

Analyse des données géochimiques par méthodes statistiques multivariées, cas d'exploration minière au Nord-Ouest de Madagascar

Rakotondramano Heliarivonjy^{1,2,*} ; Razafindrakoto Boni^{2,3} ; Farasoa Jedidia^{1,3} ; Rasolomanana Mahefa¹

1 : ED Ingénierie et géosciences, Université d'Antananarivo

2 : Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo

3 : Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

*Auteur correspondant : Tél. & WhatsApp : +261 34 46 340 46 ; E-mail : vonjyrak@gmail.com

Résumé- Des échantillonnages géochimiques Stream sediment ont été effectués dans la Région Melaky, District Besalampy. Géologiquement, elle est marquée par deux types de formations géologiques majeures dont le dôme cristallin de Bekodoka dans la partie orientale et les séries sédimentaires du Bassin de Mahajanga dans la partie occidentale. Les analyses géochimiques des 34 éléments ont été réalisées par Spectrographie de plasma (ICP-MS) et de Spectrographie de Fluorescence de Rayon X (XRF). La méthode statistique monovariée a été utilisée dans le calcul du seuil d'anomalie géochimique tandis que la méthode statistique multivariée composée de la corrélation de Pearson et de l'analyse factorielle réside sur la mise en évidence de liaison existant entre les éléments chimiques et leur classification selon leurs concordances avec les axes factoriels. Ces méthodes ont été utilisées dans le but de spécifier les formations géologiques à haut potentiel de minéralisation et de visualiser d'éventuelles associations d'éléments au sein d'une formation géologique spécifiée.

Selon l'étude effectuée, 15 éléments chimiques dominent la zone d'investigation. Parmi ces 15 éléments chimiques figurent : Fe, Mn, V, Ni, Cr, Cu, Co, Cd, Zn, Ti, La, Nd, Y, Nb et Ce. Six zones à haut potentiels miniers ont été localisées dans la zone d'investigation. Ces 6 zones méritent une exploration plus avancée pour mieux vérifier leurs potentialités en matière de minéralisation.

Mots-clés : Melaky, géologie, géochimie, minéralisation, statistique, monovariée, multivariée

Abstract- Stream sediment geochemical sampling was carried out in the Melaky Region, Besalampy District. Geologically, it is marked by two types of major geological formations including the crystalline dome of Bekodoka in the eastern part and the sedimentary series of the Mahajanga Basin in the western part. Geochemical analyzes of the 34 elements were performed by Plasma Spectrography (ICP-MS) and X-ray Fluorescence Spectrography (XRF). The monovariée statistical method was used in the calculation of the threshold of geochemical anomaly while the multivariée statistical method composed of the Pearson correlation and the factorial analysis resides on the demonstration of link existing between the chemical elements and their classification according to their concordances with the factorial axes. These methods were used to specify geologic formations with high mineralization potential and to visualize possible association of elements within a specified geologic formation.

According to the study carried out, 15 chemical elements dominate the area of investigation. These 15 chemical elements include: Fe, Mn, V, Ni, Cr, Cu, Co, Cd, Zn, Ti, La, Nd, Y, Nb and Ce. Six areas with high mining potential have been located in the investigation area. These 6 zones merit further exploration to better verify their mineralization potential.

Keywords- Melaky, geology geochemistry, mineralization, statistics, monovariée, multivariée

1. Introduction

Il est incontestablement vrai que le développement d'un pays repose sur l'exploitation de ses ressources. Dans le cas de l'île de Madagascar, elle abrite d'innombrables ressources naturelles biologiques et minérales. Pourtant, l'île est sous-explorée, la plupart des données géologiques du pays date des années 50.

