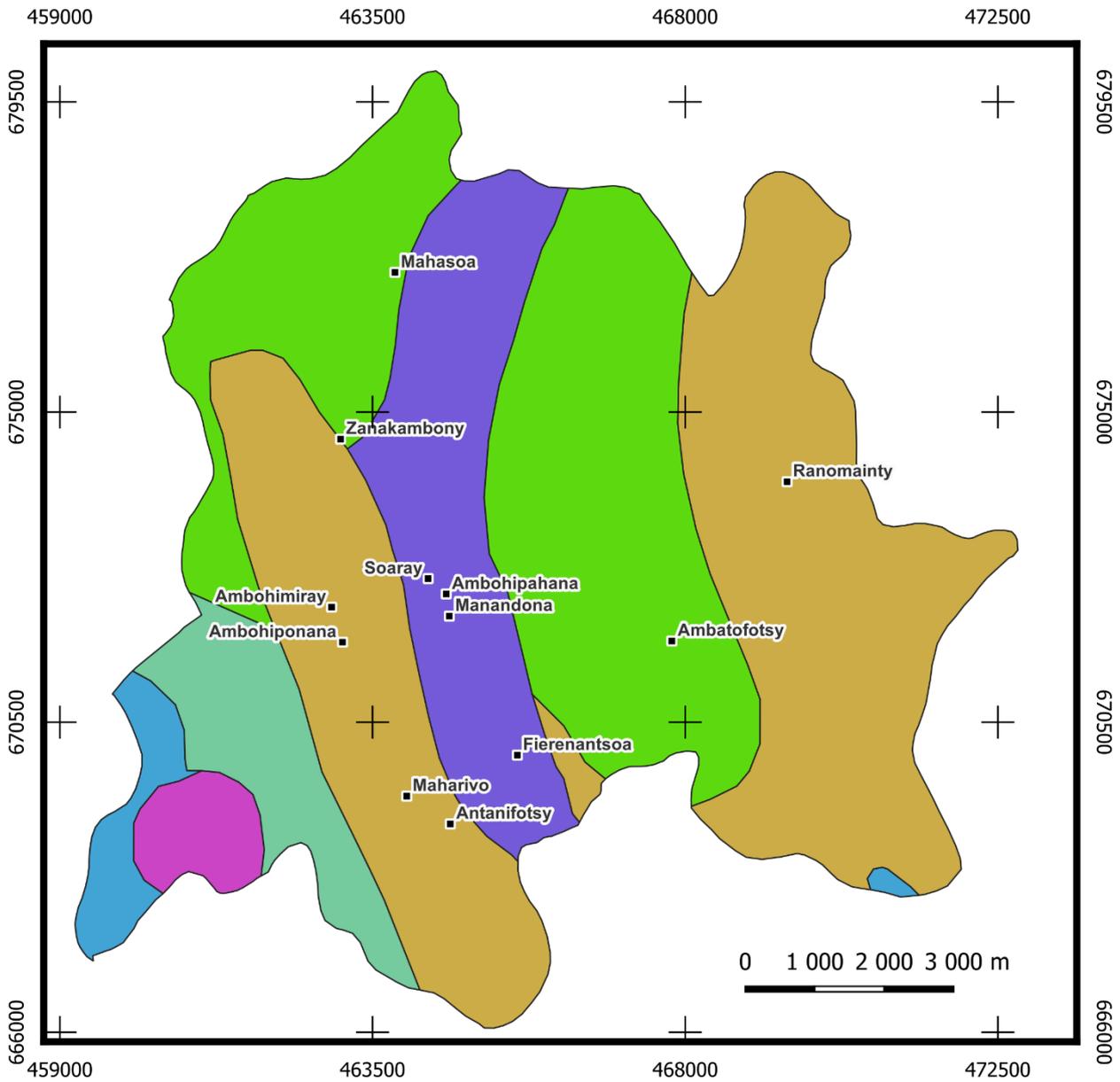
Toutes ces roches qui constituent le vieux socle cristallin des Hautes Terres Centrales de Madagascar ont été fortement métamorphosées autour de 550 Ma.

❖ Lithologie

Appartenant au système de graphite défini par Besairie en 1964, les migmatites prédominent dans la zone de Manandona, comme dans la majeure partie des Hautes Terres de Madagascar. En effet d'après BOURGEAT (1972), ce sont les roches appartenant au système de graphite qui connaissent le maximum d'extension sur les Hautes Terres. [3]

Le mont Ibity-Amborompotsy à l'Ouest figure parmi le complexe de SQC Schisto-quartzocipolins de Besairie. A l'Est, ce sont les migmatites qui affleurent. Ce dernier sont les migmatites « banales » qui constituent la ligne faitière des Hautes Terres. Toutes ces roches métamorphiques sont la preuve que le socle a subi plusieurs phases métamorphiques. Enfin, la rivière Manandona coule sur des formations récentes constituées par ses alluvions.

CARTE GEOLOGIQUE DE LA COMMUNE DE MANANDONA



localités

Lithologie:

- Alluvions, Sables
- Granites
- Granites migmatitiques, Migmatites granitoides
- Migmatites
- Quartzites
- Schistes, Gneiss, Micaschistes

Source: FTM

Projection: Laborde MADAGASCAR

Figure 13: Carte géologique de la commune de Manandona

❖ **Tectonique récente et active** [17]

La tectonique tient une place importante dans la zone de Manandona. À titre de rappel, Madagascar se structure suivant 2 directions fondamentales [10].

- Une orientation de la retombée occidentale N20° W dite direction Bongolava
- Une orientation de la façade orientale N20° E dite direction côte Est.

Ce sont ces deux directions qui sont responsables de la structuration de l'île ainsi que des principaux reliefs sur les Hautes Terres Malgaches.

Concernant la tectonique dans la région d'Antsirabe, plusieurs auteurs comme Lenoble (1949), Guigues (1952), ou encore Petit (1970 et 1998) reconnaissent l'existence de 3 failles. Celui du Mandray, du Betampona et de Betafo à l'Ouest.

Petit (1998), explique que la fin du Miocène était une période tectonique active pour l'ensemble de Madagascar. Une phase qui se poursuit pendant le Pliocène et durant le Quaternaire.

Puis des périodes volcaniques notamment le volcanisme de l'Ankaratra et du Vakinankaratra s'en suivirent. L'escarpement de Manandona est le prolongement de la faille de Betampona constitue la limite orientale du sillon. C'est un grand linéament de direction moyenne N5° E. L'escarpement relie la crête principale du massif de l'Ankaratra au Nord jusqu'au fossé de la Manandona au Sud. Elle est constituée de failles relais de même direction, avec des failles conjuguées de direction N110° et N45°. [17]

Au Sud de la route Antsirabe-Soanindrariny, la faille de Betampona est relayée par un accident N45° qui va rejoindre le sillon de la Manandona N5°.

Pour Petit (1998), la mise en place de la faille de Betampona a débuté au fin Pliocène et s'est poursuivie pendant le Quaternaire. D'où la présence des marques d'une tectonique récente et active sur cet escarpement : les facettes caractéristiques des failles. Quant à la faille de Mandray, c'est un linéament de direction moyenne qui s'étend du cœur du massif de l'Akaratra au Nord et jusqu'à la confluence de Sahatsio et Manandona au sud.

❖ **Pédologie :**

On y rencontre des sols ferrallitiques rouges typiques du climat tropical nuancé par l'altitude. Ce type de sol couvre une grande partie de la région. Ils sont d'évolutions très diverses, pouvant porter du maïs, du manioc, et peuvent se prêter à la culture de pommes de terre et à l'arboriculture. Dans les bas-fonds et marécages, drainés par la rivière, on rencontre surtout des sols peu évolués ou des sols hydromorphes où la riziculture est pratiquée. [21]

7. Situation socio-économique :

L'occupation humaine dans le sillon remonte avant la conquête du roi Radama Ier et la riziculture s'y pratiquait déjà sur une petite superficie). L'aménagement dans le sillon a débuté à partir de la colonisation et s'est poursuivi après l'indépendance par la construction d'ouvrages hydro-agricoles dans la plaine de Manandona. Tout cela s'est fait sous la pression de l'accroissement démographique.

La population de la commune rurale de Manandona comptait 12 033 habitants en 2005 contre 14 098 en 2015 (INSTAT, 2015). Le taux de natalité est de 1,2 % et le taux de mortalité est de 0,76 %. Ainsi le taux d'accroissement naturel est de 0,44 % (source PCD 2005). La population de moins de 18 ans représente 53 % de la population totale, ce qui marque une grande jeunesse de la population.

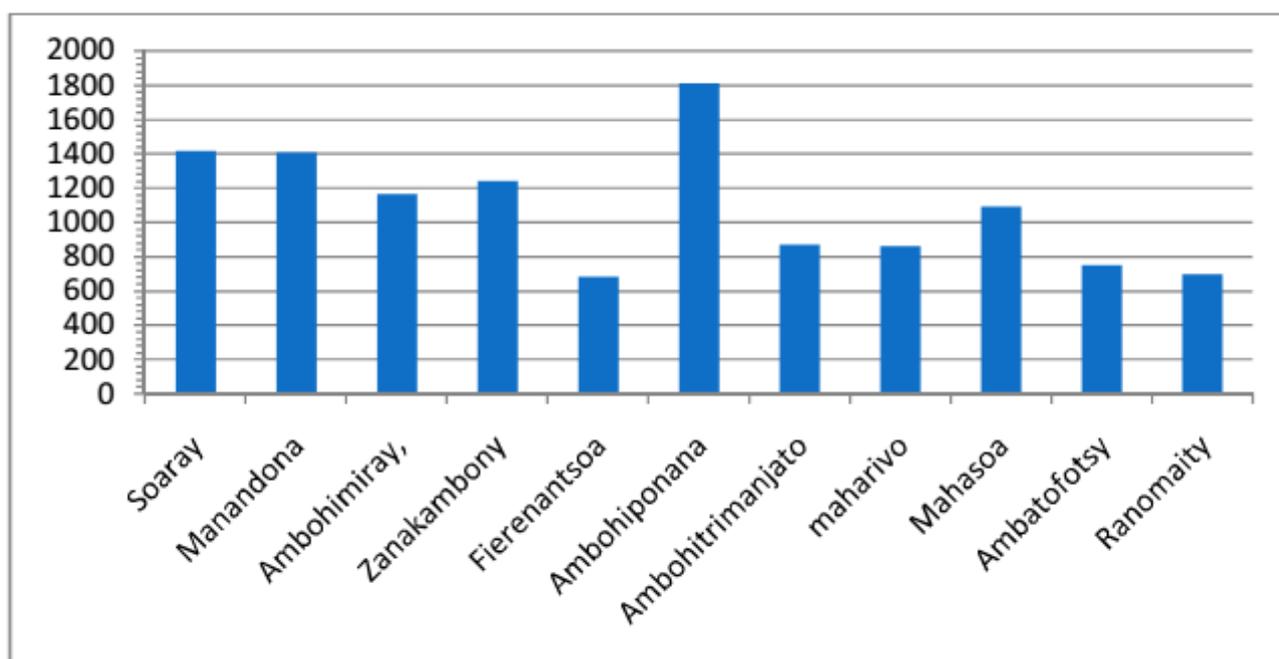


Figure 14: Démographie de la population dans les Fonkotany de Manandona (INSTAT,2015)

Concernant les activités de la population, en tant que commune rurale, l'économie est surtout basée sur l'agriculture.

Tableau 4: Activités principales des populations actives (INSTAT 2015).

Activités	Agricultures	Commerçants	Professions libérales
% de la population	80,17	1,86	0,36

D'après ce tableau l'agriculture tient un rôle important dans l'économie de la commune. Les cultures vivrières occupent une place importante comme la culture du riz, du maïs, haricot, pomme de terre, manioc, la patate douce, taro. Ces cultures vivrières sont pour la plupart destinées à la consommation locale. Cependant, les besoins de la population ne sont pas satisfaits pour de nombreuses raisons comme les problèmes d'inondation, mais aussi à cause des techniques ainsi que des outils agricoles archaïques et rudimentaires.

Grâce à sa proximité avec la ville d'Antsirabe, des cultures industrielles sont aussi pratiquées. Il s'agit surtout de culture de contre saison et constitue des revenus supplémentaires pour les ménages, car ils vendent leurs produits aux industries d'Antsirabe. Ces cultures industrielles sont : le soja, le blé, l'orge et des arboricultures fruitiers comme la pêche, l'orange et la Vigne. (PCD Manandona, 2005).

Avec une activité économique basée sur l'agriculture qui est encore au stade traditionnel avec un faible rendement, les activités dans la commune dépendent ainsi de la rivière Manandona. Par ailleurs, sous la pression démographique, les terrains de cultures ne se limitent pas dans la plaine ni dans les bas-fonds, mais sur des terrains à forte pente sur des puissants reliefs. Une couverture végétale marquée par une absence de forêt, un climat tropical à précipitations abondantes concentrées sur quelques mois seulement, ainsi que des eaux qui ruissellent de part et d'autre du sillon, constituent des paramètres pour enclencher les processus d'érosion. En outre, le sillon a été mis en place par la tectonique et l'action de l'érosion différentielle, qui sera ensuite remplie par des sédiments fluviaux.

II. Caractéristique du bassin versant de la Manandona (rivière)

D'une superficie de 574 km² jusqu'à sa confluence avec la Sahalombo dans le sillon, la Manandona draine l'Est du bassin d'Antsirabe et longe la faille de Betampona. Elle prend sa source dans les contreforts de l'Ankaratra au Sud du massif d'Antsoatany d'une altitude de 1740 m. Sur les 20 premiers kilomètres, le profil longitudinal montre une pente forte (Puis au niveau du village d'Andranomiantra, elle reçoit ses affluents rive droite : Anjamana et Andranotobaka. La pente diminue de (0,4 %) puis à la traversée de la faille de Mandray la pente longitudinale s'accélère. Puis, elle reçoit la rivière Sahatsio, la pente s'accélère à nouveau avant de plonger vers la plaine d'Ivohibe le long de la RN7. [17]

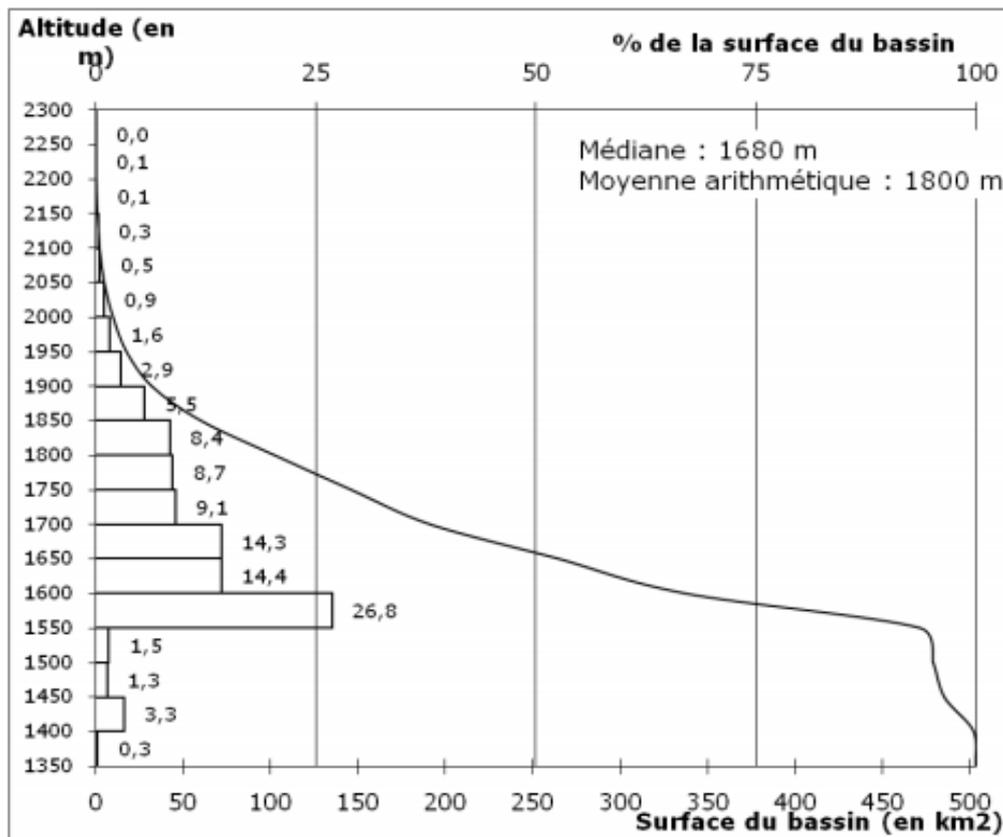


Figure 15: Courbe hypsométrique du bassin versant de Manandona [17]

Tableau 5 : Caractéristique morphométrique du bassin versant de Manandona [17]

B.V de la Manandona et ses sous B.V(Exutoire)	Superficie (Km²)	Longueur de la rivière (Km)	Indice de compacité KC	Pente (m/Km)
Avant la confluence avec le Sahalombo	574	90	1,77	10,06
Confluence avec le Sahalombo	169	90	1,64	9,54

L'indice de compacité KG a été calculé à partir de la formule :

$$KG = \frac{0,28.P}{\sqrt{S}}$$

P : Périmètre du bassin versant

S : Surface du bassin versant

L'indice de Gravelius dépasse le chiffre un (1), ce chiffre est expliqué par la forme allongée du bassin versant. Un indice de pente élevé implique une compétence élevée, car la gravité est d'autant plus importante que la pente est forte. Durant la saison des pluies, d'importantes quantités d'eau peuvent être véhiculées par ces ruisseaux et se déversent dans la plaine de Manandona vers la rivière. D'où la qualification de gouttière du sillon de Manandona, car d'importantes quantités d'eaux ruissellent vers la rivière notamment en saison pluvieuse.

Chapitre III : L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LA ZONE D'ÉTUDE

D'après la définition de l'érosion qu'on a citée au-dessus : c'est un ensemble de phénomènes externes qui à la surface du sol ou à faible profondeur, enlèvent tout ou partie des terrains existants. Ici l'eau demeure le principal agent de l'érosion dans le bassin versant de la Manandona. Le processus de l'érosion se fait en deux étapes : Il y a d'abord la phase de préparation en d'autres termes appelée « altération » puis la mise en mouvement des matériaux altérés.

I. L'érosion hydrique : source d'ensablement

Une coupe dans un chenal abandonné suite à des aménagements anthropiques montre bien que le sable prend de l'importance dans les sédiments transportés par la Manandona. Actuellement, les sédiments deviennent de plus en plus sableux.



Figure 16: Coupe dans un lit abandonné par la rivière

La photo nous montre que les argiles et les limons dans la partie supérieure sont moins épais et le sable constitue la majeure partie de la coupe. Cette coupe montre trois énergies différentes de l'eau. A la base, des sables grossiers avec des galets à stratification entrecroisée, qui indiquent un environnement de dépôt agité lié à une forte énergie. Puis une stratification oblique de sable beaucoup plus fin qui indique une baisse de l'énergie et au sommet un litage à circonvolutions de limons et d'argiles en relation à une énergie beaucoup plus faible.

Voyons quels sont alors l'origine de ces ensablements dans la plaine de notre secteur.

II. Les facteurs de l'érosion hydrique dans la zone d'étude

Selon nos recherches, les facteurs de l'érosion sur la zone d'étude peuvent être à la fois naturels et anthropiques.

→ Les causes naturelles :

- **Des conditions géologiques favorables à l'érosion**

En ce qui concerne la géologie, les roches métamorphiques telles que les gneiss et les migmatites sont des roches moins résistantes aux agents de l'érosion. Or, d'après le contexte lithologique dans le sillon, et le fait est que cette zone appartient au système de graphite de Besairie (Besairie, 1973), il y a donc une prédominance de migmatite, de gneiss donc des matériaux favorables à l'érosion.

- **Le climat**

La capacité d'érosion des eaux pluviales est très importante. La durée des pluies et leur intensité sont les facteurs prépondérants de l'érosion hydrique. L'intensité des précipitations exprime la hauteur en millimètre (mm) de pluies qui tombe pendant une unité de temps. C'est elle qui favorise l'agressivité des précipitations. Un orage de courte durée, mais qui présente une intensité forte est beaucoup plus érosif qu'une pluie de faible intensité. Cependant, des pluies de faible intensité, mais sur une durée prolongée comme les pluies générées par la CIT, sont aussi très érosives. Car le sol est fortement saturé et où il n'y a plus d'équilibre sur le versant c'est-à-dire un versant fragile propice à tout déplacement ; Concernant cette intensité de la pluie, à Madagascar et notamment sur les Hautes Terres Centrales, une pluie d'intensité inférieure à 28 mm/h est dite faible. L'intensité est moyenne quand elle est comprise entre 28-60 mm/h. Et enfin, les précipitations sont qualifiées de fortes intensités quand elles dépassent les 60 mm/h. [1]

Dans la région Vakinankaratra, des pluies intenses de 71mm/h pour le maximum et 53 mm/h pour le minimum ont une période de retour de 10 ans. Ce qui est très important comparée à la valeur de la moyenne nationale (CPGU ; GEO&ECO Consult ; HYDROARCH S.R.L Consulting Engineers, 2009). Donc, il n'est pas rare que des pluies intenses et agressives contribuent à l'érosion des versants.

- **La pente topographique et le ruissellement :**

La pente tient un rôle important parmi les facteurs de l'érosion sur les versants. En effet, les fortes pentes favorisent un écoulement fort sous l'effet de la gravité. Cela accentue donc le ruissellement et plus précisément la compétence et la vitesse des eaux de ruissellement. Ainsi, il y a érosion sur les versants.

- **Les causes anthropiques ou humaines :**

L'homme figure aussi parmi les facteurs de l'érosion par ses actions qui modifient le milieu.

- **Les feux de brousses :**

Ils sont fréquents dans la commune de Manandona et aux alentours. La communauté locale brûle les versants pour faciliter les travaux des champs, et se servent des cendres comme engrais et apports biologiques sur des versants pauvres en éléments nutritifs. Cela se produit surtout en fin de saison sèche entre août et novembre. Les communes de Manandona et ses environs se trouvent d'ailleurs dans le rouge sur le TBE du Vakinankaratra en raison de la fréquence des feux de brousse (Office National pour l'Environnement, 2005).

Le passage répété des feux entraîne une dégradation de la couverture végétale en pseudo steppe donc une « nudité » progressive des sols des versants (Randriatsivery, 2005) ; (Ramahefamanana, 2012). Ainsi, ils sont non protégés lorsqu'arrivent les premières gouttes de pluie en début de la saison pluvieuse. Ces premières pluies sont d'ailleurs très agressives d'où le rôle des feux de brousse dans le processus d'érosion des versants.

- **L'utilisation des sols pour la culture :**

D'après une enquête auprès de la population, la mise en culture des versants a déjà débuté bien avant la colonisation. Les fortes pentes de l'escarpement de Manandona n'empêchent en rien la population d'y pratiquer l'agriculture avec des méthodes et techniques rudimentaires.

Comme les constructions des petits chenaux, qui servent pour l'écoulement des eaux de ruissellement. Il s'agit de mesure de protection contre le ruissellement. Mais ces chenaux seront travaillés par l'eau puis vont former des ravins. Ce que les gens pensent comme une pratique contre l'érosion, accentueront davantage les actions du ruissellement, car les eaux vont se concentrer dans ces chenaux avec les processus d'érosion qui l'accompagne.



Figure 17: Chenaux érodé, Source : auteur

Comme il a été énoncé auparavant, les méthodes sont archaïques, il n'y a pas d'utilisation d'engrais, mais les herbes sont brûlées et servent d'engrais. Les feux répétés favorisent encore l'érosion des sols, car la couverture végétale devient de plus en plus disparate par le fait qu'il est difficile de maîtriser ou circonscrire le feu. Ainsi, la pente est forte, le sol est travaillé donc ameubli, puis une couverture végétale faible d'où l'aggravation du phénomène d'érosion.

