

## 5.1.2 Caractéristique des différents facteurs de l'équation

### 5.1.2.1 Facteur de pluviosité R

Le facteur R est défini comme le facteur d'érosivité ou d'agressivité de la pluie.

La pluie est l'un des principaux facteurs de l'érosion hydrique des sols. Ceci ce produit lorsque les eaux pluviales ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol et par conséquent arrachent et emportent les particules du sol. Ainsi, le facteur R a pour objet de caractériser la force érosive des précipitations sur le sol.

Ce facteur intègre deux variables liées à la précipitation :

- la quantité d'eau de pluie tombée,
- l'intensité maximale soutenue sur une période prolongée.

Tableau 12: Variables affectant le facteur R (Source: Prévission de l'érosion des sols au Canada, 1997)

VARIABLE	DESCRIPTION ET FONCTION	INCIDENCE SUR L'EROSION
<b>ENERGIE DES ORAGES</b>	Volume d'eau de pluie et de ruissellement produit durant un orage	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ une longue pluie lente ou une pluie de courte intensité à volume élevé peuvent avoir la même incidence.</li> <li>☞ les faibles volumes sur de courtes périodes avec de longs intervalles entre les orages ont un faible potentiel érosif.</li> <li>☞ Les orages même d'intensité relativement faibles associés à d'autres facteurs (p. ex le facteur K pour les sols fortement érodibles) peuvent provoquer une érosion importante.</li> </ul>
<b>INTENSITE DES ORAGES</b>	Quantité d'eau de pluie par unité de temps	☞ Plus les orages sont intenses plus ils sont susceptibles de provoquer le détachement et le transport de sédiments.

### 5.1.2.2 Facteur d'érodibilité des sols K

Le facteur K ou facteur d'érodibilité du sol se définit par la résistance ou la sensibilité du sol à deux sources d'énergies :

- la battance des gouttes de pluies à la surface du sol,
- l'entaille du ruissellement entre les mottes, dans les griffes ou les rigoles.

Roose et Sarrailh (1990) ont pu montrer que cette sensibilité du sol à l'érosion est largement influencé par les paramètres intrinsèques du sol (stabilité structurale, croûte de battance, état dispersé, matière organique, texture).

Le facteur K varie en fonction de la texture, la teneur en matière organique, et la perméabilité du sol.

Tableau 13: Variables affectant le facteur K (Source: Prévisions de l'érosion des sols au Canada, 1997)

VARIABLE	DESCRIPTION ET FONCTION	INCIDENCE SUR L'ÉROSION
<b>TEXTURE DU SOL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Granulométrie et répartition des particules de sable disponibles</li> <li>☞ Lorsqu'elles sont détachées, les petites particules sont transportées facilement</li> <li>☞ La texture du sol influe sur la quantité et le débit de ruissellement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Accroissement de l'érodibilité avec la présence de limon et de sable très fin (les particules se détachent facilement, forme rapidement des croûtes qui réduisent l'infiltration et accroissent le ruissellement)</li> </ul>
<b>TENEUR EN MATIERES ORGANIQUES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Quantité d'humus présent</li> <li>☞ La matière organique contribue à lier les particules de sol</li> <li>☞ Effet sur la capacité de rétention d'eau du sol ; incidence sur les quantités d'infiltration et de ruissellement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Plus grande résistance à l'érosion des sols à teneur élevée en matières organiques et plus grande rétention d'eau</li> <li>☞ Faible teneur en matières organiques = faible résistance à l'érosion</li> </ul>
<b>STRUCTURE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Répartition des particules de sable et des agrégats</li> <li>☞ Indication du degré de liaison des particules du sol lui permettant de résister à l'érosion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Sols qui ne se désagrègent pas facilement, mais qui permettent l'infiltration et qui résistent mieux à l'érosion</li> </ul>
<b>PERMEABILITE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Effet sur la quantité d'eau qui s'infiltrera dans le sol en comparaison avec celle qui s'écoulera vers le bas de la pente ou qui s'accumulera à la surface.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Meilleure infiltration = moins de ruissellement, moins d'érosion (p. ex sable moyen et grossier)</li> </ul>

### 5.1.2.3 Facteur topographique LS

Ce facteur traduit l'effet de l'angle et de la longueur d'accumulation. Le facteur LS est donc une mesure des effets de l'angle, de la longueur et de la complexité de la pente sur l'érosion; il est lié aux paramètres de terrain. Le facteur de pente a une incidence majeure sur l'érosion. En effet :

- il y a une relation étroite entre l'inclinaison de la pente et le ruissellement. Le ruissellement augmente au fur et à mesure que la pente devient plus inclinée et la perte de sol augmente plus rapidement que le ruissellement. Cela est dû à une vitesse d'écoulement qui s'accroît avec la pente ;
- l'érosion causée par le ruissellement s'intensifie avec l'augmentation de la longueur de pente et une grande accumulation d'eau de ruissellement sur les pentes les plus longues augmente les possibilités de détachement et de transport.

