

REFLEXION AUX APPORTS DU SIG DANS LA REPRESENTATION DES FACTEURS DE PLUIE ET DE L'EROSION EN MILIEU TROPICAL D'ALTITUDE SELON LA FORMULE DE WISCHEMEIER : CAS DU DISTRICT DE BETAFO

- 1-RAVERONIRINA Harimbola Sahondra**
Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE)
- 2- HERITAHINA Rambelison**
Maitre de Conférences HDR
Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE)
- 3- RAZANADRANAIVO Dinamalala Faniriantsoa**
Maitre de Conférences
Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE)
- 4- RANDRIANJA Roger**
Professeur Titulaire
Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE)

RESUME

L'évaluation à l'échelle systémique sert à définir le modèle d'aménagement adapté au territoire donné. Dans le milieu rural, il est primordial de mettre au point des cartes de potentialités et risques physiques, exigées lors d'une évaluation environnementale stratégique avant d'y entamer une quelconque planification. Le but en est non seulement de prendre en compte les efforts de prévention qui devraient s'orienter vers la maîtrise des facteurs de blocages et la gestion efficiente des facteurs-clé de succès. Même si la mise en application des réflexions issues des produits du Système d'Information Géographique (SIG) et de la télédétection reste jusqu'ici assez restreinte du fait des facteurs d'ordre à la fois politique que technique non encore satisfaisant. L'évaluation des indices et facteurs de pluies et de l'érosion et leur représentation par procédé de superposition des couches d'informations a fait ressortir une certaine dissymétrie Nord-Nord-Est- Sud-Sud-Ouest des facteurs physiques du milieu, de part et d'autre du Chef-lieu du District de Betafo.

Mots-clés : Wischemeier-facteurs-pluies-tropical-dissymétrie-topoclimat-superposition-couches-schéma

ABSTRACT

The system-wide assessment is used to define the appropriate planning model for the given territory. In rural areas, it is essential to develop physical hazard and potential maps, which are required during a strategic environmental assessment, before planning can begin. The aim is not only to take into account prevention efforts, which should be directed towards the control of blocking factors and the efficient management of key success factors. Even if the application of the reflections resulting from the products of the Geographic Information System (GIS) and remote sensing remains so far rather limited due to technical factors that are not yet satisfactory. The evaluation of rainfall and erosion indices and factors and their representation by superimposing the layers of information revealed a certain north-north-east-south-south-west asymmetry of the physical factors of the environment, on both sides of the Betafo Capital of this District.

Keywords: Wischemeier-factors-rainfall-tropical-asymmetry-topoclimate-superposition-layers-diagram

I-INTRODUCTION

Le paysage géomorphologique du District de Betafo est façonné par le volcanisme de concernant la partie Sud-Est de l'Ankaratra, Cette formation géologique du terrain avec les atouts y liés et la richesse de son histoire y sont spécifiquement favorables, d'où une forte concentration humaine. Cependant, une certaine instabilité s'observe du côté des caractéristiques physiques du milieu naturel et celui de l'aménagement ou de la mise en valeur du territoire.

Des agressions anthropiques engendrent des empreintes sensibles sur les milieux. Cela entraîne certains changements progressifs par rapport aux principales caractéristiques physiques du milieu. De ce fait, une situation de fragilités du milieu naturel de plus en plus remarquable s'annonce.

Pour faire face aux pressions sur le milieu naturel, soit de l'exploitation abusive, soit du manque de prévention, soit de l'insouciance par rapport au besoin de remise en question ou de prise de mesures correctives, ou bien une réflexion à une gestion durable du territoire. La planification territoriale qui tient compte des atouts et contraintes du milieu sert d'étape vers l'élaboration d'un schéma raisonné d'aménagement du territoire.

Comme l'eau est le principal facteur de l'érosion sur les Hautes Terres Centrales de Madagascar, ce travail a l'intention d'évaluer les sources de l'érosion à l'échelle de la zone d'étude. Mais des éléments physiques du milieu tels que l'altitude, les pentes, la couverture végétale et le climat y jouent également une influence et engendrent la dégradation des sols.

II- MATERIEL

L'objectif est de monter des cartes thématiques aux fins d'analyses de l'interaction entre le niveau d'altitude et les causes de l'érosion, à savoir, l'indice d'érosivité des pluies, l'indice d'érodibilité des sols, la longueur des pentes, l'indice de protection des cultures et l'indice d'efficacité des luttes antiérosives. Des images satellites produites par Landsat 7 et Landsat 8 de l'USGS (United States Geological Society) sont travaillées pour sources actualisées d'informations. Elles sont comparées aux données de terrain. Ensuite, des cartes géologiques du Bureau régional de Géologie et des Mines de Madagascar (BRGM) et topographiques du FTM (Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara) sont utilisées pour le référencement géographique sur la zone d'étude. Des fonds de cartes numérisés ont servi

d'outils de repérage administratif. Tel est le cas correspondant à un schéma d'aménagement du territoire qui concerne tous les niveaux administratifs. La cartographie est travaillée sur le Logiciel ArcGIS.

II.1. Zone d'étude

Betafo est une partie du Moyen-Ouest du Vakinankaratra dont le milieu démontre une certaine originalité due aux impacts du volcanisme de l'Ankaratra d'un côté et des formes d'occupation de l'espace de l'autre côté. Les richesses mais aussi les fragilités du milieu conduisent à réfléchir aux autres possibilités de diversification des sources de revenus pour entretenir efficacement ses atouts et potentialités. Huit communes du Nord et du Sud, de part et d'autre du Chef-lieu dudit District sont choisies pour le représenter. La géomorphologie a permis de comprendre, d'une part, la dynamique et l'évolution du relief et d'autre part, les risques érosifs liés aux facteurs naturels et plus tardivement aux facteurs anthropiques qui ont affecté tous types de relief dans ce milieu tropical d'altitude.

II.2. Méthodes

L'étude se fonde sur des approches synchroniques par l'étude de la dynamique fluviale actuelle et l'analyse des contraintes ou facteurs du milieu. Et les facteurs permettant la réalisation d'une analyse-diagnostic sont évalués et représentés cartographiquement.

Les approches synchroniques valorisent les éléments explicatifs de l'espace géographique, du bassin-versant à partir de l'analyse des acquis antérieurs pour l'acquisition des informations. Les approches diachroniques demandent beaucoup des travaux de terrain pour les observations, les analyses et les interprétations des traces d'anthropisation sur les paysages et qui permettent aussi d'apporter des explications sur l'évolution et les modifications du paysage actuel.

Comme méthode, la forme de la pente, la longueur du trajet constituent le facteur topographique LS du milieu, d'après la formule de WISCHEMEIER en 1960 :

$$LS = (0,76 + 0,535 + 0,0765)\sqrt{L}/100$$

De même, si le corps mobile situé sur un plan incliné accélère son mouvement et augmente sa vitesse, selon la formule $f = 0,5mV^2$

Avec m masse en kilogramme

Et V temps en secondes.

Alors, la force de l'érosion hydrique est donnée par $V = n\sqrt{h * I}$

Où n varie de 1 à 5

h : hauteur en m de la lame d'eau

I : pente en m/m

W. H. WISCHEMEIER et D. D. SMITH : Equation pour la prédiction de l'érosion

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Où A : l'érosion attendue en t/ha

R : Indice d'érosivité des pluies

K : Indice d'érodibilité du sol

L : Fonction de la longueur de la pente

S : Indice de protection des cultures

P : Indice d'efficacité de la lutte antiérosive

L'énergie de la pluie $E = (89 \log I + 210, 3) h$

Où E : exprimée en t*m/ha

L'intensité I en cm/h

La hauteur h en cm.

L'indice d'érosivité R (en t.m/ha* cm/h* 10⁻² et l'intensité maximum en 30mn en cm/h, n est le nombre de pluviophase de la pluie) d'une pluie a pour expression finale :

$$R = E * I_{30} = \left[\sum_{i=1}^n (89 \log I + 210, 3) h \right] * I_{\max 30} * 10^{-2}$$

II.3. Choix du sujet

Le paysage accidenté (BATTISTINI (R.), 1962) est lié à de formations superficielles épaisses mais meubles. L'agressivité de l'érosion hydrique, responsable de l'évolution du paysage, dépend même de la nature et l'état de celui-ci. Des divers phénomènes naturels endogènes et exogènes ont affecté le bâti géologique de Betafo et ont rendu le paysage favorable à l'érosion. En outre, Betafo a un rôle religieux, historique et économique caractéristique. D'abord, elle a cédé la place d'ancienne capitale du Vakinankaratra à Antsirabe. Contrairement à son rôle religieux d'être le point de départ de l'implantation d'édifices religieux protestants à Madagascar, ses réputations d'être un fournisseur régional et même national de certains produits alimentaires sont actuellement remises en question. De

plus, en dépit du fait que le sous-sol recèle certaines potentialités en ce qui concerne les pouzzolanes, des pierres industrielles et autres richesses, apparemment, les données et informations ne sont pas traçables. D'où un devenir remis en question. Alors « Peut-on revaloriser la notoriété de douceur de Betafo ? ».

II.4. Limites de l'étude

Les travaux ont seulement porté sur 8 des 12 communes du District de Betafo. La difficulté d'accès et l'insécurité n'ont pas permis de récolter des données suffisantes sur terrain. Par ailleurs, sans station ou relevés météorologiques, les sources disponibles via internet ou web sont recoupées aux informations sur le terrain.