III. Un ravinement extrême dans les versants :

Les rigoles et les ravines se forment quand la vitesse du ruissellement augmente et il y a concentration des filets d'eau. Ces filets d'eau vont former de petits ruisselets qui descendent le long du versant en entaillant le sol à une certaine profondeur en formant des griffures. Les griffes ont une profondeur de quelques centimètres alors que les rigoles entaillent le sol à plus d'une dizaine de centimètres. La poursuite de ces formes d'érosion combinée à d'autres paramètres aboutira par la suite à la formation de lavaka.



Figure 18: Ravinement dans les versants, Source : Auteur

Les lavaka sont de grandes excavations en forme de cirque creusée dans le flanc d'une colline. Les lavaka sont les exagérations ou l'aboutissement extrême du processus d'érosion en ravins ou « *gully erosion* ». Elles peuvent être dues à la structure latéritique des argiles. Les « lavaka » sont aussi présents sur les versants notamment du côté Ouest de la commune et peuvent aussi contribuer à l'apport de sédiments dans la plaine de Manandona.

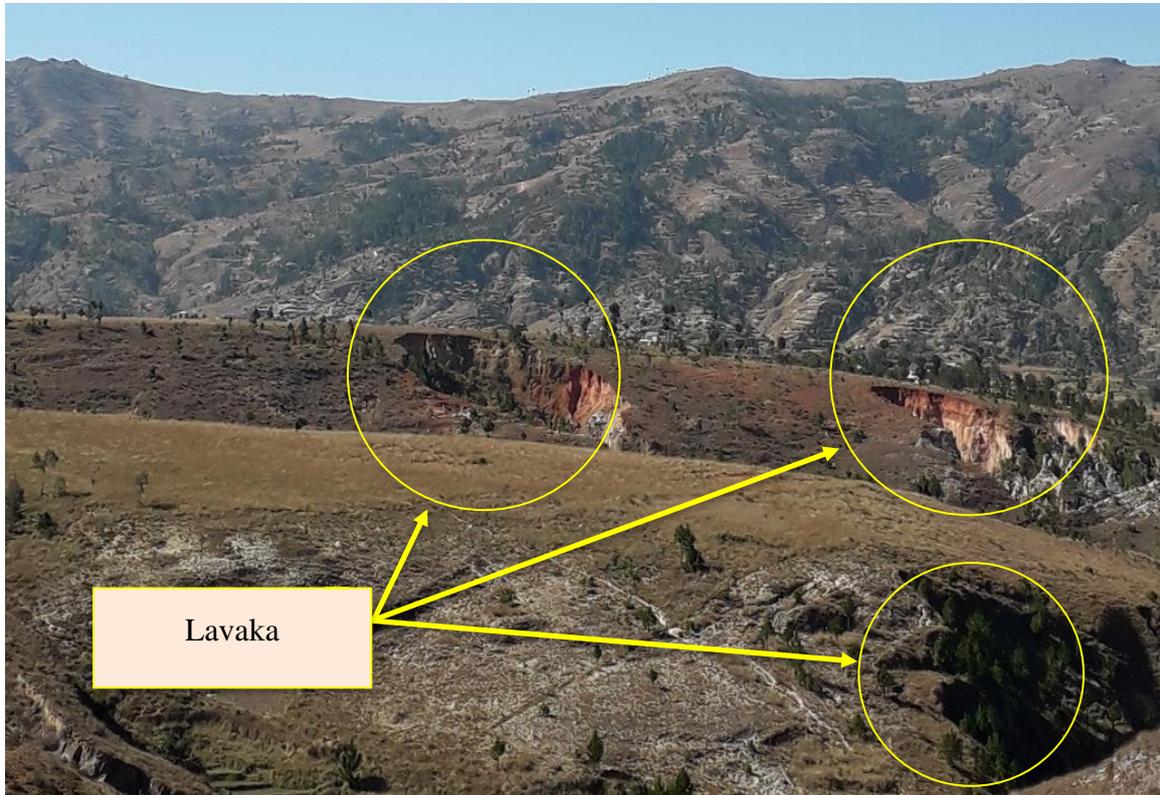


Figure 19 : Les lavaka sur une colline, Source : Auteur

Les lavaka sont alors une source importante de sable pour les rizières à proximité. Durant les crues, la rivière et ses affluents apportent d'importantes quantités de sables qui se déposent dans les rizières, sur les levées, dans le chenal de la rivière même. Même la route RN7 est ensablée durant les fortes crues par les affluents venant de l'escarpement de Manandona. Ces ensablements sont très importants et de nombreuses rizières et parcelles agricole sont ensevelies sous les sables entraînant ainsi une baisse de la superficie des terres cultivables.



Figure 20: Ensablement sur la RN7 et dans les champs, Source : Auteur

ensevelis sous d'énormes quantités de sables à cause d'une rupture de digues de la Sahalombo. De nombreux hectares de rizières ont été ensevelis sous le sable. Les faits se sont passés durant les épisodes pluvieux pendant le début de l'année 2022 où il a plu durant des jours voire des mois amenant une importante quantité d'eau. Actuellement, les gens peinent à dégager le sable et la riziculture est encore quasi-impossible, ce n'est qu'un exemple parmi tant d'autres où le sable envahit les rizières suite à des ruptures de digues.

Par ailleurs, la rivière transporte d'importantes quantités de sable et les dépose au niveau du pont à l'entrée de la commune rurale de Manandona. Ces sables ont pour origine les versants dénudés du cours supérieur à caractère montagneux de la rivière comme les sommets d'Antsoatany et ils sont alors transportés sur de longues distances et se déposent à l'entrée de la plaine. L'étude de l'origine des sables est complexe et nécessite des dispositifs et moyens techniques importants comme la mise en place des pièges à sédiments. Par contre, le dépôt de sable au niveau du pont à l'entrée et au Sud-Ouest de la commune de Manandona a engendré une activité d'extraction de sable durant plus de vingt ans maintenant.



Figure 21: La rivière Manandona et sa carrière de sable dans le lit, Source : Auteur

Partie II

METHODOLOGIE

Chapitre IV : ANALYSES ET TRAITEMENTS DES DONNÉES

I. Approche méthodologique :

L'intérêt de notre démarche réside et s'appuie sur l'apport des données numériques par l'exploitation d'un SIG, permettant de spatialiser et caractériser le degré de sensibilité des sols à l'érosion sur l'ensemble de la zone d'étude.

La première étape de notre démarche consiste à identifier les critères les plus représentatifs intervenant dans les phénomènes érosifs. Il s'agit des facteurs et contraintes choisies.

La deuxième étape consiste à intégrer les données sous forme de couches d'informations dans un SIG. Ces couches sont ensuite reclassées qualitativement sous forme d'un indicateur de sensibilité en fonction de leur contribution au phénomène d'érosion.

Finalement le résultat de la combinaison multicritère, apporte une spatialisation de l'érosion potentielle des sols, classée selon un niveau de sensibilité.

Mais avant de procéder à l'élaboration de la carte de vulnérabilité d'érosion, il est avant tout nécessaire de connaître et de développer nos matériels d'études et l'acquisition de nos données.

II. Matériels et données utilisés

Le matériel est constitué de données et de logiciels. La démarche appliquée dans cette étude nécessite l'intégration de données spatiales, des cartes numériques, des images satellitaires et des données alphanumériques relatives à la topographie.

Voici les logiciels qui sont utilisés dans le cadre de cette étude :

- QGIS pour les mises en pages et traitements des données vecteurs, MNT et satellitaires ;
- SAGA GIS pour la délimitation des bassins versants et la création des écoulements hydrographiques dans la commune de Manandona ;
- GRASS pour la numérisation des critères et leurs classifications, et la sortie de la carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique

1. Présentation du logiciel QGIS



Figure 22: Logo de QGIS

Appelé à l'origine *Quantum-GIS*, c'est un logiciel libre et gratuit de système d'information géographique (SIG). QGIS fonctionne sur la base de projets, qui vont permettre d'enregistrer des *sessions de travail sur les données*. Ainsi, chaque projet va contenir les liens vers les données ou leurs sources distantes, les styles qui leur sont appliqués (notamment pour en faire des cartographies), les filtres ou sélections réalisées, pour les sauvegarder dans un fichier projet. Ces fichiers pourront permettre de facilement retrouver un espace de travail enregistré.

Au cours des dernières années, Qgis a su s'imposer comme une référence en matière de SIG open source. En effet, son interface graphique est connue pour être ergonomique et intuitive et l'accès aux « fonctions de base » se fait très facilement par les différentes barres d'outils. Pour autant, l'utilisateur aguerri préfère souvent se servir de la boîte à outils plus complète où il peut, par exemple, développer ses propres modèles de Géotraitement (à la manière du « Modèle Builder » d'ArcGIS). En plus de la boîte à outils, il peut aussi utiliser la console Python du logiciel pour appeler les différentes fonctions ou créer ses propres scripts

Même si depuis la version 3.0 du logiciel un nombre important de fonctionnalités sont intégrées nativement dans Qgis, beaucoup d'utilisateurs augmentent les capacités du logiciel grâce à la bibliothèque d'extensions. Les extensions sont développées en majorité par les utilisateurs de Qgis et sont basées sur le langage Python. Chaque utilisateur a donc la possibilité de créer ses propres plugins dans le cadre de ses travaux pour faciliter et améliorer des fonctions, existantes ou non, du logiciel. [W3]

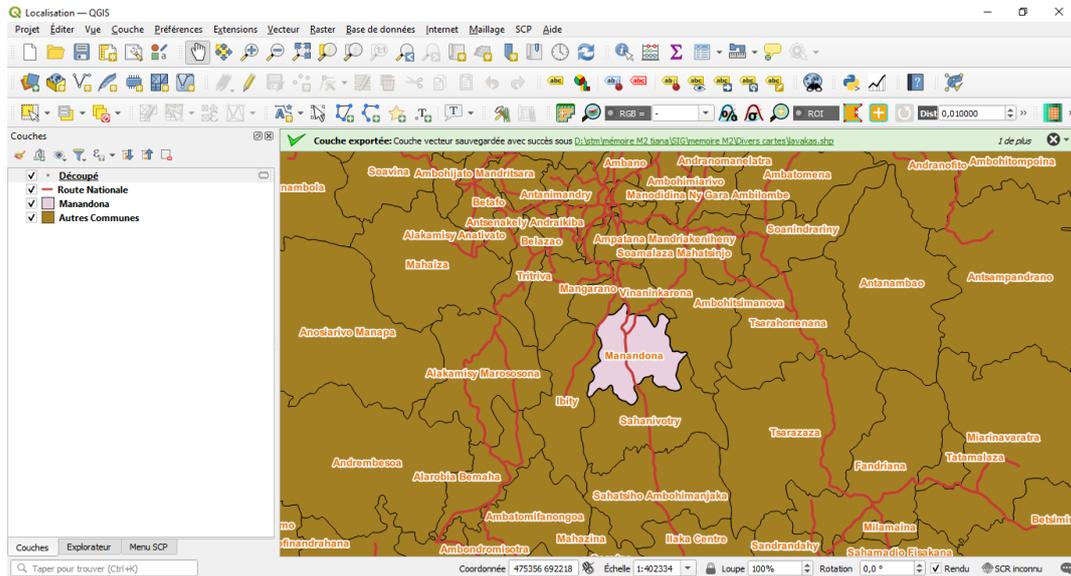


Figure 23: Interface principale de QGIS

2. Présentation de GRASS GIS et de SAGA GIS

Tout comme QGIS, GRASS et SAGA sont des logiciels dit Open sources qui sont en effet des outils complémentaires et indispensables pour QGIS, mais peuvent être utiliser indépendamment l'un à l'autre selon les besoins et objectifs des utilisateurs. On a ainsi choisi pour les deux logiciels la version récente 7.8.2 qui sont stables et remplies de nouvelles fonctionnalités, des nouvelles mises à jours et correction des bugs.

a) GRASS



Figure 24: Logo de GRASS GIS

GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) est un logiciel libre de SIG bien connu qui dispose d'une large gamme de fonctions SIG. Il a été publié pour la première fois en 1984 et il a subi de nombreuses améliorations au fil du temps.

GRASS est de conception modulaire, c'est-à-dire qu'à chaque fonction du logiciel correspond un module, ce qui permet d'économiser la mémoire et la CPU de l'ordinateur en lançant que les modules dont l'utilisateur a besoin. Ces modules sont regroupés en familles : r.* pour les fonctions rasters, i.* pour les fonctions de traitement d'image, r3.* pour les fonctions volumiques (rasters tridimensionnels), v.* pour les fonctions vectorielles, db.* pour

les fonctions ayant trait aux bases de données liées (ou pg.* pour utiliser spécifiquement la base de données Postgres), d.* pour les fonctions d'affichage, ps.* pour la production de cartes Postscript, ou encore g.* pour les fonctions générales de GRASS telles que manipulation/suppression/renommage de fichiers ou le paramétrage du Secteur ("location" en particulier système de géoréférencement choisi pour le projet ou résolution des fichiers rasters), de la région ("region", c'est-à-dire la vue du projet mais aussi la zone sur laquelle porteront calculs, analyses, ou exportations), ou du jeu de données ("mapset", répertoire de travail de l'utilisateur sur lequel il a droit de lecture et d'écriture tandis que les autres utilisateurs ont le seul droit de lecture).

Ses fonctionnalités font de GRASS, en particulier à partir de sa version 6, un logiciel extrêmement puissant et polyvalent puisqu'il hérite des puissantes fonctionnalités de GRASS 5 en traitement d'image et en analyse raster (cf. algèbre de carte) et que s'y ajoutent des fonctionnalités vectorielles 2D et 3D (rappelons que GRASS est un logiciel topologique).

Il accepte une multitude de formats propriétaires ou d'échange en importation ainsi qu'une grande variété de formats en exportation grâce à son interface avec les bibliothèques autonomes GDAL et OGR.

De plus, la refonte de son interface en Gestionnaire SIG et l'arrivée de nouvelles interfaces telles que QGIS ou JavaGRASS (ou JGRASS) lui confèrent un confort d'utilisation accru en particulier pour la numérisation de données ou la mise en page cartographique à l'intérieur de GRASS.

Il est aussi reconnu comme étant particulièrement adapté dans le cadre d'un travail collaboratif grâce à sa gestion des jeux de données utilisateurs.

b) SAGA GIS



Figure 25: Logo de SAGA GIS

SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses) est un système SIG Open Source (GPL) polyvalent mais principalement axé sur l'analyse de terrain. Plus d'informations sur la page d'accueil de SAGA. La première version de SAGA était uniquement un programme

MS Windows mais depuis la version 2.0, c'est un programme multiplateforme basé sur GTK wxWidgets et une interface en ligne de commande.

Le premier objectif de SAGA est de fournir aux (géo)scientifiques une plate-forme efficace mais facile à apprendre pour la mise en œuvre de méthodes géo scientifiques. Cet objectif est atteint grâce à l'interface de programmation d'applications (API) unique de SAGA. Le deuxième objectif est de rendre ces méthodes accessibles de manière conviviale, ce qui est fait en premier lieu par son interface utilisateur graphique (GUI). L'ensemble de ces éléments constitue la véritable force de SAGA : un ensemble de méthodes géoscientifiques en pleine expansion, prêtes à être utilisées dans de nombreuses applications.

SAGA est codé dans le langage de programmation très répandu et puissant C++ et a une conception de système orientée objet. Depuis la version 2, SAGA utilise la bibliothèque GUI multiplateforme wxWidgets pour la fonctionnalité de l'interface utilisateur. Comme wxWidgets permet le développement de logiciels indépendants du système d'exploitation.

3. La télédétection

a) Définition :

Au sens large, la télédétection est la mesure ou l'acquisition d'informations sur l'environnement d'un objet ou un phénomène, par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec l'objet étudié. C'est l'utilisation à distance (par exemple, d'un avion, d'un engin spatial, d'un satellite ou encore d'un bateau) de n'importe quel type d'instrument permettant l'acquisition d'informations sur l'environnement. On fait souvent appel à des instruments tels que : appareils photographiques, lasers, radars, sonars, sismographes ou gravimètres.

La télédétection est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, d'observer et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci. Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de cette cible : géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption, etc.) et physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle foliaire, phytomasse, matière organique du sol,...), etc.

Télédétection passive : Enregistrement du rayonnement naturel, fourni par la lumière ou la chaleur, qu'il soit émis, réfléchi ou réfracté (ex : photographies aériennes du paysage éclairé par la lumière du soleil ainsi que certaines images satellitaires comme (SPOT, LANDSAT, IKONOS,))

Télédétection active : Enregistrement du rayonnement que réfléchit l'objet ou le paysage « illuminé » par l'opérateur (ex : images radar).

b) Les principes de la télédétection :

Le rayonnement émis par une source d'énergie ou d'illumination (A) parcourt une certaine distance et interagit avec l'atmosphère (B) avant d'atteindre la cible (C). L'énergie interagit avec la surface de la cible, en fonction des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface. Le rayonnement est réfléchi ou diffusé vers le capteur (D), qui l'enregistre et peut ensuite transmettre l'énergie par des moyens électroniques à une station de réception (E) où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques). Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image (F) est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible. La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier (G)

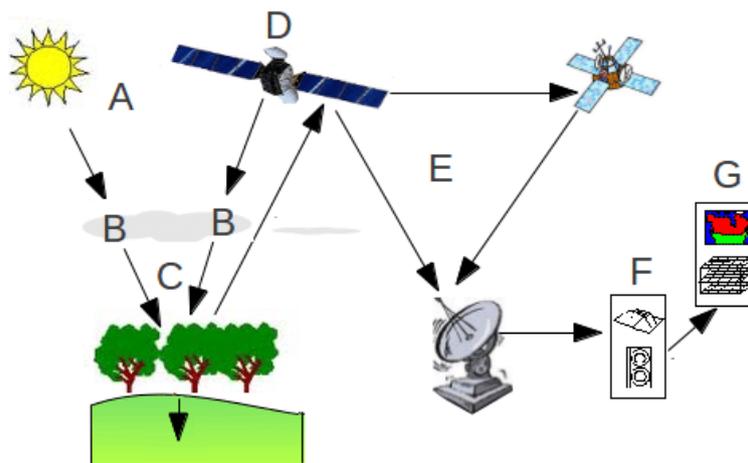


Figure 26: Principe de la télédétection [14]

Les sept étapes du processus de télédétection (figure 27): (A) source d'énergie ; (B) atmosphère ; (C) cible ; (D) capteur ; (E) transmission, réception et traitement ;(F) interprétation et analyse ; (G) Application.

4. L'analyse multicritère :

a) *Définition et principes :*

L'analyse multicritère est une méthode qui permet d'orienter un choix sur la base de plusieurs critères communs. Cette méthode est essentiellement destinée à la compréhension et à la résolution de problèmes de décision. Les critères sont l'élément de base décisionnel. Ils peuvent être évalués ou mesurés. Ils se composent de deux types de variables : les facteurs et les contraintes.

Dans toutes les méthodes d'analyse multicritère, il s'agit de choisir et d'utiliser le modèle mathématique le plus adapté au type de décision à prendre. Comme toute modélisation, l'analyse multicritère doit décrire la réalité de façon pertinente pour permettre de transposer les conclusions du modèle vers le problème réel. Pour choisir et mettre en œuvre le modèle, on fait généralement appel à une ou plusieurs personnes extérieures à la décision.

b) *Cartographie multicritère :*

L'objectif de la cartographie multicritère est de fournir des cartes d'aide à la décision pour chaque état de la variable. Pour cet usage de l'espace, la finalité sera une carte d'aptitude ou de probabilité que l'on peut qualifier de carte décisionnelle. L'AMC se déroule donc en plusieurs étapes dont les principales sont la catégorisation des couches "critères" en facteurs et contraintes, la standardisation des facteurs par recours à des fonctions d'appartenance, à la pondération des facteurs et leur agrégation pour obtenir la carte d'aptitude final. [4]

Les phases principales d'une cartographie multicritère :

Les approches multicritères montrent trois étapes principales :

- Etape 1 : Description du problème et rassemblement des données nécessaires à sa résolution.
- Etape 2 : Correspond à des traitements simples avec des analyses des données, extraction des caractéristiques qui se rapportent au problème posé et superposition/intersection
- Etape 3 : Comprend la classification statistique, la modélisation et la combinaison des données avec assignation de poids



Figure 27: Principe de la cartographie multicritère

III. Démarche méthodologique :

Comme on l'a cité avant, la première étape de la démarche consiste à identifier les critères et à sélectionner les facteurs et les contraintes qui sont plus à même d'influencer l'érosion dans un bassin versant. D'après les différentes littératures et les données qu'on a, quatre critères influencent la capacité du sol à s'éroder, il s'agit de la topographie, de la formation géologique, pédologiques, les réseaux de drainage, de l'occupation du sol et de l'agressivité du climat. Dans ce travail le climat n'a pas été pris en compte car les données obtenues sur le climat ne permettent pas d'établir de façon précise l'agressivité des précipitations sur le plan spatial. L'effet de la précipitation est alors considéré comme homogène sur l'ensemble de la zone d'étude.

La démarche s'appuie sur l'utilisation des données numériques par l'exploitation d'un SIG qui a permis de spatialiser et caractériser le degré de vulnérabilité des sols à l'érosion sur la zone étudiée. La méthode consiste à intégrer les différentes données sous formes de couches d'information dans un SIG. Ces couches sont ensuite reclassées sous forme d'un indicateur de vulnérabilité en fonction de leur contribution au phénomène d'érosion. Les nouvelles informations ainsi obtenues sont alors combinées par le biais d'une analyse multicritère par la méthode de la somme pondérée.

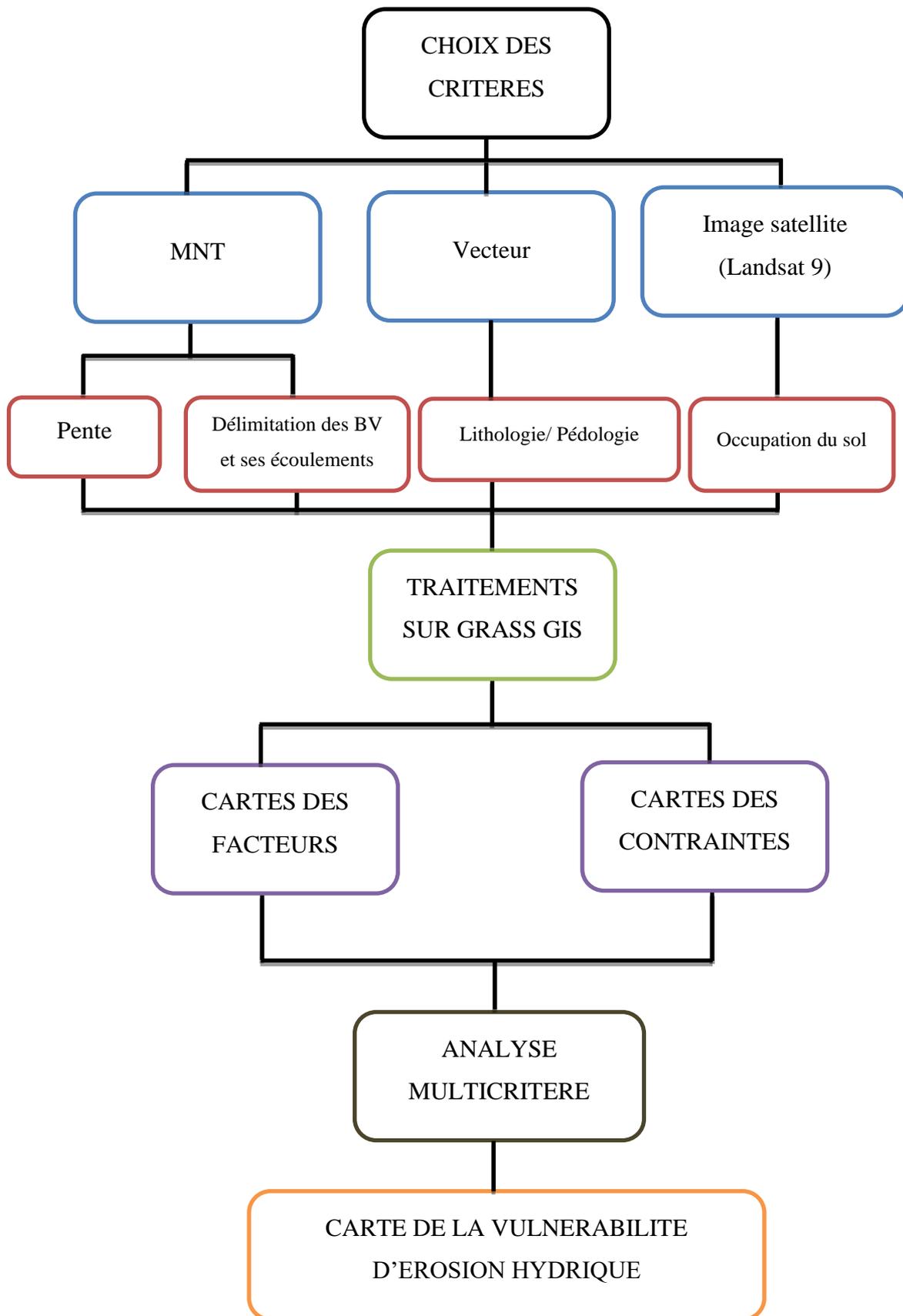


Figure 28 : Les étapes méthodologiques

1. Acquisition des données :

➤ *MNT ou Modèle Numérique de Terrain :*

Le modèle numérique de terrain est la représentation sous forme numérique du relief d'une zone géographique (représentation de la topographie : altimétrie et/ou bathymétrie). Elle est issue d'un échantillonnage de valeurs d'altitude qui ont été mesurées sur la surface terrestre, et qui, par l'application des méthodes d'interpolation, ont permis l'estimation de valeurs d'altitudes approchées en tout point de surface. Le MNT indique la forme brute du terrain, sans construction ni végétation, c'est une schématisation de la région étudiée. Ainsi, un MNT est une représentation numérique et simplifiée du relief qui est reproduit par le codage des altitudes en chaque point d'une matrice.