### 5.1.2.4 Facteur de végétation C

Le facteur C est défini comme le rapport entre les pertes en sols nus sous des conditions spécifiques et les pertes en sols correspondant aux sols sous système d'exploitation. Il est aussi appelé facteur de couverture et d'utilisation du sol (Cover and Management factor).

En effet, le couvert végétal protège les sols et assure l'amortissement des gouttes de pluie, le ralentissement du ruissellement et de l'infiltration. Ainsi, pour une végétation basse, les pertes de sols diminuent avec l'augmentation du couvert végétal.

#### 5.1.2.5 Facteur de conservation P

Le facteur P prend en compte les pratiques de conservation du sol. Les pratiques antiérosives concernent toutes les techniques culturales mises en œuvre pour diminuer le ruissellement et l'érosion, telles que le labour en courbe de niveau, le buttage, ou le billonnage en courbe de niveau.

Après les inspections faites sur terrain, une valeur unique de 0,7 est affectée au facteur P pour l'ensemble du BV. En effet, le BV a été le sujet d'un programme de lutte antiérosive (PLAE) il y a quelques années, seulement, les effets attendus des aménagements se sont quasiment neutralisés depuis par manque d'entretien.

### 5.1.3 Choix de l'équation pour évaluer chaque facteur

#### 5.1.3.1 Calcul de l'érosivité des pluies R

Le facteur R de l'équation universelle de perte en sol de Wischmeier et Smith (1978) est défini par l'équation suivante :

$$R = \sum (E \times I_{30})$$

où  $E$  : l'énergie cinétique des pluies

$I_{30}$  : l'intensité maximale des pluies en 30mn

Et l'énergie cinétique des pluies est donnée par la formule suivante :

$$E = 210 + 89 \log_{10} I$$

où  $I$  : intensité de pluie

Pour calculer cette équation, il nous faudrait connaître la valeur totale de la pluviométrie ainsi que l'intensité maximale sur 30 minutes des épisodes pluvieux sur une période d'au moins 20 ans. Malheureusement, des données aussi détaillées que cela ne sont pas disponibles pour le cas de notre zone d'étude.

Donc, cette formule proposée par Wischmeier et Smith est difficilement applicable pour les régions où les données pluviométriques ne sont pas régulières.

Cependant, plusieurs équations de substitution permettant d'estimer la valeur du facteur R en fonction des données annuelles ont été développées à travers diverses études dans des pays et régions autres que les états d'Amérique et ont montrées des résultats satisfaisants.

Tableau 14: Relations développées dans quelques pays pour déterminer le facteur R

LOCALISATION	EQUATION
Indonesia (Bols, 1978)	$R = \frac{2.5P^2}{100(0.073P + 0.73)}$
Honduras (Mikhailova Et Al., 1997)	$R = 7.562P - 3172$
Italy (Torri Et Al., 2006)	$R = 3.08P - 944$
Conterminous U.S. (Renard, Fremund, 1997)	si $P < 850mm$ : $R = 0.04830P^{1.61} \times 0.1$ si $P \geq 850mm$ : $R = (587.8 - 1.219P + 0.004105P^2) \times 0.1$
S.E. Australia (Yu, Rosewell, 1996)	$R = 0.0438P^{1.61} \times 0.1$

South Africa (Roose, 1975)

$$R = 0.5P + 1.735$$

Hawaii (Lo, 1985)

$$R = (38.46 + 3.48P) \times 0.1$$

Pour estimer la valeur de ce facteur dans le cadre de notre étude, on va utiliser trois de ses équations (celles de Roose, de Yu et Rosewell et de Renard et Fremund), choix basé sur les similarités topographiques, climatiques et la proximité par rapport à Madagascar.

$$R_{groupement} = \frac{R_{Roose} + R_{Renard\&Fremund} + R_{Yu\&Rosewell}}{3}; [M].mm. ha^{-1}. h^{-1}]$$

### 5.1.3.2 Calcul de l'érodibilité des sols K

Wischmeier et Smith (1978) proposent, pour calculer la valeur du facteur K, la formule suivante :

$$100K = 2,1.M^{1,14}.10^{-4}(12 - a) + 3,25(b - 2) + 2,5(c - 3)$$

Où  $M$  : (% limon + % sable très fin) x (100 - % argile)

$a$  : % matières organiques

$b$  : code de structure des sols utilisés dans la classification des sols

$c$  : classe de perméabilité

Les paramètres  $b$  et  $c$  peuvent être facilement estimés en connaissant la texture globale du sol.

