

VI.4 Analyse multicritère

VI.4.1 Le choix des critères

Pour représenter chaque zone en fonction de leur degré de vulnérabilité, nous avons opté pour six facteurs. Pour chaque critère, une qualification du fort au faible les uns par rapport aux autres a été attribuée. Notons qu'un critère peut être déterministe comme le facteur « forme de BV ».

Déjà les sous-bassins versants sont déjà allongés, mais c'est en comparant les classes les unes par rapport aux autres que nous saisissons de qui est en le plus, ou en est le moins. Cela traduit le principe de l'analyse multicritère hiérarchique.

VI.3.1.1 Critère « Type de sol »

C'est sur les textures (argilo-limono-sableux) des échantillons des sols de Madagascar [9] que nous avons pu classer la pédologie de la zone d'étude (Tableau 13).

Tableau 13: Classification du critère type de sol : Source [21]

Très fortement vulnérable	fortement vulnérable	Moyennement vulnérable	Faiblement vulnérable
Sols typiques rouges en phase érodée	Sols typiques rouges sur roches acides	Sols typiques jaune sur rouge sur roches acides	Sols hydromorphes
Sols ferralitiques lessivés	Sols indurés, concrétionnés ou cuirassés jaune/rouge sur roches basiques	Sols indurés, concrétionnés ou cuirassés jaune/rouge sur roches acides	Sols typiques brun-rouge sur roches basiques
	Sol d'érosion lithique sur basalte ou gabbro	Sols d'érosion lithique sur granite	Sols humifères des forêts ombrophyles

VI.4.1.2 Critère « Lithologie »

La répartition des lavaka se fait d'autant plus favorable dans des roches acides que dans des roches basiques favorisant : c'est-à-dire sur les migmatites et les lypténites que sur le basalte ou le gabbro dans notre cas. Aussi, de par la foliation, les migmatites et les migmatites granitoïdes sont les plus concernés à cette vulnérabilité à l'érosion hydrique (Tableau 14) [22].

Tableau 14: Classification du critère lithologie

Fort	Moyen	Faible	Contraintes : plan d'eau et sédiments
Migmatites	Gabbros, orthopyroxénites	Charnockites	Grès, argile kaolinique
Migmatites granitoïdes, granites migmatitiques	Gneiss, migmatites à amphibole, amphibolite, pyroxénites	Ankaratrites	Plan d'eau
Migmatites, leptynites			Alluvion sable
Migmatite, quartzites à magnétites			

VI.4.1.3 Critère « Pente »

La pente est un critère déterminant pour une érosion hydrique. Plus la pente est grande, plus le ruissellement est privilégié (Tableau.15). Ainsi la classification est la suivante :

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 15 % (équivalent à 8,53 en degré) [23]. Après avoir effectué plusieurs classifications, nous avons jugé que les classes de pentes suivantes sont bien adaptées pour l'analyse multicritère car la répartition spatiale des valeurs sont jugée distincte.

Tableau 15: Classification du critère pente

Très fort	Fort	Moyen	Faible	Très faible
30°	15- 30°	5- 15°	2- 5°	0- 2°

VI.4.1.4 Critère « Altitude »

Après l'observation de la carte topographique de la Région Alaotra, l'altitude en-dessous de 800m représente les plans d'eau, les rizières et les marécages. Les lavaka se situent par occurrence entre 900 et 1250m [22]. Nous avons tenu compte de cela et opté pour une équidistance de 200m distinctive (Tableau.16). Ainsi, nous avons la classification suivante pour l'altitude:

Tableau 16: Classification du critère altitude

Très fort	Fort	Moyen	Faible
1200- 1577 m	1000- 1200 m	800- 1000 m	702- 800 m

VI.4.1.5 Critère « Occupation de sol »

Il existe trois classes de couvert végétal : celles qui sont présentes toute l'année et qui offrent une bonne protection du sol comme la forêt dense ; celles qui sont toujours présentes, mais offrent moins de protection comme la zone reboisée ; en dernier se présentent les cultures saisonnières qui ne donnent que peu de protection comme la savane. Cette dernière vit et meurt au rythme des saisons. [23]. Les herbes se développent très rapidement pendant la saison humide et meurent pendant la saison sèche soit par le feu, soit par ce qu'elles se dessèchent. (Tableau 17).

Tableau 17: Classification du critère Occupation de sol

Très protectrice	Protectrice	Peu protectrice	Contraintes
Forêt dense	Zone reboisée	Savane herbeuse	Rizière
Forêt dégradée	Savane arborée	Mosaïque de culture	Plan d'eau
			Marécage

VI.4.1.6 Critère « Forme du BV »

Ce critère a été exposé dans la figure 29. Selon l'indice de compacité, et en comparant les formes des sous-bassins versants entre eux, nous retrouvons les formes plus allongées par rapport à aux autres. Voici sa classification (Tableau 18).

