

CHAPITRE II : LES LAVAKA

Parmi les formes d'érosion les plus actives, le *lavaka* est le plus fréquent sur les Hautes-terres malagasy. Lavaka est un mot malgache entré dans le vocabulaire géomorphologique international grâce à Riquier (1954) qui signifie littéralement « trou, fosse, caverne » utilisé pour décrire des profondes excavations (Hoeblich, 1992). C'est une cavité elliptique dont le petit axe est horizontal et le grand axe, qui va du sommet à l'orée, est incliné suivant la ligne de plus grande pente de l'ancienne surface topographique (Andriamampianina, 1985). Il est souvent situé à mi-pente ou en bas de pente des versants moyens ou abrupts constitués d'épaisses couches d'altération argilo-sableuse ou d'argile latéritique (Raunet, 1984 ; Andriamampianina, 1985).

II.1. NOTION D'ÉROSION

Les eaux courantes, la mer, les vents, le soleil et les glaciers sont les principaux agents d'érosion qui sculptent les formes topographiques du paysage à partir des modifications subies par les roches (endogènes ou exogènes). Une altérite peut-être définie comme une roche provenant de l'altération ces roches mères. Dans la nature, l'érosion peut être résumée en 2 types comme suit :

- Décompositions chimiques : Elle résulte de la réaction des minéraux des roches en présence des agents chimiques véhiculés par l'eau: l'oxygène, le gaz carbonique, les acides produits par les plantes. Les effets en sont très variés: la dissolution, l'oxydation, l'hydrolyse.
- Désagréations mécaniques : ce sont essentiellement des dislocations des roches mères dues aux actions mécaniques des forces endogènes ou exogènes et aux variations de température entraînant le déchaussement de la roche en agrégat ou en minéraux.

Par ces deux phénomènes les éléments rocheux se morcellent et sont réduits de volume jusqu'à la taille des sables, limons ou argiles et qui sont ensuite drainé en aval par les agents érosifs.

II.2. DESCRIPTION DES LAVAKA

Un lavaka est en général caractérisé par des parois quasi verticales formant un cirque ovoïde, prolongé à l'aval par un chenal d'écoulement qui est un étroit goulot, et se terminant par un cône de déjection plus ou moins sableux. Sa profondeur peut varier en moyenne de 10 à 50 mètres (Riquier, 1954 ; Raunet, 1984).

L'érosion en lavaka se produit sur des sols de type ferralitique, pour le cas de Madagascar, ce type de sol couvre plus de la moitié de la superficie de l'île (Riquier, 1966). Un

lavaka est le produit de l'accentuation de l'érosion en ravin, sa forme particulière est due à la texture des argiles latéritiques. L'intérieur d'un lavaka est le plus souvent encombré de l'effondrement des éboulis des terrains qui les avoisinent. En effet les parois verticales, sous l'effet de l'écoulement des eaux de pluie, se fragilisent progressivement et finit par s'effondrer. A l'intérieur d'un lavaka, le profil est soit en V, soit en U ; on peut y trouver de la végétation lorsque le lavaka se stabilise. La figure 8 suivante va illustrer toutes ces caractéristiques :