III-RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les principaux résultats ont permis de cartographier les principaux types de terrains en tenant compte desdits facteurs, et d'en définir les fragilités.

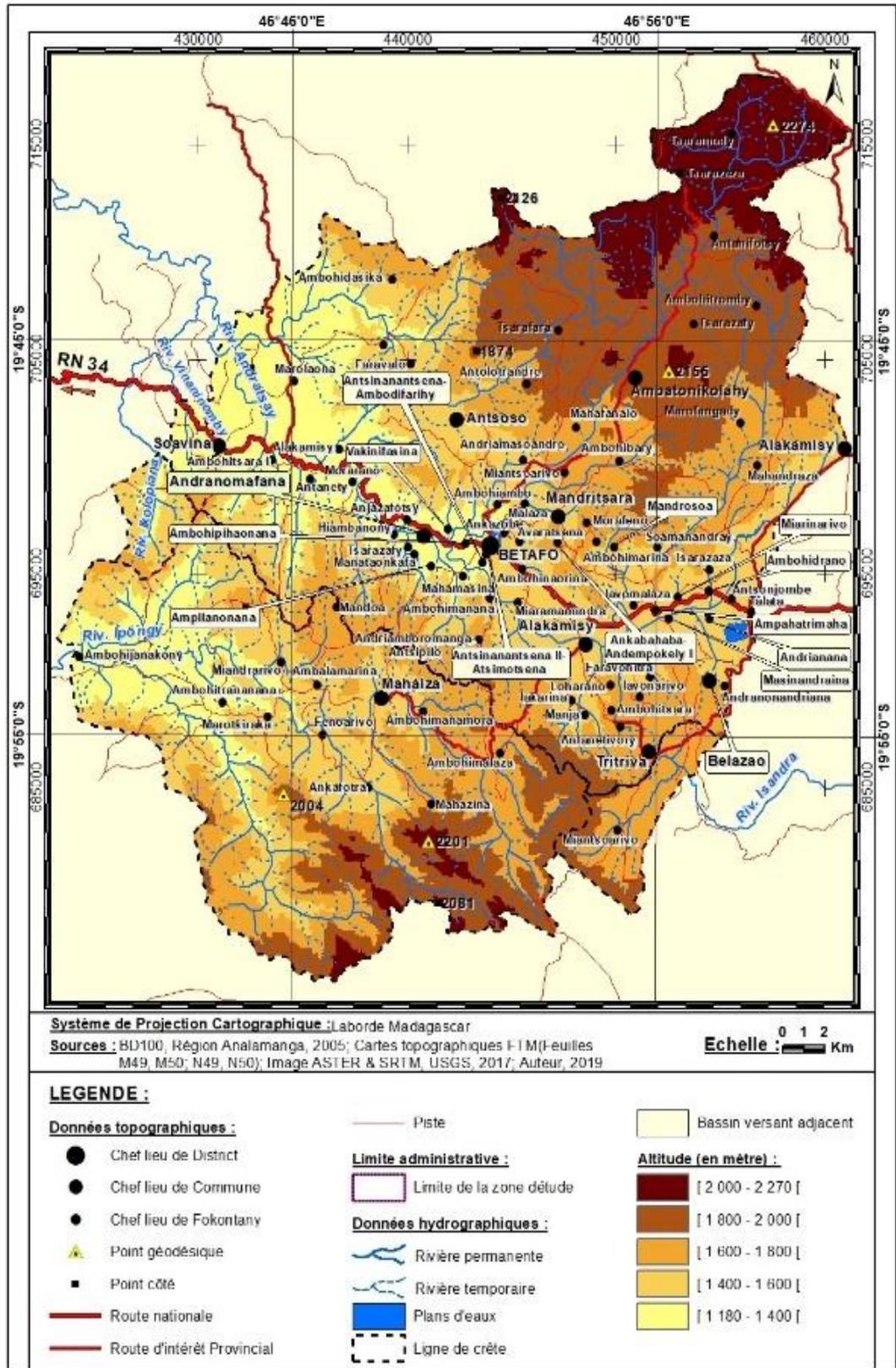
III.1. Résultats

Le paysage naturel varie en fonction de son assise géomorphologique. Les facteurs de pluies se divisent en deux, de part et d'autre de l'axe routier RN 34. Le relief et le pendage, la pédologie et l'indice d'érosivité des sols, les types d'occupation du sol, la couverture végétale et la présence de barrière antiérosive influencent d'une manière synchrone par rapport à l'érosion. En effet, les potentialités sont nombreuses, toutefois, les risques de dégradation rapide des terrains sont alertants et la possibilité de restauration reste encore inestimable.

III.1.1. Identification et cartographie des risques de terrain

La carte géomorphologique présente une forme de paysage symétriquement disposé et varié, de part et d'autre de la Route Nationale 34. A la pointe Nord-Est de Betafo, l'altitude dépasse 2 000m, sa constitution est liée au volcanisme de l'Ankaratra. Dans le Sud-Est, c'est une partie plus élevée. Au centre se rencontre l'altitude inférieure, de l'ordre de 1 180 à 1 400m. Les points géodésiques du Nord-Est sont au nombre de trois, respectivement 2 274m d'altitude, avec une descente à 2 150m et 1 874m. Dans le côté Sud-Est, on a 2 201m, 2 081m et 2 004m d'altitude.

Carte 2 : Paysage accidenté à formations superficielles épaisses mais meubles



L'altitude moyenne avec la presque totalité du territoire se situe entre 1 600 à 1 800m. Ce terrain a l'aspect général d'espaces bombés et en demi-oranges, avec des bas-fonds ou dépressions susceptibles de recevoir des dépôts alluvionnaires en période de crues ou de hautes eaux. Les lignes de crêtes sont bien identifiables.

Cette forme de relief permet d'hiérarchiser l'effet de l'action de l'eau sur le milieu naturel. En effet, les crêtes, les sommets et les pentes qui sont peu couvertes peuvent subir des conséquences de l'action de l'eau à cause des contrastes climatiques extrêmes et du topo climat ou microclimat. Ce sont surtout les sommets, pentes et bas-fonds qui subissent d'une manière différente l'intensité des pluies dans l'érosion.

III.1.2. Valeur de l'Energie de pluie, notée E dans la zone d'étude

L'énergie de pluie E correspond généralement à la capacité des pluies à porter une influence déterminante sur le milieu naturel, avec son importance qui est variable, elle peut apporter certaine agressivité.

Elle est une résultante de la quantité, la durée, la période et la périodicité de la pluie. En effet, la force et l'intensité de sa chute a pour effet sur le sol où elle tombe. D'autant plus que le pendage fort, raide ou faible peut expliquer la vitesse de déplacement des eaux de pluie, par ruissellement des eaux de surface. Le contexte du milieu d'étude se présente comme suit :

En effet, trois catégories de pluies journalières concernent la zone d'étude. Selon ces catégories, I_Max (en mm/J) = 120mm/jour, 140mm/jour ou 160mm/jour. La première concerne une superficie de 295,354km². La seconde tombe sur 323,082km² et la troisième sur 2,970km². Le tableau suivant montre que les deux premières quantités départagent donc la zone d'étude en deux zones dont la quantité maximale journalière est forte. Quant à la troisième, de 160mm/jour, elle concerne une infime superficie, au Nord-Nord-Est de la zone d'étude.

Tableau 1 : Pluie maximale journalière dans la zone d'étude

I_Max (en mm/J)	Superficie en Km²	Superficie en %
120	295,354	47,53
140	323,082	51,99
160	2,970	0,48
TOTAL	621,406	100,00

Source : Extrait de BD 100 Région Vakinankaratra 2005 ; Cartes topographiques FTM (Feuilles M49, M50, N49, N50) ; Images ASTER&SRTM, USGS, 2017, Auteur 2022.

Pour mesurer la force de la pluie, un calcul se fait à partir de la formule suivante :

Calcul de l'énergie de la pluie notée $E = 210,3 + 89 \log I_{max}$

Le résultat du calcul se présente dans le tableau et le graphique suivants. En effet, en même temps que la quantité journalière de pluie augmente, l'énergie y provoquée est plus forte. De ce fait, sur une même zone d'étude, l'énergie de la pluie est variable. Elle est fonction des caractéristiques du milieu dont le pendage et le degré de pendage, et notamment l'intensité de la pluie.

Tableau 2 : Calcul de l'énergie de la pluie notée $E = 210,3 + 89 \log I_{max}$

I_Max (en mm/J)	I_Max (en Cm/J)	Constante_1	Constante_2	logI _{max}	89*logI _{max}
120	12	210,3	89,00	1,0792	96,0471
140	14	210,3	89,00	1,1461	102,0054
160	16	210,3	89,00	1,2041	107,1667
TOTAL					

I_Max (en mm/J)	89*logI _{max}	E	I _{max} 30mn	E*I _{max} 30mn	R
120	96,0471309	306,35	10,0000	3063,471309	30,63471309
140	102,0053952	312,31	11,6600	3641,480908	36,41480908
160	107,1666785	317,47	13,3300	4231,830824	42,31830824
TOTAL					

E étant l'énergie cinétique de la pluie (J/m²/mm) I₃₀ : Intensité maximale de la pluie en demi-heure (mm)

Source : Auteur, 2022.