Dans le cadre de la réactualisation des données géologiques de Madagascar, une campagne de prospection géochimique Stream sediment a été menée dans le District de Besalampy. 34 éléments chimiques stratégiques font l'objet de cette investigation. La zone d'investigation est située dans la zone de contact entre l'affleurement du socle cristallin de Bekodoka et les séries sédimentaires du Bassin de Mahajanga. Tout au long de cet article, on cherche s'il existe des formations géologiques porteuses de minéralisation dans la zone en précisant leurs coordonnées géographiques respectives.

Dans l'établissement de cette étude, quatre objectifs ont été élaborés dont :

- la détermination des formations géologiques porteuses de minéralisation
- l'établissement des cartes d'indices métallogéniques éventuelles
- la caractérisation des anomalies géochimiques
- la délimitation des zones à haut potentiel minier

2. Situation géographique

La Région Melaky se situe dans la partie Centre-Ouest de la Grande Ile. Elle regroupe cinq districts : Besalampy, Maintirano, Morafenobe, Ambatomainty et Antsalova. Maintirano est la capitale de la Région. La zone d'étude se trouve dans le District de Besalampy.

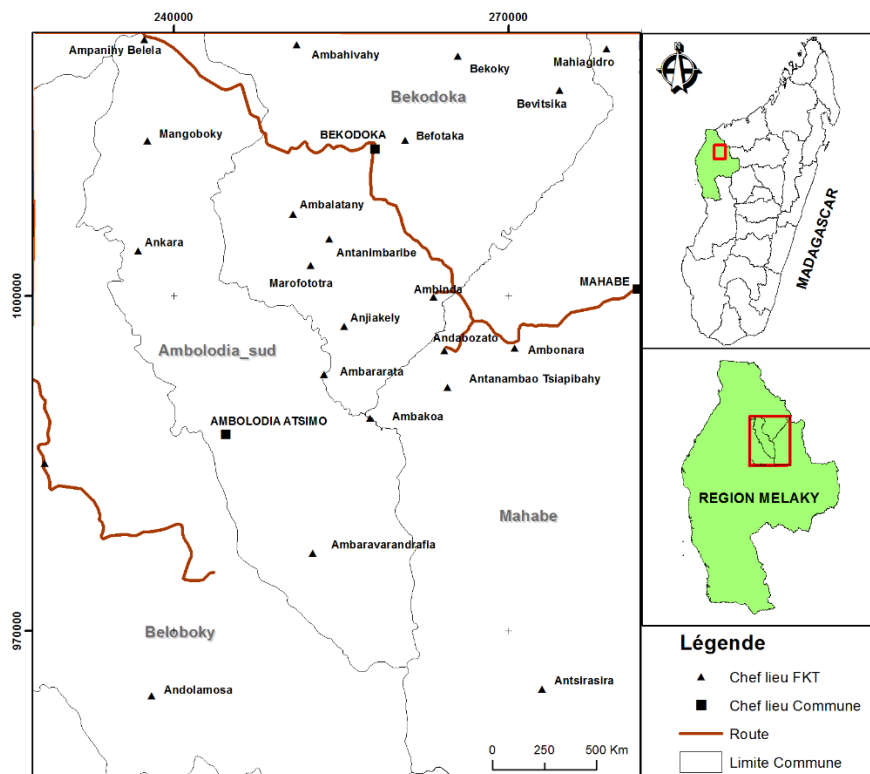


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude (Source : BD 100, FTM)

Elle est délimitée au Nord par le District de Soalala (*Région Boeny*), au Sud par les Districts de Morafenobe et d'Ambatomainy, à l'Est par le District de Kandrehô (*Région Betsiboka*) et à l'Ouest par le District de Maintirano. Administrativement, 7 communes appartiennent à la zone d'étude. Elle s'étend sur une superficie de 38.852 km² et approximativement se situe à 600km au Nord-Ouest de la Capitale Antananarivo.

3. Contexte géologique

La zone d'étude fait partie des six feuilles géologiques à l'échelle 1/100 000 à savoir : GHI4243. Elle est composée de deux parties telles la partie du socle cristallin et celle de la partie sédimentaire.