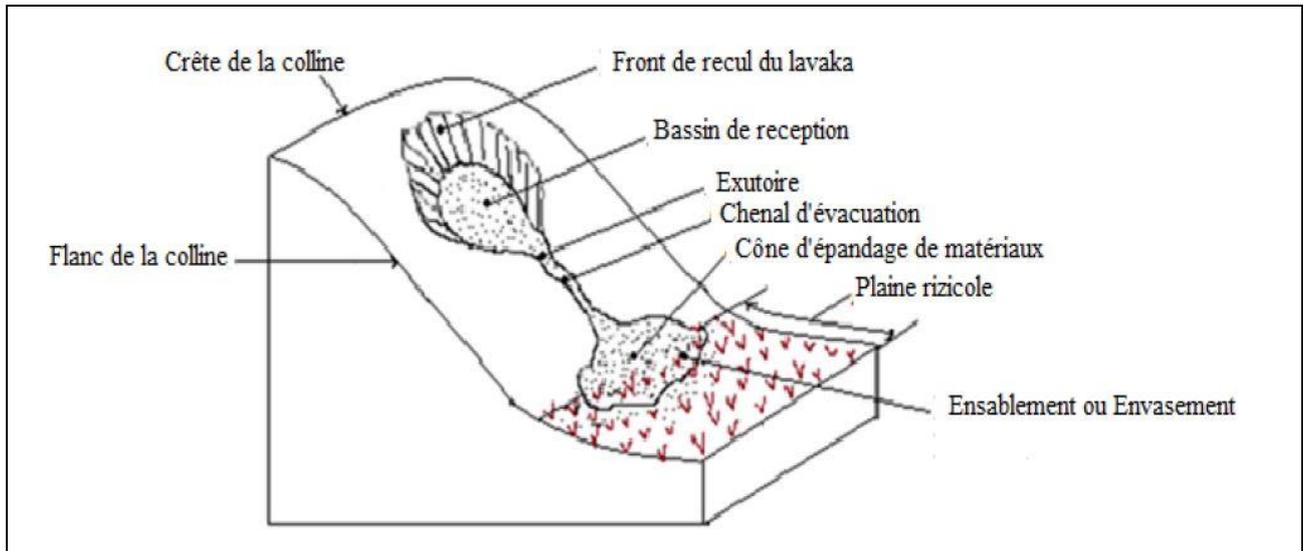


Figure 8: Description d'un lavaka et ses effets en aval (J. Riquier, 1953)

Typologiquement, on peut classier les lavaka sous trois formes (figure 9) :

- Lavaka linéaire : caractérisé par un tracé horizontal en ligne
- Lavaka piriforme : ayant l'aspect d'une poire
- Lavaka digité : enrichi de plusieurs lobes mais à exutoire commun

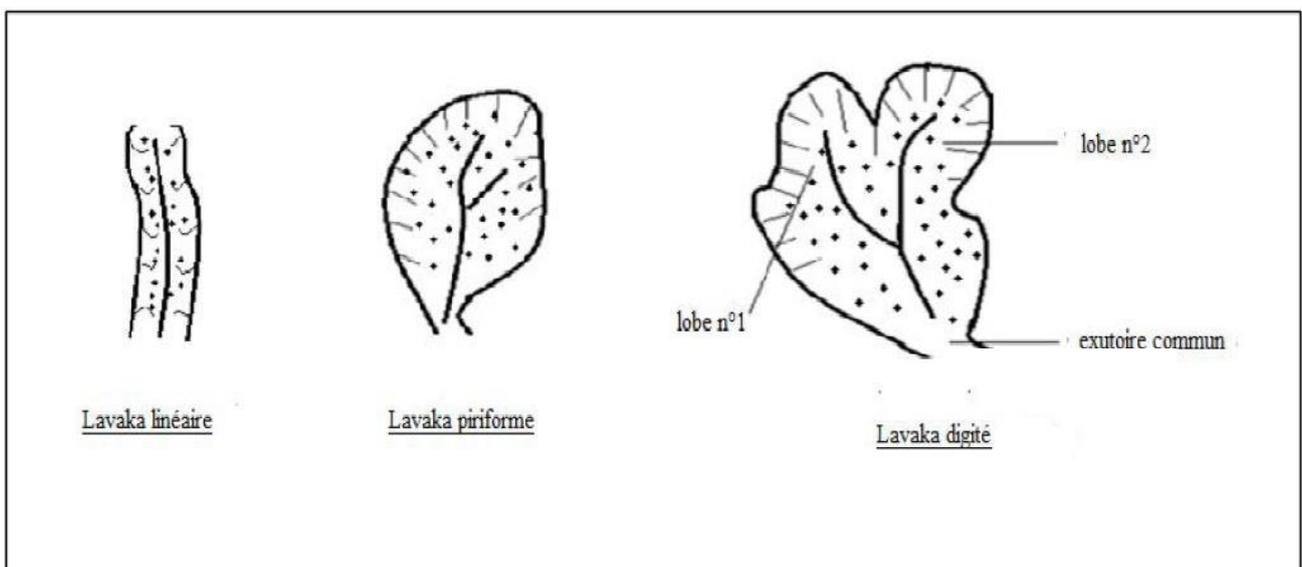


Figure 9: Les différents types de lavaka

II.3. ORIGINES, FACTEURS ET EVOLUTIONS

II.3.1. Origines

D'après Andriambolaso (2002), les lavaka sont en général engendrés par une situation hydrogéologique naturelle et d'autres facteurs externes tels que l'homme et les troupeaux d'animaux. L'aspect hydrogéologique s'explique par le fait d'une forte densité d'écoulement souterrain induisant aux affaissements internes qui se répercutent en surface. Dès que la couche supérieure plus compacte est fissurée, le ruissellement de surface s'engouffre dans les fentes et atteint la couche altérée sous-jacente. Ainsi, l'écoulement latéral favorise l'arrachement de terre à cet endroit.

