CHAPITRE VI : INTERPRETATION

VI.1. Sur les variables quantitatives

- **Altitude** :

L'ensemble de la zone d'étude varie entre des altitudes de 436 m à 1548m, la zone présente donc une alternance de relief fort et faible selon les lignes de failles ou les bassins. Après les analyses statistiques sur les valeurs des altitudes (considérés comme variable), on a pu en tirer un intervalle à risque ou favorable à la formation des lavaka qui est entre 800 à 950 mètres avec une densité de probabilité d = 0,53 (présence de lavaka). Si on se réfère sur l'ensemble de la zone, cet intervalle d'altitude se trouve moyennement sur l'intermédiaire des versants.

Sur la densité, la valeur individuelle maximale qu'elle peut atteindre sur l'existence d'un lavaka est d = 0,02 qui est une valeur basse. On peut en interpréter alors que l'influence qu'a les altitudes n'est pas directement évidente sur la formation des lavaka, elle doit donc être impérativement combinée avec les autres facteurs pour avoir une idée de son influence exacte sur les probabilités de formation des lavaka.

- **Courbure** :

La valeur de la courbure s'étend de -18,66° à 11,79° sur l'ensemble de la zone d'étude, il y a donc une alternance de courbure concave, convexe et plane. Les analyses statistiques effectuées sur les valeurs des courbures des lavaka ont démontrés qu'entre -0,344° à 0,356°, il y a une présence massive de lavaka avec une densité de probabilité d = 0,50.

Cet intervalle est compris sur des courbures plat et concave et il a été considéré comme à risque, c'est-à-dire favorable à la formation des lavaka.

Sur la densité de probabilité, la valeur maximale individuelle qu'il peut atteindre selon les courbures est environ 0,5, ce qui est une valeur haute. On peut donc en interpréter provisoirement que la connaissance de la courbure d'un terrain est important car sa valeur aura une influence sur la probabilité de formation d'un lavaka sur celui-ci. Toutefois, une combinaison des valeurs des courbures avec les autres facteurs est nécessaire pour la connaissance de la densité de probabilité de formation des lavaka réelle. Il faut aussi se référer aux régressions linéaires pour avoir une idée sur son rang d'influence.

- **Pente** :

Sur l'ensemble de la zone d'étude, la valeur des pentes s'étend de 0° à 74,33° qui est une alternance de pente faible, moyenne et forte. D'après les analyses statistiques effectuées sur les

valeurs des pentes de chaque lavaka, une présence considérable de ceux-là est remarquée dans l'intervalle 9° à 17° avec une densité de probabilité d = 0,50.

Cet intervalle peut être considéré comme des pentes moyennes et c'est par conséquent l'intervalle favorable à la formation des lavaka selon les pentes.

La valeur maximale que peut atteindre la densité de probabilité individuelle de formation d'un lavaka selon les pentes est d ≈ 0,4. Tout comme les courbures, la connaissance des valeurs des pentes est importante car ils auront une influence sur la probabilité de formation d'un lavaka sur un terrain. Il est aussi nécessaire de combiner ces valeurs avec les autres facteurs pour connaitre la probabilité réelle de formation des lavaka. Son rang d'influence sera connu à partir de la régression linéaire effectuée sur les facteurs.

En effet, ces intervalles sont très favorables pour la formation des lavaka vu leurs valeurs des probabilités d'apparition mais on peut aussi en déduire que c'est là que l'ensemble des forces mécaniques qui agissent à cause de la gravité et de la cinétique des agents qui peuvent menés à la formation des lavaka atteint le pic de leurs ampleurs. C'est donc la combinaison de ces 3 facteurs qui font que ces 3 intervalles sont considérés comme à risque.

- **Hydrologie :**

On a calculé la distance des lavaka par rapport aux cours d'eau et elles varient de 0 à 2375,69 mètres. Les analyses statistiques effectués sur ces valeurs ont montré qu'il y une présence considérable des lavaka dans l'intervalle des distances entre 320 à 840 mètres des cours d'eau avec une densité de probabilité d = 0,50.