3.1. Socle cristallin

❖ Massifs d'Ambohitrosy au Nord

Le complexe de l'anneau d'Ambohitrosy pénètre dans les parties Nord du champ volcanique de Maningoza à environ 40 Km au Sud-Est du Cap Saint André. Il est composé de : gabbros, noyau de granite et de syénite, monzonite et d'anneaux de micro gabbros.

❖ Champs Volcaniques de Maningoza (CVM) au Nord-Ouest qui se subdivise en cinq composants lithostratigraphiques principaux :

- formation de Sambao : constitue l'unité la plus basse et répandue du CVM. Elle est composée de basalte et de rhyolite ;
- formation d'Antongobory : composée de rhyolite, de dacite et de trachyte ;
- formation d'Antanetilava : composée de basalte, trachyte, dacite et de rhyolite ;
- formation d'Ambolodia : forme l'unité volcanique la plus élevée du Sud CVM. Elle est composée de trachyte, andésite, basalte ;
- formation de Sahondra : forme l'unité volcanique la plus élevée du Nord CVM. Elle est composée de basalte et de gabbros.

❖ Pénéplaine de Bekodoka à l'Est située dans la partie Est de la zone d'étude. Elle comprend une partie du domaine d'Antananarivo, une partie de la feuille de Tsaratanàna et une partie de la ceinture d'Itremo-Ikalamavony :

- les orthogneiss granodioritiques polydéformés et fortement migmatitiques de la suite néoarchéenne de Betsiboka (*appelé gneiss de Miako 2529 Ma*) dominant le domaine d'Antananarivo dans les parties Sud de la fenêtre du socle cristallin ;
- les deux tiers de la partie Nord de la pénéplaine de Bekodoka reposent sur des méta-roches vertes du groupe néoarchéen Ambohipaky au faciès amphibolite de la feuille de Tsaratanàna. Les types de roches comprennent les gneiss et schistes mafiques, ultramafiques et quartzo-feldspathiques et les métaquartzites à magnétite ;
- les affleurements de la ceinture protérozoïque Itremo-Ikalamavony sont limités à une petite région dans les parties Sud-Ouest de la pénéplaine et se composent principalement de marbre d'Itremo, de quartzite et d'amphibolite qui sont séparés des gneiss du domaine d'Antananarivo.

D'autres formations géologiques sont aussi présentes telles que : Bekodoka type granitique orthogneiss au Nord, Anahidrano type hornblende monzogranite au centre, Beda Sub suite gabbros et d'Ankarandohakomely diorite orthogneiss.

- ❖ Complexe d'Ankibobozaka à l'Ouest, petit complexe de diamètre 4,5km empiète sur la formation basaltique d'Ambolodia dans la partie Sud du CVM. Il est composé de microsyénite, microgranite et de microgabbro.
- ❖ Ambohibeory, structure circulaire de 5 km de diamètre constitue un pic en forme de dôme situé au centre d'une grande structure annulaire sous-volcanique. Il est composé de rhyolite, trachyte et de dacite.
- ❖ Complexe de Berevo au Sud d'un diamètre d'environ 12 km, est située au Sud de la zone d'étude. Il est composé de gabbro, microgranite, microsyénite, granodiorite et de quartzite ferrugineux.

3.2. Roches sédimentaires

La couverture sédimentaire (Fig. 2) est composée surtout :

- de calcaires, grès, argiles et des marnes qui sont situées dans la partie Ouest en s'allongeant suivant la direction Nord-Sud
- de grès à structures entrecroisées et conglomérats, bois pétrifiés fréquents et bitume localisé, situés dans la partie Est en traversant la pénéplaine de Bekodoka suivant la direction Nord-Est Sud-Ouest.