Riquier (1954) affirme ce rôle majeur du ruissellement. Il attribue la formation des lavaka au décapage de l'horizon superficiel compact des sols qui permet à l'eau d'atteindre et d'affouiller l'horizon meuble sous-jacent. En parlant des actions de l'homme et des animaux, Hoeblich (1992) atteste que les mécanismes relatifs à la genèse et l'extension des lavaka reposent aux processus d'origine anthropique. Les feux de brousses, l'exploitation des versants pour les cultures et le piétinement bovin à la surface du sol produisent des fentes de dessiccation, favorables au déclenchement de l'érosion en lavaka lors de la saison de pluie.

Raharijaona *et al.* (2001) ont montré deux mécanismes de formation des lavaka. Un lavaka se forme généralement par les couches inférieures. L'eau pluviale pénètre dans le sol, enlève les matériaux les plus fins et fait glisser les couches supérieures sur une couche appelée couche-savon. Ensuite, il y a effondrement des couches supérieures quand les matériaux des couches profondes ont été emmenés. C'est après ces étapes que le lavaka commence à prendre forme sur le terrain. Selon Andriamampianina (1985), ces sont les sols ferrallitiques et les colluvions qui présentent des caractères aptes à la formation des lavaka à cause de l'existence d'un matériel basal friable et sableux, d'un matériel kaolinique plus ou moins épais et d'une teneur en limon toujours élevée dans ces types de sols.

II.3.2. Les facteurs de formation d'un lavaka

Ces différentes théories ne devraient toutefois pas s'exclure l'une de l'autre, l'érosion en lavaka faisant très vraisemblablement appel à la synergie de tous les processus évoqués par ces auteurs.

Rakotondraompiana *et al.* (2003) ont montré les différents facteurs naturels et anthropiques qui ont une influence sur la formation des lavaka. Le choix de ces facteurs a été basé sur la répartition de leurs propriétés parmi les zones en présence de lavaka. Ces facteurs ont été pris en considération selon leurs influences sur les zones soumises à l'érosion. Les

résultats, c'est-à-dire les rangs d'influences de ces facteurs ont été établie à partir des observations faites sur le terrain par différents spécialistes (géographes, géologues, forestiers,...) ayant travaillé dans le cadre d'un même projet de recherche en utilisant une évaluation multicritère.

Les facteurs naturels jugés comme ayant une influence sur le déclenchement des érosions en lavaka sont :

- Le relief et ses paramètres dérivés : altitude, pente, courbure
- La distance par rapport au réseau hydrographique
- La nature géologique des roches
- La couverture végétale
- L'occupation du sol
- Les lignes structurales
- Les facteurs anthropiques : distance par rapport aux lieux d'habitation (villages)

II.3.3. Evolutions d'un lavaka

Ce type d'érosion est un phénomène dynamique. En effet, sa progression se fait par érosion rétrograde vers le haut avec des formes plus ou moins lâches (digités) sur les colluvions et des formes plus circulaires (piriformes) sur des sols ferrallitiques (Andriamampianina, 1985).

Selon Raharijaona *et al.* (2001), c'est une évolution spatiale et temporelle. Suite à une forte densité d'écoulement souterrain, l'érosion en nappe s'explique par un décapage uniforme de la couche superficielle de la terre. Avec une concentration des eaux de ruissellement et des pressions humaines successives, les rigoles ainsi creusés se développent en ravines qui peuvent aller jusqu'à la formation des lavaka. L'usure directe de la paroi verticale par l'eau est suivie d'un écroulement du talus et va laisser une excavation grandissante. Le recul de la paroi verticale se fait par l'effondrement du talus, glissement et affaissement d'un bloc.

D'après Rafanomezana (2006), l'évolution vers la stabilisation du lavaka va commencer par un processus de recolonisation par la végétation progressive. Du fait de la stabilisation lente, la plupart des lavaka stabilisés sont des lavaka anciens. Ils sont parfois recouverts de végétation en surface.