Et c'est à partir du MNT que QGIS peut déterminer les pentes, l'altitude, les formes des BV et ses sens d'écoulement des eaux. Notre donnée d'altitude est issue de l'SRTM à 30 m de résolution.

➤ *Vecteur :*

Les caractéristiques géologiques de la région ont été déduites à partir de la base de données du milieu physique de la commune de Manandona ; et les caractéristiques pédologiques sont extrait à partir du croisement des données en pente (MNT) et de la carte géologique (FTM) [16]. La base de données est une donnée à l'échelle 1/500 000. De cette carte a été analysée et extrapolée l'aptitude des sols et sous-sols vis-à-vis de l'érosion, c'est-à-dire la vulnérabilité des sols à l'érosion par rapport à la pédologie de la zone d'étude ou l'érodibilité.

➤ *Photo satellite par LANDSAT 9 :*

Une Photo-satellite provenant du satellite Landsat 9 a été utilisée pour établir la carte d'occupation du sol de la zone d'étude. Cette image satellite a été prise pendant la période pluvieuse et ensoleillé c'est-à-dire au mois de Décembre pour avoir une image claire et éclairé, la date d'acquisition est le 18 Février 2022. La résolution de l'image est de 30m. La référence de l'image est «**LC91590742022049LGN00** ». En plus de la haute résolution, les images Landsats ont l'avantage d'être téléchargeable gratuitement sur le site de l'USGS (United States Geological Survey) : « <http://earthexplorer.gov> ».

Landsat est le système d'observation de la surface terrestre par satellite le plus ancien des Etats Unis. La NASA a lancé le premier satellite de la série de LANDSAT (à l'origine appelé ERTS : "the Earth Resources Technology Satellites") le 23 juillet 1972. Le programme a été renommé LANDSAT en 1975. A nos jours 9 satellites Landsat ont été lancés.

LANDSAT 9 est équipé par l'imageur terrestre opérationnel 2 (OLI-2) qui permet d'enregistrer les observations de la surface de la Terre dans les bandes visible, proche infrarouge et infrarouge à ondes courtes, tandis que son capteur infrarouge thermique 2 (TIRS-2) mesure le rayonnement infrarouge thermique (chaleur) émis par la surface de la Terre.

La précision et la commodité d'interprétation des images LANDSAT facilitent leur utilisation pour la cartographie. Les données LANDSAT peut être utilisées dans un système d'information opérationnel pour différentes applications dont la géologie, la foresterie, le suivi à long terme de l'utilisation du sol, ... La composition colorée des images LANDSAT facilite l'établissement de cartes d'occupation du sol.

▪ Acquisition des données satellitaires :

Selon la disponibilité des données et l'observation du bassin versant dans la commune de Manandona, nous avons pris des images Landsat 9 venant du capteur Thematic Mapper (TM) et l'Operational Land Imager 2 (OLI-2) recouvrant une scène de 185 km x 185 km et avec 30m de résolution.

Tableau 6: Caractéristique de LANDSAT 9 [W1]

Date	Satellite	Bandes	Spctre électromagnétique	Capteur
18/02/2022	LANDSAT 9 (2021)	1	Coastal aerosol 0.43–0.45 µm (30m)	OLI-2(Operational Land Imager)
		2	Blue 0.45–0.51 µm	
		3	Green 0.53–0.59S µm	
		4	Red 0.64–0.67 µm	
		5	NIR 0.85–0.88 µm	
		6	SWIR1 1.57–1.65 µm	
		7	SWIR2 2.11–2.29 µm	
		8	Panchromatic 0.50–0.68 µm (15m)	
		9	Cirrus 1.36–1.38 µm (30m)	
		10	10,60-11,19(100)	
		11	11,5-12,51	

- Application principale de chaque bande sur LANDSAT 9 (USGS.gov)

Tableau 7: Caractéristique de chaque bande de LANDSAT 9 [W1]

Bande	Utilité pour la cartographie
Band 1 - coastal aerosol	Études sur les côtes et les aérosols
Band 2 - blue	Cartographie bathymétrique, distinction entre le sol et la végétation et entre la végétation de feuillus et de conifères
Band 3 - green	Met l'accent sur le pic de végétation, ce qui est utile pour évaluer la vigueur des plantes.
Band 4 - red	Discriminer les pentes de végétation
Band 5 - Near Infrared (NIR)	Met l'accent sur le contenu de la biomasse et les rivages
Band 6 - Short-wave Infrared (SWIR) 1	Distingue la teneur en humidité du sol et de la végétation ; pénètre les nuages fins
Band 7 - Short-wave Infrared (SWIR) 2	Améliore la teneur en humidité du sol et de la végétation ; pénètre les nuages minces
Band 8 - Panchromatic	Résolution de 15 mètres, définition d'image plus nette
Band 9 - Cirrus	Amélioration de la détection de la contamination des cirrus
Band 10 - TIRS 1	Résolution de 100 mètres, cartographie thermique et estimation de l'humidité du sol
Band 11 - TIRS 2	Résolution de 100 mètres, cartographie thermique améliorée et estimation de l'humidité du sol

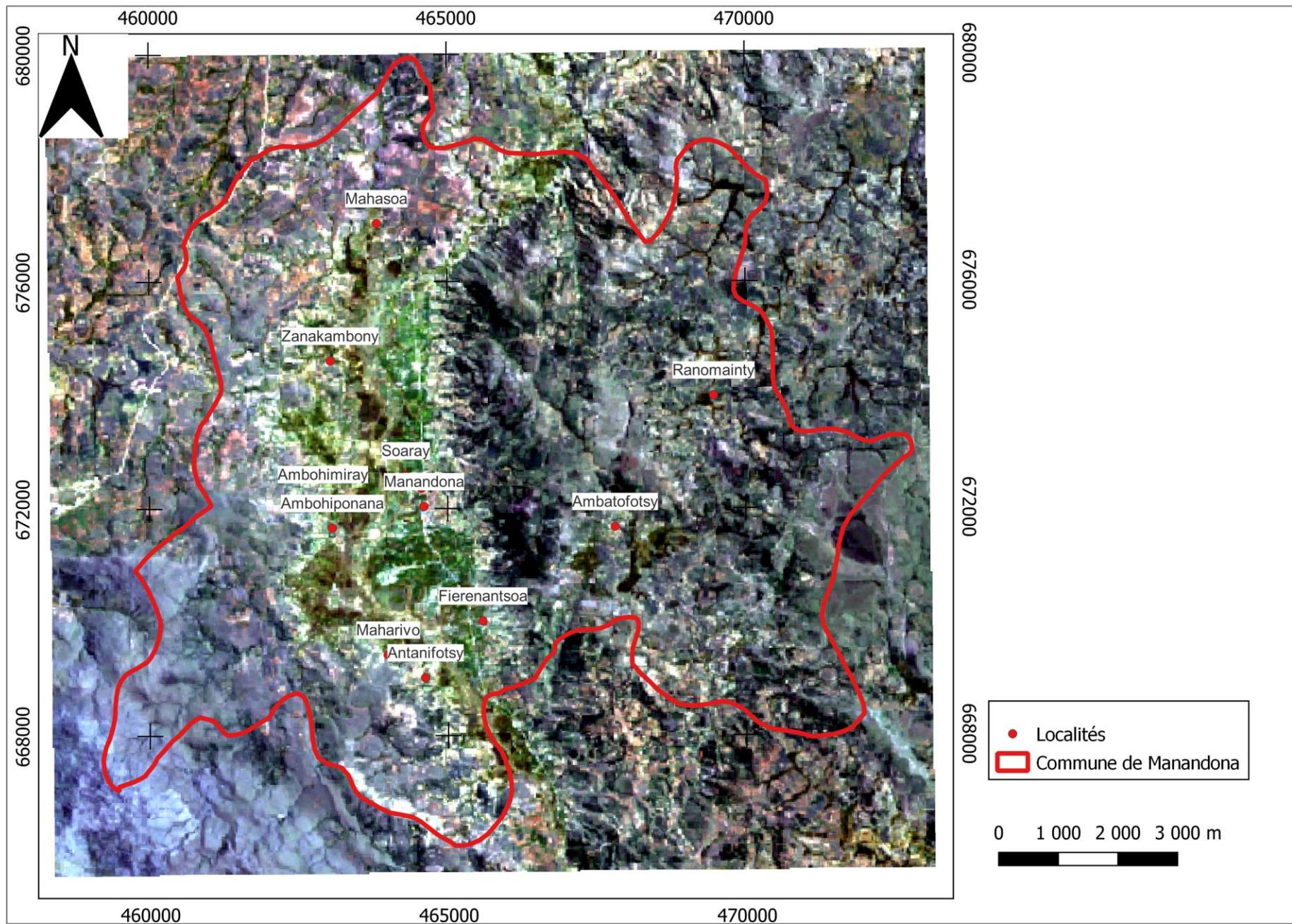


Figure 29: Image satellite de LANDSAT 9 par la composition 4-3-2

- Coordination des données :

Enfin, il est important de noter que tous ces données doivent être uniforme c'est-à-dire qu'ils doivent tous être en image raster de la même résolution de 30m et sur le même système de projection.

2. Identification des critères :

Afin de parvenir au résultat final l'AMC consiste tout d'abord à déterminer les critères qui sont en effet le principe de base à mesurer et à évaluer pour la prise de décision. Dont le facteur qui est un mis en valeur ou lui en réduit et qui provient d'une convenance d'une alternative spécifique pour une activité considérée ; et les contraintes qui sert à limiter les alternatives considérées. Les contraintes sont des variables binaires qui limitent spatialement la décision. D'après nos données acquis et nos études on a ainsi identifié les critères suivants :

❖ CRITERE PENTE :

La pente est un critère déterminant pour une érosion hydrique. Plus la pente est grande, plus le ruissellement est privilégié.

Lorsque l'inclinaison de la pente augmente, l'énergie cinétique des pluies reste constante mais le transport s'accélère vers le bas car l'énergie cinétique du ruissellement augmente et l'emporte sur l'énergie cinétique des pluies dès que les pentes dépassent 8,5° (15%)

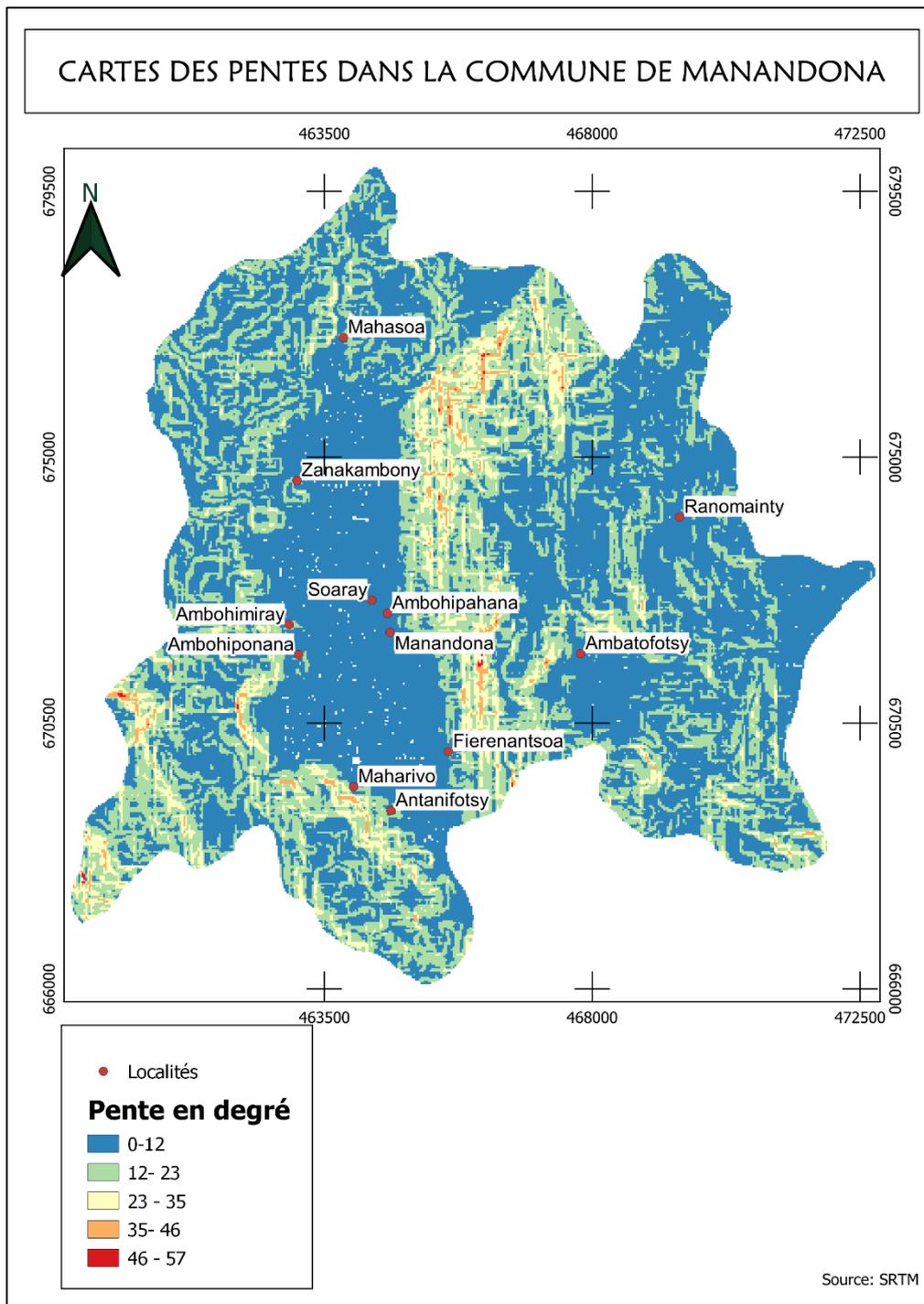


Figure 30: Carte du critère pente

❖ CRITERE LITHOLOGIE

En ce qui concerne la géologie, les roches métamorphiques telles que les gneiss et les migmatites sont des roches moins résistantes aux agents de l'érosion. Or, d'après le contexte lithologique dans le sillon, et le fait est que cette zone appartient au système de graphite de Besairie (Besairie, 1973), il y a donc une prédominance de migmatite, de gneiss donc des matériaux favorables à l'érosion.

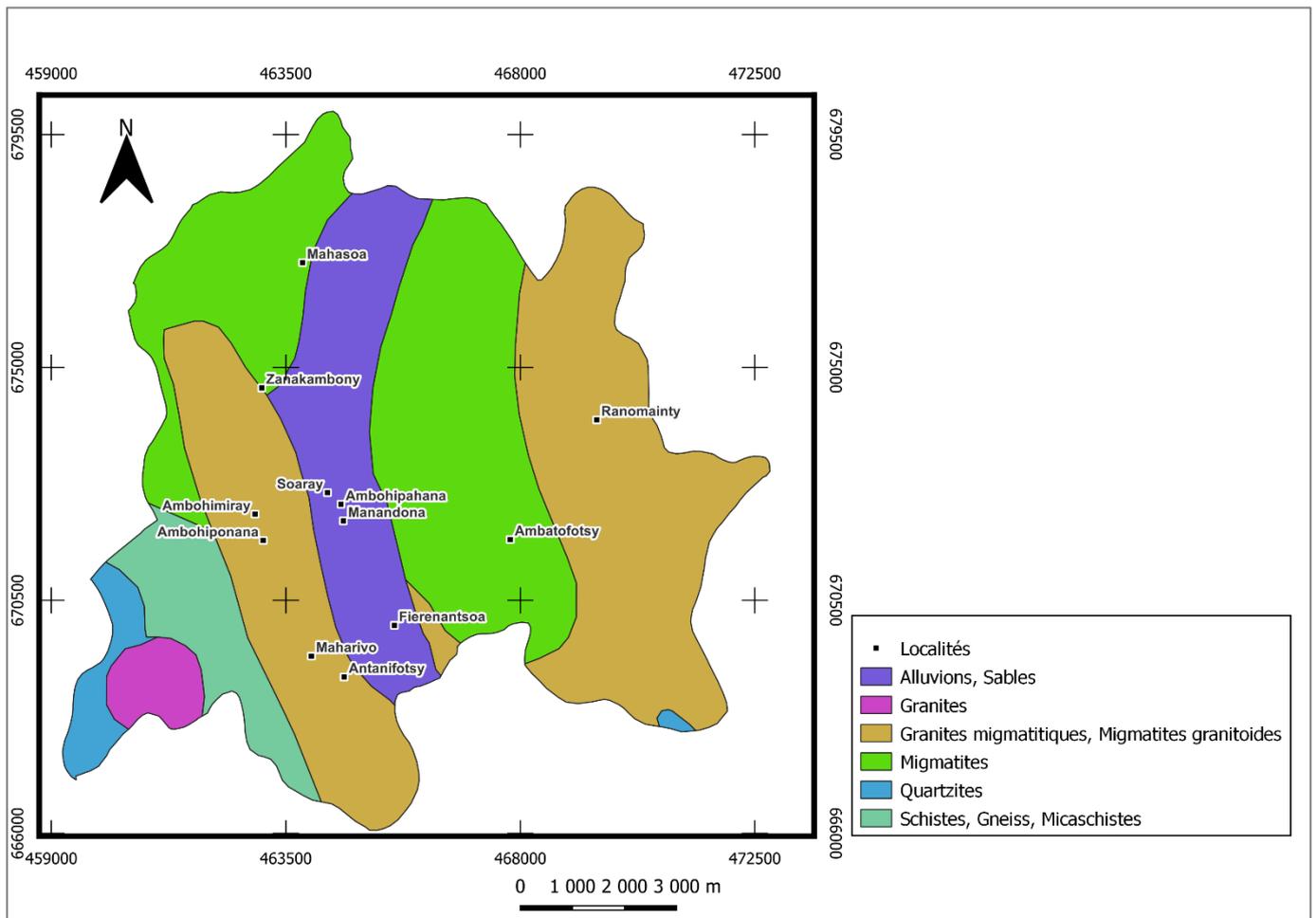


Figure 31: Carte de critère lithologie

❖ CRITERE PEDOLOGIE :

Suite au croisement des cartes de pente et de la carte lithologique fait à partir du logiciel GRASS GIS et aussi de l'observation du système de sédimentation dans les zones selon notre bibliographie, on a pu obtenir une carte de synthèse sur la nature pédologique de notre secteur. [16]. Cette technique est basée sur l'interdépendance entre composante géomorphologique et pédologique : la morphopédologie ou unité de paysage. Le relief, même modéré, exerce une action importante sur la pédogenèse par la modification du régime d'eau qu'il impose ; les sols varient d'une façon constante le long des pentes, alors qu'ils restent identiques le long des courbes de niveau, ces successions régulières de sols constituent une unité morphopédologique. C'est dans cette optique et en tenant compte de l'influence directe de la lithologie sur la nature des processus morphogénétiques des versants, qui sont d'ailleurs démontrés par plusieurs auteurs, que nous avons réalisé la carte pédologique.

Ainsi, Les propriétés physiques du sol, notamment la structure, tiennent un rôle fondamental dans le processus de l'érosion. A la suite de "l'effondrement de la structure", le sol devient compact, sa perméabilité diminue considérablement ce qui augmente le ruissellement superficiel et l'érosion des sols se manifeste.

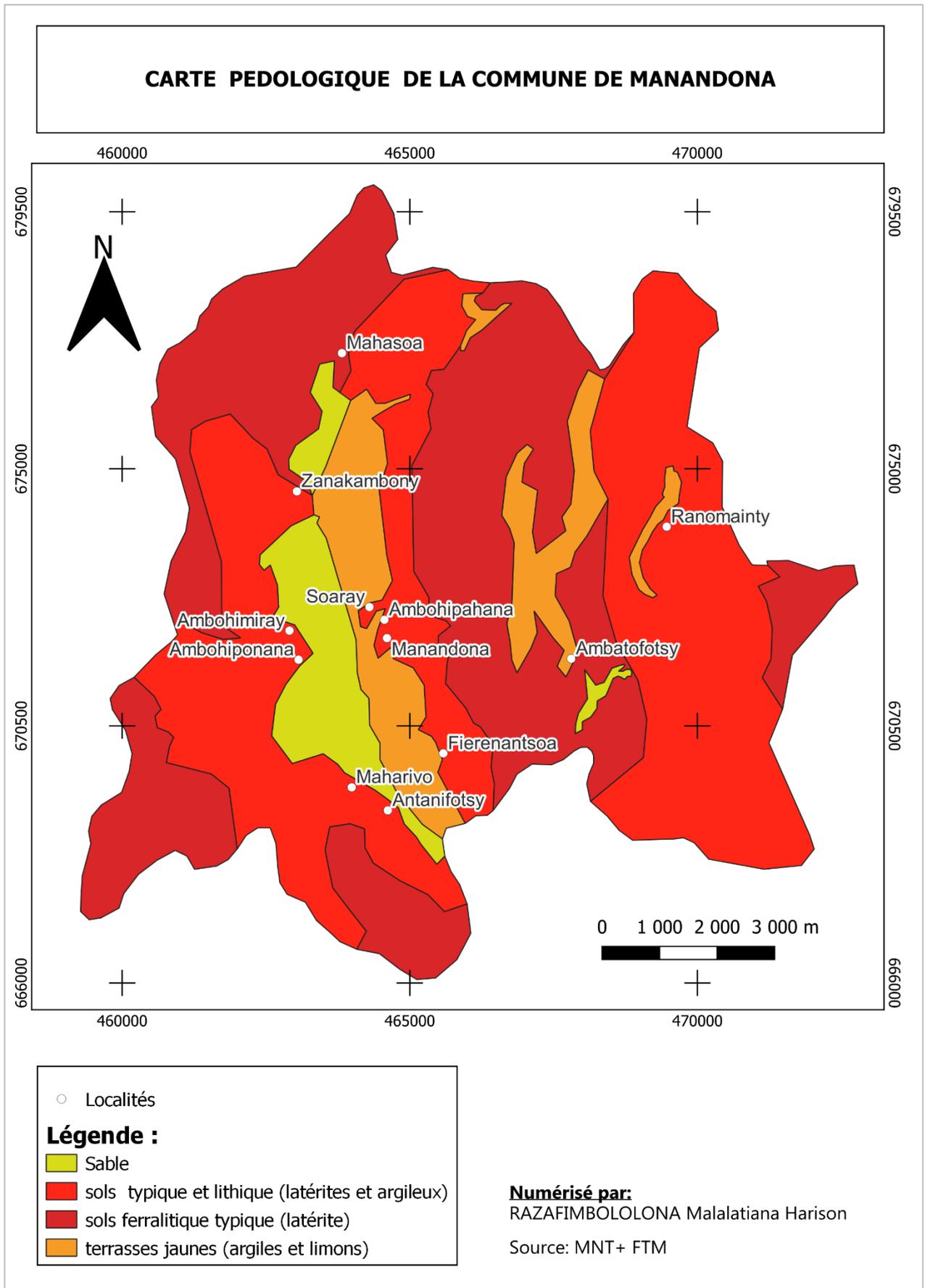


Figure 32: carte de critère pédologie

❖ CRITERE OCCUPATION DE SOL :

D'après notre carte fait à partir de l'image de LANDSAT 9, on y trouve 3 types de formations végétales : Celles qui se présentent tout le long de l'année comme les forets qui sont quand même dans un état dégradé ; celles qui sont toujours présentes, mais offrent moins de protection comme la zone reboisée et enfin les mosaïques de culture et les savanes portent peu de protection.