Les indicateurs et l'énergie de la pluie augmente en fonction de la quantité journalière de pluie, c'est-à-dire en fonction de la localité concernée.

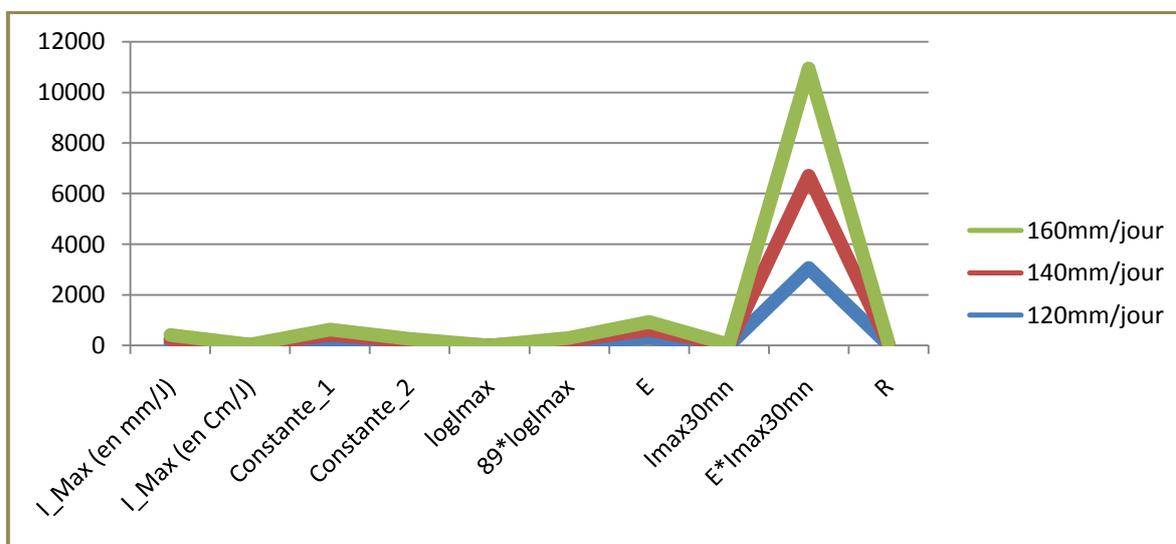


Figure 1 : Energie de la pluie la structure pluviométrique dans la zone d'étude

Source : Auteur, 2022.

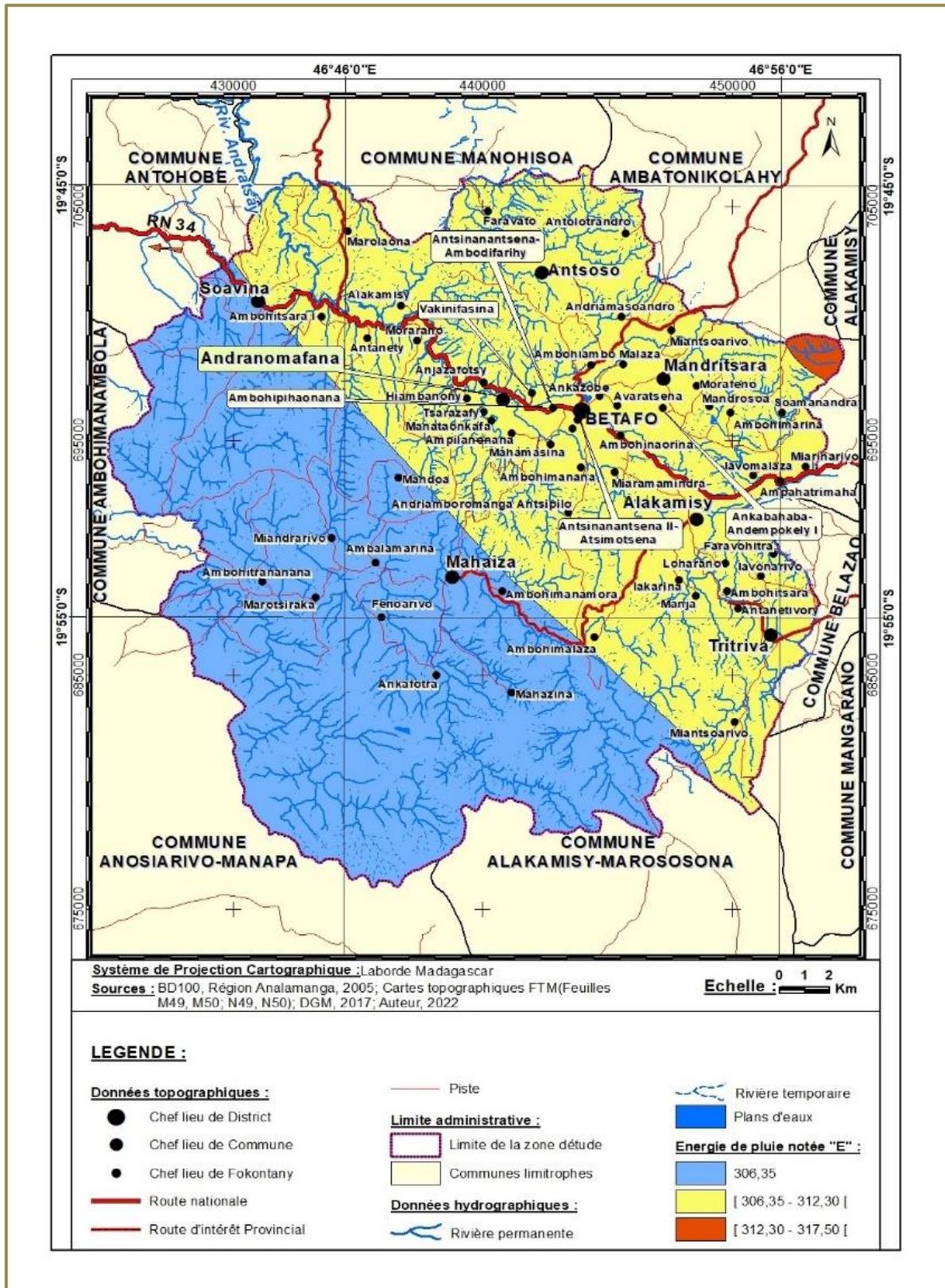
La carte ci-dessous représente la répartition géographique de l'énergie de la pluie, notée « E », selon trois tranches de pluviométrie journalière maximale.

-Elle est d'autant plus forte dans la partie Nord-Nord-Est de la zone d'étude ou « E » a une valeur de 306,35.

-Ensuite, elle prend une valeur comprise entre [306,25-312,30] dans la partie Nord de la zone d'étude.

-Enfin, elle atteint une valeur plus forte entre [312,30-317,50] dans la partie Sud de la zone d'étude.

Carte 3 : Valeurs de l'Energie de la pluie E et leur dissymétrie Nord et Nord-Est -Sud et Sud-Ouest dans la zone d'étude



III.1.3. Valeurs de l'indice d'érosivité du sol noté « R » dans la zone d'étude

L'indice d'érosivité R est défini comme étant le produit de l'énergie cinétique de la pluie par l'intensité horaire maximum de celle-ci observée pendant 30 min, le tout divisé par 100. Il caractérise l'agressivité de la pluie résultant de l'effet combiné de l'impact des gouttes (splash) et du ruissellement.

L'équation pour la prédiction de l'érosion (W.H. Wischmeier et D.D. Smith¹), Cette équation s'écrit :

$$A = R.K.L.S.C.P.,$$

où A est l'érosion attendue en t/ha ;

R est l'indice d'érosivité des pluies ;

K est l'indice d'érodibilité du sol ;

L est fonction de la longueur de la pente ;

S est fonction de l'inclinaison de cette pente ;

C'est un indice de protection des cultures ;

P est un indice d'efficacité des pratiques de lutte antiérosive.

L'énergie cinétique d'une pluie est égale à la somme des énergies cinétiques des pluviophases qui la composent. Pour obtenir l'énergie d'une pluviophase, on a recours à une expression où n'intervient que l'intensité de la pluviophase et sa hauteur.

L'indice d'érosivité ne permet pas d'évaluer l'érosivité des précipitations solides. L'effet de la fusion de ces précipitations n'est pas aisé à quantifier en raison des différentes conditions dans lesquelles cette fusion se produit (A. Laurant et A. Bollinne, 1979²). Afin de tenir compte d'une érosivité potentielle résultant des précipitations solides, au cours du dépouillement, l'érosivité de celles-ci a été considérée comme due à des précipitations sous forme liquide.

¹ W.H. Wischmeier et D.D. Smith, Le modèle empirique de perte en terre, 1960-1970.

² A. BÜLLINNE (2), A. LAURANT (3) et W. BOON (4), , juin 1979, pp. 77-99.

Tableau 3 : Erosion attendue « A » dans la zone d'étude

Classe de la valeur de A	Superficie	
	Km ²	%
[0 - 5 [	355,746	57,25
[5 - 10 [	97,122	15,63
[10 - 25 [	106,895	17,20
[25- 50 [	41,735	6,72
[50 - 100 [	13,519	2,18
[100 - 200 [	4,184	0,67
[200 - 300 [	1,446	0,23
[300 - 400 [	0,607	0,10
[400 - 500 [	0,149	0,02
[500 - 530 [	0,003	0,00
TOTAL	621,406	100,00

Source : Extrait de BD 100 Région Vakinankaratra 2005 ; Cartes topographiques FTM (Feuilles M49, M50, N49, N50) ; Images ASTER&SRTM, USGS, 2017, Auteur 2022.