On peut interpréter cet intervalle de distance et la probabilité comme suit : en dessous des 324 mètres des cours d'eau, on est encore dans le lit mineur donc la végétation est beaucoup plus abondante ainsi que les particules d'argile qui solidifient les terrains. Au-delà des 320 mètres, on est dans le lit majeur de la rivière, le sol y est relativement moins compact et la couverture végétale relative à la solidification du sol moins abondante. On a donc beaucoup plus de risque à la formation des lavaka dans cet intervalle.

Sur la densité de probabilité des lavaka individuellement, la valeur maximale qu'elle peut atteindre est d = 0,3. Cette valeur est moyenne par rapport aux probabilités d'existence des lavaka selon les pentes et les courbures. On peut donc en déduire que la connaissance de ces distances affecte moyennement sur la probabilité de formation des lavaka ; mais une combinaison avec les autres facteurs est toujours nécessaire pour la connaissance de la valeur exacte de la probabilité générale. La régression linéaire est aussi recommandée.

- **Activités anthropiques :**

L'ensemble des lavaka se trouvent entre 44 à 14076 mètres des zones habitées. Concernant l'intervalle favorable à la formation des lavaka, c'est entre 2800 à 6400 mètres avec une densité de probabilité d'apparition d = 0,52. On peut interpréter que ce n'est qu'à partir de presque 3 km des villages que les lavaka sont abondant car en dessous de cette valeur, les habitants ont plus ou moins une maîtrise sur les terrains à cause de leur agriculture et d'autres infrastructures. Les terrains sont ainsi nourris et ont une couverture végétale préserver, les risques de formation des lavaka y sont alors minimes et contrôlés. Au-delà des 3 km, la maîtrise des terrains et beaucoup moins évidente, c'est aussi à partir de cette distance que les villageois envoient leur bovin, les feux de brousse y sont aussi beaucoup plus fréquent et mal maîtrisés.

La valeur maximale de la densité de probabilité d'apparition individuelle des lavaka sur l'ensemble de la zone d'étude est d ≈ 0,13. Cette valeur peut être interprétée qu'elle est relativement basse et que la distance par rapport aux zones habitées influe faiblement sur la probabilité d'existence des lavaka si elle est étudiée individuellement.

L'influence réelle que peut avoir ce facteur sur la probabilité générale de la formation des lavaka sera connue avec l'étude de l'ensemble des facteurs. Son rang d'influence sera connu à partir d'une régression linéaire entre tous les facteurs.

- **Selon les structures tectoniques :**

La partie sud de la zone d'étude avec des multitudes de faille est une zone de bombement correspondant à une remontée asthénosphérique et donc d'amincissement de la croûte continentale. En conséquence, de multiples fracturations sans direction privilégiées y sont remarquées.

La partie centre est un fossé tectonique d'effondrement, les failles bordières de direction globale Nord-Sud sont des failles toujours actives manifestées par les lignes des épicentres des séismes secouant depuis quelques années la région (Fourno et Roussel, 1991).

A partir de ces deux regroupements dans l'ensemble de la zone d'étude, on a pu avoir que l'emplacement des lavaka varient de 0 à 37162 mètres des lignes de failles. L'intervalle favorable à la formation des lavaka sur ces distances est de 2100 à 19700 mètres avec une densité de probabilité d = 0,51.

Individuellement, la probabilité d'apparition maximale d'un lavaka selon les distances par rapport aux lignes de faille est $d = 2,5*10^{-4}$ qui peut être interpréter comme très basse. Une combinaison de ces distances avec les autres facteurs est quand même nécessaire pour avoir une idée réelle de son influence sur les formations des lavaka.

Les lavaka sont alignés globalement suivants les lignes de faille que ce soit ceux dans la zone de bombement ou ceux dans le fossé tectonique d'effondrement.

- **Régression linéaire entre les variables quantitatives**

1. ***Régression linéaire entre altitude et les autres facteurs***

D'après les tableaux XII et XIII, parmi tous les facteurs qui peuvent faire varier la variable « altitude », 19.9% de sa variation est expliquée par les variables considérées comme explicatives.