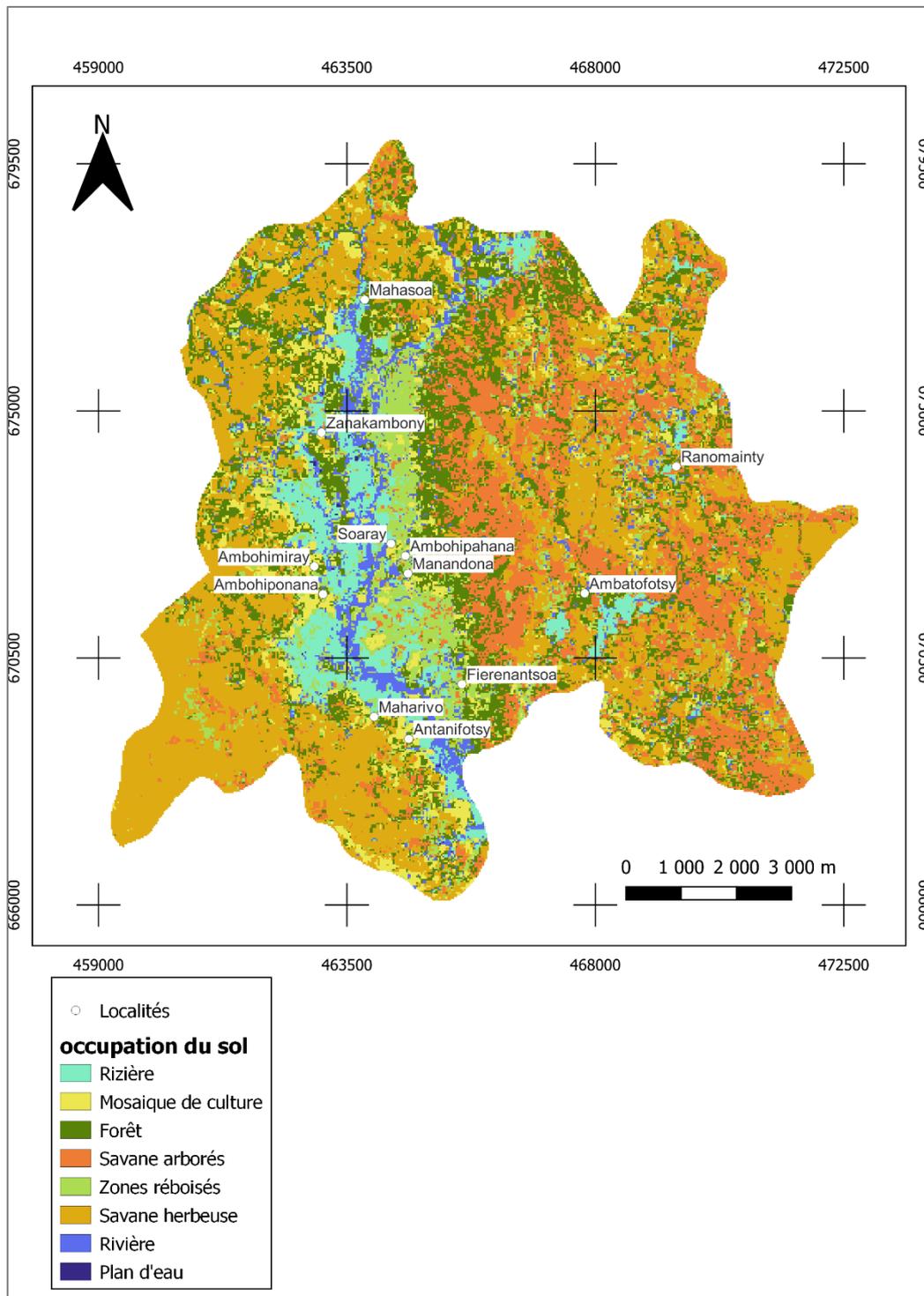


Figure 33: Carte de critère occupation de sol

❖ CRITERE HYDROLOGIE :

Sur le plan hydrologique, les réseaux hydrographiques des bassins versants jouent un rôle important sur la vulnérabilité à l'érosion car le ruissèlement et la vitesse d'écoulement de l'eau sont les principales causes des altérations. Celles-ci ont été générée sur SAGA GIS à partir de notre donnée MNT, on observe alors les réseaux hydrographiques (cours d'eau) dans les bassins versants.

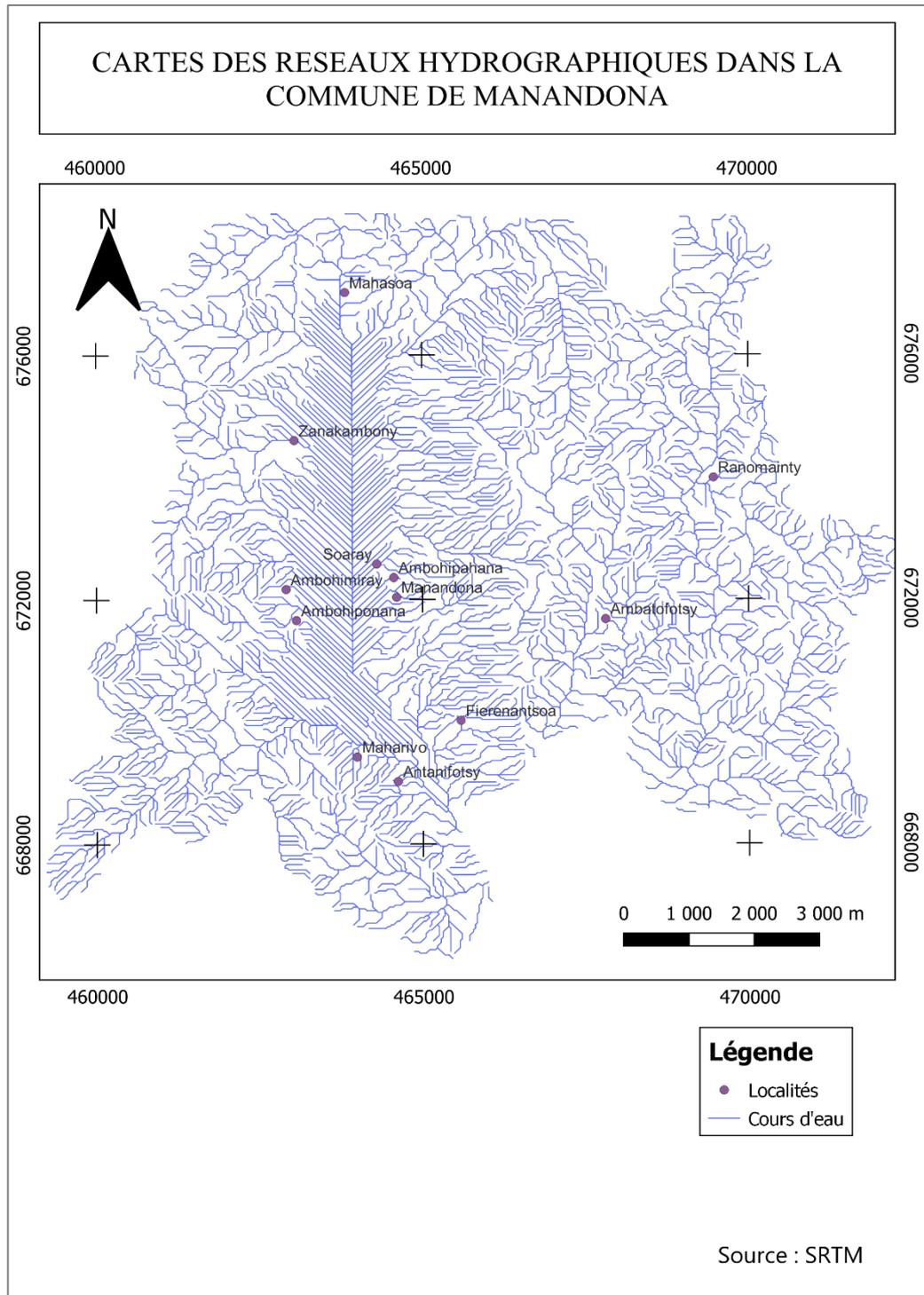


Figure 34: Carte de critère hydrologie

Il faut aussi remarquer que d'autres critères pourraient rejoindre à notre étude sur la vulnérabilité à l'érosion hydrique comme les précipitations, les études physico-chimiques du sol, etc... Mais par manque de données ou des données obsolètes, on optera pour ces critères cités ci-dessus qui sont amplement nécessaire à réaliser notre carte de vulnérabilité.

3. Classification des critères :

Ces critères sont ensuite classés en facteur et en contrainte selon notre analyse et nos sources bibliographiques.

Tableau 8: Classification des critères

FACTEURS	CONSTRAINTES
<ul style="list-style-type: none"> • Pédologie (Influence sur la nature du sol) • Pente (structurale et ruissellement en fonction de la pente) • Hydrologie du bassin versant (influence sur le parcours du drainage de l'eau) 	<ul style="list-style-type: none"> • Lithologie (influence de la nature de la roche mère) • Occupation du sol (couverture végétale)

4. Analyse multicritère et pondération des facteurs :

Après avoir déterminé l'ensemble des critères pris en compte dans l'érosion hydrique et les avoir classifiées, nous avons procédé à une analyse multicritère basée sur la méthode de la somme pondérée qui est connue par sa simplicité et son accessibilité mathématique. [21]

$$C = \sum W_i X_i \times \prod C_j$$

C : composite

W_i : Poids de chaque facteur

X_i : Valeur du facteur i

C_j : Valeur de la contrainte j

Pour notre cas, les valeurs des poids des facteurs sont attribuées suivant une logique selon la criticité des facteurs qui influence le risque d'érosion hydrique. Du coup, le facteur pédologie aura un poids plus important par rapport au poids du pente et de l'hydrographie car d'après nos documentations la nature du sol joue ici sur la stabilité structurale selon le type du sol (argileux, sableux, etc..) dont chacune à sa valeur de contrainte et de rupture et qui peut se manifester selon des facteurs extérieurs d'érosion (pluie, pente, ruissèlement). Et ensuite la pente intervient dans les phénomènes d'érosion par sa valeur, sa forme, et sa longueur. Donc, plus les pentes sont raides plus on aura des risques d'érosivités plus élevé, et les ruissèlements sur les réseaux hydrographique augmente et influencera ainsi les phénomènes d'érosion sur les bassins versants.

Sur ceux, la valeur des sommes des poids W_i sera toujours à égal à 1 on a alors ici les poids des facteurs :

Tableau 9: Pondération des facteurs [4],[18],[21]

	PEDOLOGIE	PENTE	HYDRO
POIDS (W_i)	0.5	0.3	0.2

IV. Réalisation des cartes des facteurs et des Contraintes :

Le croisement des données prises en compte dans le processus érosif repose sur une combinaison faite à partir du SIG. Chaque couche d'information est représentée par une image dans laquelle sont représentées les valeurs correspondantes au niveau de vulnérabilité à l'érosion du thème représenté. L'ensemble des images constitue un espace multivarié dont chaque niveau de risque a été codifié sur des valeurs de pixels. Pour les traitements des cartes des facteurs et des contraintes diverses commandes et étapes ont été appliqué sur GRASS GIS, qui sera expliqué brièvement dans l'annexe.

a) *Réalisation des cartes des facteurs*

▪ **Création de la carte de facteur pédologie**

➤ *Pédologie :*

Sur le plan pédologique, on va ici prendre la nature types de sols, qui seront pertinent à la stabilité du sol. Soit on a des sols de types sableux plus on aura une de risque d'instabilité et de risque d'érosion du sol.

Tableau 10: Degré de criticité selon les valeurs de contraintes des sols

Natures des sols	Degré de criticité
Sables et grés	Forte
Latérites	Moyen
Argiles et limons	Faible

▪ **Création des fonctions d'utilités pour la pente et l'hydrologie :**

Afin de réaliser nos cartes de facteurs de la pente et de l'hydrologie, on a besoins de déterminer les fonctions d'utilités qui sont des fonctions représentant les degrés de criticités des facteurs. On va alors ainsi déterminer la classification des criticités des facteurs.

Cette approche est basée sur le principe d'affectation d'une valeur 255 à un extrême maximale de la répartition des valeurs des criticités des facteurs et d'une valeur 0 à l'extrême minimale, le nombre 0 et 255 représentent les valeurs des pixels sur une image dont 0 signifie une information nulle ou néant tandis que 255 signifie une limite maximale d'une information.

Ce système d'affectation linéaires est utilisable pour des informations continues ou codées séquentiellement de façon régulière (reclassification préalable). Il permet de combiner des données dont l'unité est différente et évite ainsi les biais dus aux variations d'unités. [4]

- **Traçage des courbes de degré de criticité :**

- *Hydrologie :*

Sur le facteur de l'hydrologie, soit on approche des cours d'eaux soit la probabilité d'érosion augmente, sinon soit on s'écarte des cours d'eaux soit la probabilité d'érosion diminue.

Tableau 11: Degré de criticité par rapport à la distance des cours d'eaux

Distance	Degré de criticité
0 à 5 mètres	Forte
5 à 10 mètres	Faible

- *Pente :*

Au niveau de la pente, ce facteur contribue à la vitesse d'écoulement de l'eau sur les bassins versants. Or si la pente est raide alors la probabilité d'érosion augmente, sinon si elle est moins raide alors la probabilité d'érosion diminue et devient faible jusqu'à nulle.

Tableau 12: Degré de criticité par rapport aux pentes

Inclinaison	Degré de criticité
0 à 10 degré	Faible
10 à 20 degré	Moyen
20 à 30 degré	Forte

On a ainsi les fonctions suivantes : **Comme $y = ax + b$**

Hydrographie :

a) 0 à 5 m : Forte

b) 5 à 10 m : Faible

a) pour l'intervalle de distance comprise entre 0 à 100 m

$$x=0 \quad y=255$$

$$x=5 \quad y=255$$

$$\rightarrow \underline{Y=255}$$

b) pour l'intervalle de distance comprise entre 100 à 120 m

$$x=5 \quad y=255$$

$$x=10 \quad y=0$$

$$\rightarrow \underline{Y=-51x+510}$$

Pente :

- a) 0 à 10° : Faible
- b) 10 à 20° : Moyen
- c) 20 à 30° : Forte

a) pour l'intervalle d'inclinaison comprise entre 0 à 10°

$$\begin{aligned} x=0 & \quad y=0 \\ x=10 & \quad y=127,5 \end{aligned}$$

$$\rightarrow \underline{Y=12,75x}$$

b) pour l'intervalle d'inclinaison comprise entre 10 à 20°

$$\begin{aligned} x=10 & \quad y=127,5 \\ x=20 & \quad y=127,5 \end{aligned}$$

$$\rightarrow \underline{Y=12,75}$$

c) pour l'intervalle d'inclinaison comprise entre 20 à 30°

$$\begin{aligned} x=20 & \quad y=127,5 \\ x=30 & \quad y=255 \end{aligned}$$

$$\rightarrow \underline{Y=12,75x+127,5}$$

Tableau 13: Fonctions utiles

Indicateur	Intervalle	Fonction
Hydrologie	0 à 5 m	$Y=255$
	5 à 10 m	$Y=-51x+510$
Pente	0 à 10°	$Y=12,75x$
	10 à 20°	$Y=12,75$
	20 à 30°	$Y=12,75x+127,5$

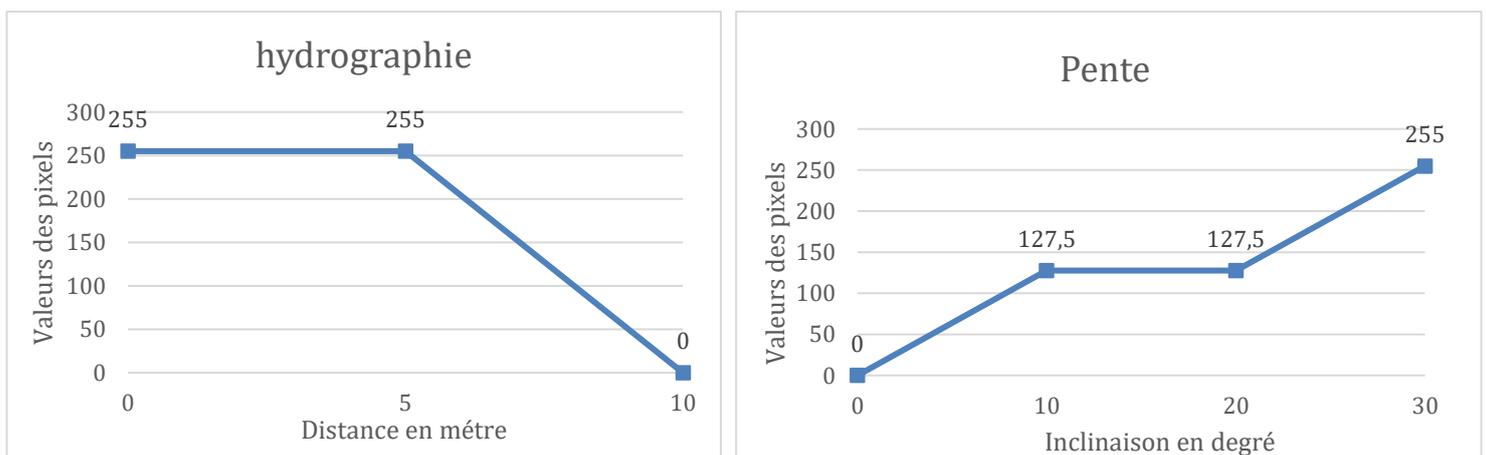


Figure 35: Courbes des fonctions utiles sur les facteurs hydro et pente

b) Réalisations des cartes des contraintes :

D'après sa définition, les contraintes sont des variables binaires qui limitent spatialement la décision. De ce fait, pour la réalisation des cartes de contraintes, on va créer ici alors des cartes binaires (0 et 1) selon la nature des contraintes qu'on a identifié.

Partie III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre V : RESULTATS

I. Résultats intermédiaires et finale

1. Délimitation des B.V :

Avant de voir les résultats intermédiaires, il faut délimiter les bassins versants dans la commune de Manandona sur SAGA GIS. Voici la représentation de la limite des bassins versants superposée au numérique d'élévation qui a pu fournir les données d'altitudes (MNT). Les étapes seront expliquées dans l'annexe. D'après les valeurs de l'indice de Gravelius, on constate que la majorité des bassins versants ont une forme allongée ($KG > 1$).

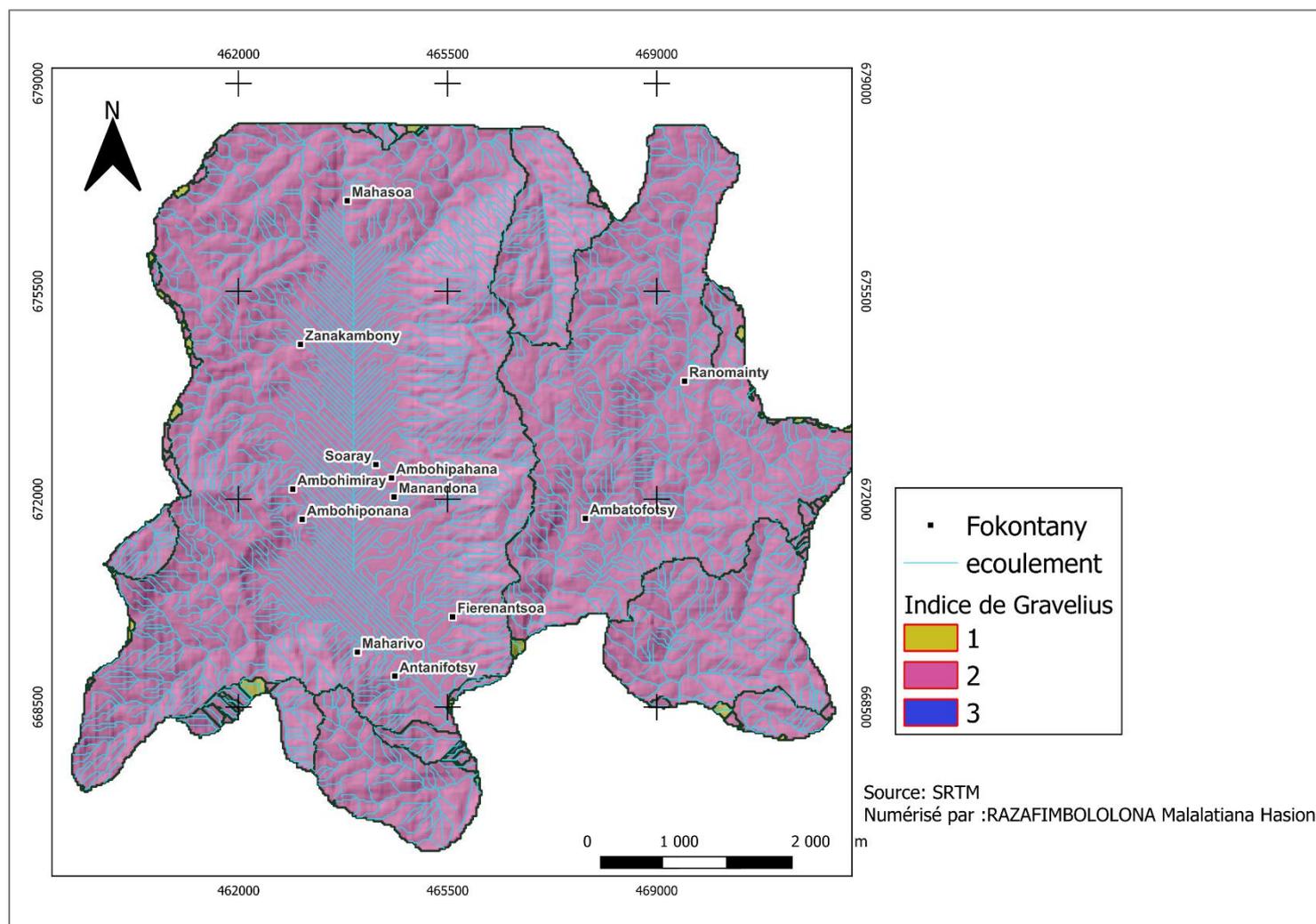


Figure 36: Délimitation des bassins versants dans la commune de Manandona

2. Cartes des facteurs et des Contraintes :

a) *Carte des facteurs :*

Afin d'obtenir les cartes des facteurs sur GRASS on a pu utiliser les commandes suivantes :
r.grow.distance (surface de distance) et r.recode (reclassement basé sur les courbes utiles)

Sur les cartes des facteurs on constate ici en légende l'intensité des risques d'érosions correspondant aux valeurs des pixels (dégradé de violet a jaune). On observe que les probabilités de risque se trouvent entre les couleurs vert et jaune.