Tableau 18: Classification du critère forme du BV

Très fort	Fort	Moyen	Faible
> 3	2,5- 3	2- 2,5	2 <

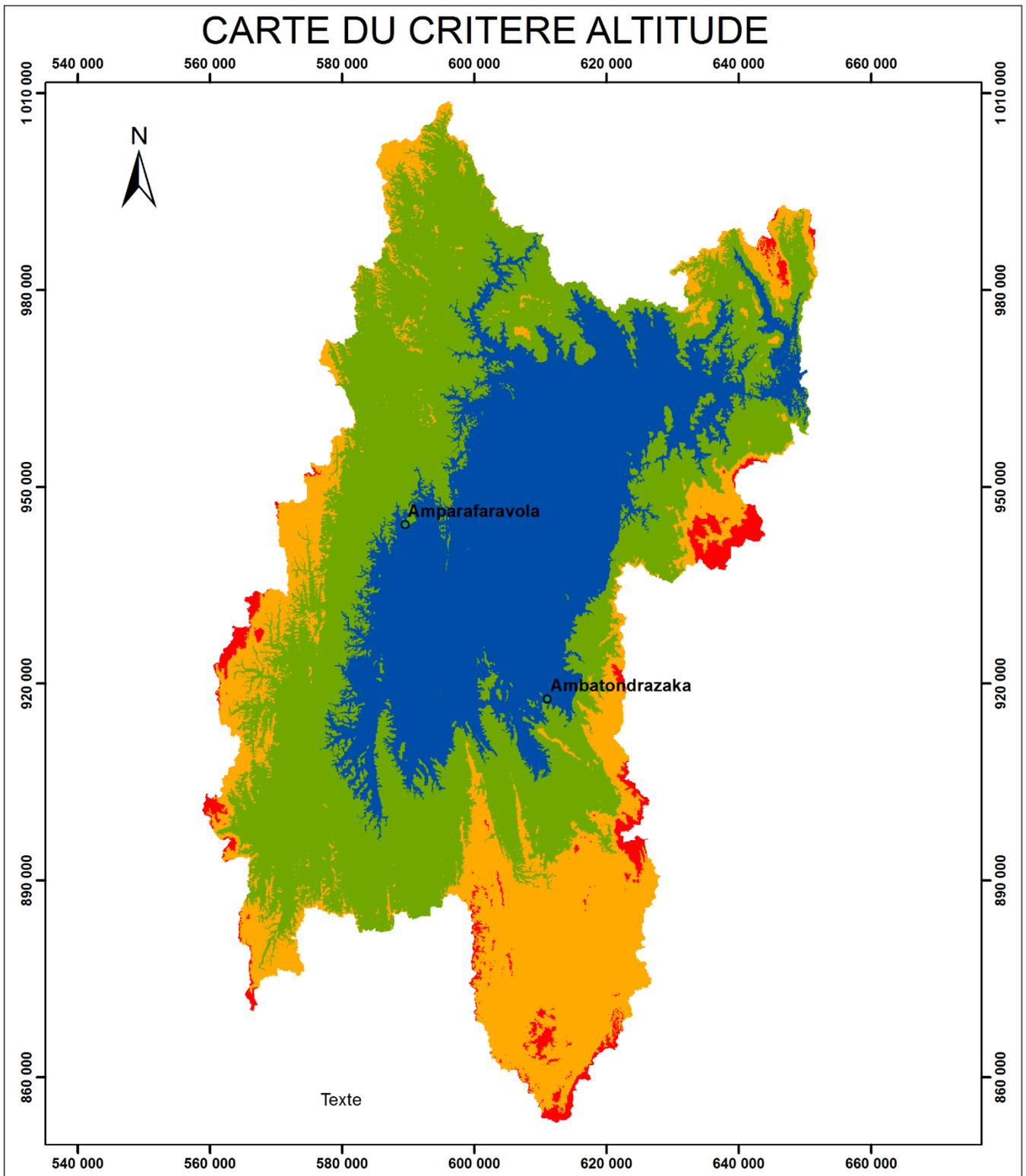
VI.4.2 La classification

Les données proviennent de couches vectorielles et des rasters comme l'indique l'organigramme de la méthodologie (Fig.26), nous avons fait le reclassement selon l'échelle de la priorité sur ArcToolbox. Nous avons appliqué la méthode hiérarchique pour pouvoir classifier tous les critères. La pratique sur Arcgis de la classification des critères est illustrée dans l'annexe 1.

Dans le bassin versant d'Alaotra, l'altitude entre 702 à 800 m occupe 31% de la surface totale. En attribuant la qualification de l'altitude moyenne située entre 800 à 1000m, cette zone est très répandue qui recouvre 44%. Puis, l'altitude forte et l'altitude très forte sont respectivement à 21% et 26%. L'altitude est bien répartie surtout le bassin versant.

Pour le critère pente, la classe entre 0-2° représente 28% de la surface totale. La pente 2-5° en occupe 16%. La pente moyenne entre 5-15° est à 47% contre la pente forte de 15-30° qui en est à 8%. La pente très forte est minimale. Ainsi, le bassin versant d'Alaotra a une pente variant de faible à fort.

Voici les cartes des critères d'altitudes (Fig.30) et de pente (Fig.31) qui illustrent ces classifications.



• Chef lieu District

Altitude en m

- 702- 800
- 800- 1000
- 1000- 1200
- >1200

1:750 000

0 20 000 40 000 Mètres

Numérisée par RAJAONARY Harisitraka Fanantenana
 Source: DEM Madagascar
 Coordonnées Laborde Madagascar