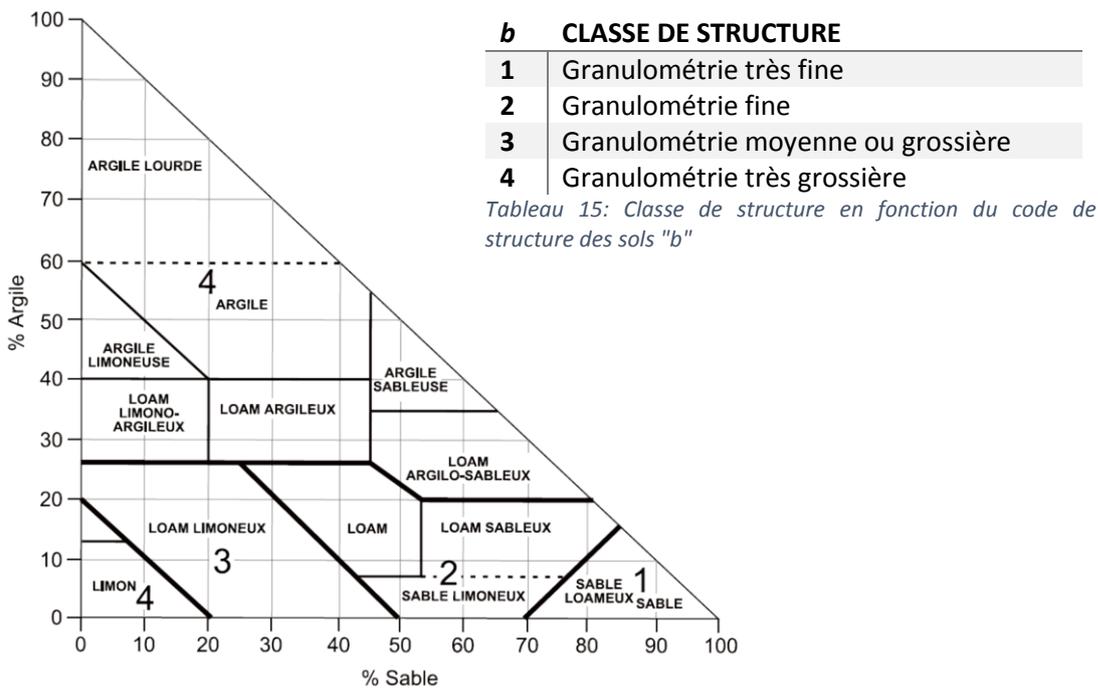


Figure 14: Code de structure basée sur la classification des textures (Source: Manuel pour l'évaluation des pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada; 1997)