Toutes les variables ont une influence significative sur l'altitude (car sign. = 0 qui est inférieur à 0,05). Les valeurs des coefficients A nous montrent que tous les variables ont une influence positive sur les valeurs de l'altitude (évoluent dans le même sens) sauf les distances par rapport aux structures tectoniques avec qui ils évoluent dans le sens contraire. Les rangs d'influence de ces facteurs sur la variable expliquée sont déjà montrés par le tableau 13.

2. ***Régression linéaire entre pente et les autres facteurs***

Les tableaux XIV et XV nous montrent que 5,5 % de la variation des valeurs des pentes est expliquée par les variables considérés comme explicatives. Les valeurs des Sign sont tous nul, on peut dire alors que leurs influences sur les valeurs des pentes sont significatives. Les valeurs de A nous montre que tous les facteurs ont une influence positive sur les pentes sauf ceux des courbures avec A = -0,291 qui a une influence négative, c'est-à-dire que si les pentes augmente, les courbures diminuent et vice versa. Les rangs d'influence de ces facteurs sur la variable expliquée sont déjà montrés par le tableau 15.

3. ***Régression linéaire entre courbure et les autres facteurs***

A partir des tableaux XVI et XVII, on peut remarquer que les variables explicatives n'influent qu'à 0,5 % des variations des courbures. Tous les facteurs ont une influence significative sur les courbures. Les valeurs de A montrent que les pentes (A = -0,002) et les distances par rapport à zones habitées ($A = -8,85 * 10^{-5}$) ont une influence négative sur les courbures (évoluent dans des sens contraires) tandis que les autres facteurs ont une influence positive. Les rangs d'influence de ces facteurs sur la variable expliquée sont déjà montrés par le tableau 17.

4. ***Régression linéaire entre distance par rapport aux distance par rapport aux cours d'eau et les autres facteurs***

D'après les tableaux XVIII et XIX, les 7,3 % des variations des distances par rapport aux cours sont expliquées par les variables considérés comme explicatives. Tous les facteurs ont une influence significative et positive (A >0) sur la distance par rapport aux cours d'eau sauf la distance par rapport aux zones habitées qui ne l'influe pas car la valeur de son Sign = 0,107 est supérieur à

0,05. Les rangs d'influence de ces facteurs sur la variable expliquée sont déjà montrés par le tableau 19.

5. Régression linéaire entre distance par rapport aux zones habitées et les autres facteurs

Les tableaux XX et XXI expliquent que 7,6 % de la variation de la distance par rapport aux zones habitées est expliquée par les variables considérées comme explicatives.

On remarque qu'avec Sign = 0,107, les distances par rapport aux cours d'eau n'ont pas d'influence significative sur la distance par rapport aux zones habitées. Les autres facteurs ont tous des influences significatives et positives sauf les courbures qui ont une influence significative et négative (A = -186,076) sur cette distance par rapport aux zones habitées. Les rangs d'influence de ces facteurs sur la variable expliquée sont déjà montrés par le tableau 21.

6. Régression linéaires entre distance par rapport aux structures tectoniques et les autres facteurs

Les tableaux XXII et XXIII expliquent que 7,7 % de la variation de la distance par rapport aux structures tectoniques est expliquée par les variables considérées comme explicatives. Tous les facteurs ont une influence significative sur la distance par rapport aux structures tectoniques car on a Sign. = 0, ces influences sont tous positives sauf celui de l'altitude avec (A = -24,043) qui est négative. Les rangs d'influence de ces facteurs sur la variable expliquée sont déjà montrés par le tableau 23.

Si on résume ces régressions linéaires, on peut tirer du tableau XXIV les rangs de significativité ou d'influence de chaque variable sur la formation des lavaka. Ce ne sont que des résultats statistiques mais elles sont bien cohérentes avec la réalité car on peut voir que c'est l'altitude puis les distances par rapport aux structures tectoniques qui sont les plus influents, ce sont deux facteurs physiquement important.

Le rang de significativité de chaque facteur est donc inversement proportionnel aux densités de probabilité d'apparition des lavaka correspondant à chaque facteur.