4. Méthodologie

4.1. Statistique multivariée

En statistique, les analyses multivariées ont pour caractéristiques de s'intéresser à des lois de probabilités à plusieurs variables. Les analyses multivariées sont très diverses selon l'objectif recherché, la nature des variables et la mise en œuvre formelle. Les méthodes statistiques se répartissent en deux catégories : les statistiques exploratoires ou descriptives et les statistiques inférentielles.

La statistique descriptive ou statistique exploratoire est un ensemble de méthodes permettant de décrire, présenter et résumer l'information contenu dans les données, de façon synthétique et efficace. Parmi ces méthodes figurent les représentations graphiques, les tableaux d'indicateurs numériques (*variance, moyenne*). Elle permet en même temps de fournir les caractères essentiels des phénomènes étudiés et de suggérer les hypothèses pour les études ultérieures. Les probabilités ne jouent qu'un rôle mineur dans ce genre de statistique.

La statistique inférentielle est un ensemble de méthode statistique permettant de faire des prévisions, des estimations. Elle est un outil performant de prise de décision. Elle utilise dans son ensemble les modèles probabilistes.

Dans le cas où on s'intéresse à mesurer plusieurs variables sur les mêmes individus, on parle de la statistique descriptive multidimensionnelle ou multivariable.

4.3. Statistique descriptive monovariante

4.3.1. Les indicateurs statistiques de tendance centrale

Ce sont des paramètres statistiques de position comme la moyenne arithmétique, la moyenne géométrique, la moyenne harmonique, les valeurs extrêmes et la valeur médiane.

- **La moyenne arithmétique** est définie par :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- **La moyenne géométrique**, elle est appliquée à des grandeurs à croissance géométrique exponentielle. Elle est donnée par la relation :

$$G = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} \Rightarrow \ln(G) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i)$$

- **La moyenne harmonique** représente l'inverse de la moyenne arithmétique des inverses des valeurs.

$$H = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}} \quad \text{ou} \quad H = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{f_i}{x_i}}$$

- **Les valeurs extrêmes** sont définies par la plus petite valeur $x_1 = \min x_i$ et la plus grande valeur $x_n = \max x_i$ des valeurs observés.
- **La valeur médiane** notée M est un réel tel que 50% des données sont inférieure à Me et 50% des données sont supérieure à 50%.

$$\frac{Me - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} = \frac{0,5 - F_{i-1}}{f_i} \Rightarrow Me = x_{i-1} + (x_i - x_{i-1}) \cdot \frac{0,5 - F_{i-1}}{f_i}$$

4.3.2. Les indicateurs statistiques de dispersion

Parmi les indicateurs de dispersion figurent le coefficient de variation, la variance et la déviation standard.

- **La variance** est définie par la moyenne arithmétique des carrés des écarts à la moyenne arithmétique.

$$\text{var}(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

- **La déviation standard** ou écart type est définie par la racine carré de la variance

$$s_X = \sqrt{\text{var}(X)}$$

- **Le coefficient de variation CV** est donné par le rapport entre l'écart type et la moyenne arithmétique. Il est souvent mesuré en pourcentage.

$$CV = \frac{Ma}{s_X} \times 100$$

4.3.3. Limite inférieure d'anomalie ou seuil d'anomalie

La méthode statistique monovariante est non seulement un moyen incontournable dans le calcul du seuil d'anomalie géochimique mais aussi une méthode de visualisation globale des données. Pour connaître la distribution de chaque élément chimique, les conditions ci-dessous sont établies :