Le tableau ci-dessus et le graphique suivant représentent la perte attendue en terres due à l'érosion. Le minimum prévu est de moins de 5t/ha sur environ 57,25% de la superficie étudiée. Le maximum, même si peu étendu atteindrait 400 à 500t/ha.

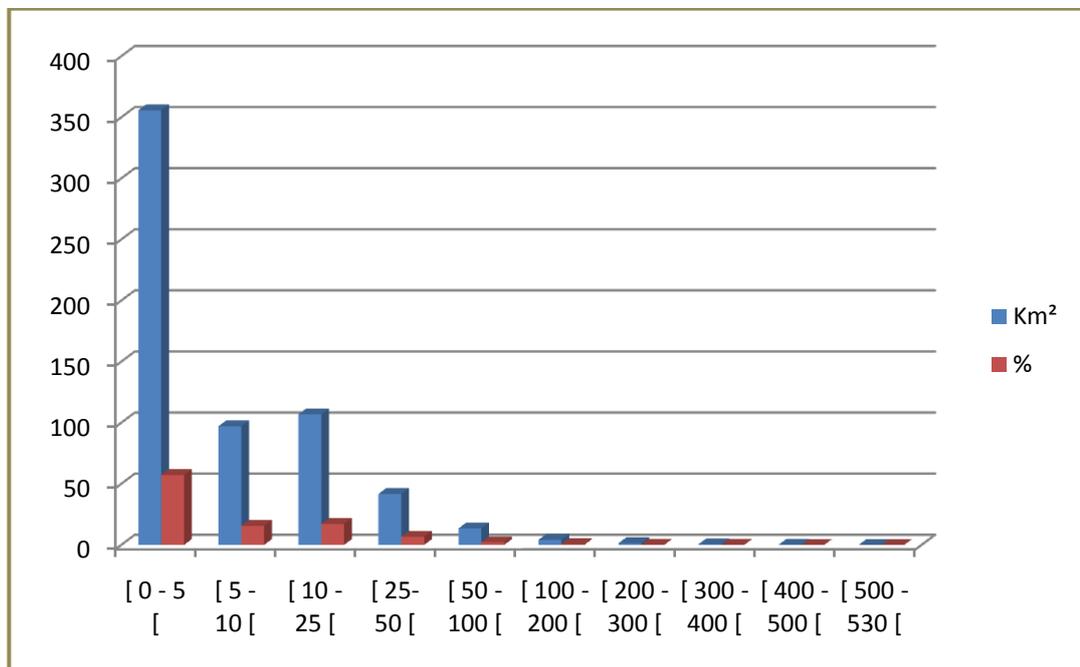
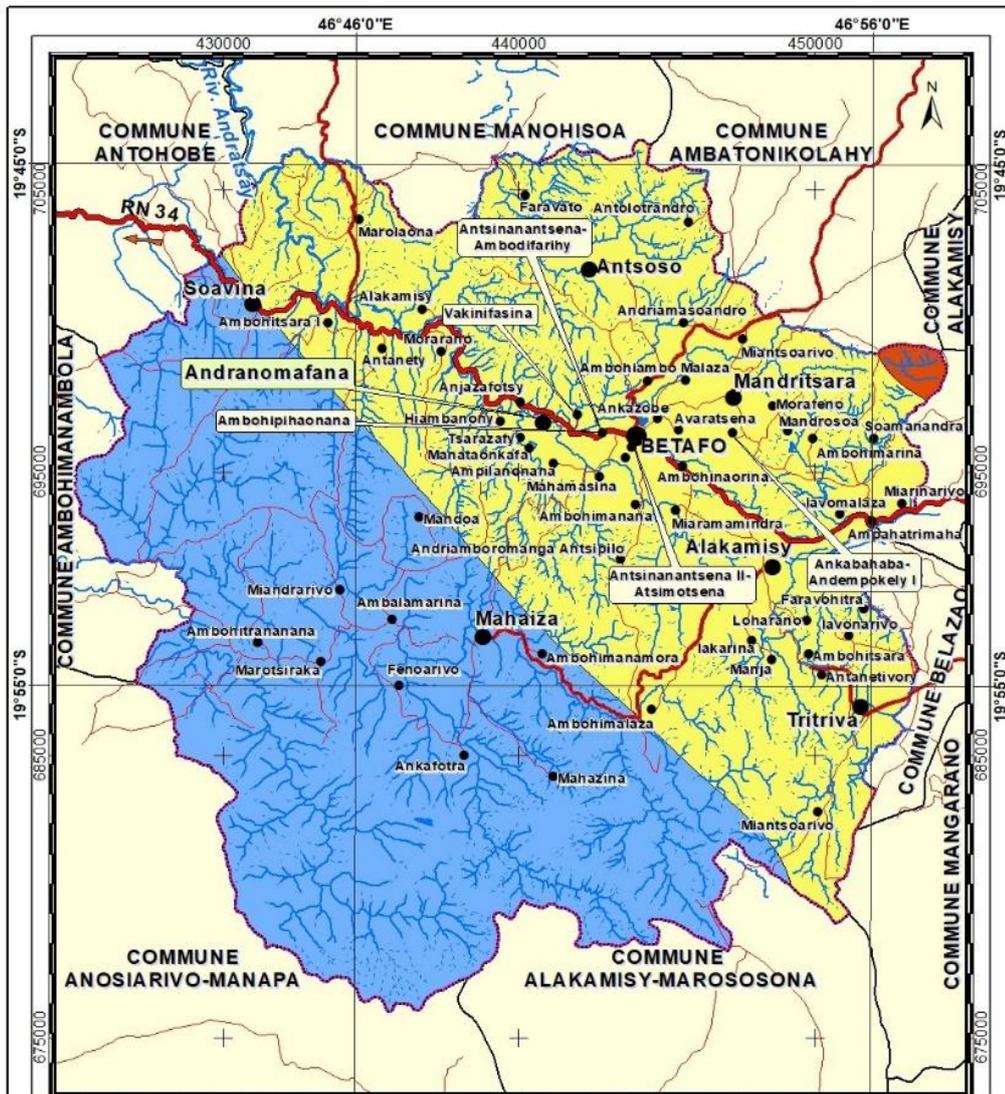


Figure 2 : Importance de la valeur attendue de la perte en terres

Source : Auteur 2022.

Carte 4 : Dissymétrie Nord et Nord-Est -Sud et Sud-Ouest des valeurs de pertes attendues en terre R dans la zone d'étude



Système de Projection Cartographique : Laborde Madagascar

Sources : BD100, Région Analamanga, 2005; Cartes topographiques FTM (Feuilles M49, M50; N49, N50); DGM, 2017; Auteur, 2022

Echelle : 0 1 2 Km

LEGENDE :

Données topographiques :

- Chef lieu de District
- Chef lieu de Commune
- Chef lieu de Fokontany
- Route nationale
- Route d'intérêt Provincial

— Piste

Limite administrative :

- Limite de la zone d'étude
- Communes limitrophes

Données hydrographiques :

- Rivière permanente

— Rivière temporaire

— Plans d'eau

Indice d'érosivité des pluies note "R" :

- 30,60
- [30,60 - 36,42 [
- [36,42 - 42,32 [

La carte ci-dessus montre la répartition spatiale de cette estimation de l'indice d'érosivité « R » de la zone d'étude :

- « R » = 30,60 dans les parties Ouest, Sud-Ouest et Sud ;
- $30,60 < \text{« R »} \leq 36,42$ dans la partie Nord, Est et Sud-Est ;
- $36,42 < \text{« R »} \leq 42,32$ dans l'Est de Mandritsara.

III.1.4. Valeurs du facteur d'érodibilité du sol, noté « K » de la zone d'étude

L'érodibilité du sol est définie comme étant sa sensibilité à l'érosion. Elle dépend uniquement des caractéristiques du sol qui influencent l'érosion, entre autres la vitesse d'infiltration, la détachabilité, la transportabilité ou la résistance à la dispersion. Les valeurs du facteur « K » sont déterminées expérimentalement sur le terrain, pour un sol dans la plupart des cas couverts.

III.1.4.1. Interprétation théorique des valeurs de « K »

Les valeurs du facteur « K » sont déterminées expérimentalement sur le terrain. Pour un sol donné, c'est l'érosion en t/ha lorsque tous les autres facteurs de l'équation ont une valeur unitaire, c'est-à-dire par unité de l'indice d'érosivité des pluies et lorsque les mesures sont effectuées dans des parcelles longues de 22,13 m, installées sur des pentes de 9 %, travaillées parallèlement à la pente et maintenues en jachère nue (W.H. Wischmeier et D.D. Smith, **JACQUES Nestor**, 2005).

Ces valeurs varient de 0,03 à 0,69, mais la plupart sont comprises entre 0,10 et 0,50 (W.H. Wischmeier et D.D. Smith ; W.H. Wischmeier, C.B. Johnson et B.V. Cross). Ceci a permis à W.H. Wischmeier et à J.V. Mannering) de mettre au point une équation qui permet de calculer le facteur K lorsqu'on connaît les caractéristiques des sols.