On peut en effet voir sur le tableau 24 que les pentes et les courbures ont respectivement les 4è et 6è rangs d'influence sur la formation des lavaka alors que les densités de probabilité d'apparition individuel d'un lavaka selon ces deux facteurs sont les plus élevées (respectivement d = 0,4 et d = 0,5).

Par rapport aux travaux effectués par Rakotondraompiana *et al*. (2003) dans une autre zone des hautes-terre de Madagascar (commune de Sadabe) qui consistait aussi à une caractérisation des zones d'érosion mais avec une autre approche, les valeurs des intervalles à risques selon les

facteurs individuels correspondent. On a tout de même remarqué un décalage pour l'intervalle des altitudes à risque (1300 à 1400 m) par rapport à 800 à 950 m pour le présent travail. Ce décalage des valeurs pourrait s'expliquer par la position géographique de notre zone d'étude qui se trouve à l'Est du cisaillement d'Ifanadiana-Angavo qui est responsable d'un déversement général vers l'Est, alors que la commune de sadabe se trouve dans les hauts plateaux où l'on observe en moyenne des altitudes plus élevées.

La figure 35 montre avec une probabilité p = 0,07 les zones les plus favorables à la formation des lavaka sur l'ensemble de la zone d'étude, c'est la combinaison des zones à risques selon l'ensemble des facteurs quantitatives.

VI.2. Selon la pédologie

La propriété pédologique d'un terrain est un facteur déclenchant l'érosion en lavaka. L'eau pénètre et affouille les altérites qui montrent une aptitude particulière au cisaillement. Un glissement du profil se produit alors, le lavaka amorcé se poursuit vers l'amont jusqu'au plateau sommitaux.

Selon le tableau XXVI, on retrouve 51,11 % de l'ensemble des lavaka sur un horizon avec des sols typiques rouge, phase érodé (sol ferralitique) qui est une formation très favorable à la formation des lavaka à cause de sa texture et de la présence d'argile latéritique. En effet la zone d'étude compte environ 1247210 Ha et les 21,05 % de cette surface est couvert par ce type de sol et c'est un peu plus de la moitié de l'ensemble des lavaka qui s'y trouve. Le tableau suivant va montrer les valeurs moyennes des facteurs quantitatives correspondant aux lavaka se retrouvant dans cette pédologie :

Tableau XXIX: Correspondance entre pédologie et les variables quantitatives

Pédologie Favorable	**Altitude moy (m)**	**Pente moyenne (deg)**	**Courbure moy (deg/m)**	**Dist_riv moyenne (m)**	**Dist_zonha moyenne (m)**	**Dist_struc moyenne (m)**
Sol typique rouge, phase érodée	835,62	13,24	0,013	607,99	4122,67	14102,87

Ces valeurs se retrouvent tous dans les intervalles considérés à risque. C'est donc largement le type de sol favorable à la formation des lavaka.

VI.3. Selon la lithologie

La lithologie est un facteur déclenchant l'érosion en lavaka, d'après le tableau XXVIII, on a 40,65 % de l'ensemble des lavaka qui sont sur des formations de Granites migmatitiques ou Migmatites granitoïdes. En effet, cette formation possède une facilité à l'altération avec des climats humide et tropical. En plus, l'érosion se limite simplement à un effet de nappe superficielle, témoigné par des collines aplanies dans leur partie sommitale et sur leur flanc.

Voici un tableau qui va montrer les valeurs moyennes des facteurs quantitatives correspondant aux lavaka se retrouvant dans cette formation géologique :

Tableau XXX: Correspondance entre lithologie et les variables quantitatives

Lithologie Favorable	**Altitude moyenne (m)**	**Pente moyenne (deg)**	**Courbure moyenne (deg)**	**Dist_riv moyenne (m)**	**Dist_zonha moyenne (m)**	**Dist_struc moyenne (m)**
Migmatite Granitoïde	904,36	13,88	0,003	607,35	5276,49	11665,01

On peut voir que les valeurs moyennes des facteurs qualitatives appartiennent aux intervalles considérés comme à risque selon les résultats eu ultérieurement. Tout cela démontre alors que c'est la lithologie favorable à la formation des lavaka.