Figure.30 Carte du critère altitude

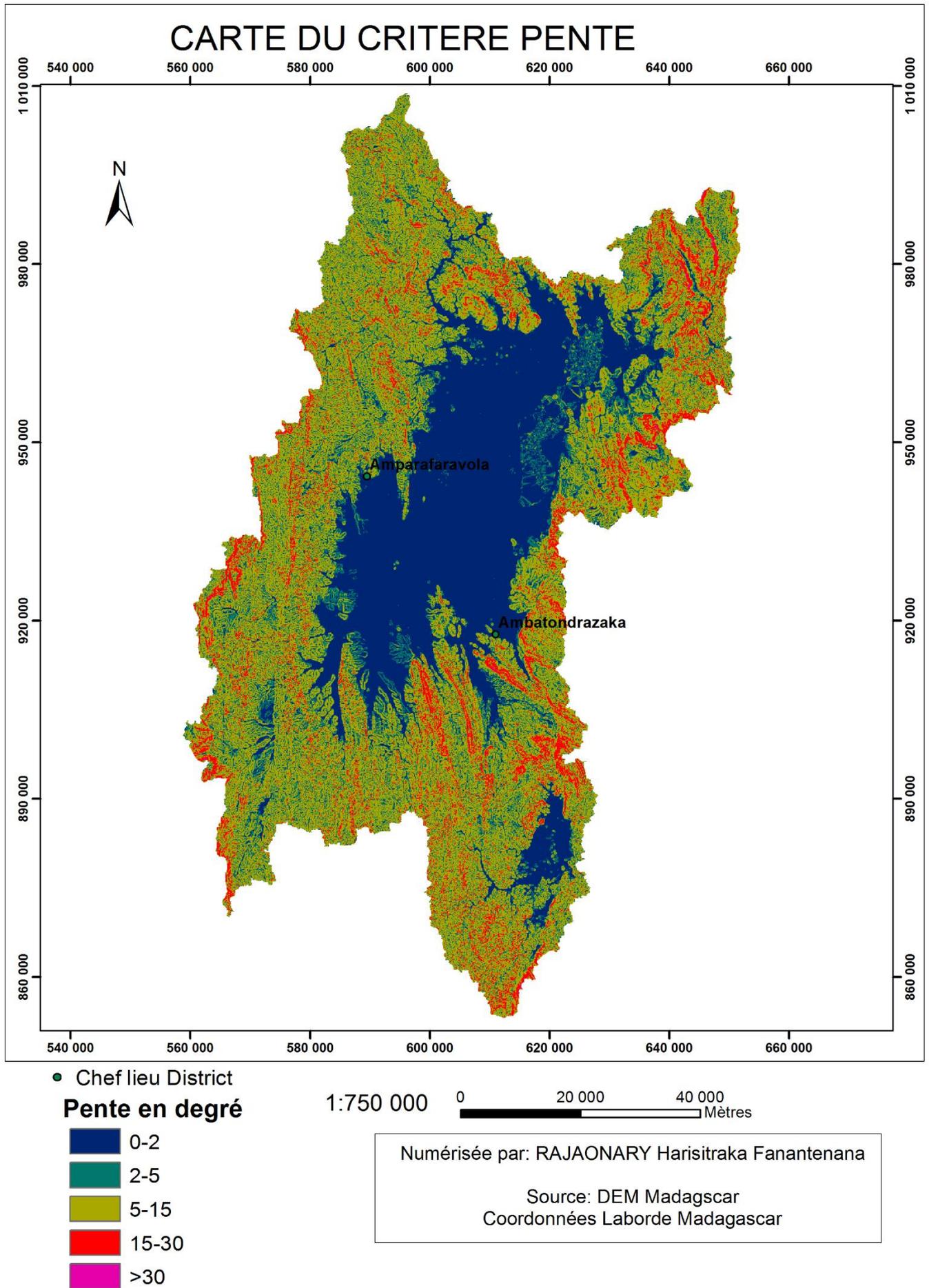


Figure.31 Carte du critère pente

VI.4.3 La pondération des critères

D'une manière explicite, l'érosion se traduit par l'enlèvement, le transport et le dépôt des matériaux. Le type de sol est le critère le plus important car l'érosion provient tout d'abord par la dégradation du sol. Ensuite, la lithologie explique la source de ces sols c'est-à-dire la roche mère. Aucun transport drainant ne peut se faire sans une pente. Et plus la pente est grande, plus le ruissellement est privilégié. En étant plus haut, le drainage se fera plus long, donc un effet plus vulnérable. C'est l'altitude. L'occupation du sol ou le couvert végétal est aussi un facteur d'érosion hydrique car pour une végétation protectrice, l'infiltration est privilégiée. La forme du bassin est donnée par l'indice de Gravelius. D'après l'indice de Gravelius représenté dans le tableau 11, les sous-bassins versants ont tous une forme allongée. Mais certains sont plus allongés que d'autres. Si une zone est affectée par une érosion hydrique, elle sera beaucoup plus vulnérable lorsque le bassin sera plus allongé. Car en étant plus long, le bassin peut drainer plus de matériaux érodables au cours du passage des eaux de ruissellement.

Nous avons hiérarchisé les critères. Maintenant, reprenons tous les critères et nous allons les évaluer. Pour cela il faut pondérer linéairement les classes de façon à ce que la somme de leur poids vaut 1 (Fig.32).