Toutefois, si la dépression ne protège plus la végétation par son humidité et ses parois, les feux peuvent l'envahir dans des certaines conditions et une prairie à graminée remplace le boisement. En outre, cette destruction des végétations protectrices de la surface expose le sol aux actions agressives des précipitations et du rayonnement solaire. Un nouveau cycle d'érosion peut recommencer et un nouveau lavaka se formera à la place de l'ancienne.

PARTIE 2 : METHODOLOGIE

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES LAVAKA

Un des buts de ce présent travail est d'avoir une idée sur les influences que peuvent avoir les divers éléments considérés comme facteur de formation des lavaka. Comme méthodologie de travail, on a choisi une étude statistique de ces facteurs pour pouvoir atteindre cet objectif. Ce chapitre va alors détailler les différentes étapes qui ont été suivies le long de ce travail et ces étapes seront regroupées comme suit :

- l'analyse statistique
- les collectes de données (élaboration des cartes, numérisation des lavaka)
- élaboration de la base de données des lavaka compilant les données utiles pour les analyses statistiques

Voici la figure 10 un schéma montrant ces étapes suivies.

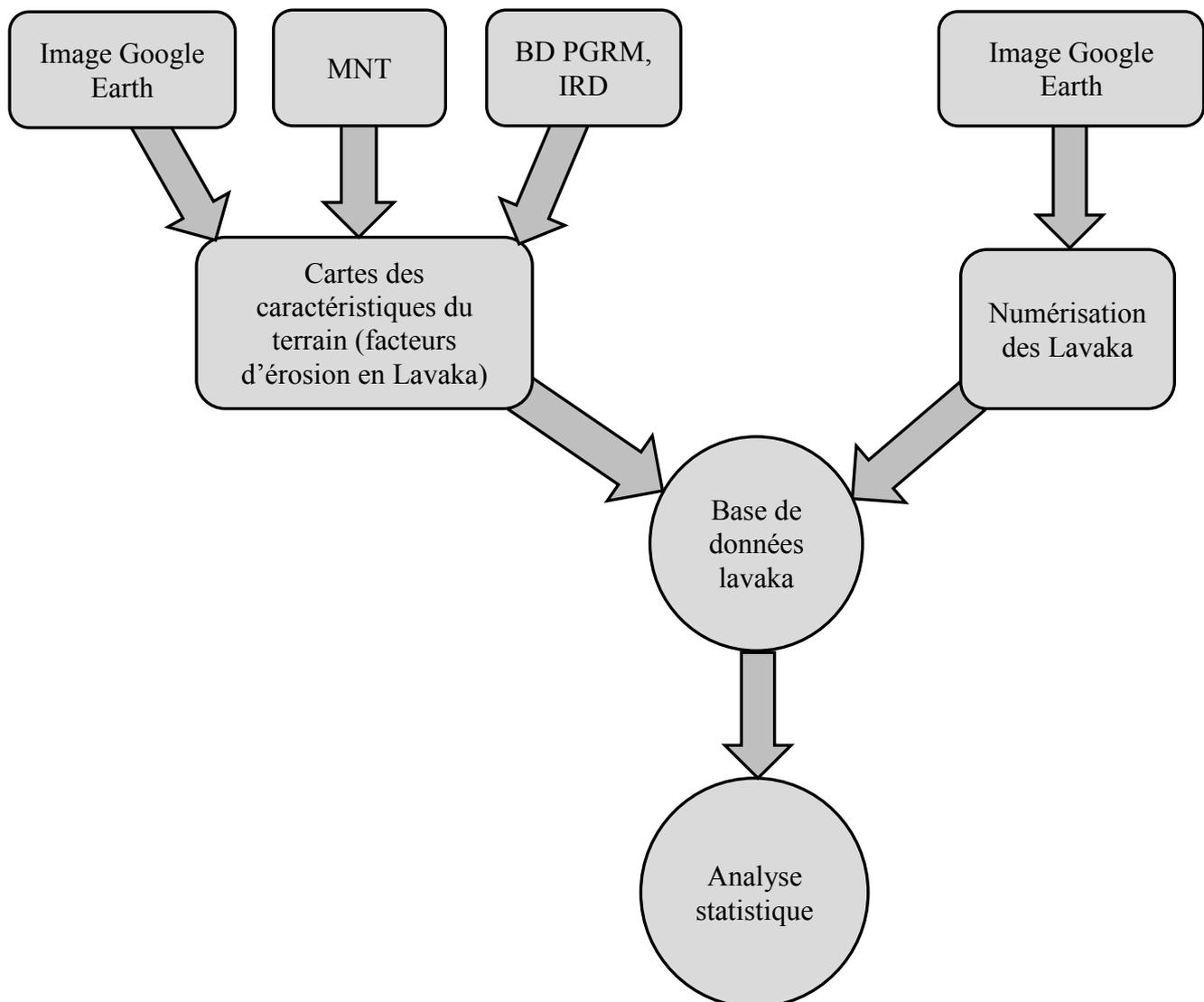


Figure 10 : Organigramme des étapes suivies

III.1. ANALYSE STATISTIQUE

La statistique est une discipline mathématique qui a pour objet l'analyse, le traitement et l'interprétation de données d'observation collectées afin de les rendre plus compréhensibles. Dans notre travail, l'analyse statistique va nous aider à extraire à partir des données des informations qui peuvent ne pas être évidentes en regardant seulement par exemple une carte relative aux facteurs de lavakisation. On peut retrouver en annexe 3 un rappel des indicateurs statistiques standard.

Ces analyses statistiques seront effectuées sur des valeurs issues d'une base de données qu'on a pu élaborer à partir de ces éléments considérés comme facteurs de la formation des lavaka sur l'ensemble de la zone d'étude.

Les constituants de cette base de données sont des variables quantitatives et qualitatives. Il est donc possible d'effectuer cette analyse statistique sur ces données qui seront considérées comme une série statistique de données pour avoir une idée de cette influence que peut avoir ces facteurs sur la formation des lavaka ainsi que les relations qui peuvent exister entre eux à partir d'une régression linéaire.

Des transformations ou approximations seront effectuées sur certaines variables pour qu'ils suivent une loi normale afin de connaître la probabilité d'apparition d'un lavaka selon chaque facteur de formation.