La gamme des différents sols a été définie en fonction de la classification française de l'étude des sols. La gamme de « K » est la suivante :

- « K » < 0,05 : sol très peu érodible,
- $0,05 < \text{« K »} < 0,1$: sol faiblement érodible ,
- $0,1 < \text{« K »} < 0,2$: sol moyennement érodible,
- $0,2 < \text{« K »} < 0,4$: sol fortement érodible,
- $0,4 < \text{« K »} < 0,6$: sol très fortement érodible.

III.1.4.2. Indice d'érodibilité « K » du bassin versant

L'exemple du bassin versant de Sandranamby sert d'exemple pour y mesurer l'indice d'érodibilité. Le tableau et la figure ci-dessus relatent les caractéristiques de ce bassin versant, en effet :

$-0,14 < \text{« K »} < 0,20$ pour $39,30\% + 46,06\% = 85,36\%$ de la surface totale, donc, l'érodibilité y est moyenne ;

- « K » < 0,1 pour 4,06% de la surface de la localité, donc, l'érodibilité y est faible ;
 -De même, $0,20 < \text{« K »} < 0,25$ pour $4\% + 6,57\% = 10,57\%$ de la superficie, donc l'érodibilité forte concerne 10% environ.

Tableau 4 : Valeur de « K » dans le bassin versant de Sandranamby

Classe de la valeur de « K »	Valeur de « K » moyenne	Superficie en Km ²	Superficie en %
[0,07 -0,14 [	0,07	25,2592	4,06
[0,14 -0,15 [	0,15	244,1817	39,30
[0,15 -0,20 [	0,18	286,2339	46,06
[0,20 -0,23 [	0,22	24,8814	4,00
[0,23 -0,25 [	0,24	40,8498	6,57
TOTAL		621,406	100,00

Source : Extrait de BD 100 Région Vakinankaratra 2005 ; Cartes topographiques FTM (Feuilles M49, M50, N49, N50) ; Images ASTER&SRTM, USGS, 2017, Auteur 2022.

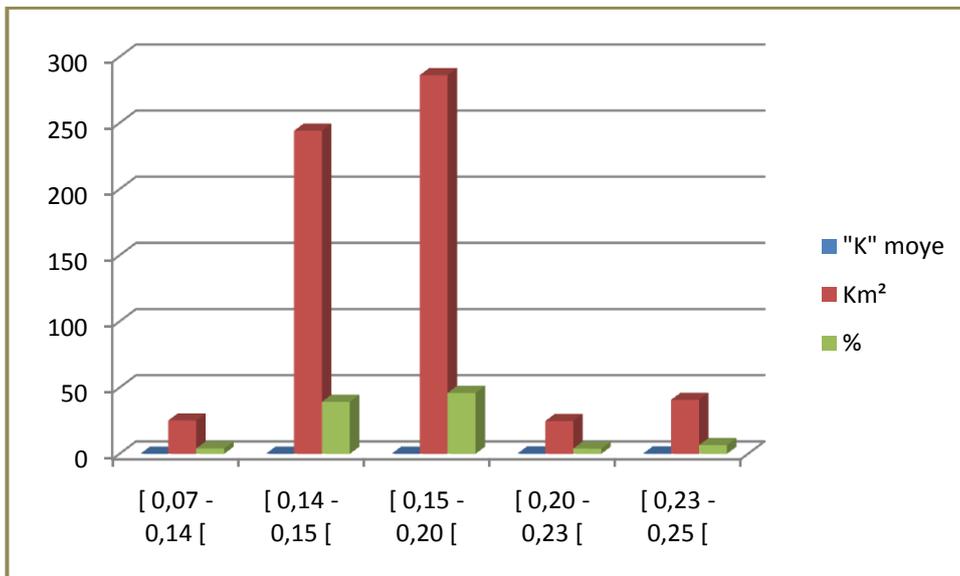
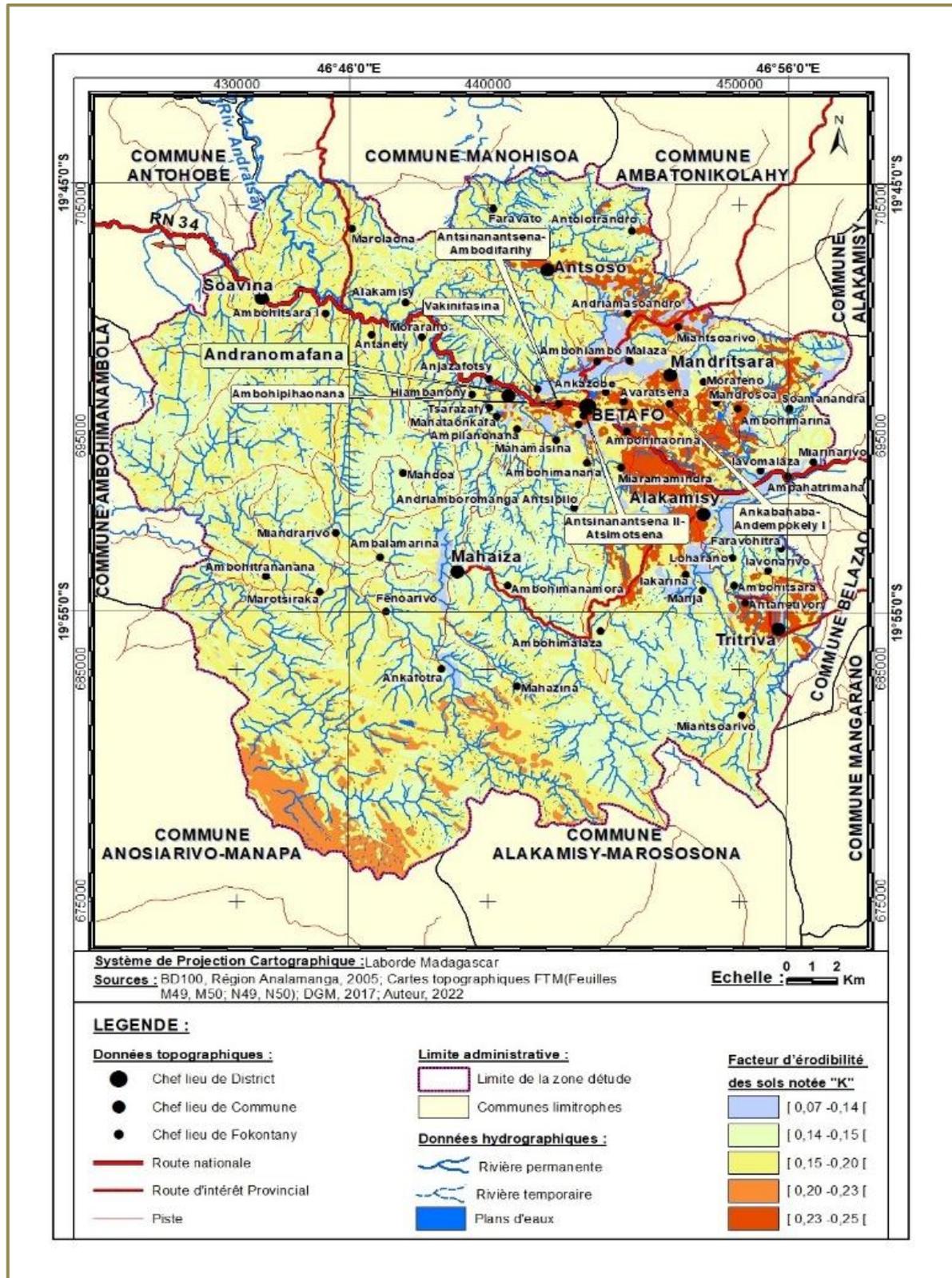


Figure 3 : Indice d'érodibilité « K » moyen selon la superficie

Source : Auteur 2022.

Carte 5 : Valeurs de K dans la zone d'étude



Dans la zone d'étude, la valeur de « K » est représentée en quatre plages allant de 0,07 à 0,25, soit elle prend comme valeur 0,07 à 0,14 ; 0,14 à 0,15 ; 0,15 à 0,20 ; 0,20 à 0,23 ; et 0,23 à 0,25. Ce qui veut dire que les sols peuvent correspondre à ceux faiblement érodibles et ceux fortement érodibles. D'après la carte suivante, les sols sont érodibles différemment :

- les localités fortement érodibles correspondent aux pentes des sommets aux voisinages des localités plus habitées de l'Est et celles de la partie Sud-Ouest de Mahaiza ;

- les localités moyennement érodibles sont les bas-fonds et les pentes moins fortes réparties partout ;

- les sols faiblement érodibles correspondent aux bas-fonds proches des zones d'habitation humaine.

III.1.5. Valeurs du facteur topographique ou longueur de pente « LS » de la zone d'étude

La détermination du facteur topographique « LS » est fonction de la longueur des pentes « L » (en m) et de leur inclinaison « S » en %. « LS » est déterminé à partir de l'image Aster 30 m de la zone d'étude. En effet, théoriquement :

- La pente et sa longueur augmentent généralement l'importance de l'érosion mais l'existence d'érosion et de ruissellement intense sur des pentes douces indique par contre qu'il n'est pas besoin d'une forte pente pour déclencher ce phénomène : l'action pluviale y suffit (Fauck, 1956; Fournier, 1967).