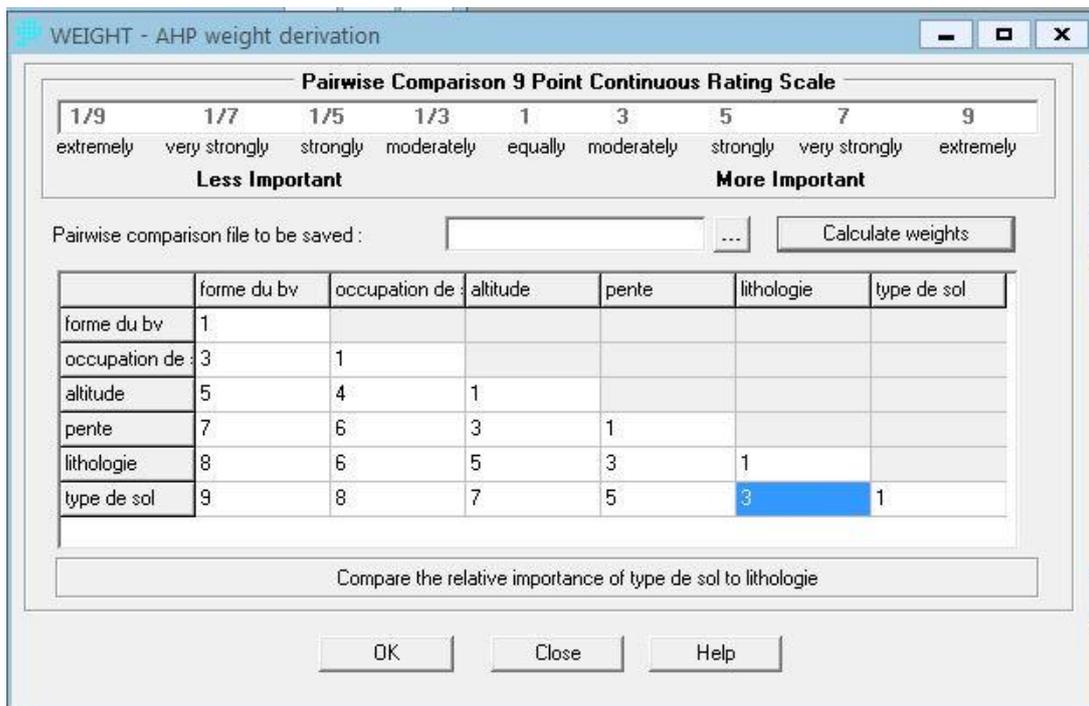


Figure.32 Matrice de jugement

Ce que venons de faire a été d'attribuer des classes pour chaque critère. Ici, nous allons les évaluer. Pour cela il faut pondérer linéairement les classes de façon à ce que la somme de leur poids vaut 1. RC étant inférieur à 0,10 ; la matrice de jugement est acceptable (Fig.33).

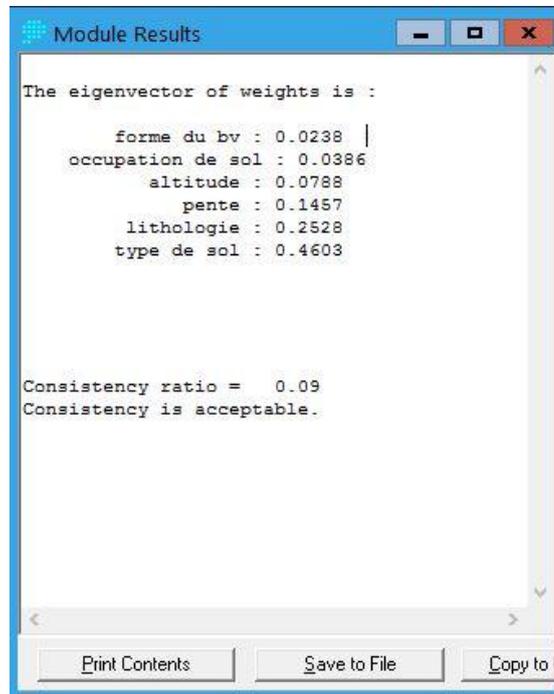


Figure.33 Pondération des critères

VII.4.4 La carte de la vulnérabilité à l'érosion hydrique dans le bassin versant Alaotra

L'évaluation multicritère des facteurs de l'érosion hydrique dans la Région Alaotra étant effectuée, nous avons obtenus la carte de susceptibilité à l'érosion. (Fig.34).