- ❖ Si $M-2S_0 > 0$ la distribution suit une loi normale
- ❖ Si $M-2S_0 < 0$ la distribution suit une loi lognormale

avec M : moyenne S_0 : écart type

Dans le cas d'une distribution normale, le seuil d'anomalie d'un élément chimique est alors calculé par la formule dite formule de l'écart type : $A = M + 2S_0$ (1)

avec A : Anomalie M : Moyenne S_0 : écart type

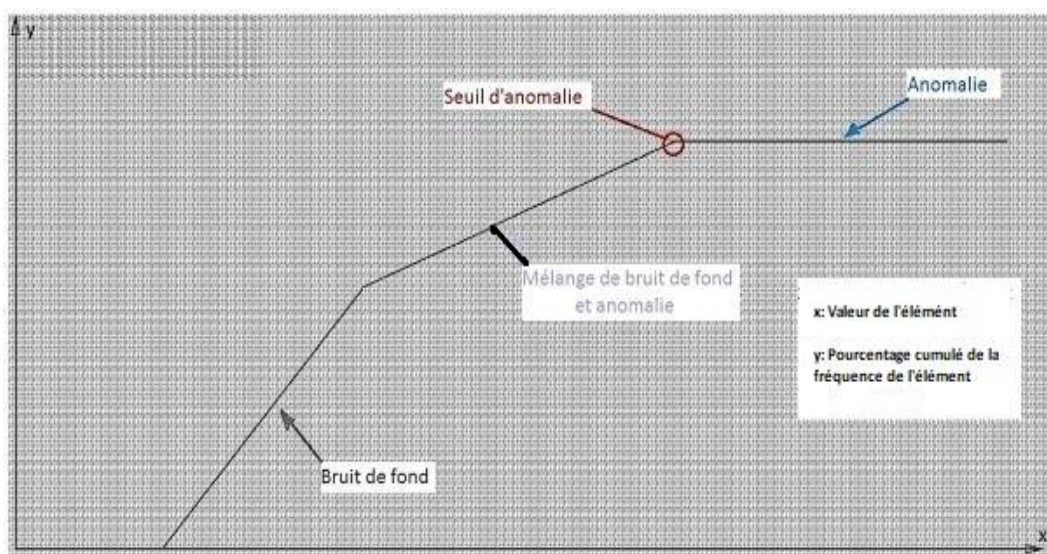


Figure 3. Courbe de fréquence cumulée ou fonction de répartition empirique

Pourtant, si la distribution de l'élément suit une loi lognormale, le seuil d'anomalie est obtenu à partir de l'établissement de la courbe des fréquences cumulé ou fonction de répartition empirique tout en éliminant les bruits de fond. Cette courbe est obtenue à partir du logiciel Xlstat en estimant la valeur des quartiles correspondant à chaque fréquence cumulée. Le seuil d'anomalie sera alors déterminé comme l'indique la figure 3 selon la valeur de l'abscisse x correspondant à la valeur de la fréquence concernée.

4.4. Statistique descriptive multivariante

La statistique descriptive multidimensionnelle ou multivariante se définit comme étant un ensemble des méthodes et techniques de la statistique exploratoire ou descriptive permettant de traiter de façon simultanée un grand nombre de variables. Cette méthode aboutisse à la représentation graphique des variables et des individus. Mais on sait qu'un individu représente une ligne du tableau et un point dans un espace à K dimensions (*variables*).

Si $K=1$, nous avons une représentation axiale
 $K=2$, on aura un nuage des points
 $K=3$, c'est une représentation 3D
 et si $K \geq 4$ comment faire ?

Les méthodes factorielles interviennent lorsque $K \geq 4$, elles consistent à rechercher des facteurs en nombre restreint afin qu'on puisse résumer les données de façon optimale. Elles permettent de représenter graphiquement ces données à l'aide de ces facteurs qui se sont représentés par des axes factoriels. Les méthodes factorielles se distinguent selon le type de variable :

- variables quantitatives : ACP ou analyse en composante principale
- deux variables qualitatives : AFC ou analyse factorielle des correspondances
- plusieurs variables qualitatives : ACM ou analyse des composantes multiples

Dans la pratique, la méthode statistique multivariable permet d'étudier les liaisons entre les éléments chimiques afin de déterminer les occurrences de minéralisations éventuelles. Dans cette étude, nous utilisons la corrélation de Pearson et l'analyse factorielle simple pour mieux explorer les données géochimiques provenant de la campagne Stream sediment de la zone d'étude.