- L'inclinaison de la pente augmente l'énergie cinétique des pluies dès que la pente dépasse 15 %. Ainsi, l'érosion croît de façon exponentielle (exposant : 0,6) avec la longueur de la pente (Zingg, 1940). En région tropicale, une plus haute valeur de l'exposant est plus appropriée (Hudson, 1957-1973).

- Les relations entre l'érosion et la longueur de pente varient plus d'une année à l'autre que d'un site à l'autre. L'importance de l'exposant (de 0,1 à 0,9) est fortement influencée par l'évolution du sol, la couverture végétale, l'utilisation des résidus de culture. L'influence de la longueur de pente sur le ruissellement est encore moins nette. Elle est tantôt positive, tantôt négative ou tantôt nulle, en fonction de l'humidité préalable et de l'état de surface du sol (Wischmeier, 1958 ; 1966).

- Lorsque la pente augmente, la forme de l'érosion change ; elle burine dans le sol, fait effet splash, décape, transporte et dépose, c'est-à-dire que de multiples figures peuvent apparaître.

Tableau 5 : Valeur du facteur topographique ou longueur de pente « LS » dans la zone d'étude

Classe de la valeur de « LS »	Superficie en Km ²	Superficie en %
[0 - 10 [	406,7352	65,45
[10 - 25 [	150,9216	24,29
[25 - 50 [	49,5741	7,98
[50 - 100 [	13,5775	2,18
[100 - 143 [	0,5976	0,10
TOTAL	621,4060	100,00

Source : Extrait de BD 100 Région Vakinankaratra 2005 ; Cartes topographiques FTM (Feuilles M49, M50, N49, N50) ; Images ASTER&SRTM, USGS, 2017, Auteur 2022.

Le tableau ci-dessus et la figure suivante présentent que la longueur de la pente « LS » la plus faible concerne 65,45% de la superficie totale. Ensuite, « LS » moyennement faible correspond à 24,29% de la superficie. Enfin, « LS » la plus élevée concerne seulement 0,10% du terrain. Donc la zone d'étude est attaquée par l'érosion.

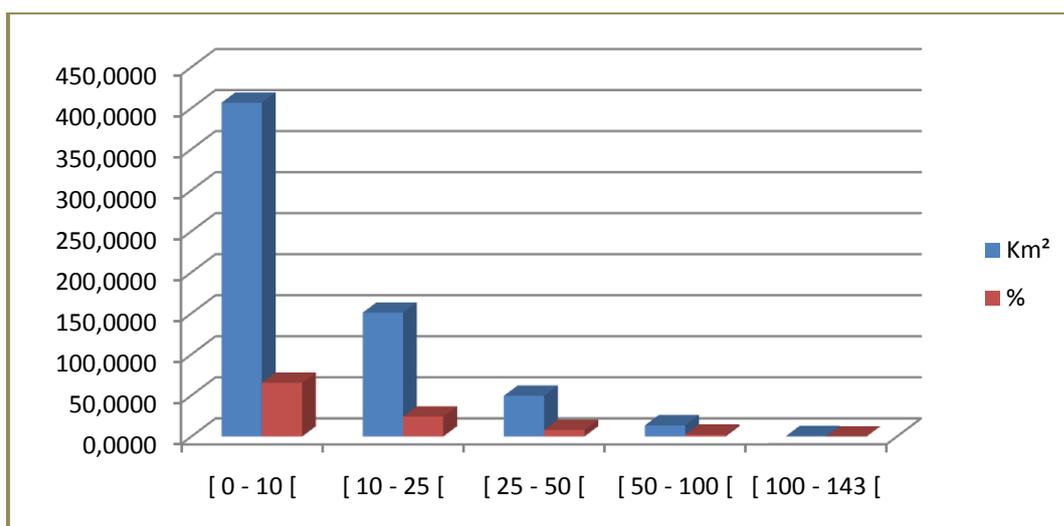
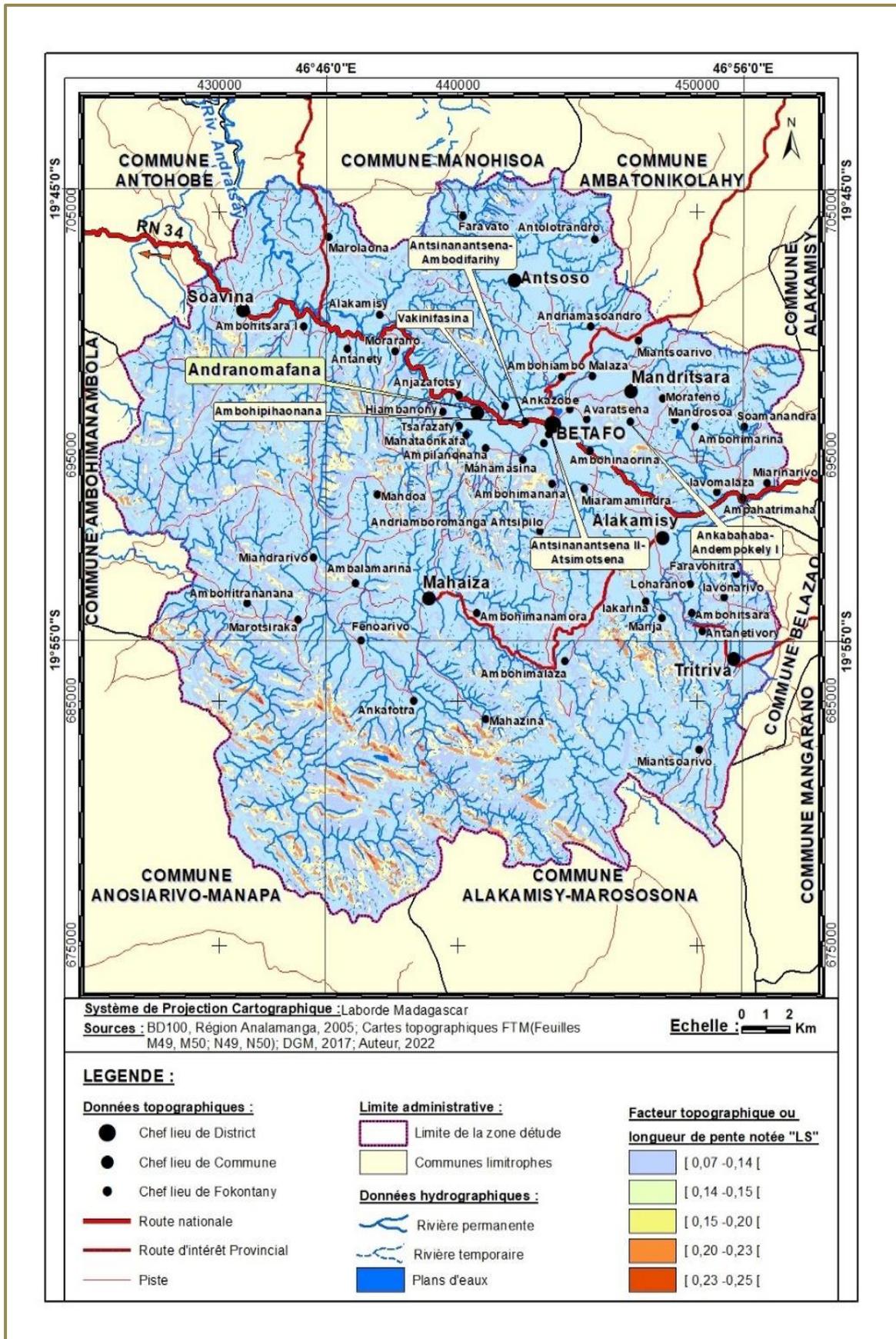


Figure 4 : Facteur topographique ou longueur de pente « LS » moyen selon la superficie

Source : Auteur 2022.

Pour le cas des études effectuées sur les Hautes Terres Centrales de Madagascar, environ 1t/ha de terres sont emportées par l'érosion hydrique et éolienne. La pente y joue une action déterminante, notamment pour les terrains fragilisés dus à l'action anthropique. La carte suivante montre que les valeurs les plus fortes des longueurs des pentes correspondent à la partie Sud et Sud-Ouest de la zone d'étude. Partout, ailleurs « LS » reste faible.

Carte 6 : Valeurs LS dans la zone d'étude



III.1.6. Valeur du facteur de culture, noté « C » de la zone d'étude

L'effet de la pente et l'état de la surface du sol interagissent sur l'érosion et le ruissellement. Ce qui veut dire que la présence ou non de couverture, végétation, ou culture, par exemple influencent le ruissellement et l'érodibilité ou l'érosion du sol.

III.1.6.1. Résultats des expérimentations de MAEP

-Sous cultures pluviales, maïs, blé, orge, manioc ou haricot, l'érosion moyenne sur la pente de 4,5 % (E= 18,8 t/ha/an) fait augmenter les pertes.

-Les formes d'érosion changent avec la pente et le profil du sol.

-Contrairement, le ruissellement augmente avec la pente sur de petites parcelles mais de façon variable en fonction de la rugosité de la surface du sol et de sa capacité à retenir l'eau. Le type de culture et niveau de saturation du sol avant la pluie. Sous culture, le coefficient de ruissellement atteint 16 % sur une pente de 4,5 %. Il se stabilise autour de 24 %, que les parcelles aient 7 ou 23 % de pente.