Selon encore le tableau XXVIII, les 31,25 % des lavaka se retouvent sur des formations à Migmatites, Leptynites (sur la zone d'Andrebabe-Beanana), Gneiss, Khondalites, Migmatites de Manampotsy ; elles peuvent aussi être considéré comme des formations facile pour l'érosion en lavaka.

Par contre les formations qui ne sont pas du tout favorable à la formation des lavaka c'est là où on retrouve des Grès ou des Argiles kaoliniques. On y retrouve seulement 0,007% des lavaka.

VI.4. Selon l'occupation du sol

L'occupation de sol ou surtout la couverture végétale est aussi un facteur important au déclenchement de l'érosion en lavaka. Selon le tableau XXVII, on a 66,06% des lavaka qui se retrouvent sur des zones à Savane herbeuse qui représente 34,8 % de la surface total de la zone d'étude. C'est donc largement la couverture végétale favorable à la formation des lavaka.

Les savanes herbeuses sont des végétations caractéristiques soit des zones du Sud de Madagascar qui est essentiellement constitué de zones arides, soit des zones où l'on a effectués des feux de brousse. Notre zone d'étude se retrouvant sur les hautes terres de Madagascar, la présence de ces savanes herbeuses est surtout due aux multiples feux de brousse pour les cultures

sur brulis et qui peut aussi fragiliser les sols. Cette présence massive des lavaka dans cette zone à savane herbeuse est donc liée aux effets anthropiques.

Voici un tableau qui va montrer les valeurs moyennes des facteurs quantitatives correspondant aux lavaka dans cette zone à savane herbeuse:

Tableau XXXI: Correspondance entre occupation de sol et les variables quantitatives

Occupation du sol	**Altitude moyenne (m)**	**Pente moyenne (deg)**	**Courbure moyenne (deg)**	**Dist_riv moyenne (m)**	**Dist_zonha moyenne (m)**	**Dist_struc moyenne (m)**
Savane herbeuse	859,12	13,64	0,012	620,96	4705,11	12233,2

Toutes les valeurs moyennes appartiennent aux intervalles considérés comme à risque. Par contre, environ 1,5 % des lavaka sont sur des zones où il y a des forêts, ce qui est un effectif maigre par rapport à l'ensemble. On peut donc en tiré que le reboisement est fortement conseillé pour des préventions contre le phénomène de lavakisation.

A partir les fréquences des lavaka selon les variables qualitatives, on peut donc en déduire moyennement que l'érosion dépend principalement :

1. de l'occupation du sol (66,06 % des lavaka dans les savanes herbeuses)
2. puis de la pédologie (51,11 % des lavaka dans les sols typiques rouge, phase érodés)
3. enfin de la lithologie (40,64% des lavaka dans les granites migmatitiques).

On a pu remarquer qu'il y a une forte concentration de lavaka dans les districts d'Amparafaravola et de Tsaratanana avec des dimensions variés et une répartition aléatoire. Par contre ceux qui sont dans le district d'Ambatondrazaka suivent une direction générale Nord-Sud avec des dimensions variés et se forment généralement le long des structures tectoniques.

CHAPITRE VII : PROPOSITION DE STABILISATION

Il n'y a pas de méthode standard pour stabiliser les lavaka, mais le choix des techniques et des dispositifs à mettre en œuvre dépend du type et du stade d'évolution du lavaka ainsi que du contexte de la région et de son emplacement. Des propositions de mesure d'atténuation des effets néfastes des lavaka ont été tirées d'un programme de lutte anti érosive (Raharinaivo, 2008), ces mesures consistent à diminuer l'aire de drainage, de diminuer les effets de cascade d'eau venant de la partie supérieure et d'arrêter l'approfondissement des lavaka. La végétation joue aussi un rôle important dans la stabilisation d'un lavaka, elle fixe le sol et réduit les effets de l'eau.

Il est aussi important de prendre en compte les zones favorables à la formation des lavaka selon les différents facteurs qu'on a établis ultérieurement pour le choix des sites d'implantation des mesures de stabilisation.