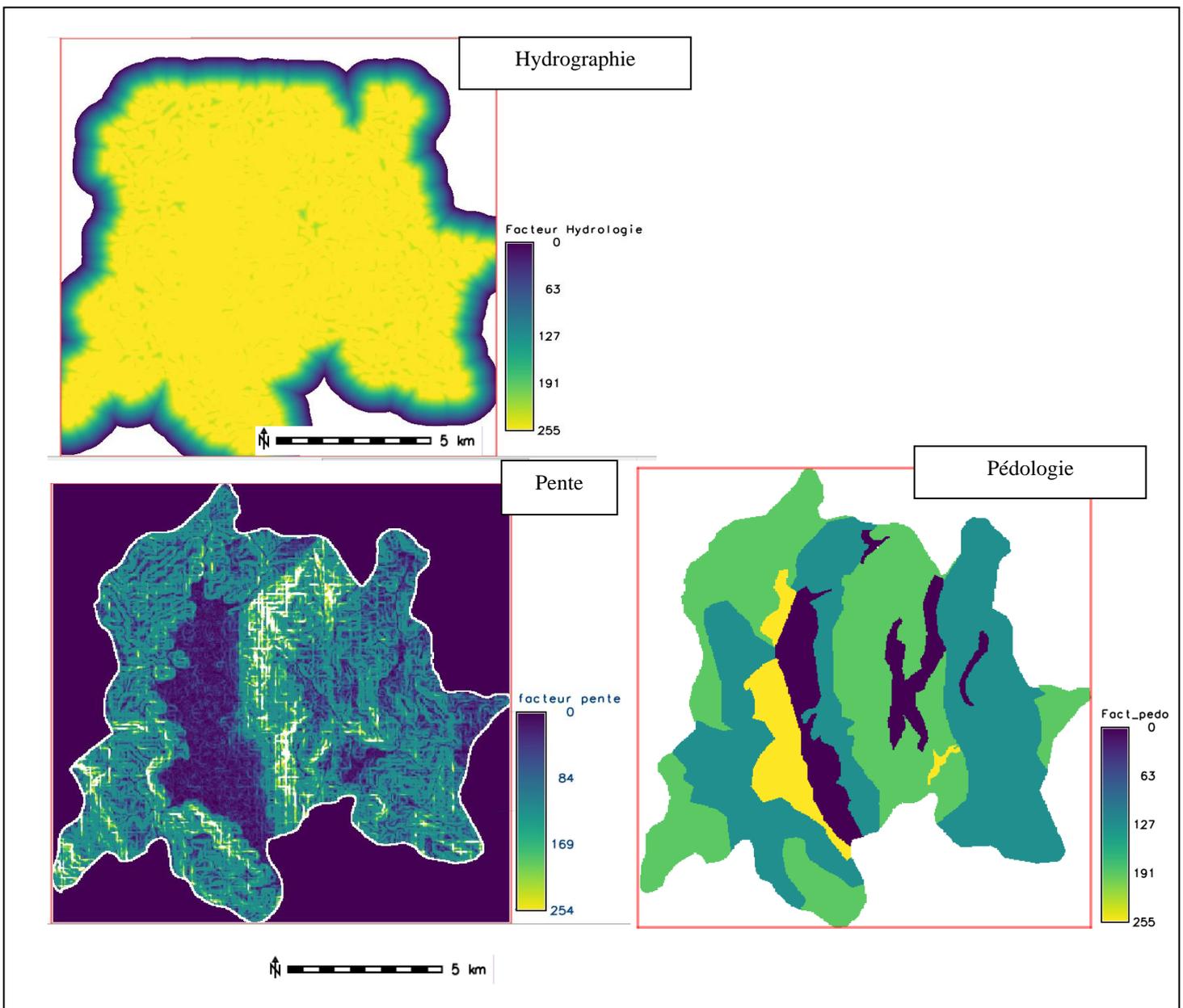


Figure 37: Cartes des facteurs

b) *Cartes des contraintes :*

Pour les cartes des contraintes, on les a obtenues grâce aux commande r.mapcalc

Les cartes des contraintes sont des cartes binaires qui limitent ainsi les risques d'érosions. Ainsi on a 0 où il n'y a pas de risque et 1 où il existe des risques d'érosion dans les bassins versants.

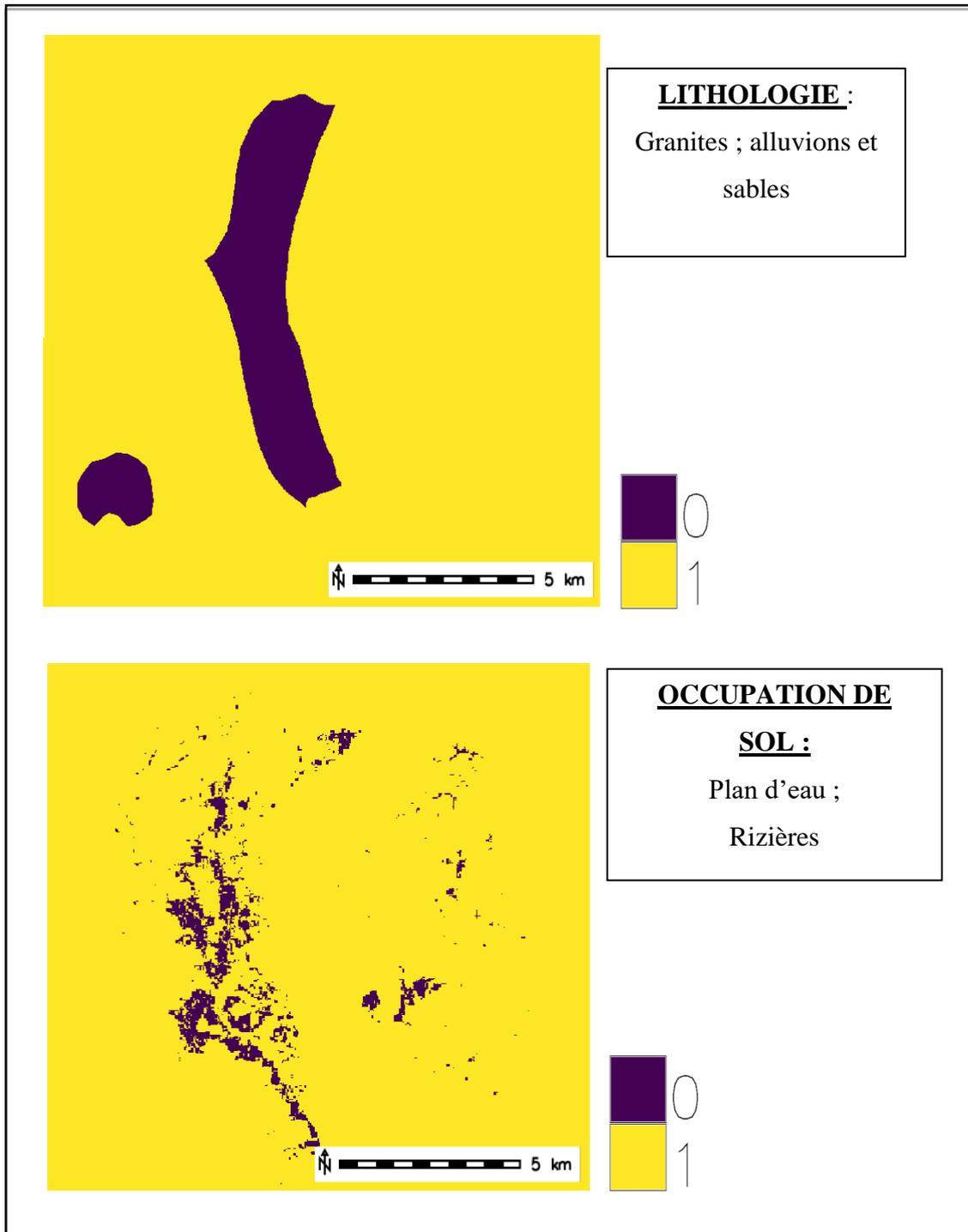


Figure 38: Cartes des contraintes

3. Carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique dans les bassins versants dans la commune de Manandona :

Il s'agit maintenant d'intégrer les résultats des cartes des facteurs et des contraintes dans un modèle général de sensibilité des sols à l'érosion et de formaliser une typologie de cette sensibilité.

Le croisement des données prises en compte dans le processus érosif repose sur la méthode de la somme pondérée sur GRASS à partir de la commande `r.mapcalc` :

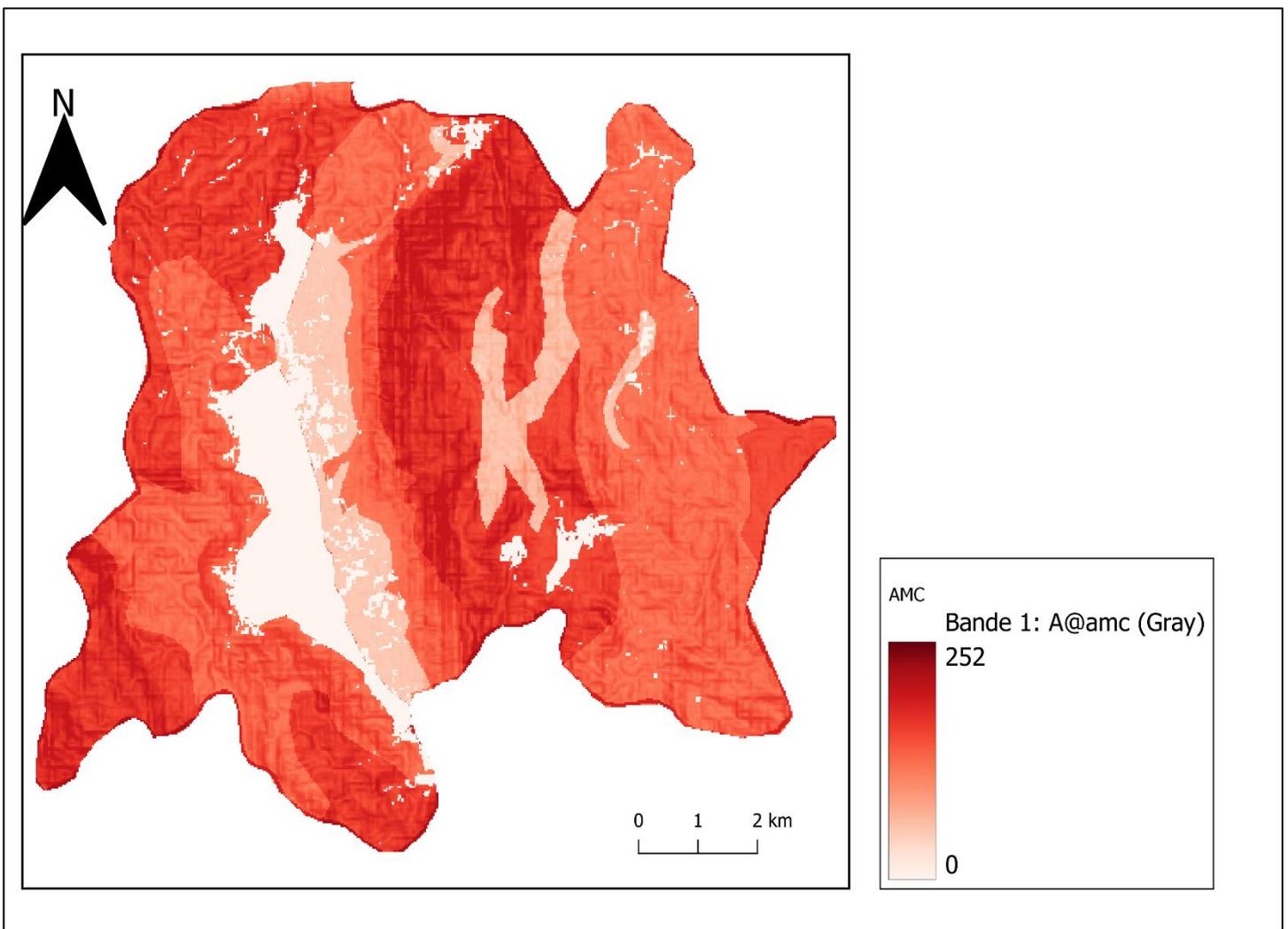


Figure 39: Carte de vulnérabilité de l'érosion hydrique

La carte sortie par GRASS est une localisation des zones vulnérables à l'érosion sous une nuance de couleur (rouge) de 0 à 255. Le niveau de pixel (valeur) traduit les différentes zones. Les nuances claires rapprochant du blanc représentent les valeurs moindres c'est-à-dire les contraintes et les valeurs très faibles.

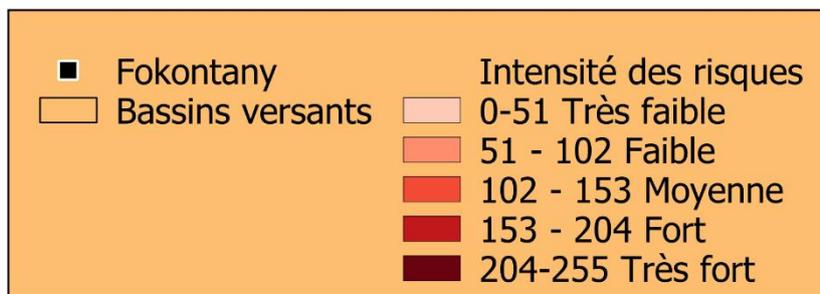
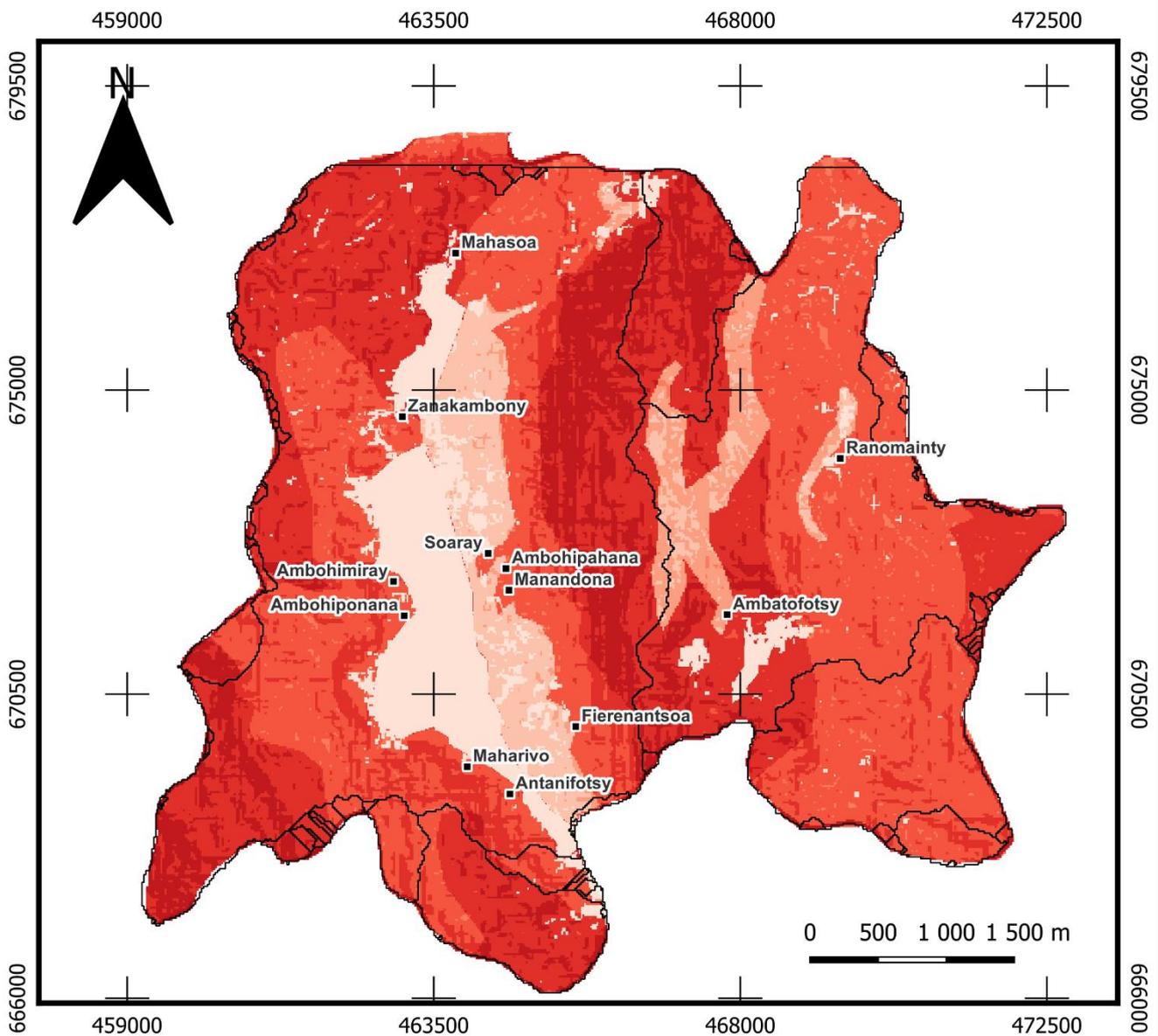
Le pixel 0 représente la zone de contrainte c'est-à-dire la zone d'exception à ne pas considérer. Le pixel 255, est la limite maximale du degré de vulnérabilité. Le tableau suivant résume le degré de vulnérabilité à l'érosion hydrique selon le résultat de l'analyse multicritère après une reclassification des valeurs en pixels pour une bonne lecture des intensités des risques.

Tableau 14: Intensité de risque selon la valeur des pixels

Valeurs des pixels	Intensité de risque
0-29	Extrêmement faible
29-58	Très faible
58-88	Faible
88-117	Moyennement faible
117-146	Moyennement fort
146-176	Fort
176-203	Très fort
203-255	Extrêmement fort

Pour pouvoir ajouter une référence spatiale (coordonnées), nous allons exporter la carte de GRASS pour une mise en page. En prenant aussi maintenant les bassins versants en « shapefile » et de la superposé sur notre carte de vulnérabilité, on va ainsi déterminer spatialement les risques de vulnérabilité d'érosion appliqué sur chaque bassin versant dans la commune.

CARTE DE VULNÉRABILITÉ A L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LES BASSINS VERSANTS DE LA COMMUNE DE MANANDONA



Numérisé par:

RAZAFIMBOLOLONA Malalatiana Harison

Figure 40: Carte de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique dans les bassins versants de Manandona

II. Interprétation du résultat final :

Le résultat de la combinaison multicritère, apporte une spatialisation de l'érosion potentielle des sols, hiérarchisée selon un niveau de sensibilité. Nous pouvons ainsi distinguer les zones les plus sensibles par le processus érosif et celles les plus préservées. Afin de commenter la carte, dressons un tableau qui nous permettra d'avoir une référence spatiale sur les zones vulnérables en termes de quantité.

Tableau 15: Tableau statistique de chaque intensité de risque sur une unité de surface

Intensité de risque	Répartition en Ha	Ratio en pourcentage
Très faible	2379,69	22,60%
Faible	41,86	0,40%
Moyenne	3875,08	36,80%
Fort	2948,91	28%
Très fort	1285,76	12,21%
Total	10 531,30 Ha	100%

D'après le tableau, on a ici la répartition totale en hectares (Ha) et son ratio en pourcentage des risques de vulnérabilité d'érosion hydrique sur les bassins versants dans la commune de Manandona. On remarque que la majorité des bassins est caractérisé par une moyenne sensibilité à l'érosion hydrique.

Les zones qui ont la nomination « Fort » couvrent ici 30 % de l'ensemble des territoires, et se concentre principalement en amont où les pentes sont trop raides qui conduit aussi à la vitesse d'écoulement sur les ruisseaux. L'érosion hydrique entraîne des conséquences tant en amont qu'en aval des bassins versants. Elle peut se traduire, en amont, par des pertes en terre ainsi que des pertes de couvertures végétales. Et en aval, les dégâts sont provoqués par l'augmentation du ruissellement et l'entraînement des particules du sol.

Les zone à faible sensibilité à l'érosion hydrique couvrent 23 % du territoire et se concentre dans les zones à faible ou moyenne inclinaison de pentes et une couverture végétale très protecteur comme les zones reboisées et les savanes arborés.

Dans la qualification « très faible » représente la contrainte qui est en-dehors de la zone d'analyse multicritère. Rappelons que la contrainte obéit à la fonction booléenne, 1 si vrai et 0 si faux. Ici, le plan d'eau, la rizière et la formation des alluvions sont les contraintes car elle ne participe pas à l'érosion. Elle est considérée comme une espace ouverte où peuvent se déposer les produits de l'érosion.

III. Validation des résultats :

Afin de valider ces résultats on va identifier les Lavaka et les sols nus par télédétection à partir de l'image de LANDSAT 9 et de l'image de GOOGLE EARTH. [12]

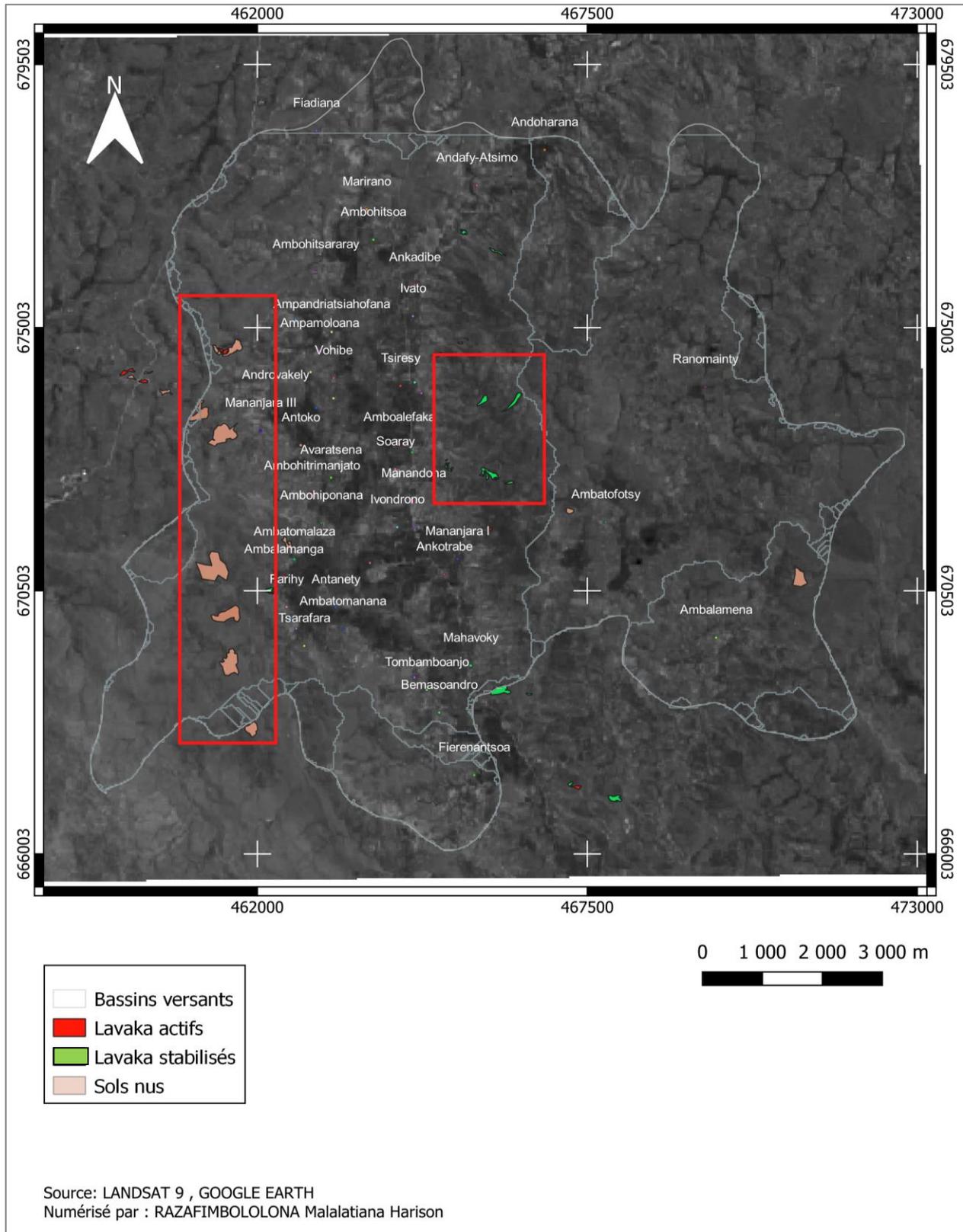


Figure 41: Identification des Lavaka et des sols nus

On observe ici dans les deux zones des formes d'érosion distinctifs, les Lavaka stabilisés et actifs et les sols nus. Selon la carte de GRASS GIS on remarque que ces deux zones se trouvent dans la classification « Fort ». On constate alors que ces produits d'érosions se trouve dans des pentes raides entre 15 à 30° ; et de la présence des écoulements ou des cours d'eau qui ruissèlent régulièrement sur les versants. Or d'après la carte lithologique ces formes d'érosion sont placées sur les formations de migmatites et des sols latéritiques qui sont aussi favorables à l'érosion.