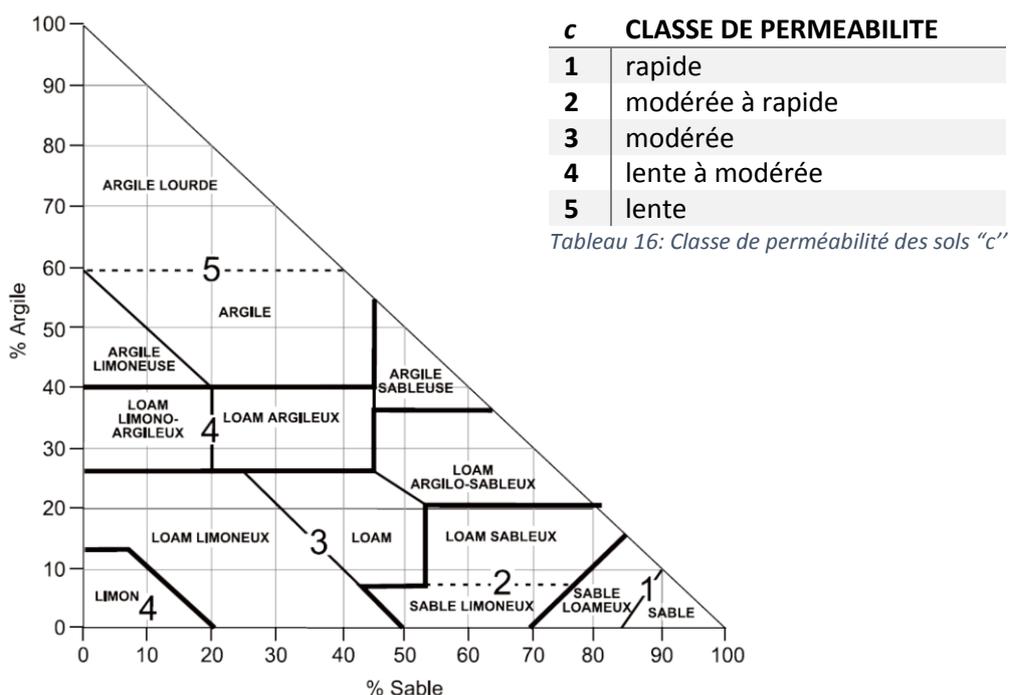


Figure 15: Code de perméabilité basée sur la classification des textures (Source: Manuel pour l'évaluation des pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada; 1997)

Cependant, la valeur du paramètre  $M$ , fonction des pourcentages de limon, de sable et d'argile, ainsi que le pourcentage de matière organique "a" ne peuvent être connus que suite à des essais en laboratoire. De plus, il faut tenir compte de la variation du paramètre "a" en fonction de l'occupation du sol et son utilisation. Par ces faits, il est très difficile, même impossible, de définir la valeur de ce paramètre pour un type de sol donnée à l'échelle du bassin versant, puisque deux sol de même nature peuvent donc avoir un pourcentage de matière organique différent.

Donc, cette formule n'est pas très pratique pour évaluer le facteur K à l'échelle du bassin versant.

Alors, pour déterminer la valeur du facteur K, on a fait le recoupement entre les résultats issus de deux types d'approches. D'une part, on a utilisé des valeurs existantes de K, issu des études antérieures, pour des types de sol malgache. D'autre part, on a évalué la valeur de K en fonction de la texture du sol relative au type de sol selon la carte pédologique issu du HWSO utilisé par la FAO.

Tableau 17: Valeur de K en fonction du type de sols

TYPE DE SOLS PRESENTS SUR LE BASSIN VERSANT			TEXTURE DU SOL	K [T.h/MJ.mm]
_Pédo_BD100	_FAOsoil	_Riquier J.		
Sol ferrugineux tropicaux sur carapace de sable	Cambic Arenosols	Sol ferrugineux tropicaux sur grés ou sable et sols squelettiques sur grés	sableux à sablo-argileux	<b>0.29</b>
Complexes sols alluviaux peu évolués + sols sales/Roches alluviales	Eutric Fluvisols		Sable loameux à limono-sableux	<b>0.26</b>

### 5.1.3.3 Calcul du facteur topographique LS

La formule la plus usitée permettant de définir la valeur du facteur LS est défini par :

$$LS = \left( \frac{\lambda}{22,15} \right)^m \cdot [65,4 \cdot \sin^2 \theta + 4,56 \cdot \sin \theta + 0,065]$$

où :

$\lambda$  : longueur de la pente [m]

$\theta$  : inclinaison de la pente [degré]

$m$  : facteur établi en fonction de la pente

Cependant, la valeur de LS sur l'ensemble du BV peut aussi être déterminée en utilisant l'outil de traitement « *r.watershed* » de GRASS\_Gis dans le logiciel QGis. L'algorithme utilise la formule proposé par Moore et Burch en 1986 pour calculer LS, tel que :

$$LS(r) = (m + 1) \cdot \left( \frac{A(r)}{a_0} \right)^m \cdot \left( \frac{\sin b(r)}{b_0} \right)^n$$

où :

$A$  : aire d'accumulation (catchment area)

$b$  : pente

$a_0 = 22,1$  m

$b_0 = 0,09$

$m$  : valeur entre 0,4 et 0,6

$n$  : valeur entre 1 et 1,4

### 5.1.3.4 Evaluation du facteur de couverture C

La valeur du facteur C varie de 0 pour les plans d'eau et des surfaces bâties, à 0,9 pour les sols dénudés. Celle-ci peut donc être déterminée à partir d'une cartographie de la couverture végétale de la zone.

En l'absence d'information sur le pourcentage de sols recouvert par la canopée et de la hauteur des différents types de couvert végétal, le facteur C n'a pu être calculé à partir du graphique linéaire proposé par Roose en 1994. Une typologie des différents types d'occupation du sol a donc été réalisée à partir de la BD200. La sensibilité à l'érosion des différentes classes est par la suite déterminée à partir de données issues de travaux réalisés sur Madagascar (MAEP, 2004).