VII.1. Profil de restauration

- **Etape 1 : Création de profil d'équilibre (terrassement)**

Un profil d'équilibre est un système mécanique de réaménagement topographique qui vise à ralentir l'effet de ruissellement en respectant l'angle de stabilité des différents types de sols et à créer une rupture de pente.

Ce profil débute de bas en haut jusqu'à la pente la plus raide du lavaka, on les retient compactés avec des fascines en bois ou en bambou. En amont, il faut empêcher l'éboulement massif des parois du lobe ; donc il est nécessaire de mettre en œuvre une canalisation qui redirige le ruissellement vers les deux côtés. Voici la figure 38 une illustration à ce profil d'équilibre :

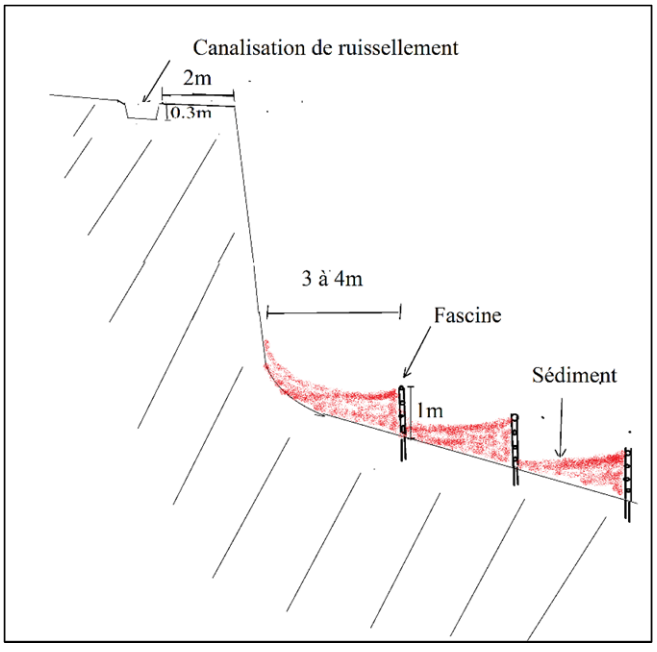

Figure 38: Profil d'équilibre

En appui de ce profil d'équilibre, des systèmes de gabionnage peuvent y être ajoutés, on peut construire un gabion 1 contre la paroi du lavaka pour éviter les effets de cascade de l'eau. Un gabion 2 est construit à une distance égale à la profondeur du lavaka pour freiner le transport des sols dû à l'effondrement des parois, donc à corriger progressivement le talus (figure 39).