-Sur jachère nue, le ruissellement diminue quand la pente augmente. En général, il dépend de la pente et du degré de saturation en eau du sol ou du mode de gestion des résidus de culture. (Wischmeier, 1966)

Tableau 6 : Valeur d'Indices de végétations noté "C"

Type d'occupation du sol	Valeur de "C"
Forêt dégradée	0,02
Forêt dense	0,005
Marécage	0,009
Mosaïque de cultures	0,5
Plan d'eau	0
Zone reboisée	0,02
Savane arborée	0,03
Savane herbeuse	0,08
Rizières	0,05

Source : MAEP 2004.

Le tableau ci-dessus montre la valeur d'Indices de la végétation, en effet :

-le ruissellement est très faible sous marécage est sous végétation dense, respectivement de 5 et 9‰ ;

-Il est plus forte dans les mosaïques de culture ;

-Il est moyennement fort dans les zones de savane, rizières ;

-Il est faible dans une forêt dégradée.

III.1.6.2. Résultats dans la zone d'étude

Le tableau et le graphique suivants montrent les caractéristiques, la valeur et

l'importance du facteur « C » dans la zone.

Tableau 7 : Valeur de « C » dans la zone d'étude

Classe de la valeur de C	Valeur de C moyenne	Superficie en Km ²	Superficie en %
[0,001 - 0,005 [	0,005	6,1437	0,99
[0,005 - 0,025 [	0,02	87,9355	14,15
[0,025 - 0,050 [	0,03	114,6199	18,45
[0,050 - 0,500 [	0,25	396,9009	63,87
[0,500 - 0,900 [	0,7	15,806	2,54
TOTAL		621,406	100,00

Source : Extrait de BD 100 Région Vakinankaratra 2005 ; Cartes topographiques FTM (Feuilles M49, M50, N49, N50) ; Images ASTER&SRTM, USGS, 2017, Auteur 2022.

En effet, on a vu que :

-la valeur la plus faible, [0,001 - 0,005 [concerne une superficie de 6,1437, soit moins de 1% du total de la zone étudiée ;

-la valeur moyenne, respectivement [0,005 - 0,025 [, [0,025 - 0,050 [et [0,050 - 0,500 touchent des superficies de 87,9355, 114,6199 et 396,9009km², ce qui donne 14,15+18,45+63,87% soit moins de 1% du total de la zone étudiée ;

- la valeur la plus élevée, [0,500 - 0,900 [s'étend sur une superficie de 15,806km², ce soit plus de 2% du total de la zone étudiée.

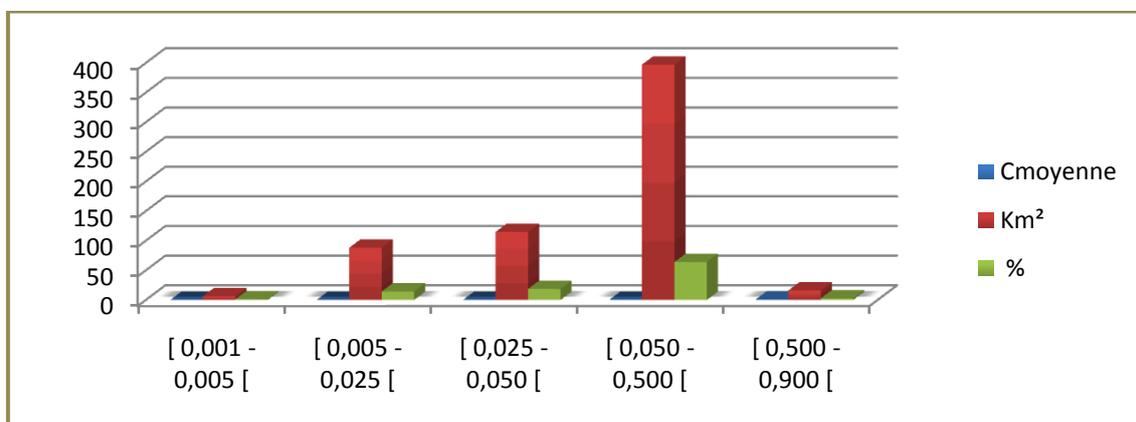
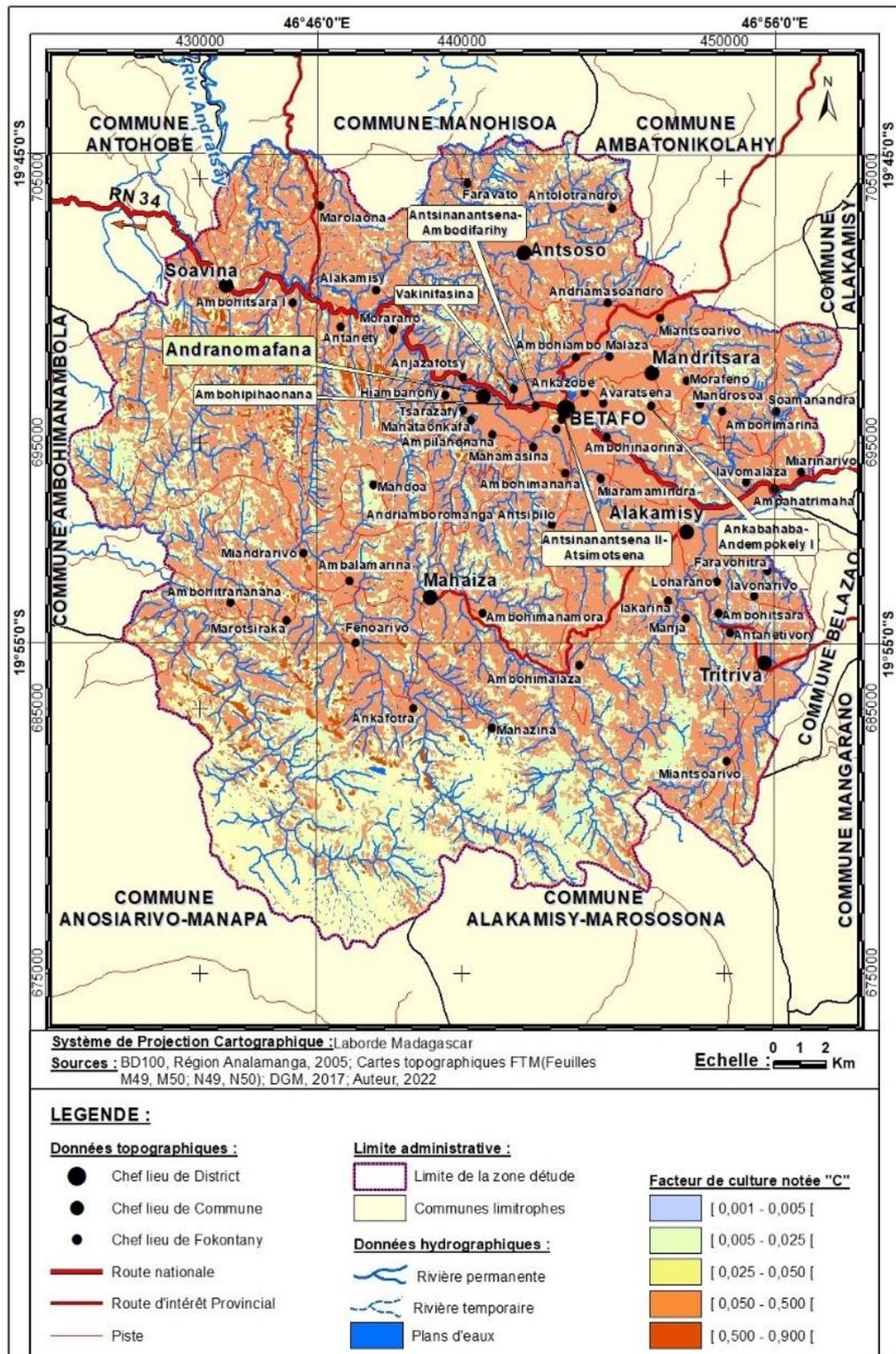


Figure 5 : Valeur de « C » dans la zone d'étude

Source : Auteur 2023.

Carte 7 : Valeurs de C dans la zone d'étude



La carte ci-dessus représente que « C » prend des valeurs allant de très faibles, moyennement faibles et élevées. L'état de la couverture ou d'occupation du sol permet de l'expliquer. La carte suivante montre que :

-sur les bas-fonds se rencontrent les plus fortes valeurs de facteur « C » et c'est plus restreint en étendue ;

-les valeurs moyennes de facteur « C » se trouvent dans les moyennes et les hautes altitudes qui sont très étendues ;

-sur les plus hautes altitudes se rencontrent les plus faibles valeurs de facteur « C » et c'est plus restreint en étendue.

Comme explication, la correspondance entre la valeur des différents facteurs et la structure du milieu ainsi que les formes d'occupation du sol signifie une difficulté pratique de l'aménagement des espaces sur un terrain accidenté.

III.2. DISCUSSIONS

A un relief presque symétriquement disposé se structure une dissymétrie Nord et Nord-Est -Sud et Sud-Ouest des facteurs de l'érosion ; les types d'occupation du sol, les pentages et la couverture végétale qui expliquent la gravité de l'érosion. On observe une inégalité Nord-Sud des grandes divisions du relief, des pentages et des facteurs de l'érosion.