CARTE DE LA VULNERABILITE A L'EROSION HYDRIQUE DU VERSANT D'ALAOIRA D'IDRISI

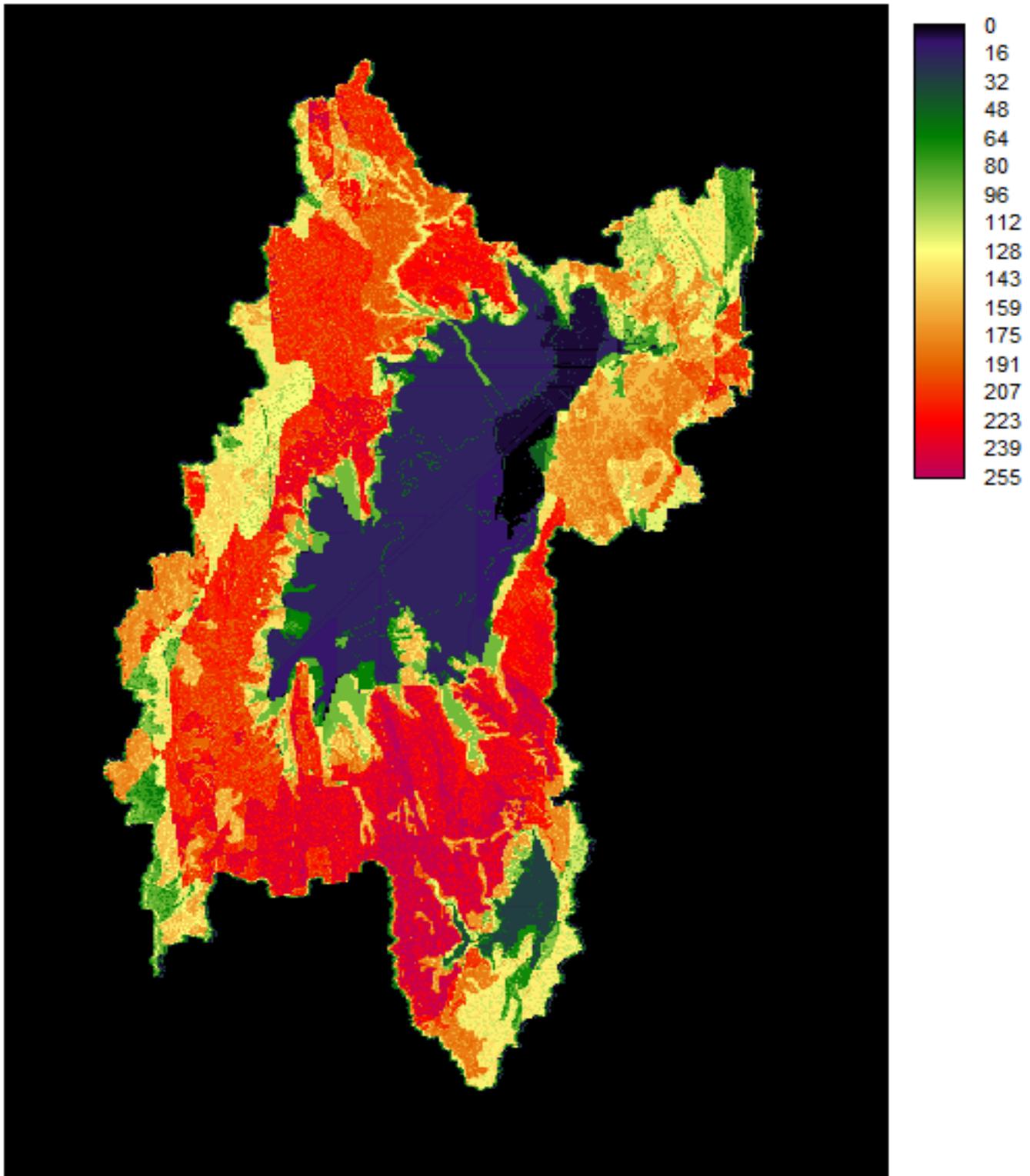


Figure.34 Carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique d'IDRISI

La carte sortie par IDRISI est une localisation des zones vulnérables à l'érosion sous une palette de couleur de 0 à 255. Le niveau de pixel (valeur) traduit les différentes zones. La zone violacée rapprochant du noir représentent les valeurs moindres c'est-à dire les contraintes et les valeurs très faible: plan d'eau, sol hydromorphe, marécages et rizières.

Le noir étant nul, le violet étant très faible, le vert faible, le jaune moyen, l'orange fort, le rouge très fort et le magenta extrêmement fort. La traduction de ces pixels en degré de vulnérabilité est la suivante: 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 19 résume le degré de vulnérabilité à l'érosion hydrique selon le résultat de l'analyse multicritère.

Tableau 19: Degré de vulnérabilité selon les valeurs des pixels

Valeurs des pixels	Degré de vulnérabilité
0-47	EXTREMEMENT FAIBLE
47-86	TRES FAIBLE
86-107	FAIBLE
107-135	MOYENNEMENT FAIBLE
135-164	MOYENNEMENT FORT
164-203	FORT
203-221	TRES FORT
221-255	EXTREMEMENT FORT

Pour pouvoir ajouter une référence spatiale (coordonnées), nous allons exporter la carte d'IDRISI dans Arcmap pour une mise en page. Il faut géoréférencier la carte en prenons quatre points de chaque côté dont les coordonnées sont connus. Comme cela, nous pouvons superposer le shapefile « Localités » qui est en système de coordonnées Laborde (Fig.35).

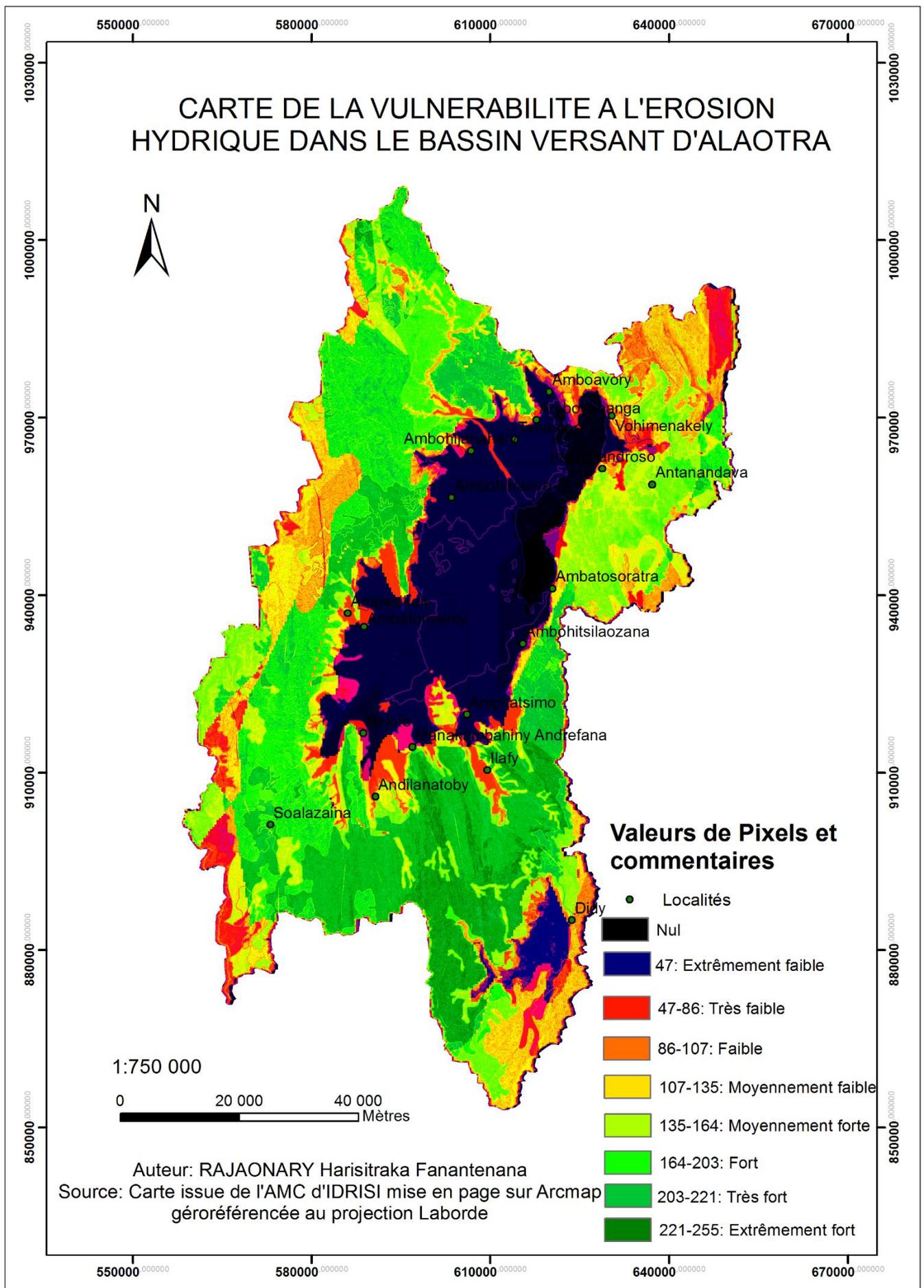


Figure.35 Carte de la vulnérabilité à l'érosion hydrique du bassin versant d'Alaotra

Pour commenter cette carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique, dressons un tableau nous permettant d'avoir une référence spatiale de la répartition des zones vulnérables à terme de quantité (Tableau 20).