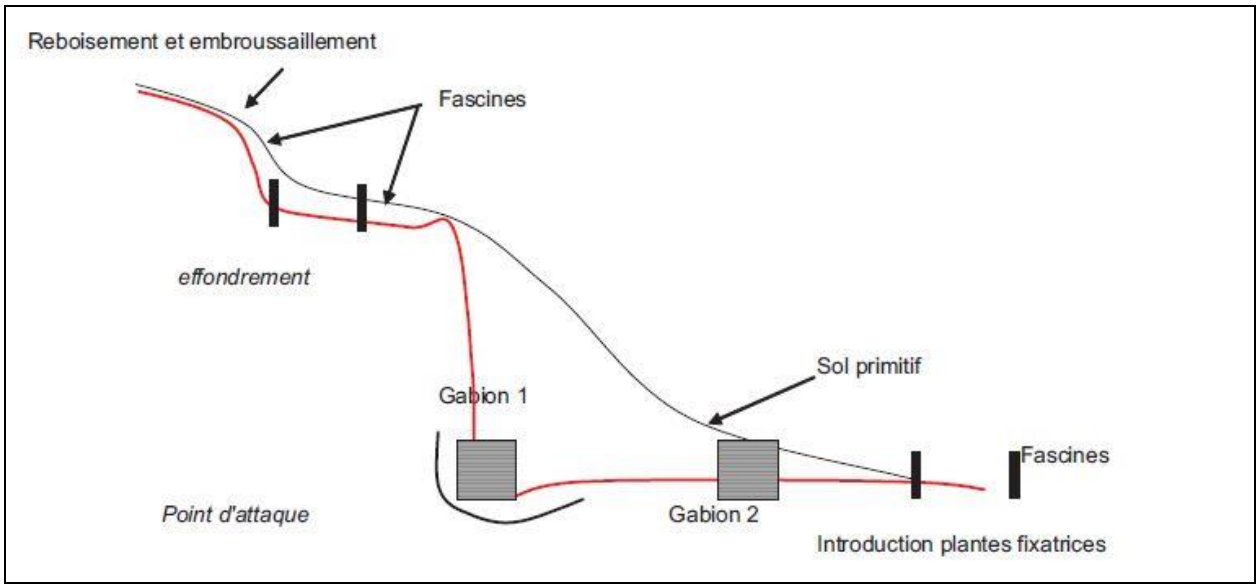

Figure 39: Système de gabionnage

- **Etape 2 : Option biologique**

Le principe consiste à coloniser l'intérieur du lavaka par les plantes adaptées au type de sol d'altération ainsi que le climat et plantées à mi saison de pluie, c'est-à-dire entre le mois de Janvier et Février pour éviter l'insuffisance d'arrosage et l'ensablement de l'infrastructure. C'est dans cette option que les plantes suivantes sont proposées :

- ***Le Grevillea robusta***

Il est originaire des zones côtières de l'Est de l'Australie, et pousse dans les forêts subtropicales et tropicales sèches recevant en moyenne plus de 1000 mm d'eau par an. C'est un arbre à feuillage persistant, à croissance rapide, avec des feuilles vertes foncées bipennées et dentelées comme la fronde des fougères. Les graines arrivent à maturité en fin d'hiver et au début de printemps. Harwood CE, (1989). Voici une image de cette plante qui a une vocation invasive :

Figure 40: Grevillea Robusta

- ***La fougère***

Plantes rampantes avec des feuilles bien développées, les fougères sont plus représentées dans les pays chauds, en recherchant à la fois la chaleur et l'humidité. Ce sont plutôt des plantes d'ombre et elles colonisent surtout des sols à pH neutre à faiblement acide, mais il existe aussi des espèces acidophiles et d'autres basiphiles.

Figure 41: Fougères

- ***Le bambou***

Poussant avec ses tiges, le bambou peut servir de fascine, l'étroitesse de ses feuilles améliorant l'infiltration de l'eau dans le sol (deux fois plus qu'une forêt de feuillus). Il limite l'érosion des sols (grâce à son réseau racinaire très dense sur 60 centimètres de profondeur) et restaure des sols appauvris. L'image suivante va montrer des bambous.

Figure 42: Bambous

- ***le vétiver zizanioides :***

Originaire d'Inde, le vétiver est une plante très peu exigeante et bien que préférant les milieux humides, il peut également prospérer en zone sèche. Capable de supporter des sécheresses importantes, le vétiver apprécie néanmoins une période annuelle de 3 mois de pluie et résiste parfaitement à des inondations importantes s'étalant sur plusieurs mois.

La plante se présente sous forme de grandes touffes vertes, dont la racine, se développant verticalement, peut atteindre des profondeurs allant jusqu'à trois mètres. Les haies de vétiver permettent également aux sols de conserver leur humidité. Voici une photo illustrant cela :

Figure 43: Vétiver zizanioides

Selon Andriambolasoa (2002), une combinaison du profil d'équilibre et des options biologique peut être réalisée. Les Grevillea devraient être plantées dans la partie haute des versants tandis que les vétivers et les fougères à l'intérieur pour coloniser les sédiments et protéger les parties raides. La figure 44 va détaillée cette structuration de ces plantes dans le profil d'équilibre :