III.1.1. Loi normale

C'est une loi statistique continue que Gauss a conçu et appelée loi normale ou loi de Laplace-Gauss, sa fonction de répartition est représentée par une courbe en cloche. L'adjectif normale s'explique par le fait que cette loi décrit et modélise des situations statistiques aléatoires concrètes et naturelles. Cette loi dépend de deux paramètres : la moyenne et l'écart-type de la série statistique, les détails de leurs définitions et acquisitions seront en annexe 3.

La fonction de densité de cette loi normale est donnée par la formule suivante :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Equation 1: Loi normale

σ étant l'écart-type et μ la moyenne.

Pour démontrer la normalité ou non d'une distribution, de nombreuses méthodes de test existent. Ce qui nous intéresse dans notre travail c'est le test de Kolmogorov-Smirnov à cause du nombre très élevé des données. On peut retrouver en annexe 4 des détails sur les tests de normalité.

III.1.2. Probabilité d'apparition d'un lavaka selon des variables quantitatives

L'idée est basée sous les hypothèses suivantes :

- Hypothèse 1 : Les n variables quantitatives ($X_i, 1 \leq i \leq n$) sont chacune distribuées suivant une loi normale. Si chaque variable X_i suit une loi normale de moyenne μ_i et d'écart-type σ_i , sa fonction de densité est donc :

$$f_i(x) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2}$$

Équation 2: Probabilité d'apparition d'un lavaka selon un facteur

- Hypothèse 2 : Les n variables sont deux à deux indépendantes

Ainsi, $\forall i \neq j$ on aura : $P(X_i \cap X_j) = P(X_i) * P(X_j)$

De même, avec les densités de probabilité, on aura : $f(x_1, x_2) = f(x_1) * f(x_2)$

Si ces deux conditions sont satisfaites alors, pour les n variables, la densité de probabilité sera :

$$\begin{aligned} p &= f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = f(x_1) * f(x_2) * f(x_3) * \dots * f(x_n) \\ &= \prod_{i=1}^n f(x_i) \\ p &= \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2} \end{aligned}$$

Equation 3 : Probabilité d'apparition d'un lavaka selon plusieurs facteurs

Il reste donc à vérifier si :

- Hypothèse 1 : les variables quantitatives (les altitudes, les pentes, les courbures, les distances par rapport aux cours d'eau, les distances par rapport aux zones habitées et les distances par rapport aux structures tectoniques) sont normalement distribuées.
- Hypothèse 2 : Elles sont deux à deux indépendantes. On va calculer les coefficients de corrélation r entre chaque variable quantitative pour avoir une idée de leurs indépendances. On peut retrouver en annexe 3 les méthodes pour calculer la corrélation entre deux variables.