Tableau 20: Zonage quantitatif

Classe	Commentaires des valeurs de pixel	Nombre de pixel	Pourcentage
1	NUL	17854	1%
2	EXTREMEMENT FAIBLE	385756	21%
3	TRES FAIBLE	100111	5%
4	FAIBLE	93265	5%
5	MOYENNEMENT FAIBLE	179931	10%
6	MOYENNEMENT FORT	223004	12%
7	FORT	317546	17%
8	TRES FORT	279759	15%
9	EXTREMEMENT FORT	273192	15%
	Total	1852564	100%

Les valeurs de pixels extrêmement fortes traduisent les zones les plus vulnérables à l'érosion hydrique selon les poids attribués dans la pondération des critères.

Quantitativement, la vulnérabilité à l'érosion hydrique du bassin versant d'Alaotra est considérable car 59% de la zone entre dans la nomination où il y a le mot « Fort ». La qualification « Nul » 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 (lac) est la contrainte car elle ne participe pas à l'érosion. Elle est considérée comme une espace ouverte où peuvent se déposer les produits de l'érosion.

Nous allons présenter également la description qualitative de la vulnérabilité à l'érosion hydrique du bassin versant d'Alaotra sous forme de tableau (Tableau 21).

Tableau 21: Zonage qualitatif

Classe	Types de sol	Lithologie	Pente	Altitude	Occupation de sol	Forme de BV	Pourcentage spatiale
1	-	-	-	-	Lac	-	1%
2	Sols hydromorphes	Alluvions, sables	0-2°	702-800m	Marécages et rizières	NS	21%
3	NS	Grès, argile kaolinique	2-5°	800-1000m	Forêt dense	2-2,5	5%
4	Sols ferrallitiques jaune sur rouges ; Sols humifères	NS	15°-30°	NS	forêt dense et Savane arborée	2-2,5	5%

5	Sols d'érosion lithiques sur granite	Migmatites granitoïdes-granites migmatitique	15-30°	1000-1200m	Savane arborée et Savane herbeuse	NS	10%
6	Sols indurés concrétionnés ou cuirassés sur roches basiques	Migmatites granitoïdes-granites migmatitique	5-15°	1000-1200 ; >1200m	Savane arborée	NS	12%
7	Sols typiques rouges en phase érodée ; sols typiques rouges sur roches acides	Migmatites	15-30°	800-1000m	Savane arborée	NS	17%
8	Sols typiques rouges en phase érodée	Migmatites granitoïdes-granites migmatitique ; gneiss	15-30°	800-1000m	Savane arborée et Savane herbeuse	NS	15%
9	Sols typiques rouges en phase érodée	Migmatites granitoïdes-granites migmatitique ; Migmatites-leptynites	15-30°	1000-1200m	Savane herbeuse	> 3	15%

NS : non spécifique (plus de trois valeurs ; plusieurs typologies peuvent rentrer dans un critère)

Les zones colorées sont les zones considérées à prioriser dans la lutte antiérosives. En superposant la carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique du bassin versant d'Alaoatra avec la limite communale (Fig.36), les zones fortement vulnérables se trouvent dans les communes de Morarano Chrome, Ambohijanahary, Ambohitrarivo, Tsarahonenana. Puis, les zones très fortement vulnérables sont dans Andilanatoby, Sahamamy, Amparafaravola et Foramanga-Nord. Enfin, les zones très fortement vulnérables se situent à Didy, Ambatondrazaka II et Manakambahiny Andrefana.