Tableau 18: Valeur du facteur C en fonction de l'occupation du sol

OCCUPATION DU SOL	C attribué
Forêts denses sèches-série à Dalbergia, Commiphora et Hildegardia - dégradées et/ou secondaires	0,005
Fourrés xérophiiles	0,005
Mosaïque de cultures, jachères, lambeaux forestiers, formations graminéennes	0,05
Savanes et/ou pseudosteppes avec éléments ligneux	0,2
Savanes et/ou pseudosteppes sans éléments ligneux	0,5
Plans d'eau	0

#### 5.1.4 Inventaire des données utilisées

Le facteur LS est calculé à partir du SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) qui se présente sous forme de raster (Geo TIFF Tagged Image Files Format) renseignant pour chaque pixel de 90 mètres d'altimétrie Z. Ces données sont disponibles gratuitement sur le web (<http://srtm.csi.cgiar.org>) et sont acquises par interférométrie radar en 2000, au cours d'une mission de la navette spatiale Endeavour par deux agences américaines, la NASA<sup>9</sup> et la NGA<sup>10</sup>.

Pour le facteur R, les données pluviométriques sont issues de la modélisation de données mises en ligne WorldClim (<http://www.worldclim.org/current.htm>). La résolution de ces données varie de 10 minutes d'arc à 30 secondes d'arc, soit 1 km, et qui est celle qu'on a prise. Ce modèle climatique global est réalisé à partir de différentes bases de données compilées (FAO, WMO<sup>11</sup>, CINAT, Hydronet et de bases de données secondaires locales compilées par le Global Historic Climatologic Networks). Le modèle consiste à l'interpolation de données climatiques mensuelles moyennes de stations météorologiques, sur une période d'au moins 10 ans (1950-1990; 1950-2000).

L'occupation du sol est extraite des données de la BD au 1/100 000<sup>ème</sup> de Madagascar. Cette dernière contient des données vectorielles sur l'occupation du sol, l'altimétrie et l'hydrologie. Cette base de données résulte de la numérisation des cartes topographiques au 1/100 000<sup>ème</sup> produites par la FTM (Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara - Institut géographique de Madagascar)

Les cartes pédologiques issues des données de la BD au 1/100 000<sup>ème</sup> de Madagascar et celle du HWSD (Harmonized World Soil Database) produite par la FAO, CAS<sup>12</sup>, IIASA<sup>13</sup>, ISRIC<sup>14</sup> et JRC<sup>15</sup> (<http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/>) ont constitués les données disponibles et utilisés pour la détermination du facteur K.

---

<sup>9</sup> **NASA** : National Aeronautics and Space Administration

<sup>10</sup> **NGA** : National Geospatial-Intelligence Agency

<sup>11</sup> **WMO** : World Meteorological Organization

<sup>12</sup> **CAS** : Central Authentication Service

<sup>13</sup> **IIASA** : International Institute for Applied Systems Analysis

<sup>14</sup> **ISRIC** : International Soil Reference and Information Center

<sup>15</sup> **JRC** : Joint Research Center

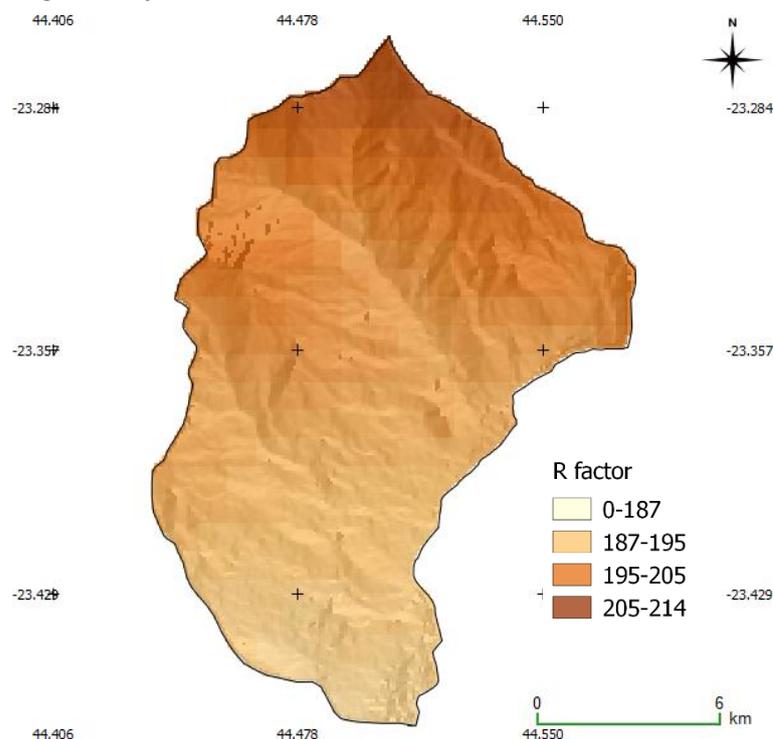
## 5.1.5 Résultats

### 5.1.5.1 Le facteur d'érosivité R

L'exploitation des données du modèle climatique WorldClim dans le calcul du facteur d'érosivité de la pluie R nous a permis de donner une évaluation globale de l'agressivité des pluies dans la zone d'étude.