4.4.1. Le coefficient de corrélation de Pearson ρ

La première méthode multivariable utilisée est la corrélation de Pearson. La particularité de cette méthode réside sur la mise en évidence de liaison existant entre les éléments chimiques à partir de la valeur du coefficient de corrélation ρ .

Après avoir calculé les coefficients de corrélation, il est important de les classer selon leurs degrés de corrélations. Alors, on cherche la valeur minimum de coefficient de corrélation significatif (r_0).

$$r_0 = \sqrt{t^2 / t^2 + (n - 2)} \quad (2)$$

avec t : Valeur de la variable de Student n : nombre d'échantillon au seuil de probabilité 95% ($t= 1.975$). Les coefficients de corrélation sont donc classés en coefficients faibles, moyens, forts et très forts en tenant compte de la valeur des paramètres r_0 et f .

$$\text{où } f = (1 - r_0) / 4 \quad (3)$$

Tableau 1: Type de corrélation

Intervalle	Type de corrélation
r_0 à $r_0 + f$	Faible
$r_0 + f$ à $r_0 + 2f$	Moyenne
$r_0 + 2f$ à $r_0 + 3f$	Fort
$r_0 + 3f$ à $r_0 + 4f$	Très fort

4.4.2. Analyse Factorielle

L'analyse factorielle permet de classer les éléments chimiques selon leurs concordances avec les axes factoriels. A l'issue de cette méthode, nous pouvons avoir une idée sur les répartitions géochimiques des éléments sur la zone ainsi que leurs associations respectives.

Il existe plusieurs types de méthode d'analyse factorielle à savoir : l'analyse factorielle simple, l'analyse factorielles des correspondances, l'analyse en composante multiple, l'analyse en composante principale... En commun les méthodes d'analyses factorielles sont utilisée dans le but de décrire un ensemble de variables observées, au moyen de variables latentes c'est-à-dire variable non observées ou axes factoriels. Pour réduire le nombre de variables, la méthode calcule ces variables latentes comme combinaisons linéaires des variables observées.

La méthode factorielle la plus adaptée pour notre cas sera la méthode d'analyse factorielle simple. Pour cela il suffit de décrire les variables éléments chimiques en fonction de ses corrélations avec les axes factoriels pour qu'on puisse déduire d'éventuelle associations d'éléments chimiques selon leurs affinités avec les axes factoriels.

5. Résultats

Cette partie présente les résultats de l'étude en indiquant les éléments chimiques qui dominent la zone étudiée ainsi que leur formation géologique appropriée. Les méthodes d'analyses différent selon l'élément chimique analysé. Les méthodes d'analyses chimiques utilisés sont : la spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-MS) et la Spectrométrie par Fluorescence des Rayons X notée XRF.

Tableau 4: Les méthodes d'analyse chimique

Méthode d'analyse	Elément chimique	Précision
Spectrographie de plasma (ICP-MS)	V, Mn, Cu, Mo, Ag, Sb, Te, Ba, Pb, Bi, Cr, Co, Cd, Th	Ppb (mg/Tonne)
Spectrographie de fluorescence de rayon X (XRF)	U, Ni, Rb, Sr, Zr, Yb, C, As, Nb, Sn, Ce, W, Zn, Ti, Fe, La, Nd, Y	Ppm ou (g/Tonne) pour les éléments mineurs % pour Ti et Fe

Pour les éléments Au et Hg, on n'a pas d'information sur leurs méthodes d'analyses respectives. L'unité de précision de ces deux éléments est le ppb ou mg/Tonne.

5.1. Résultats obtenus de la statistique monovariante

Le tableau suivant représente les paramètres statistiques des 34 éléments chimiques analysés dans la zone d'étude.