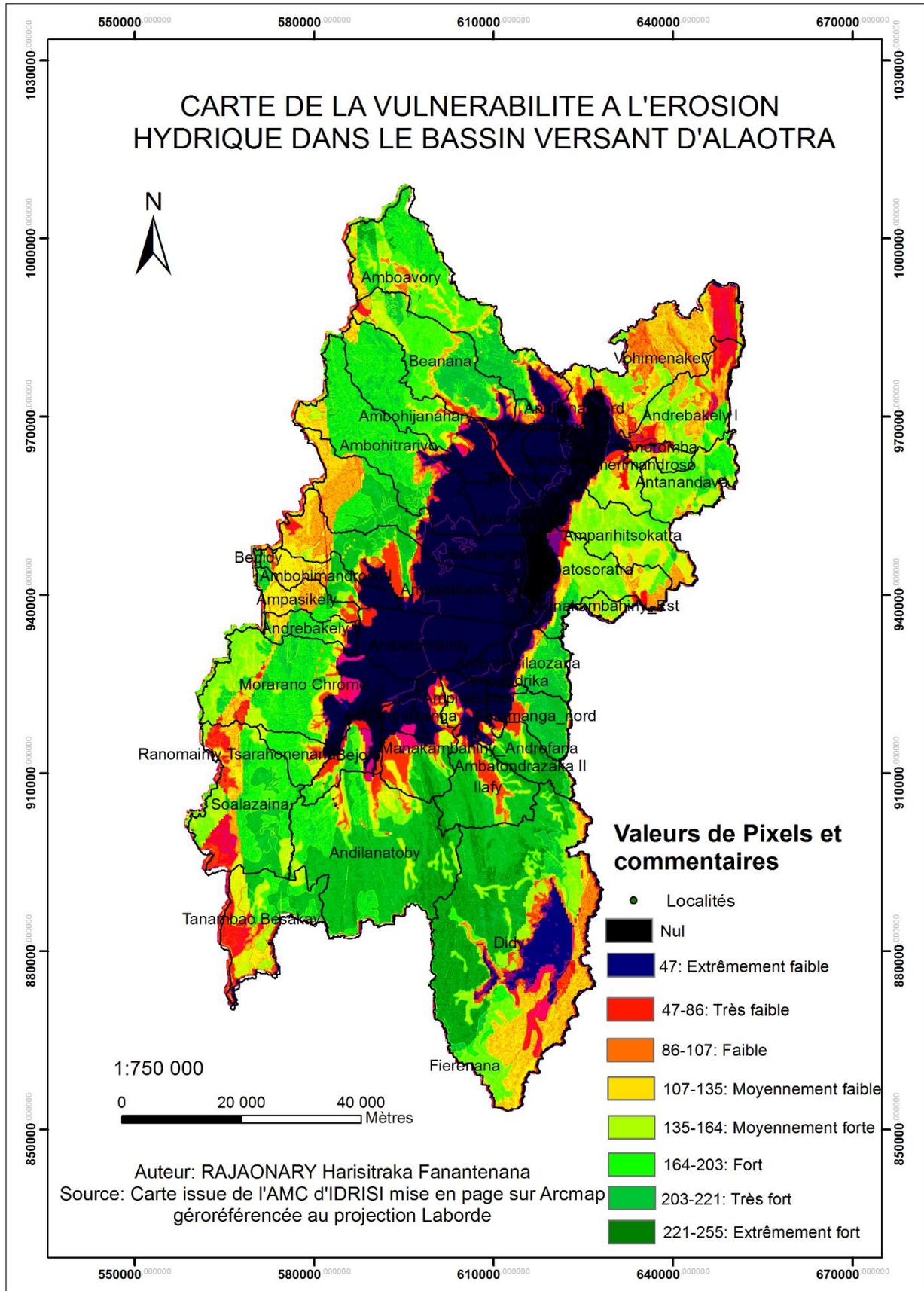


Figure.36 Localisation de la vulnérabilité à l'érosion hydrique sur une limite communale

Pour valider cette analyse, prenons comme référence d'une carte de cartographie des lavaka par télédétection [22] (Fig.37).

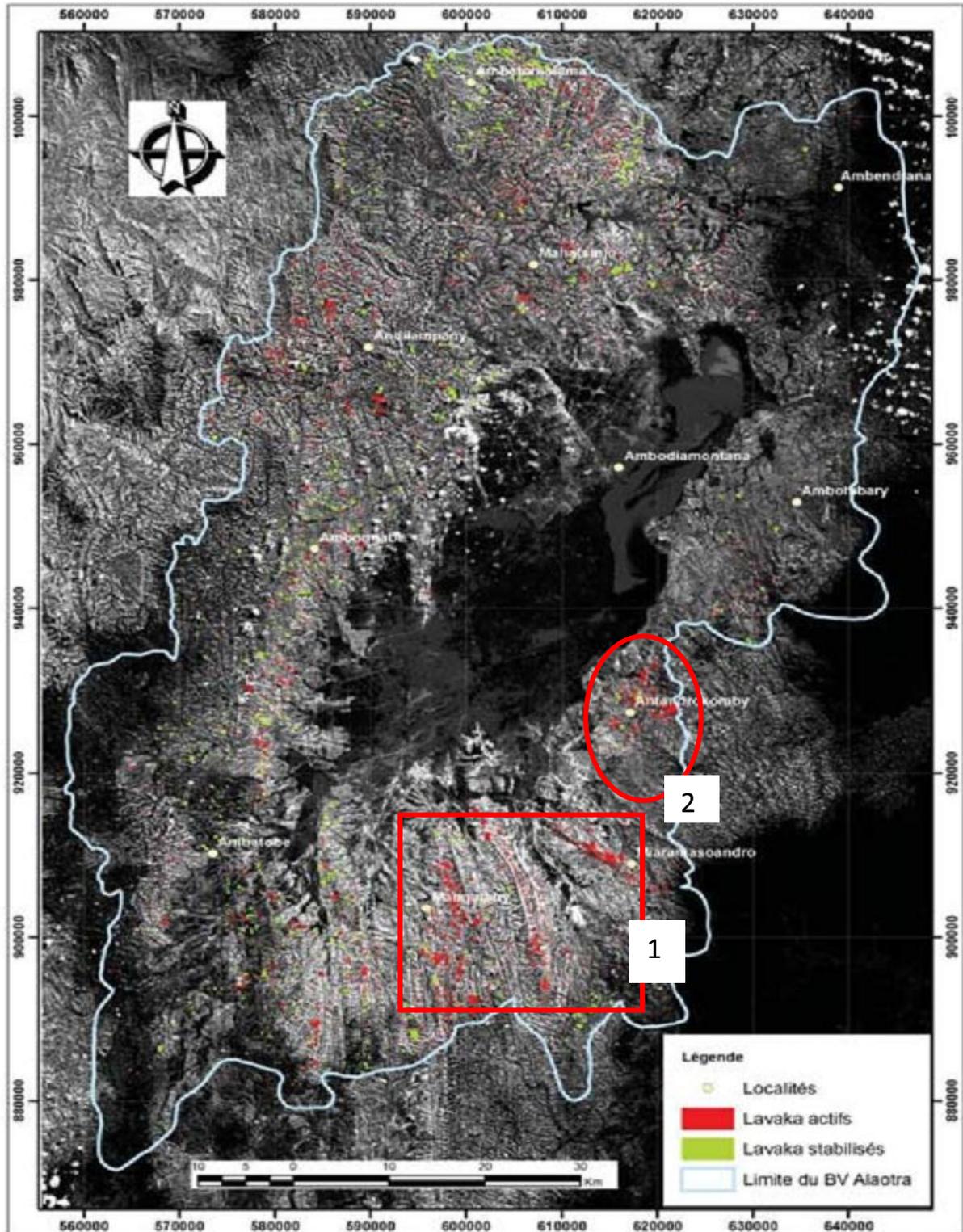


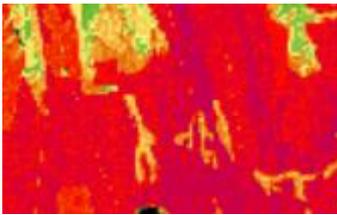
Figure.37 Validation de l'analyse multicritère : Source [22]

Les deux zones recouvrent des altitudes entre 800 et 1000m, 1000 et 1200m avec une pente entre 15 à 30°, dans une forme de BV très fortement allongé et dans un sol ferralitique typique rouge en phase érodée.