Les valeurs du facteur R varient entre 187 et 214 MJ.mm/ha.h.an avec une moyenne établie à 194,5 MJ.mm/ha.h.an. Les valeurs les plus faibles de R (187 – 189 MJ.mm/ha.h.an) s'établissent dans zone où se trouve Bezaha-ville à 135 m d'altitude, tandis les valeurs les plus élevés sont rencontrés dans la partie sommitale du BV à 483 m d'altitude.

Figure 16: R factor



### 5.1.5.2 La topographie LS

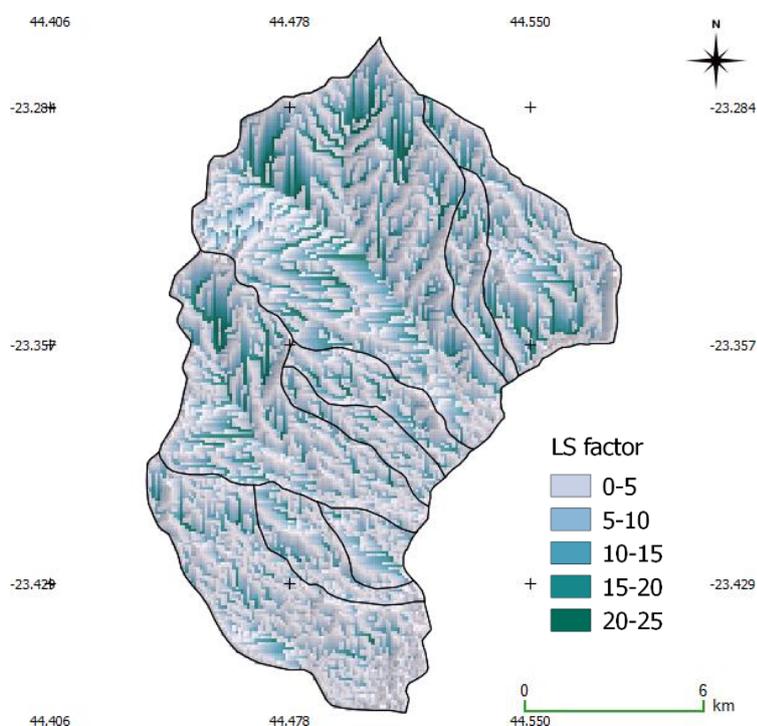
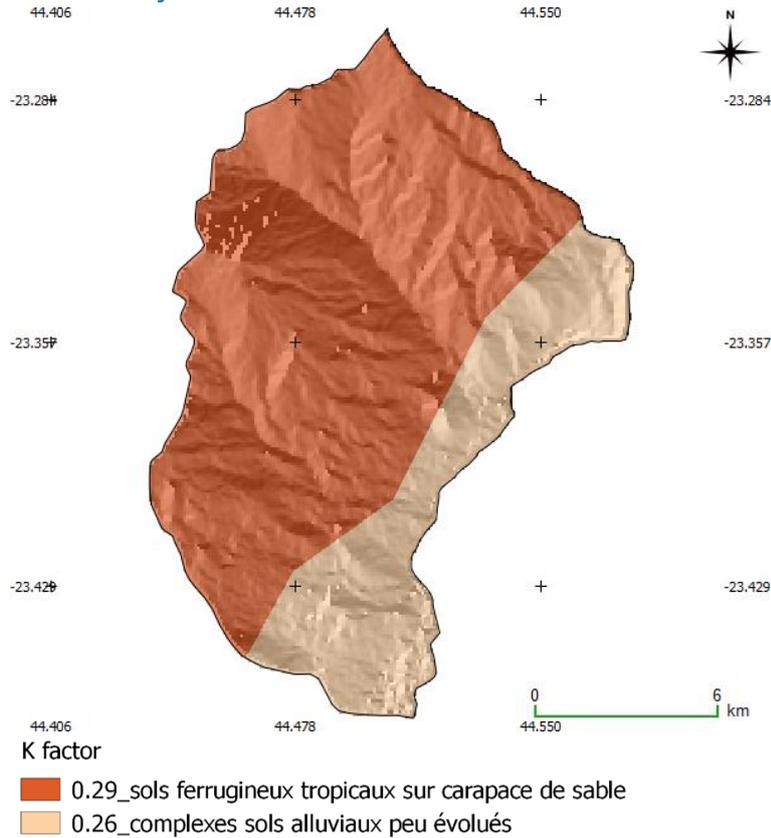


Figure 17: LS factor

Le facteur LS montre l'importance de l'inclinaison et de la longueur de pente dans le processus de l'érosion.