Le principe d'érosion-transport-dépôt d'amont en aval du relief. La densité humaine est plus ou moins élevée dans des hameaux dans la presque totalité des communes. Le principal souci y est de parvenir à satisfaire les besoins familiaux en moyens, énergie et vivres. L'on s'est progressivement attaqué aux espaces boisés et les pentes sans une réelle intention de les protéger ou les restaurer.

- Même si les sols y sont plus résistants à l'érosion, les pertes en terre sont susceptibles de provoquer des pertes de fertilité. Lesquelles conduisent la population à s'entraîner dans un revirement de la situation.

- Exceptionnellement, les sols des bas-fonds et des vallées ainsi que les localités à proximité d'Antsirabe qui ne sont pas facilement attaquables ou qui font l'objet d'une participation au reboisement.

En conséquence, l'agressivité des pluies, les pertes attendues en terre et l'efficacité des mesures antiérosives. D'où la nécessité de recolonisation végétale des lavaka, des sommets ou des pentes pour en réguler les forces des pluies et de l'eau.

L'intensité de l'érosion hydrique est responsable de l'évolution du paysage qui dépend même de la nature et l'état de celui-ci. Les constats ont révélé certains risques de dégradations liés aux pratiques insouciantes de préservation de l'environnement. Les

déséquilibres se manifestent un peu partout par des excès d'eau en période humide, soit de sécheresse en période d'étiage pour cette zone qui a été auparavant qualifiée de « château d'eau du Vakinankaratra ». D'où un danger concret surgit.

III.2.1. Une dissymétrie Nord et Nord-Est -Sud et Sud-Ouest des facteurs de l'érosion

Les facteurs de l'érosion, que sont l'érosion attendue A, l'indice K d'érosivité des sols, l'intensité I de l'érosion, la longueur LS des pentes, la protection C des cultures et K ou l'indice P d'efficacité de la lutte antiérosive. Tandis qu'à ces facteurs s'ajoutent la disparition de la végétation naturelle qui devrait couvrir et protéger les sommets, à la savane herbeuse à danga se succède une steppe à plantes plus ou moins piquantes, recouvrant à peine les terrains. En outre, les cultures des pentes sans structures d'aménagement spécifiquement adaptées aux courbes de niveau augmentent les risques de pertes en terres.

III.2.2. Facteurs de l'érosion fonction des types d'occupation des sols

Les types d'occupation des sols varient entre sol nu, espace boisé ou sol cultivé. Si les couvertures naturelles ont presque disparu en faisant place aux végétations secondaires comme les forêts dégradées, les savanes ou les steppes, aujourd'hui, elles sont à leur tour à la colonisation végétale par pratiques agro-pastorales. De ce fait, les pluies intenses des saisons à forts contrastes sont de plus en plus agressives et emportent avec eux des éléments meubles ou bien des composants organiques ou chimiques fragiles lors de leur passage, soit par érosion-transport-dépôt, soit par lessivage ou lixiviation influencées par le dérèglement climatique.

III.2.2. Facteurs de l'érosion fonction des pentages

De même, les pentages sont en relation directe avec l'érosion. La force de l'érosion hydrique en dépend à cause de la force d'attraction universelle. Par conséquent, le poids des éléments agit en augmentant plus ou moins les conséquences d'une érosion plus ou moins sélective. En outre, par un souci de facilitation dans la mise en valeur du territoire, les sommets sont peu attrayants pour les pratiques culturales qui exigent plus ou moins d'eau en permanence et aussi pour une raison d'accessibilité. Lesdits sommets sont alors réservés aux pâturages, sauf dans les endroits à proximité du village.

III.3. CARACTERISATION ET DETERMINATION DES FACTEURS DE PREDICTIONS

Si les rythmes de changement climatiques continuent et les comportements des acteurs impliqués dans l'aménagement du territoire continuent, les dégradations progressives de sols persisteront et même s'intensifieront. De ce fait, des actions correctives méritent d'être entreprises.

III.2.1. Faire face aux facteurs de l'érosion

La restauration, la préservation et la protection de l'environnement et du milieu naturel constituent une priorité à toutes les échelles et pour tous les acteurs. Pour cela, certains facteurs de la pluie sont susceptibles d'être modifiés par l'homme, d'autres ne le sont pas, respectivement l'occupation des sols et les pentes. Certes, la constitution pédologique montre des sols ferrallitiques plus ou moins résistants à l'érosion. Mais les facteurs d'érodibilité du sol se doublent de l'indice d'agressivité des pluies et de l'indice d'efficacité de lutttes antiérosives. En effet, des actions de reboisement, de mise en place des structures antiérosives sont possibles.

III.2.2. Préservation des sols en milieu tropical d'altitude

L'intensité des pertes en terre conduit à entreprendre des actions en vue de leur préservation. A cette occasion, les mêmes moyens serviront à restaurer les sols.

III.2.2. Adoucissement des effets de pentages

L'adoucissement des effets de pentages consiste à renforcer des structures qui servent à affaiblir l'agressivité des pluies. Pour cela, la rectification des effets de pendage conduit à mettre en place des obstacles ou barrières antiérosives comme des systèmes de canalisations d'irrigation ou de drainage. En outre, faire régénérer les plantes autochtones reste le meilleur moyen.

IV-CONCLUSION

Les facteurs de l'érosion hydrique connaissent une dissymétrie Nord et Nord-Est -Sud et Sud-Ouest. Les images satellites sont utilisées avec des fonds de cartes numérisés de FTM en vue de monter les différentes cartes thématiques dont pédologiques et d'occupation des sols. Les cartes de planification territoriale de la restauration des milieux conduiront aux efforts de remise en état de la qualité environnementale du territoire. L'étude de l'indice de perception des pertes en terre et de déséquilibre écologique et celle des types et de l'intensité de l'érosion demandent encore certaines précisions. En milieu tropical d'altitude comme Betafo, malgré la qualité plus résistante des sols, l'atteinte de l'érosion varie en fonction de la localisation topographique, le pendage, le degré d'humidité des sols et la couverture du sol.

Dans une zone qui appartient au climat tropical d'altitude à deux saisons contrastées, les conditions topographiques et l'agressivité des pluies vont provoquer l'érosion des sols. Ainsi, la dynamique et l'instabilité du paysage en amont peuvent modifier la géomorphologie de la surface en aval. Des interactions spatiales se présentent en fonction des formes de terrain et des modes d'occupation du sol.

REMERCIEMENTS

Nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin contribué à la réalisation de cet article : les divers responsables du site de publication, l'équipe de relecture, des pairs, du personnel des Fokontany, communes et District et surtout de la Commune Urbaine de Betafo.

BIBLIOGRAPHIE

1. **ANJARAFETINIRINA Elatr'Arison**, Dynamique des formations superficielles et recherches hydrogeomorphologiques dans le sous bassin- versant d'Andranomena (Région Itasy) Master 2018, Domaine Arts, Lettres et Sciences Humaines, Mention Géographie, Parcours Milieux Naturels et Sciences de la Terre 92 pages
2. **JACQUES Nestor**, Application de la géomatique à l'évaluation des pertes en terres dans la commune d'Alasora, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO, DEPARTEMENT DE LA GEOLOGIE, MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR, 2005, 78 pages.
3. **RATSIVALAKA S et al.**, Amélioration de la gestion paysanne de la fertilité des sols des versants cultivés des collines, du bassin versant de Maniandro, Madagascar, 2007, p 581-590.
4. **LEVY Jacques et LUSSAULT Michel**, Dictionnaire de géographie et de l'espace des sociétés, (NED revue et argumenté), in Annales de géographie, 2004, pp 645-647.
5. **JOLIVEAU T.** - 1996 - Gérer l'environnement avec des S.I.G. Mais qu'est-ce qu'un S.I.G. ? - Revue de Géographie de Lyon 71 (2/96) : 101-110 - Lyon.
6. **WILLINK Joncko, BABIN Leif**, Extreme Ownership : How US NAVY SEALS LEAD AND WIN. La dichotomie du leadership, Ed. St Martin's Press, 2015, 381 pages, in <https://fr.blog.pop.work>, consulté le 23 Mars 2023 à 12 heures.
7. **KANAVESKI M., MAIGNAN M.** - 2004 - Analysis and modelling of spatial environmental data - EPFL Press - Lausanne.
8. **LANG L.** - 1998 - Managing Natural Resources With Gis - ESRI Press.
9. **LARDON S., CLARAMUNT C.** (SOUS LA DIRECTION DE) - 2000 - SIG et simulation - Revue internationale de géomatique, numéro 10 - Hermès.
10. **LEBRUN R.** - 1998 - Potentiel d'utilisation des outils géomatiques pour l'aménagement visuel des paysages forestiers - Y. Van Chestein et JJ. Chevallier - Université Laval.
11. **MALCKZEWSKI J.**, 1999, GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley and sons, in <https://www.scirp.org>, consulté le 16 Mai 2021 à 15 heures.
12. **MARTIN B.**, Suppressing Research Data : Methods, Context, Accountability and Responses, Science and Technology studies, University of Wollongong, NSW 2522, Australia, 40 pages.