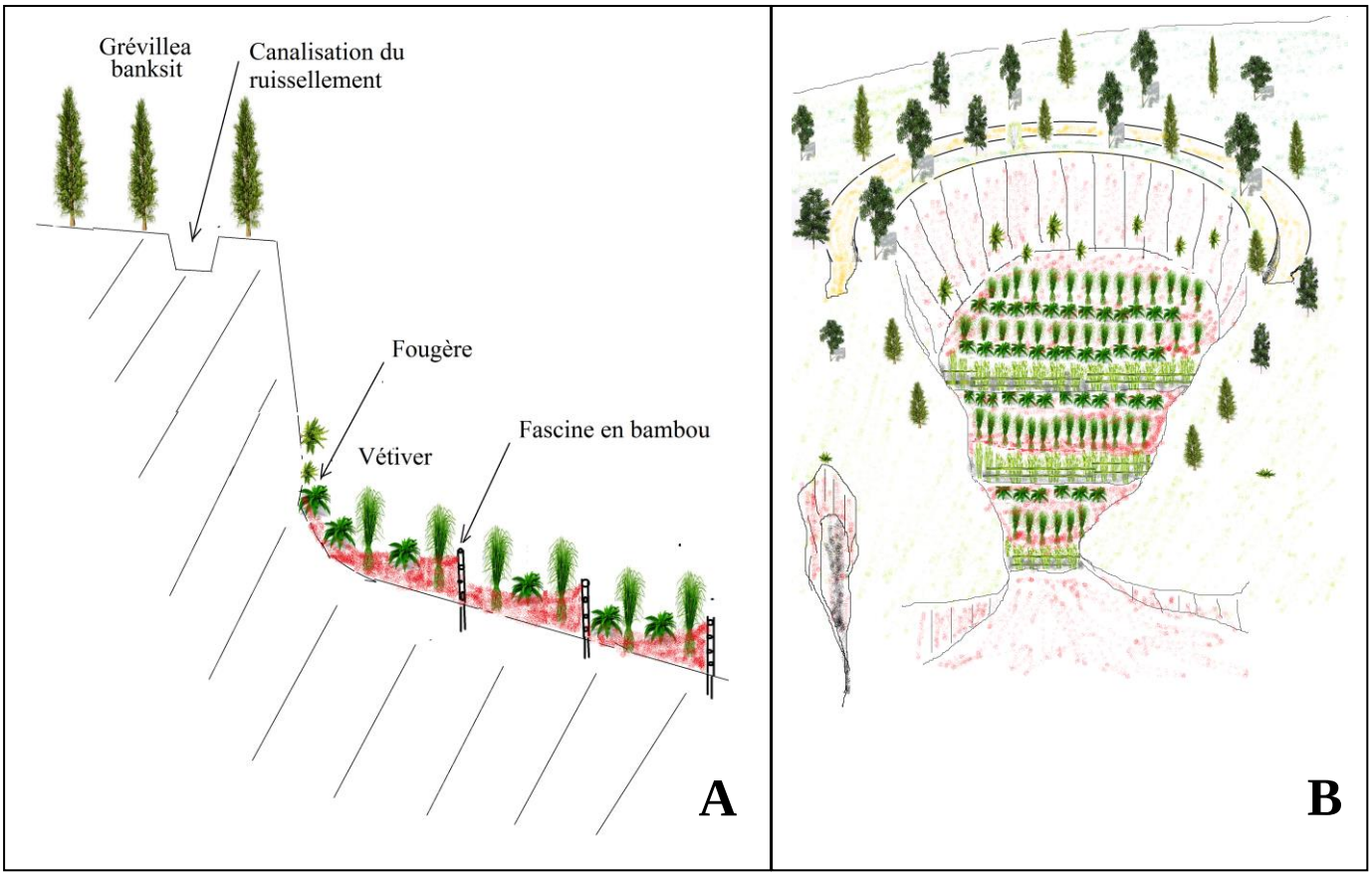

Figure 44: Structuration du profil de restauration (source : Andrimbolasoa, 2002)

A : Vue de profil

B : Vue de face

En complément de ces propositions de restauration, la connaissance des zones favorables à la formation des lavaka est aussi d'une grande aide car on pourrait prendre des mesures de prévention. On va pouvoir par exemple construire des profils d'équilibre sur les terrains qui présente des pentes à risque et dont les autres facteurs sont favorables à la formation des lavaka.

La plantation à l'avance des plantes correspondant aux formations pédologiques à risques qui va minimiser la probabilité de formation des lavaka pourrait aussi être effectuée.