Selon notre observation sur le terrain et de l'image sur Google Earth, on distingue sur le tableau suivant les distinctions entre les Lavaka stabilisés et les Lavaka actifs.

Tableau 16: Identification des Lavaka actifs et Lavaka stabilisés [12]

Classes	Lavaka actifs	Lavaka stabilisés
Parois : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pente des parois ▪ Aspect de la bordure des talus ▪ Hauteur des talus (vertical) ▪ Traces de mouvement de masse ▪ Traces de ravinement (rigoles) 	Entièrement verticale Lisse Moyen Identifiables Peu nombreuses	Raide à verticale Émoussé Haut Absentes Absentes
Fonds	Large	Très large
Végétation	Identifiables	Abondants

Chapitre. VI : DISCUSSIONS

I. Limites et perspectives :

La méthode mise en œuvre conduit à une meilleure compréhension de la distribution spatiale de l'érosion. Toutefois, ce travail constitue la première étape vers une estimation plus précise de cet aléa. La méthode de l'analyse multicritère a pour bien fait d'être organisée, quantifiée et numérisée pour faciliter à la prise de décision. L'inconvénient de recourir à cette méthode est qu'en vigueur, elle nécessite l'avis d'un commun accord entre les décideurs et l'équipe technique pluridisciplinaire sur le remplissage de la matrice des critères. En effet attribuer une classe et des poids est très arbitraire. Il faut préciser que les résultats sont conditionnés par les limites de cette méthode et avec les propos suivants. La carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique est adaptée aux types d'érosion en rigole, en ravin, et en lavaka.

Afin d'affiner les résultats, il sera nécessaire d'actualiser les données, d'améliorer les méthodes combinatoires mises en œuvre et d'intégrer des paramètres complémentaires (variabilité spatiale de l'érosivité des pluies, infiltrabilité des sols...). Des recherches poussées sur l'érodabilité des sols, leur infiltrabilité et l'érosivité des pluies apporteront des informations complémentaires permettant d'affiner la carte de vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique. L'acquisition de connaissances sur l'érosivité des pluies et sa répartition spatiale serait particulièrement intéressante. Il serait aussi avantageux de compléter l'étude par une étude quantitative de l'érosion. Certes, la prise en compte d'autres paramètres (longueur et orientation de la pente, courbure du terrain, pluviométrie, etc.) permettrait de pousser plus loin la réflexion, mais les résultats obtenus constituent un premier document utile. Il s'agit particulièrement de l'instrumentalisation de sites pilotes afin de disposer de mesures de terrain pour calibrer et valider au mieux le modèle. Ces mesures telles que des hauteurs de pertes en sols permettront d'affiner les indices déterminés à dire d'expert (restant par nature subjectifs) et de coupler des valeurs de terrain à un niveau de sensibilité. En effet, pour le moment, la validation s'est tournée essentiellement vers une interprétation visuelle de photographies aériennes et d'images satellites ainsi que par quelques relevés in situ et d'enquête sur le terrain.

Enfin, la poursuite de ce travail semble importante pour une amélioration du modèle d'analyse en croisant par exemple d'autres méthodes d'analyse multicritère, toujours selon nos types de données disponibles. L'objectif majeur est d'aboutir à la mise en place d'un outil capable d'intégrer les données géographiques de manière automatique et dynamique, basé non plus uniquement sur l'expertise mais aussi sur une méthodologie statistique.

II. Méthodes antiérosives :

1. Lutttes contre l'érosion en Lavaka et en ravines :

Au fur et à mesure de son élargissement, la pente entre la tête de lavaka et le niveau de base de la vallée diminue, profitant de l'humidité relative des fonds de lavaka et de la bonne fertilité de leur sol, les végétations colonisent le milieu par des espèces herbacées d'abord puis ligneuses et finalement les arbustes.

-La pierrosité de la surface constitue une armature efficace contre le ruissellement.

-La présence de filons de quartz ou de granite empêche l'évolution de l'érosion à l'intérieur des lavaka.

Les solutions que nous proposons, en particulier pour l'érosion en lavaka, et les ravins sont axées sur la limitation de l'aggravation du phénomène, la stabilisation en pleine évolution étant presque impossible. Les solutions proposées se divisent en méthodes biologiques, mécaniques, agropédologiques.

Ces méthodes peuvent être adoptées seules ou en association.

a) *Procédés mécaniques :*

Installation des barrages à l'intérieur des gorges principales des lavaka :

Cet ouvrage consiste à barrer les exutoires principaux des lavaka par des ouvrages en gabion. Les sables seront ainsi stockés au niveau de la base relevant alors ce dernier et évitant ipso facto le sapement à l'intérieur des lavaka et l'ensablement des rizières des basfonds. Ces ouvrages peuvent être en gabion ou en matériaux plus souples (grillage).



Figure 42: Barrage en gabion [W12]

- Précaution

Ces ouvrages doivent être renforcés sur les ailes et doivent présenter une forme incurvée vers l'avant.

Petits barrages installés sur les ravins internes :

Ces ouvrages sont installés sur les petites ravines situées en amont des lavaka à condition que le mouvement en masse n'a pas lieu.

Dynamitage des zones instables :

Ce procédé mécanique est parfois nécessaire pour atteindre le profil d'équilibre.

Fossé de protection

Le fossé de protection sert à recueillir les eaux de ruissellements provenant d'une surface dominant la parcelle en danger. Cette eau sera acheminée vers un exutoire et servira à des fins utiles.

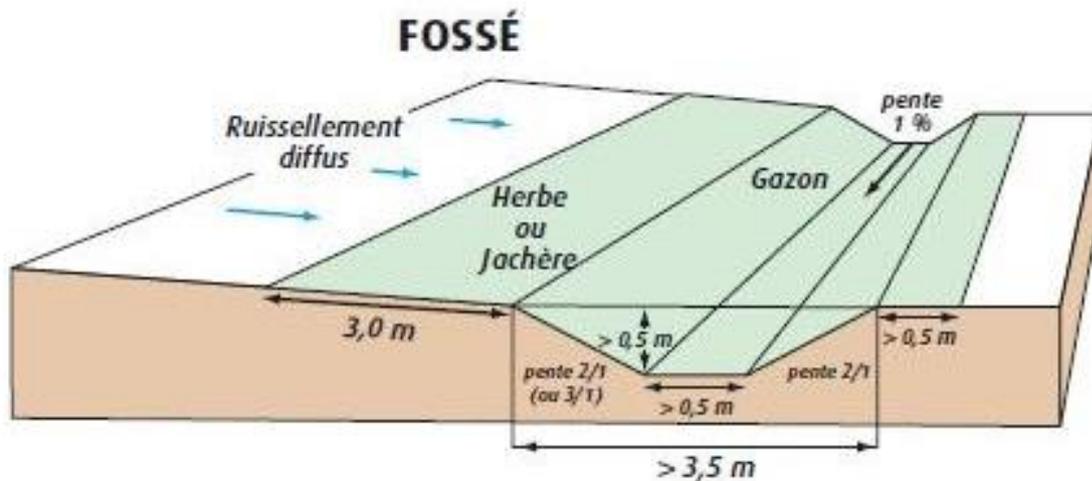


Figure 43: Plan d'un fossé [W13]

- Précautions

- Ce fossé doit avoir une pente longitudinale faible (1%) pour permettre d'évacuer lentement les eaux de ruissellement.
- Le fossé doit être bien dimensionné (profondeur et largeur) pour éviter les débordements.
- Le curage périodique du fossé est nécessaire pour éviter le comblement.

Terrasse en escalier avec mur de pierres sèches ou terrasse à talus gazonné :

Cette méthode consiste à diviser le versant en plates formes horizontales plus ou moins écartées les unes des autres. Les terres de remblais sont soutenues à l'aval soit par un mur de pierres sèches soit par une pente gazonnée.

- **Mode opératoire**

Le labour ou le piochage est effectué en versant ou en tirant toujours vers le bas. La terre est ainsi portée de l'amont vers l'aval et la pente du terrain diminue progressivement ce qui réduit considérablement le ruissellement

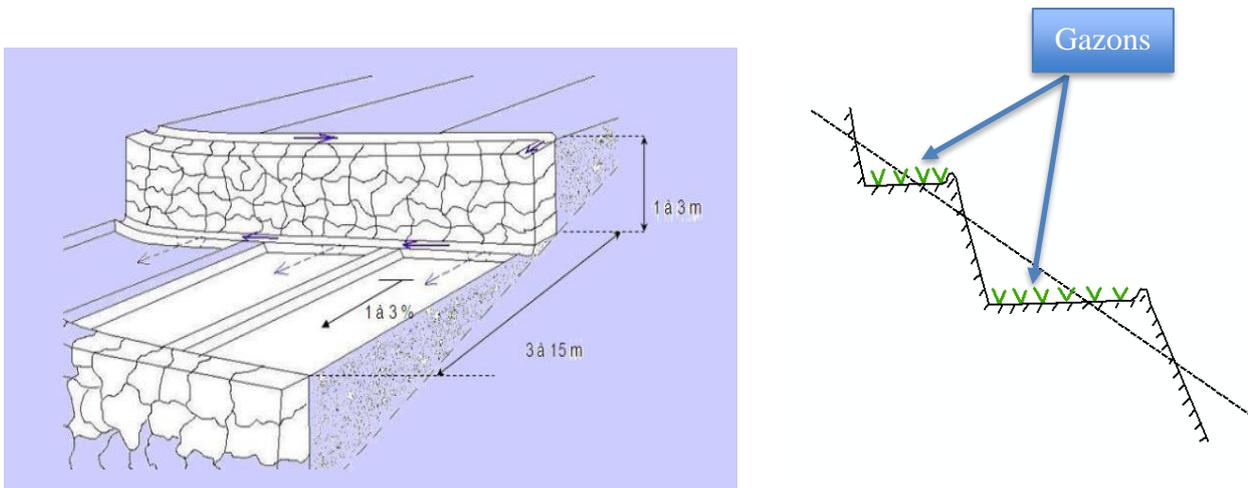


Figure 44: Plan d'une terrasse en mur de pierre et en talus gazonné, [13]

- **Précautions**

Ce procédé suppose que le sol est suffisamment homogène et profond pour ne pas risquer la dégradation pédologique du côté amont. Le relief et la pente devront permettre d'aboutir à des bandes cultivables de largeur constante.

Coupure de pente

Cette méthode consiste en un établissement de parcelles allongées en travers de la pente sans suivre les courbes de niveau.

Banquette végétale :

Il s'agit d'une zone recouverte d'une végétation permanente dense et disposée suivant les courbes de niveau. D'une largeur environ 2 mètres, ils peuvent remplacer les dispositifs mécaniques sur les sols plus filtrants.

Les banquettes végétales ralentissent les eaux de ruissellement, filtrent les sédiments transportés et favorisent l'infiltration.

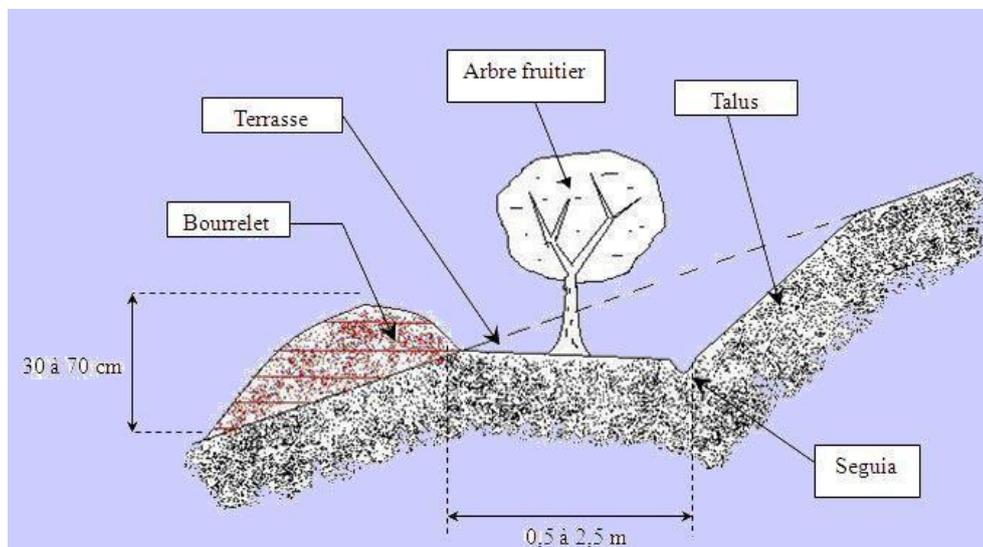


Figure 45: Disposition de la banquette végétale [W11]

Embroussailllements :

Cette technique est surtout recommandée sur les terres non cultivées. Il s'agit d'une plantation à forte densité d'espèces herbacées, le *Grevillea banksii* est fortement recommandé car cette espèce possède un pouvoir de fructification élevé même sur sols pauvres chimiquement ou dénudés et mise à nu qui correspond exactement à ceux des endroits où l'embroussaillage est nécessaire (gorge des lavaka, talus abrupts)

Bandes de sédimentation

Le rôle de ces bandes est de faire passer les eaux de ruissellement provenant des hauteurs à travers une bande de terrain aménagée en terrasses et fortement occupée par une végétation pour que les sédiments que les eaux transportent s'y déposent. La végétation se développera au fur et à mesure de la sédimentation. L'eau ainsi débarrassée de sa charge est récupérée par une fosse de déversions et utilisée pour l'irrigation.

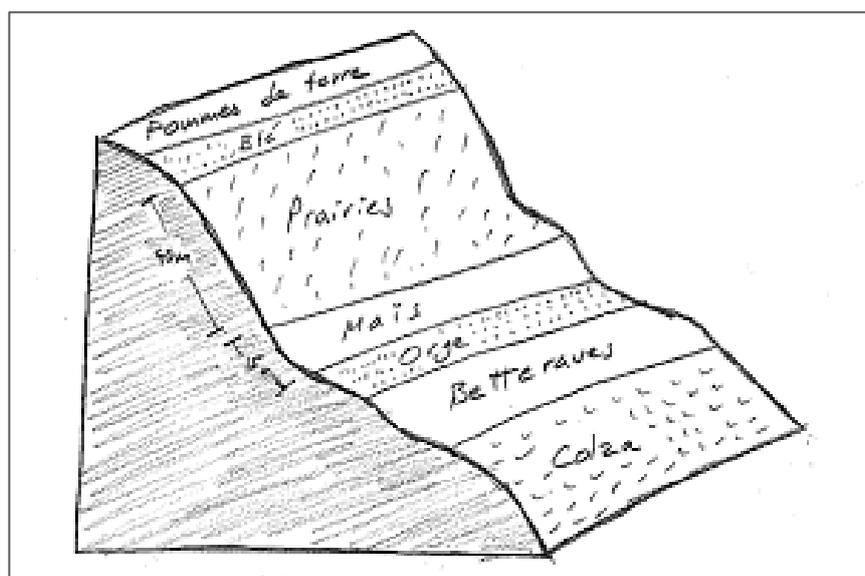


Figure 46: Bande de sédimentation [13]

b) Méthode biologique :

Reboisement :

La couverture végétale joue un rôle très important dans la lutte contre l'érosion. Pour la lutte antiérosive, le mode de plantation le mieux adapté est : la plantation suivant les courbes de niveau et en quinconce ; le mélange d'espèces et peuplement assez clairsemé entre les bandes pour laisser développer la couverture herbeuse.

▪ Précautions

Il faut faire attention dans le choix des espèces à reboiser car les racines, tout en fixant le sol créent des fentes de dessiccation pouvant être à l'origine d'un écoulement de parois. Les plantes de couverture sont donc les plus efficaces (graminées, petites plantes pionnières).



Figure 47: Reboisement dans les versants, Source : Auteur

Jachère améliorée :

La jachère améliorée correspond au temps de repos du sol. Elle permet au sol de retrouver ses propriétés physiques qui ont pu être modifiées par la culture et une partie des éléments fertilisants qui ont été exportés par les récoltes successives ou entraînés par l'érosion. Pour la jachère améliorée on utilise des espèces à fort pouvoir de régénération du sol (*Tephrosia*, *Crotalaria*).

La vitesse de restauration du sol sous jachère est nettement plus faible que la vitesse de dégradation sous culture d'où la nécessité de maintenir des jachères assez longues (trois ans au minimum dans le cas de Madagascar).

Ce type de conservation est recommandé dans les régions où les problèmes de surface n'est pas un facteur limitant.

Mise en défens :

La mise en défens périodique des terrains en pente forte est nécessaire pour permettre la reconstitution du couvert végétal et surtout pour provoquer davantage la pédogenèse afin de reconstituer le sol.

Paillage :

Le paillage a le même effet que les cailloux sur la protection du sol : l'entraînement de la terre est surtout dû au choc des gouttes d'eau sur le sol (effet splash). Lorsque celui-ci est protégé par les paillages qui amortissent le choc, l'érosion est forcément limitée. Cette technique peut aussi être combiné avec d'autres techniques antiérosives.



Figure 48: Reboisement et paillage, Source : Auteur

CONCLUSION

La présente étude pose sur la problématique de l'érosion hydrique dans les bassins versants de la commune de Manandona et qui sont en générale causés par des nombreux facteurs tels que la nature topographique, géologique, climat mais surtout par les activités humaines. Ce travail fournit un document de base qui peut constituer une base de données multi-sources de la commune, à l'aide du système d'information géographique (SIG), qui est un outil essentiel pour la spatialisation de l'information ainsi que pour la mise à jour des données.

Les éléments contenus dans les inventaires topographiques, les inventaires géologiques, pédologique et d'occupation des terres obtenue par l'image satellitaire de LANDSAT 9 ont été croisés dans des divers logiciel de SIG. Grâce à QGIS on a pu réaliser diverses cartes thématiques et ses mises en pages, mais surtout des analyses spectrales sur notre image satellitaire afin de classifier les occupations de sol dans notre zone d'étude. Puis, le logiciel SAGA GIS nous a permis de délimiter nos bassins versants et ses écoulements. Et enfin, GRASS GIS a permis d'avoir nos cartes des facteurs et des contraintes pour les combinés dans un modèle mathématique d'analyse multicritère selon la méthode de somme pondérée et d'enfin obtenir la carte finale sur la vulnérabilité de risque d'érosion hydrique dans les bassins versants.

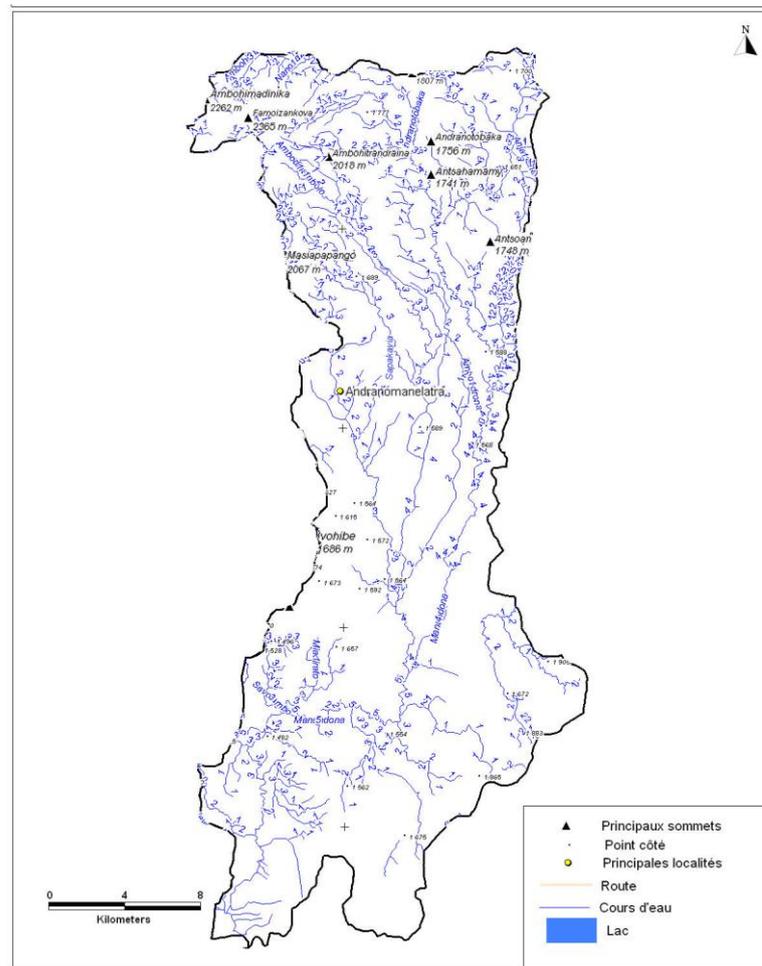
La cartographie de la zone à l'érosion hydrique a permis de distinguer cinq classes de vulnérabilité multifactorielle dans les bassins versants. Les zones très faibles à faible vulnérabilité couvrent 23 % du secteur d'étude, les zones à moyenne vulnérabilité 36,80 %, les zones de forte vulnérabilité 28 % et celles à très forte vulnérabilité couvrent 12,21 % des bassins versants. Pour valider ces résultats, on a ainsi identifié les lavaka et les sols nus actives par la télédétection.

La méthode mise en œuvre conduit à une meilleure compréhension de la distribution spatiale de l'érosion dans les bassins versants. Toutefois, ce travail constitue un document préliminaire décrivant l'alea qui manque beaucoup de précision à cause de l'indisponibilité de certaines données dans la zone d'étude ou que les données disponibles ne sont pas toutes actualisées. De même que notre approche sur la méthode d'analyse multicritère n'est pas forcément précise, il en exige que d'autres méthodes plus complexes soient appliquées et réalisées pour ensuite les comparer pour avoir un bon résultat.

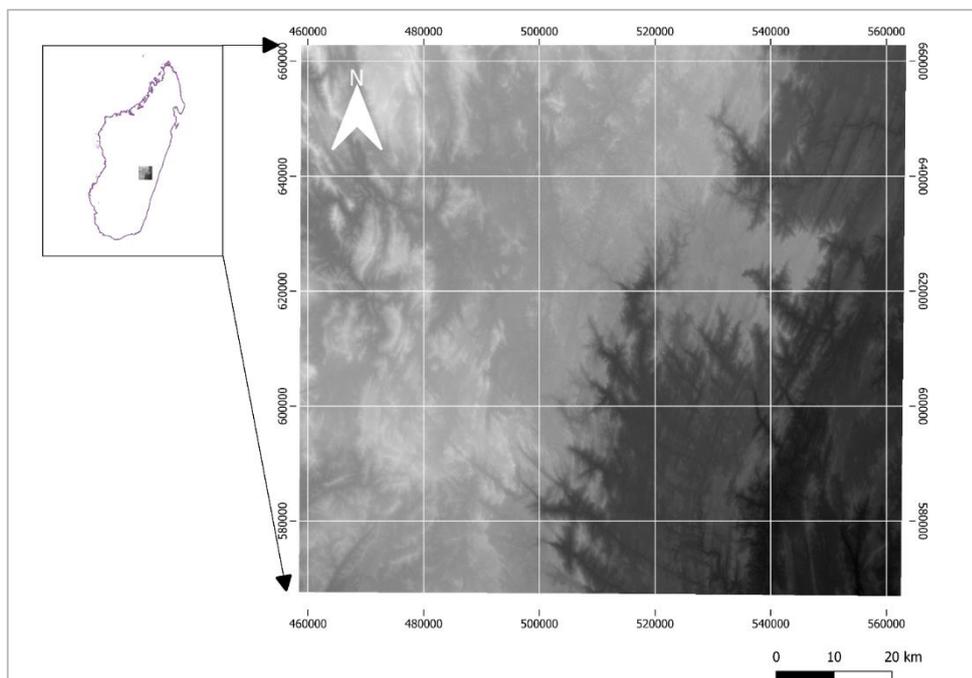
L'inventaire des mesures de lutte contre l'érosion des sols réalisé dans les différentes formes d'érosions montre qu'une grande diversité de mesures adaptées à chaque situation existent pour lutter contre les conséquences négatives de ce phénomène. Les actions, souvent dues à des initiatives individuelles, doivent être ensuite relayées par des actions coordonnées à l'échelle des bassins versants.