Zone 1 : correspond à des migmatites, leptynites



Zone 2 présence des migmatites granitoïdes



Ces deux zones contiennent plusieurs lavaka d'après Validation de l'analyse multicritère (Fig.37). Et dans la carte d'IDRISI, elles correspondent aux pixels élevés (couleur rouge et magenta). Nous pouvons en déduire que les classes attribuées sont représentatives à l'échelle de la localisation d'un aménagement d'un bassin versant ou à une campagne de conservation du sol.

VI.5 Evolution de l'occupation du sol entre 2008 et 2017

L'effet pratique de l'érosion hydrique peut être observé à partir de la diminution de la superficie d'eau, et distinctement dans le lac. Les deux images (Fig.37a ; Fig.37.b) ont été prise dans un période d'été, donc la pluviométrie n'a aucune influence.

Après avoir fait construit le ROI et fait la classification « Maximum likelihood » (Annexe 6), nous avons les deux cartes d'occupation de sol suivantes.

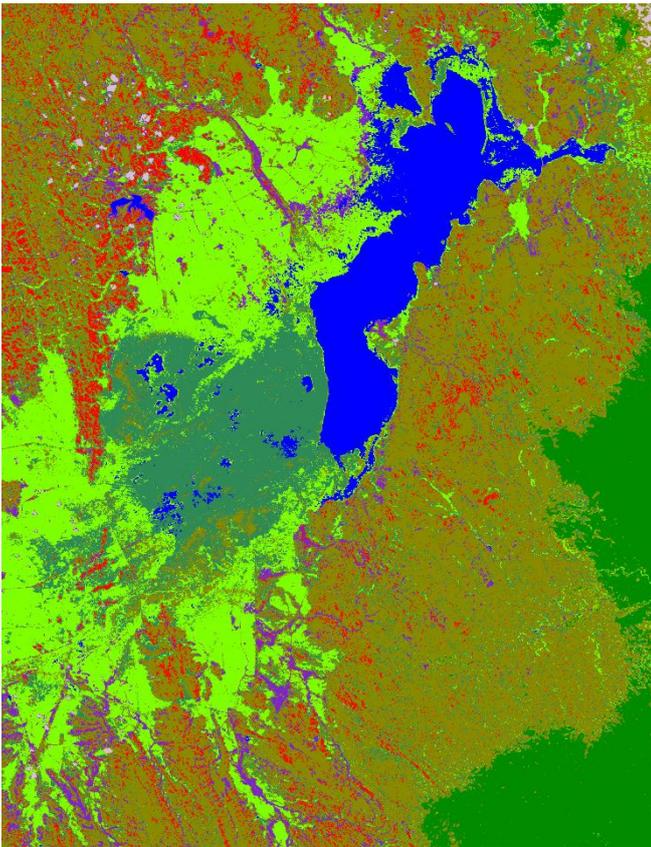


Figure.38a Occupation de sol 2008

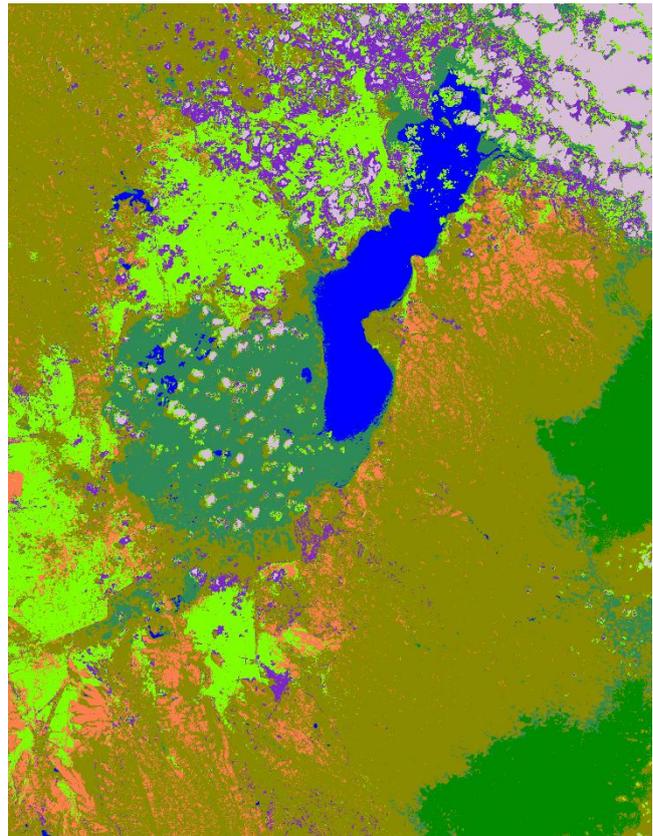


Figure.38b Occupation de sol 2017

Si nous prenons l'élément « plan d'eau » qui est en bleu, nous pouvons constater l'évolution de la superficie du lac qui est très visible. A défaut de couverture nuageuse pour l'image 2017 (Fig.37b), nous n'avons pas effectué la détection de l'occupation de sol pour tous les éléments et la matrice de changement. Il s'agit juste un aperçu visuel de l'évolution de l'occupation du sol pendant 10 ans. La superficie du lac en 2008 est nettement plus grande que celle en 2017. Le bassin versant draine autant de l'eau de ruissellement que des matériaux érodables. Cette espace ouverte (lac) sera comblée étapes par étapes par des sédiments qui s'y déposent.