III.1.3. Les approximations et transformations

Tous les variables ne suivent pas obligatoirement une loi normale. On a donc jugé nécessaire d'appliquer des approximations ou des transformations sur ces variables pour avoir une distribution qui suit une loi normale. Dans notre cas, on a eu recours à deux méthodes de transformation des données qui sont :

- **Mise sous racine carrée :**

Elle consiste à mettre tous les valeurs sous racine carrée puis de reprendre avec les nouvelles valeurs transformées qui suivent une distribution normale tous les calculs nécessaires. On aura donc des nouvelles valeurs des moyennes et des écart-types de la variable.

$$y' = \sqrt{y}$$

y : variables initiales
y' : variables transformés

- **Le calcul des rangs fractionnaires des données :**

Elle consiste à transformer des variables continues distribuées non normalement pour devenir normalement distribué. Cette transformation se fait en deux étapes (Templeton 2011) :

- L'étape 1 consiste à transformer la variable en un rang fractionnaire c'est-à-dire l'inverse de son rang, ce qui se traduira par des probabilités uniformément réparties. Pour rappel, le rang d'une variable est son classement correspondant à sa valeur suivant un ordre croissant.

- La deuxième étape applique la transformation inverse-normale aux résultats de l'étape 1 pour former une variable constituée de valeurs normalement distribués. Cette étape a été réalisée à l'aide d'un logiciel d'analyse statistique (cf. annexe 1), l'acquisition de ces valeurs normales sera dirigée en annexe 4.

III.1.4. Calcul des intervalles des zones à risques (probabilité d'apparition d'un lavaka)

Ce calcul consiste à retrouver les zones favorables ou à risque à la formation des lavaka. En effet, les lavaka seront distribués différemment selon les facteurs de formation qui sont considérés comme des variables. Les zones à risque dépendront donc de chacun de ces facteurs. Le calcul s'effectue avec l'intégrale suivant :

$$f(x) = \int_a^b \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2}$$

Equation 4 : Probabilité d'apparition d'un lavaka correspondant au zone à risque

- $f(x)$ étant la probabilité d'apparition de lavaka selon un facteur,
- σ l'écart-type et μ la moyenne du variable.
- les bornes a et b : intervalle du zone à risque

Pour que les valeurs de a et b soient les bornes de la zone à risque selon un facteur, on doit effectuer un calcul inverse. Pour qu'une zone soit qualifiée « à risque », $f(x)$ doit être supérieur ou égal à 0,5, il faut donc retrouver les valeurs de a et b qui correspond à $f(x) \geq 0,5$. L'intervalle $[a ; b]$ étant l'intervalle la plus petite qui donne $f(x) \geq 0,5$.

III.1.5. Régression linéaire

La régression linéaire permet d'avoir une idée sur les relations ou influences que peuvent avoir chaque facteur (variables) les uns sur les autres. Ainsi, on pourrait avoir une idée générale sur leur influence d'ensemble et on pourrait établir à la fin un ordre de significativité de ces facteurs sur la formation des lavaka.

Tous les facteurs seront considérés un à un comme variable expliquée par les autres variables restantes. Les résultats seront résumés dans des tableaux montrant :

- les coefficients de détermination (R^2 ajusté) avec lesquels on pourrait avoir le taux d'influence que peuvent avoir les variables explicatives sur la variable expliquée,
- la significativité (sign.) qui est associé aux variables explicatives pour mesurer si elles ont une influence significative ou non sur la variable expliquée. Si sa valeur est inférieure à 0,05 alors l'influence sera considérée comme significative,
- les coefficients non standardisés (A) afin de montrer si l'influence que peuvent avoir les variables explicatives évoluent dans le même sens ou pas avec la variable expliquée,
- la statistique t de Student associé aux variables explicatives avec lesquels on pourra établir un ordre croissant de leur significativité en comparant la valeur absolue de t .

III.2. ELABORATION DES CARTES

C'est une étape obligatoire pour le bon déroulement du travail. Que ce soit pour la présentation dans l'ouvrage ou pour les superpositions des données cartographiques avec les lavaka ou encore pour les diverses interprétations, les cartes sont indispensables.

III.2.1. Carte géologique et structurale

On a essentiellement utilisé les données issues de la base de données de la PGRM en 2012. A partir d'un logiciel SIG, on a pu sélectionner les données utiles à l'élaboration d'une carte géologique et structurale de notre zone d'étude (cf. figure 7, page 19).