La topographie relativement plane du BV entraine naturellement une répartition assez faible des valeurs de LS entre 0 et 25. La moyenne du facteur sur l'ensemble du BV est évaluée à 7,93. Les valeurs les plus élevés sont rencontrés dans la partie supérieure des sous BV de Horia et Beheoky, ainsi que sur l'ensemble du sous BV d'Ambolamena.

### 5.1.5.3 Le facteur d'érodibilité K



La correspondance entre la texture des sols et l'érodibilité des sols a permis de mettre en évidence les sols les plus érodibles du BV.

Les valeurs du facteur K sont respectivement de 0,26 pour les sols complexes sols alluviaux peu évolués rencontrés dans le bas fond du BV, et de 0,29 pour les sols ferrugineux tropicaux sur carapace de sable qui dominent presque la totalité du BV. Et on peut donc considérer que les sols du BV sont moyennement sensibles à l'érosion.

Figure 18: K factor

### 5.1.5.4 Le facteur de végétation C

L'approche développée pour le calcul du facteur d'occupation des sols propose une estimation globale de la sensibilité de la couverture des sols sur le BV. Au vu des données disponibles, elle constitue un moyen fiable pour la prise en compte du facteur C.

La carte de répartition du facteur C montre la sensibilité des différents types d'occupation du sol vis-à-vis du processus érosif.

Les savanes herbeuses bien souvent dégradés reposent sur des sols ferrugineux typiques du sud et représentent le type de couverture végétal le plus sensible au processus érosif. Ceci

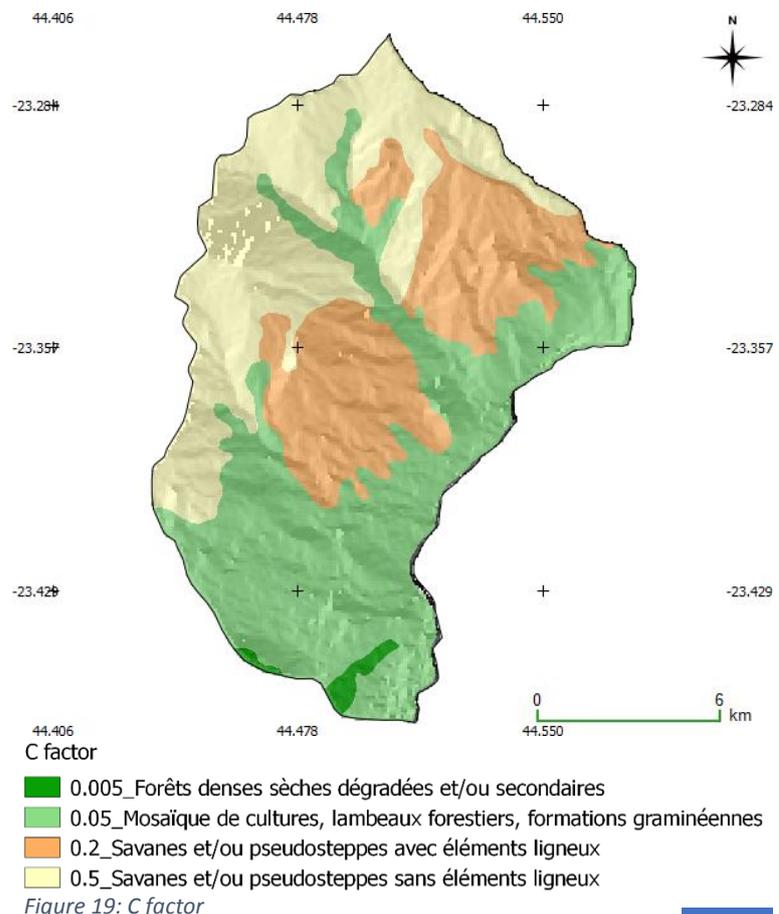


Figure 19: C factor

est dû au surpâturage et aux feux de brousse. Les fortes sensibilités à l'érosion sont donc associées à présence étendue de formation végétale secondaire de types savanes herbeuses dégradés. Et quand cette dégradation est importante, comme sur notre BV, les savanes herbeuses laissent petit à petit la place à un sol dénudé qui correspond au type d'occupation de sol le plus vulnérable à l'érosion. Cette classe est cependant sous représenté sur l'ensemble du BV, d'après les données dans le BD-100.