ANNEXES

Annexe. I : Carte du Bassin versant de la rivière Manadona (RAZAFIMAHEFA 2010)



Annexe. II : Image MNT utilisé pour les divers cartes, source : Eearth Explorer SRTM



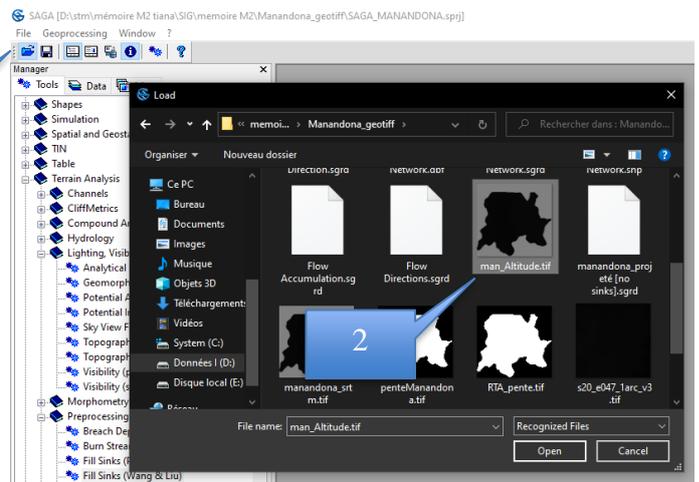
Annexe. III : Délimitation des bassins versants et de ses écoulements sur SAGA GIS

1. Création de nouveau projet :

- Ouvrir l'interface graphique de SAGA
- Importer l'image raster MNT dans le menu « open » et choisir l'image

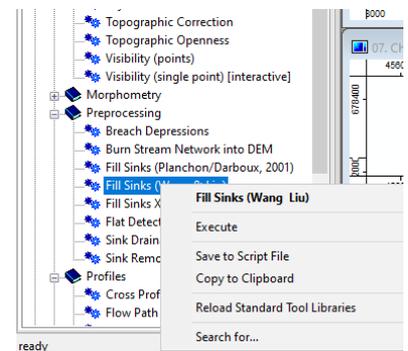
Il est important de noter que l'image est coupée selon l'emprise de votre choix, dans notre cas nous avons découpé l'image raster par la délimitation de notre zone d'étude.

- Sauvegarder le projet dans le menu « file>project>save »



2. Remplissage de l'image raster

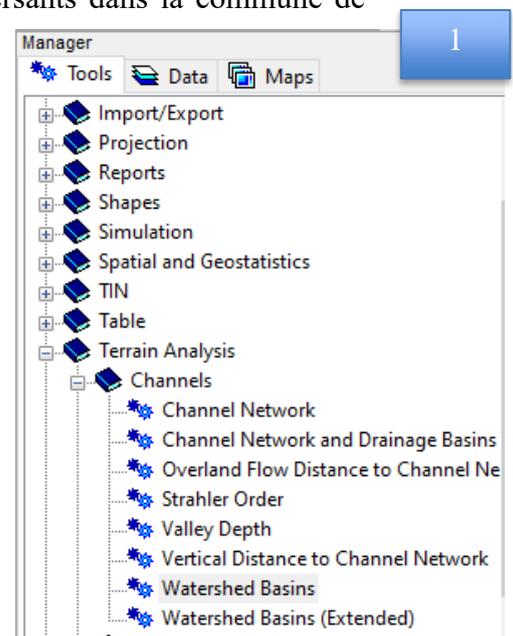
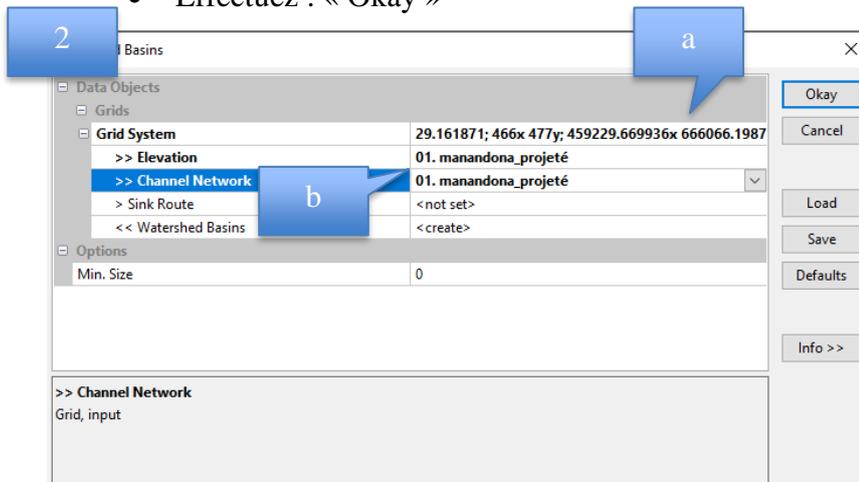
Afin d'avoir des données bien complet il est à noter de remplir l'image raster par l'outil « Fill sinks(Wang&Liu) » dans « Preprocessing ».



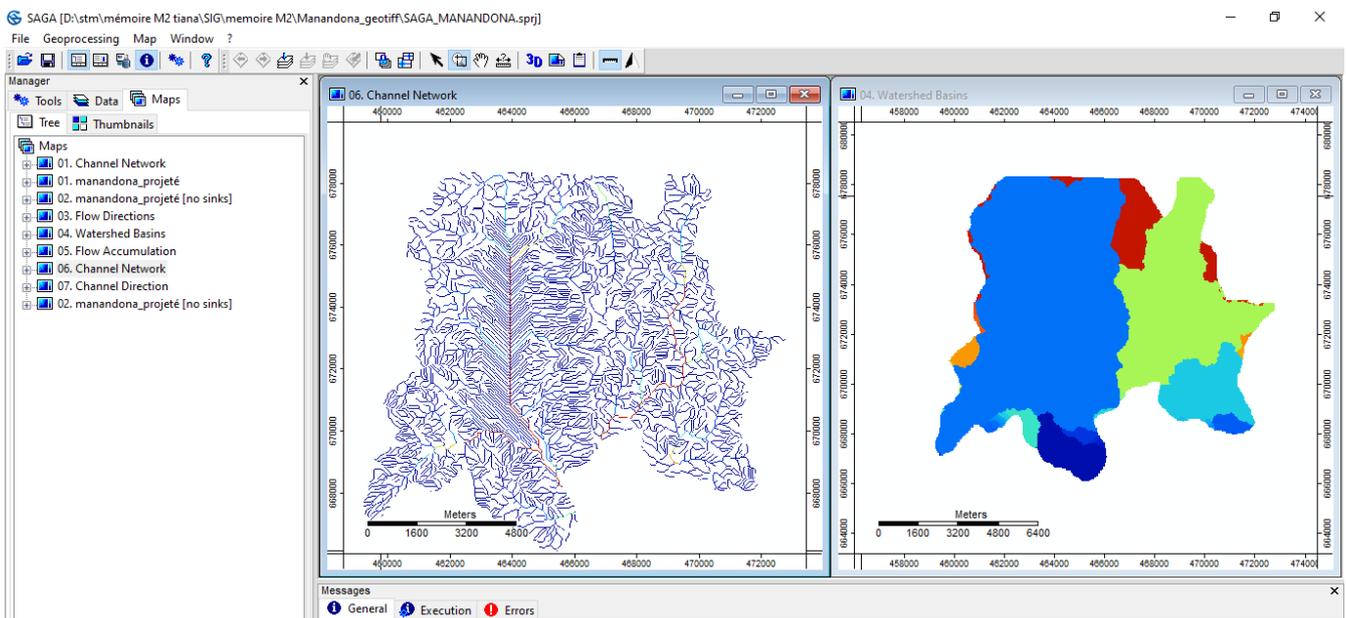
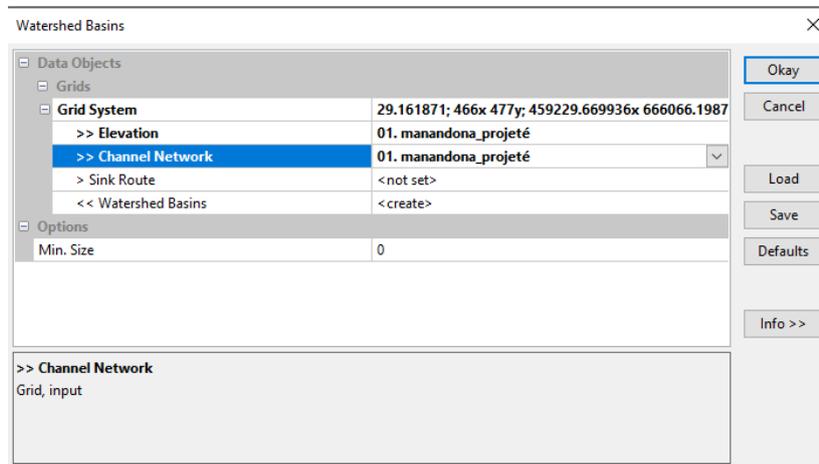
3. Délimitation des bassins versants et des écoulements

Après avoir rempli l'image raster, créons ensuite les bassins versants dans la commune de Manandona

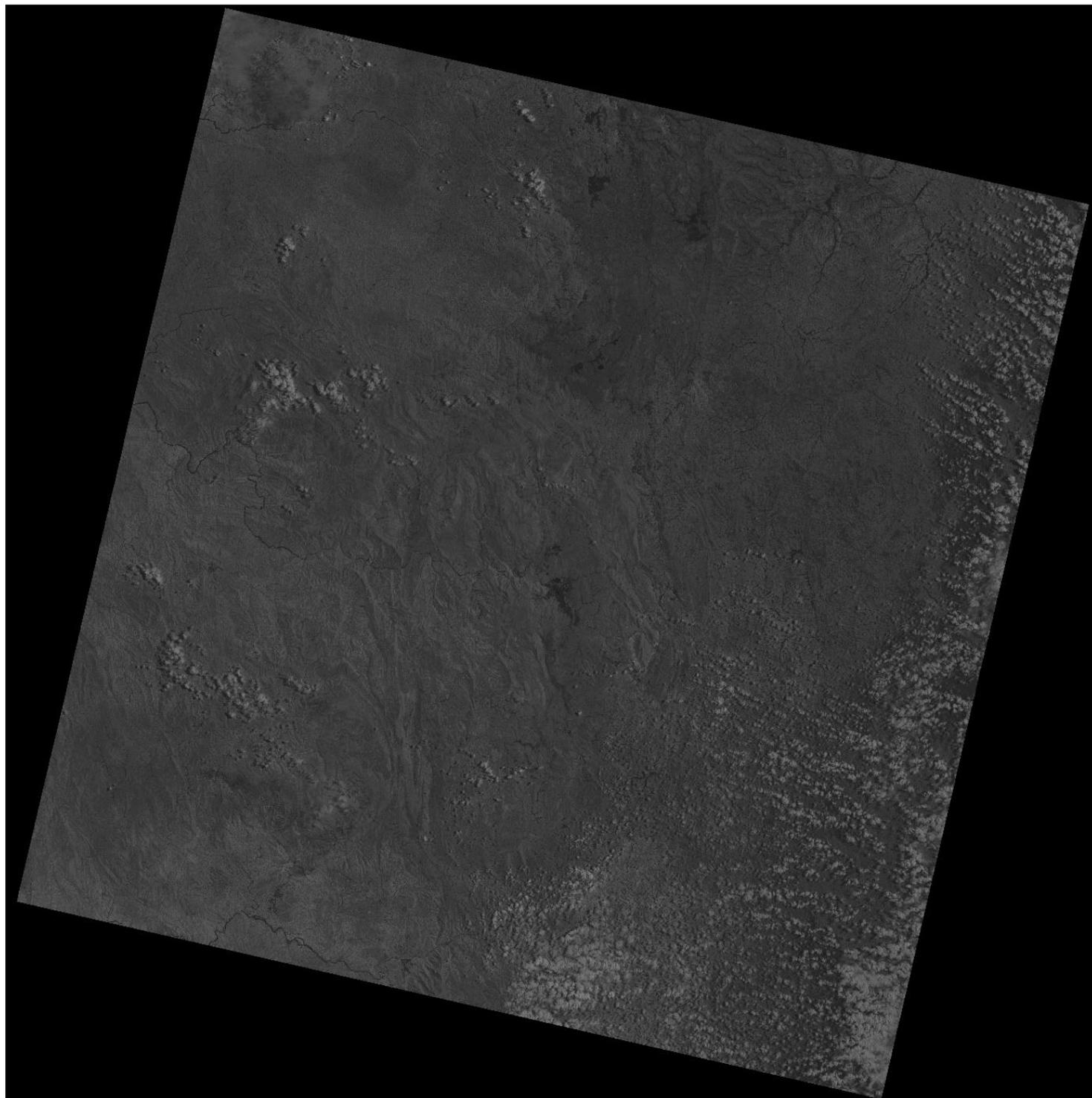
- Ouvrir Terrain Analysis dans l'onglet Tools
- Choisir l'outil Channels > Watershed basins (1)
- La fenêtre Watershed basins apparaîtra : (2)
- Choisir la projection de l'image raster rempli (a)
- Choisir l'élévation : le raster découpé (b)
- Effectuez : « Okay »



- Dans la même fenêtre, on va créer les réseaux hydrographiques « Channel network>Raster projeté » l’outil va reconnaître automatiquement les réseaux hydrographiques.

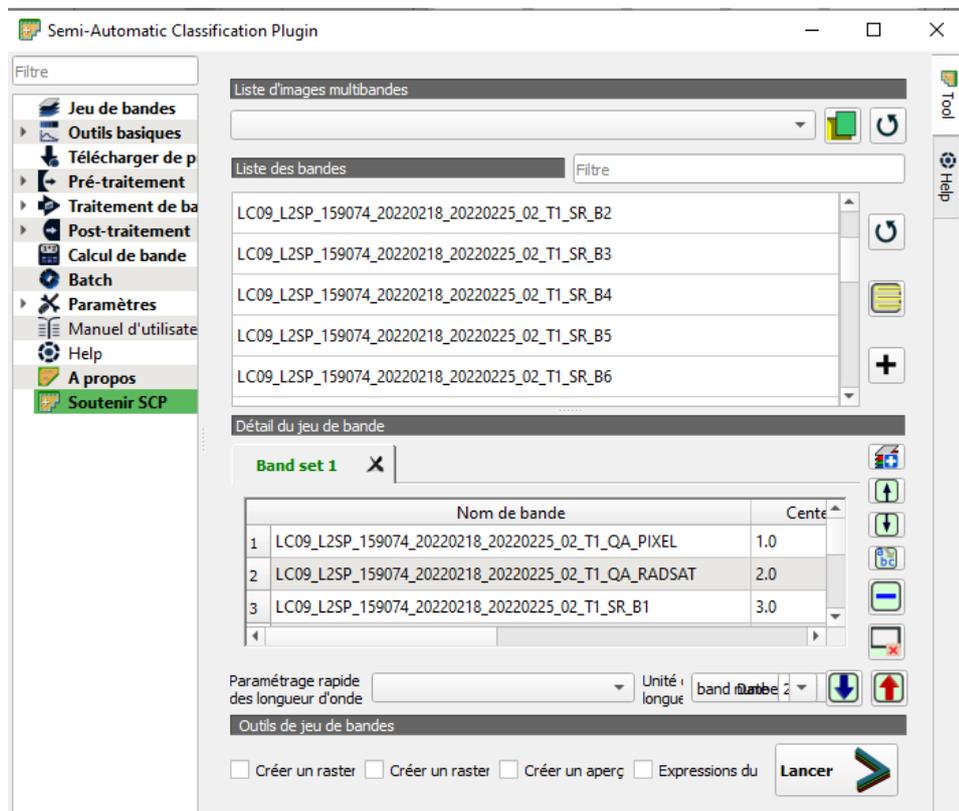


Annexe. IV : Image de la bande N°6 de Landsat 9 (Scène N° LC91590742022049LGN00)

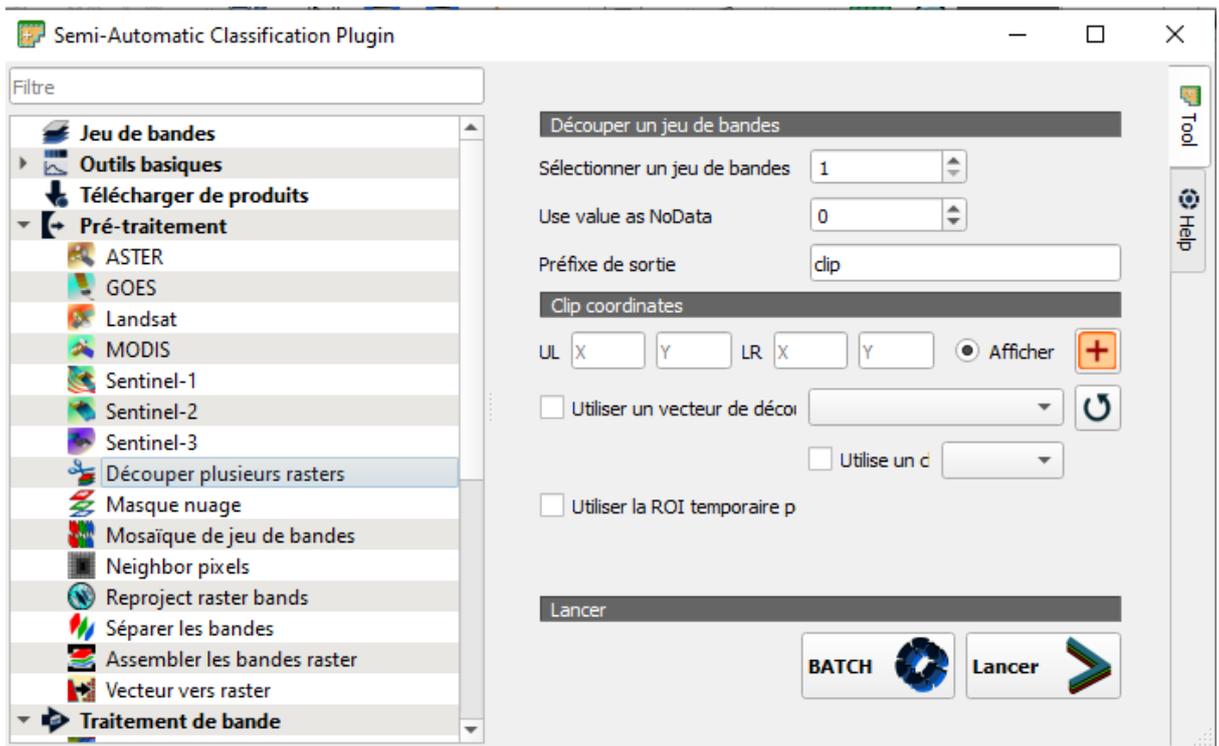


Annexe. V : Classification semi- automatique supervisé de l'image Landsat 9

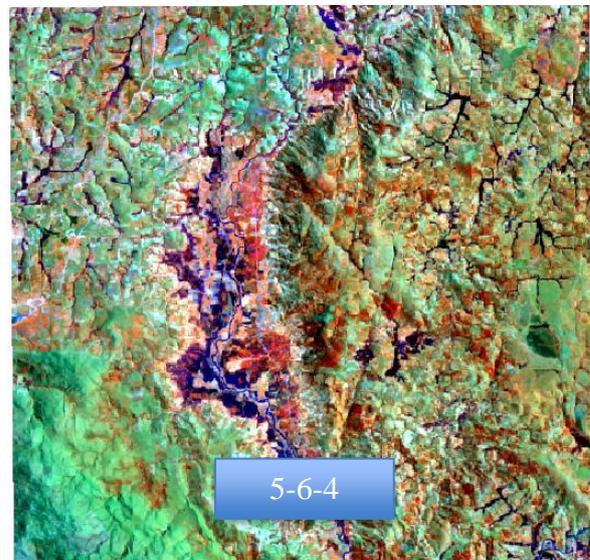
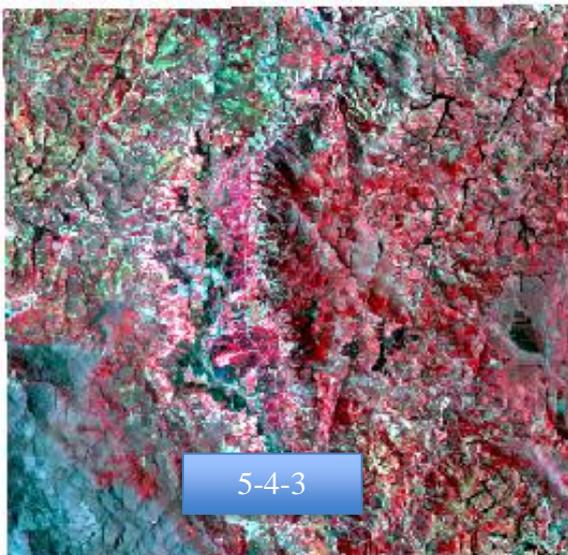
- Avant de créer les ROI, on va combiner les bandes de Landsat 9 dans QGIS à partir de l'extension « Semi-Automatic classification » d'où on peut aussi créer les ROI ou « Région of Interests » :
 - Importer les 8 bandes dans le menu Jeu de bande
 - Combiner les bandes dans la Band Set 1



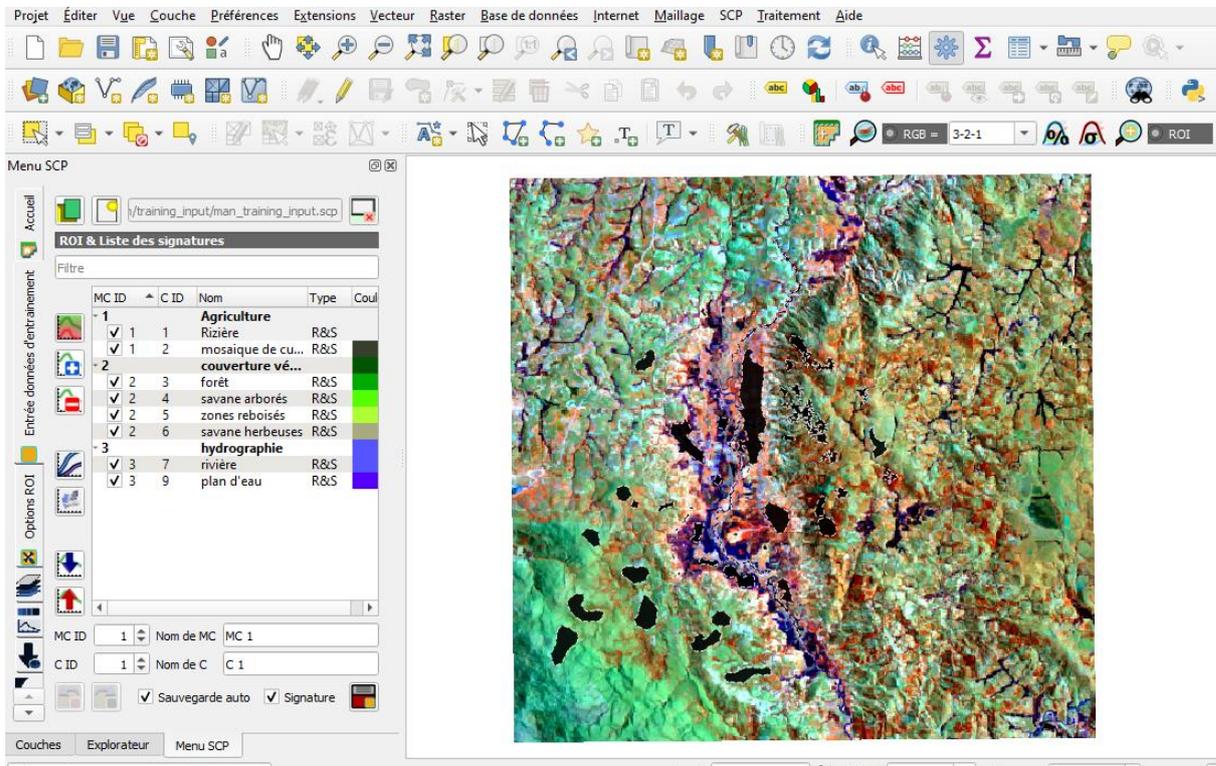
- Ensuite, avec le menu « Preprocessing » on vas délimiter notre zone d'intérêt soit en dessinant une zone d'emprise soit à partir d'une emprise d'un masque (vecteur ou raster).