#### 5.1.5.5 Estimation des pertes de sols

Les résultats apportés dans le cadre de cette étude permettent de mettre en évidence le dynamisme d'érosion en nappe dans sur le BV rive droite du Taheza impactant le périmètre hydroagricole. Le modèle USLE apporte une estimation moyenne potentielle des pertes en sols fournis par chaque maille de 100 m du BV. D'une manière générale : les savanes herbeuses dégradées, les sols dénudés, les sols fragiles (sols ferrugineux), les reliefs escarpés et les précipitations agressives contribuent fortement à augmenter l'emprise de l'érosion en nappe.

La carte de perte en sol montre que les valeurs de perte en sol varient entre 0 et 325 t/ha/an selon les zones du BV. La valeur moyenne de la perte en sol est évaluée à 51 t/ha/an, ce qui est considéré comme élevé.

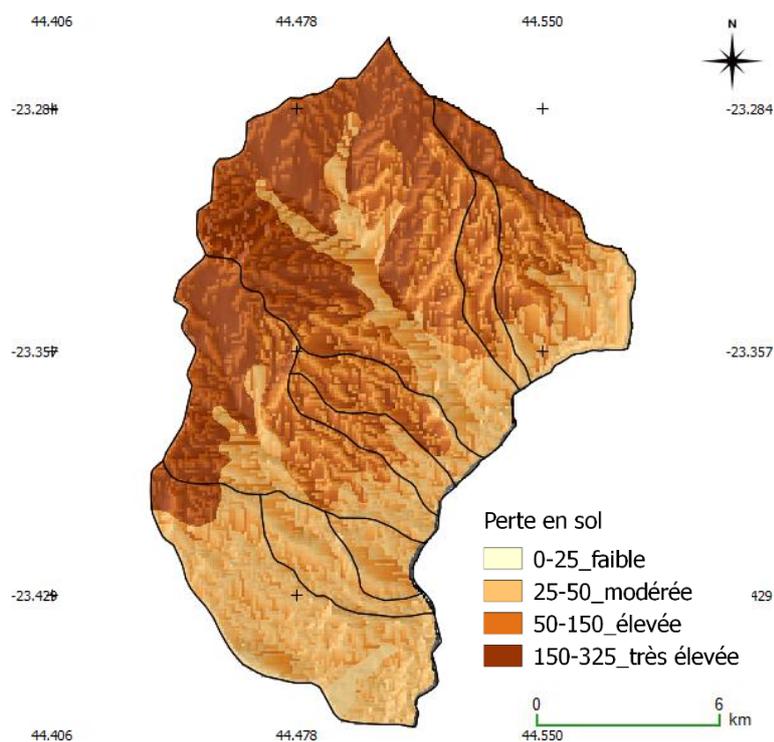


Figure 20: Estimation des pertes en terres

Les surfaces les plus sensibles représentent 53 km<sup>2</sup> et peuvent délivrer jusqu'à 738 t/ha/an de matériaux. A l'échelle du BV, 14 millions de tonnes de matériaux peuvent être potentiellement arraché et sont donc susceptibles de contribuer aux dynamiques des sakasaka et à l'ensablement du périmètre aval. En effet, le modèle ne tient pas compte des processus de transport/sédimentation des matériaux, majoritairement dépendant de la compétence des sakasaka. Cette estimation ne donne donc en aucun cas une prédiction des apports vers l'aval, mais renseigne sur la quantité de matériaux

potentiellement fournis par le BV et révèle donc son altération actuelle.

Tableau 19: Perte en terre moyenne pour chaque sous-BV

<b>SOUS-BV</b>	<b>PERTE EN SOL MOYENNE [t/ha/an]</b>
<b>Ankilindrengaroky</b>	59,454
<b>Ambolamena</b>	52,387
<b>Beheoky</b>	111,728
<b>Ambinda</b>	52,220
<b>Makapapa</b>	37,591
<b>Horia</b>	91,713
<b>Betaolakena</b>	15,296
<b>Ampasimaiky</b>	13,318
<b>Betapoaka</b>	22,511

Tableau 20: Sensibilité des surfaces à l'érosion (Ha)

<b>Surface totale</b>	<b>Faible</b>	<b>Modérée</b>	<b>Elevée</b>	<b>Très élevée</b>
<b>18644</b>	3542	6153	4847	5220
<b>100%</b>	19%	33%	26%	28%