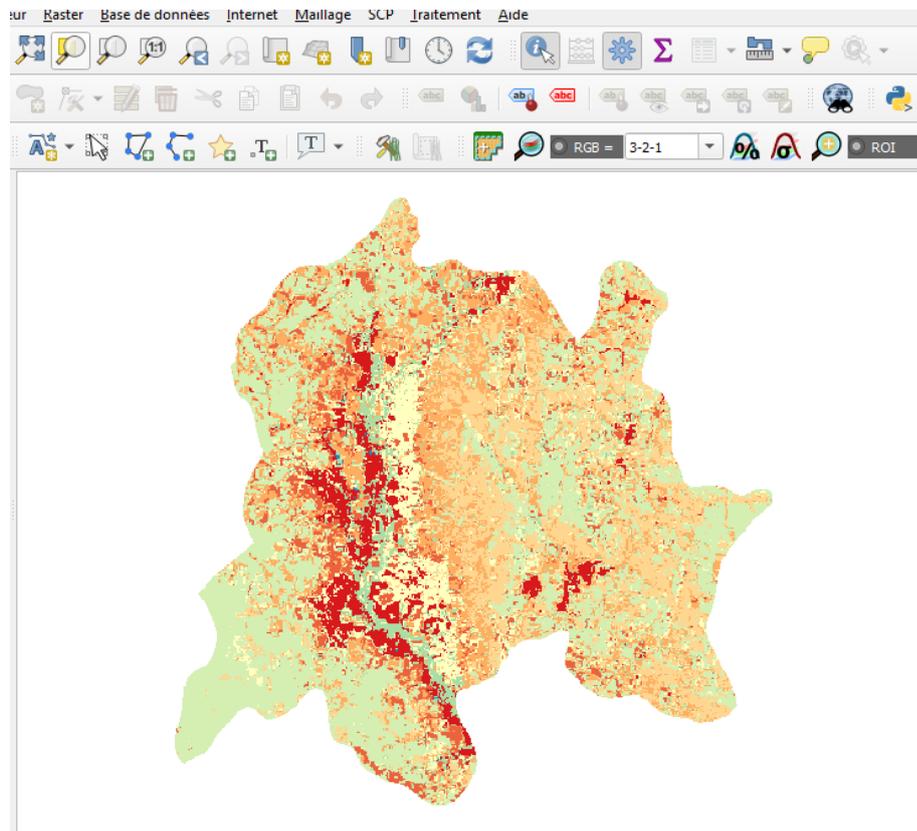
- On peut maintenant classifier les ROI à partir de la bande 1 découpé duquel on peut classer la composition des couleurs des bandes automatiquement. Comme il s'agit de Landsat 9 on vas utiliser les compositions suivantes :
 - 5-4-3 (couleurs infrarouge) pour la détection des végétation et l'occupation des sols
 - 5-6-4 pour la détection des plans d'eaux ou les surfaces occuper par des eaux.



- Créer petit à petit les ROI par l'utilisation de l'outil Training input en variant la compositions des couleurs et de déterminer chaque classes.



- Classification supervisée : dans l'onglet SCP choisir classification > cocher C ID > Choisir « Maximum Likelihood » > Run.

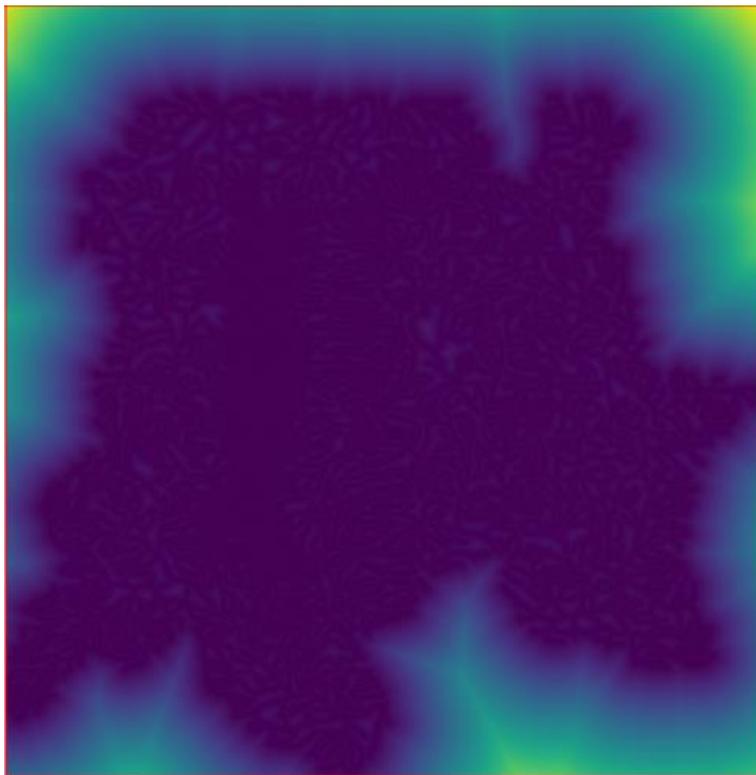


Annexe. VI : Liste des commandes utilisés dans GRASS GIS :

Commande	Description
r.in.gdal	Importation/exportation des données en image raster
g.region	Définir une région de travail
r.recode	Créer en sortie un calque basé sur un calque raster fourni en entrée
r.grow.distance	Créer une surface de distance
r.mapcalc	Calculateur de données des calques raster

Annexe. VII : Création des cartes des facteurs et contraintes sur GRASS GIS

- Importer les couches pentes et hydrographie. Si les couches sont en vecteur il faut tout d'abord les convertir en couches raster et de la faire en résolution 30 m, soit sur QGIS soit dans GRASS.
- Ensuite pour le facteur hydro, créer les surfaces de coût par pixel pour chaque facteur où la distance intervient : Utilisation de la commande **r.grow.distance** (Menu [Raster] >Zone tampon et distance raster> Distance des entités) pour créer les surfaces de distance.



- Créer les surfaces de coût avec **r.mapcalc** en se basant sur les fonctions d'utilités à partir de la commande `r.recode` :

Hydro :
 0 :50 :255 :255
 50 :100 :255 :0

Pente :
 0 :10 :0 :175
 10 :20 :175 :175
 20 :30 :175 :255

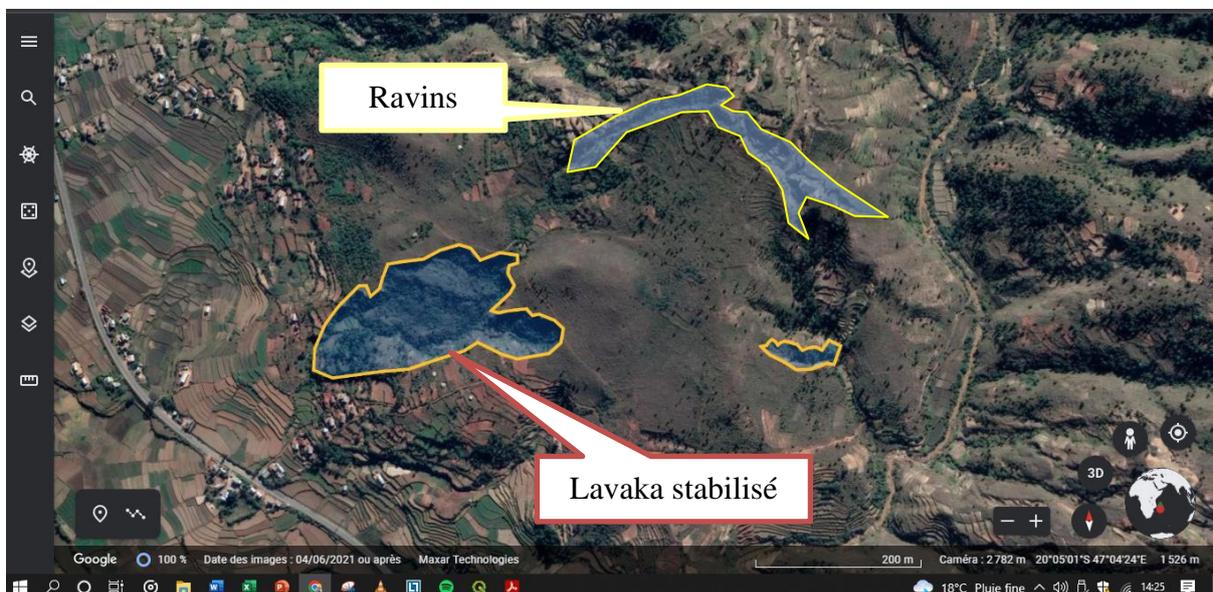
- Pour les cartes des contraintes, générer les cartes binaires avec la commande **r.mapcalc**
`if(isnull(riziere@amc),1,0) → rizirer_contrainte`
`if(isnull(pland_eau@amc),1,0) → Pland_eau_contrainte`
`if(isnull(granite@amc),1,0) → granite_contrainte`
`if(isnull(alluvion@amc),1,0) → alluvion_contrainte`

- Combinaison des cartes de facteur et contraintes dans la formule AMC (méthode de la somme pondéré) :

Ouvrir la calculatrice des rasters avec **r.mapcalc**> Insérer la ligne de code suivant en se basant sur la formule d'AMC par la méthode de somme pondéré et introduire les poids des facteur.

```
((0.3* pente_fact@ANAMULTI)+(0.2* hydro_fact@ANAMULTI)+(0.5*
pedologie_fact@ANAMULTI)) * (alluvion_contr@ANAMULTI* pland_eau_contr@ANAMULTI *
riziere_contr@ANAMULTI * granite_contr@ANAMULTI))
```

Annexe. IX : Localisation des Lavaka et des ravins dans la zone d'étude par l'image de google earth



BIBLIOGRAPHIE

- [1]. ANDRIAMIARTIANA S. (2017), *Recherches hydrogéomorphologiques dans le sillon de la Manandona, Région Vakinankaratra*. Mémoire de Maitrise, Université d'Antananarivo, Février 2017, 107 p.
- [2]. ASRI A. (2017) *Cartographie de vulnérabilité à l'érosion hydrique du bassin versant d'Oued Zeddine*. Mémoire de Maitrise, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah ALGERIE, Avril 2017, 62 p.
- [3]. BOURGEAT, F., (1972). *Contribution à l'étude des sols sur socle ancien à Madagascar. Types de différenciation et interprétation chronologique au cours du Quaternaire*, Paris : Mémoires ORSTOM, 1972, p 4-78.
- [4]. BRAUX C., (1996). *Cartographie multicritère : guide méthodologique*. Rapport BRGM R-39146, Novembre 1996, 25 p.
- [5]. BRUN A. (2009), *l'approche par bassin versant : le cas du Québec*, @propos vol 5 n°7, Institut de Recherche en Politiques Publiques, Juillet 2009, p 36-42.
- [6]. COLLINS A., (2006). *Madagascar and the amalgamation of Central Gondwana*, Gondwana Research, Janvier 2006, 16 p.
- [7]. Moritz L. (2006). *Didacticiel GRASS*. Geographic Resources Analysis Support System. GRASS Development Team. Mars 2006, 158 p.
- [8]. MAOU A., *Le bassin versant*. Cours Hydrologie I, Université de Maroc, 13p.
- [9]. MICHEL R., (2008). *Initiation à la lecture morpho-pédologique de Madagascar*. Formation des ingénieurs et techniciens des opérateurs du projet BVPI / SEHP, Décembre 2008, 58 p.
- [10]. PETIT, M., (1970). *Contribution à l'étude morphologique des reliefs granitiques à Madagascar*, Edition SNIC Tananarive, 2tomes, 1970, 307 p.
- [11]. PETIT, M., (1998). *Présentation physique de la Grande Ile Madagascar*, FTM, 1998, 192 p.
- [12]. RABARIMANANA M. ; RAHARIJAONA L. ; JEAN CHOROWICZ J., (2003). *Cartographie des lavaka par télédétection : analyse des facteurs et gestion des espaces ruraux à Madagascar*. Editions scientifiques GB. Télédétection 2003 vol. 3, n° 2-3-4, p 225-250.

- [13]. RAJAONARY HARISITRAKA F. (2018), *Analyse multicritère des facteurs de l'érosion hydrique : cas du bassin versant d'Alaotra*. Mémoire de Maitrise, Université d'Antananarivo, Décembre 2018, 125 p.
- [14]. RAKOTOARISOA E. (2022), *Cours de Télédétection*. Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra, 77p.
- [15]. RAKOTOSON NARINDRA A., (2015). *Cartographie de la vulnérabilité des sols dans le bassin versant du lac Alaotra*, Mémoire de Maitrise, Université d'Antananarivo, Juillet 2015, 108 p.
- [16]. RALISON Andrianalisoa V. (2002) *Cartographie géologique et pédologique par Sig et télédétection, outils de décision pour la conservation des sols*. Mémoire de Maitrise, Université d'Antananarivo, Septembre 2002, 98 p.
- [17]. RAZAFIMAHEFA RASOANIMANANA R. (2010). *Les formations superficielles du bassin d'Antsirabe. Nature et dynamique hydrogéomorphologique*, Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo, Septembre 2010, 195 p.
- [18]. ROOSE E. (1984), *Causes et facteurs de l'érosion hydrique sous climat tropical : conséquences sur les méthodes antiérosives*, *Machinisme et Agriculture Tropical* - n°87,1984, p 4-18.
- [19]. ROOSE E. (1994). *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols*. Bulletin pédologique de la FAO n°70 ; Réimpression de l'IRD 1999, 420p.
- [20]. T. Hengl ; C. H. Grohmann, R. ; S. Bivand ; O. Conrad ; A. Lobo, (2009). *SAGA vs GRASS : A Comparative Analysis of the Two Open Source Desktop GIS for the 3 Automated Analysis of Elevation Data*. *Proceedings of Geomorphometry*, Septembre 2009, p 22-27.
- [21]. V.LAFOREST - M. BATTON-HUBERT - M. MEAVE - P. BRULA - J. MÉHU. (2013). *Analyse Multicritère des procédés ou stratégies de traitement de sédiments*. CAP-SEDIMENT, PROFIDELIS, Décembre 2013, 44 p.
- [22]. ZEBROWSKI Cl. ; RATSIMBAZAFY Cl., (1979). *Carte pédologique de Madagascar à 1/100000 Feuille Antsirabe*. Notice explicative n°83, ORSTOM Paris 1979, 114 p.

WEBOGRAPHIE

- [W1]. <https://earthexplorer.usgs.gov/> **Consulté en Février 2022**
<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/> **Consulté en Février 2022 LANDSAT 9**
- [W2]. <https://www.google.com/intl/fr/earth/> **Consulté en Février 2022**
- [W3]. https://docs.qgis.org/2.8/fr/docs/gentle_gis_introduction/introducing_gis.html
Consulté en Février 2022 **Consulté en Mai 2022**
- [W4]. <https://geotests.net/cours/qgis/fr/intro/le-logiciel-qgis> **Consulté en Mai 2022**
- [W5]. <http://cultivons-les-couverts.agro-transfert-rt.org/battance/index.html> **Consulté en Juin 2022**
- [W6]. http://nantesreykjavik.canalblog.com/albums/america_latina_4___bolivie/photos/76477425-toto_1__12_.html **Consulté en Juin 2022**
- [W7]. https://www.researchgate.net/figure/1-Processus-de-lerosion-hydrigue_fig1_319287802 **Consulté en Juin 2022**
- [W8]. https://www.researchgate.net/figure/Distinction-entre-bassin-versant-reel-et-bassin-versant-topographique-Musy-et-al-2004_fig2_350125215 **Consulté en Juin 2022**
- [W9]. <https://www.syndicat-isac.fr/le-bassin-versant-de-lisac/quest-ce-quun-bassin-versant/> **Consulté en Juin 2022**
- [W10]. <https://www.madcameleon.com/en/2019/05/28/lerosion-sur-les-cotes-de-madagascar/> **Consulté en Juin 2022**
- [W11]. http://elearning.centre-univmila.dz/pluginfile.php/75214/mod_resource/content/1/chap%206%20PCSMNC%20master%202.pdf **Consulté en Juillet 2022**
- [W12]. <https://www.fao.org/3/AD071F/X010F16.jpg> **Consulté en Juillet 2022**
- [W13]. <https://www.sbvsvs.fr/politique-agricole/am%C3%A9nagements-d-hydraulique-douce/foss%C3%A9/> **Consulté en Juillet 2022**

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE.....	i
LISTE DES FIGURES	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	iii
LISTE DES ABREVIATIONS.....	iv
GLOSSAIRE.....	v
INTRODUCTION	1
GENERALITES	3
Chapitre I : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES	4
I. Notion sur le bassin versant :	4
1. Délimitation d'un bassin versant	5
2. Caractéristique morphométrique d'un bassin versant [6]	6
a) Dans le Plan :	6
b) L'altitude :	8
II. NOTION SUR L'EROSION :	11
1. Définition :	11
2. Types d'érosion.....	12
c) L'érosion éolienne :	12
a) L'érosion aratoire ou mécanique sèche	13
b) L'érosion hydrique :	13
Chapitre II : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	17
I. Monographie de la commune de Manandona :	17
1. Délimitation administrative :	17
2. Climat :	19
3. Occupation de sol et couverture végétal :	20
4. Cadre morpho-structurale :	22

5.	Hydrographie :	23
6.	Contexte géologique :	25
7.	Situation socio-économique :	28
II.	Caractéristique du bassin versant de la Manandona (rivière)	30
Chapitre III : L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LA ZONE D'ÉTUDE		32
I.	L'érosion hydrique : source d'ensablement	32
II.	Les facteurs de l'érosion hydrique dans la zone d'étude	33
III.	Un ravinement extrême dans les versants :	35
METHODOLOGIE.....		38
Chapitre IV : ANALYSES ET TRAITEMENTS DES DONNÉES.....		39
I.	Approche méthodologique :	39
II.	Matériels et données utilisés	39
1.	Présentation du logiciel QGIS	40
2.	Présentation de GRASS GIS et de SAGA GIS.....	41
a)	GRASS	41
b)	SAGA GIS.....	42
3.	La télédétection	43
a)	Définition :	43
b)	Les principes de la télédétection :	44
4.	L'analyse multicritère :	45
a)	Définition et principes :	45
b)	Cartographie multicritère :	45
III.	Démarche méthodologique :	46
1.	Acquisition des données :	48
2.	Identification des critères :	52
3.	Classification des critères :	59
4.	Analyse multicritère et pondération des facteurs :	59

IV.	Réalisation des cartes des facteurs et des Contraintes :.....	60
a)	Réalisation des cartes des facteurs	61
b)	Réalisations des cartes des contraintes :.....	64
RESULTATS ET DISCUSSIONS		65
Chapitre V : RESULTATS		66
I.	Résultat d'enquête sur l'érosion hydrique dans la zone d'étude	Erreur ! Signet non défini.
II.	Résultats intermédiaires et finale	66
1.	Délimitation des B.V :	66
2.	Cartes des facteurs et des Contraintes :.....	67
a)	Carte des facteurs :	67
b)	Cartes des contraintes :.....	68
3.	Carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique dans les bassins versants dans la commune de Manandona :	69
III.	Interprétation du résultat final :	72
IV.	Validation des résultats :.....	73
Chapitre. VI : DISCUSSIONS.....		75
I.	Limites et perspectives :.....	75
II.	Méthodes antiérosives :.....	76
1.	Lutttes contre l'érosion en Lavaka et en ravines :	76
a)	Procédés mécaniques :	76
b)	Méthode biologique :	80
CONCLUSION.....		82
ANNEXES.....		I
Annexe. I : Carte du Bassin versant de la rivière Manadona (RAZAFIMAHEFA 2010)...		II
Annexe. II : Image MNT utilisé pour les divers cartes, source : Eearth Explorer SRTM....		II
Annexe. III : Délimitation des bassins versants et de ses écoulements sur SAGA GIS		III

Annexe. IV : Image de la bande N°6 de Landsat 9 (Scène N° LC91590742022049LGN00)

V

Annexe. V : Classification semi- automatique supervisé de l'image Landsat 9.....VI

Annexe. VI : Liste des commandes utilisés dans GRASS GIS :IX

Annexe. VII : Création des cartes des facteurs et contraintes sur GRASS GISIX

Annexe. IX : Localisation des Lavaka et des ravins dans la zone d'étude par l'image de
google earth X

BIBLIOGRAPHIE.....XI

WEBOGRAPHIE XIII

TABLE DES MATIERESA

RESUME a

Titre : CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE DES SOLS A L'EROSION
HYDRIQUE : CAS DES BASSINS VERSANTS DE LA COMMUNE DE MANANDONA
Nom : RAZAFIMBOLOLONA
Prénom : Malalatiana Harison
E-mail : tianaharison97@gmail.com
Téléphone : 032 22 379 24
Nombre des pages : 83
Nombre des figures : 48
Nombre des tableaux : 16

RESUME

L'érosion des sols constitue un vrai problème environnemental, plusieurs régions de Madagascar souffrent de ce phénomène surtout dans les domaines ruraux. La commune de Manandona qui est l'un des piliers de l'agriculture dans la région de Vakinankaratra s'expose à cette problématique d'érosion par l'apparition des ensablements dans la commune et sur la RN7, ainsi que les formations des ravins et des lavaka dans les versants. De ce fait on constate sur le lieu les différentes causes d'érosion hydrique comme le climat, les pentes des reliefs, les ruissèlements des cours d'eaux, la nature géologique du sous-sol, la couverture végétale et surtout les causes anthropiques.

Ce mémoire propose alors la cartographie numérique des zones vulnérables à l'érosion hydriques dans les bassins versants de la commune de Manandona en appliquant l'analyse multicritère à l'aide des outils de SIG et de la télédétection.

Mot clés : Erosion hydrique, Bassin versant, SIG, Analyse multicritère, Télédétection.

ABSTRACT

Soil erosion is a real environmental problem, several regions in Madagascar suffer from this phenomenon, especially in rural areas. The commune of Manandona which is one of the pillars of agriculture in the region of Vakinankaratra is exposed to this problem of erosion by the presence of silting in the commune and on the road of RN7, and also the formations of gullies and lavaka in the slopes. Therefore, different causes of water erosion can be observed in the sector, such as climate, slopes of the relief, runoff from watercourses, geological of the subsoil, vegetation cover and particularly anthropogenic causes.

This study proposes the digital mapping of the vulnerable areas to the hydric erosion in the watersheds of the commune of Manandona by applying the multicriteria analysis using GIS and remote sensing.

Keywords: Water erosion, Watershed, GIS, Multicriteria Analysis, Remote sensing