Tableau 2: Paramètre statistique des éléments chimiques

Elément	Minimum	Maximum	Médiane (Me)	Moyenne (M)	Ecart-type (S ₀)	Clarke	M/Clarke
V	17,917	1033,845	185,716	226,448	143,255	120	1,887
Mn	33,017	13765,319	1021,161	1482,107	1534,620	1050	1,412
Cu	5,114	353,675	47,377	62,39	48,717	60	1,04
Mo	1	4,761	1,328	1,457	0,547	1,2	1,214
Ag	0,025	0,158	0,062	0,064	0,0218	0,075	0,851
Sb	0,025	0,561	0,025	0,041	0,049	0,2	0,207
Te	0,025	0,293	0,036	0,043	0,0238	0,001	43,444
Ba	14,199	2098,676	174,91	203,257	147,045	425	0,478
Pb	1,536	66,259	14,164	15,198	8,039	14	1,085

Bi	0,01	0,911	0,039	0,053	0,0604	0,0085	6,243
Cr	10,32	1470,768	136,384	167,829	156,286	102	1,645
Co	2,407	218,304	31,257	38,336	28,264	25	1,533
Cd	0,025	0,367	0,047	0,060	0,044	0,15	0,400
Th	0,619	52,401	6,066	8,0131	5,953	9,6	0,835
Zn	10,37	190,44	71,85	74,521	26,829	70	1,065
As	0	26,94	1,86	2,169	2,220	1,8	1,205
Y	9,54	115,41	26,345	29,509	13,784	33	0,894
Nb	1,21	50,09	10,59	11,996	6,219	20	0,600
Sn	0	5,89	1,07	1,233	1,179	2,3	0,536
La	2,28	182,94	35,61	37,159	17,356	39	0,952
Ce	7,94	480,56	78,075	83,243	42,973	66,5	1,252
W	0	899,78	0,97	6,295	56,554	1,25	5,036
U	0	9,14	1,51	1,666	1,292	2,7	0,617
Ti	0,46	4,66	1,17	1,342	0,562	0,56	2,396
Fe	2,1	25,23	11,62	11,843	3,923	5,63	2,103
Ni	9,74	625,12	70,785	80,813	62,770	84	0,962
Rb	0,68	129,58	21,79	28,9	25,045	90	0,321
Sr	5,65	355,29	43,16	51,284	38,116	370	0,139
Zr	41,74	4428,03	444,58	593,473	543,221	165	3,597
Nd	9,79	142,1	35,735	37,904	14,921	41,5	0,913
Yb	0	19,88	2,015	2,374	2,351	3,2	0,742
Hg	0	461,79	108,345	130,088	70,196	0,085	1,530
Au	0	96,76	1,18	1,979	5,259	0,004	0,495
C	0,2	6,31	0,8	0,989	0,679	200	0,005

Note : Unité Fe et Ti en %, Au et Hg en ppb, les autres éléments en ppm

Les moyennes de tous les éléments chimiques sont supérieures à leurs valeurs médianes. Ceci traduit que la distribution des teneurs est de déviation gauche. Les caractéristiques d'enrichissement et d'appauvrissement sont déduits à partir de la comparaison entre la moyenne et l'abondance crustale ou Clarke de chaque élément chimique.

- Si $M/Clarke > 1$, un élément présente un caractéristique d'enrichissement, c'est le cas de 17 éléments chimique à savoir V, Mn, Cu, Mo, Te, Pb, Bi, Cr, Co, Zn, As, Ce, W, Ti, Fe, Hg et Zr.
- Si $M/Clarke < 1$, un élément présente un caractéristique d'appauvrissement, c'est le cas des éléments suivant : Ag, Sb, Ba, Cd, Th, Y, Nb, Sn, La, U, Ni, Rb, Sr, Nd, Yb, Au et C.

Le tableau 3 ci-après donne un aperçu sur les distributions de chaque élément chimique.

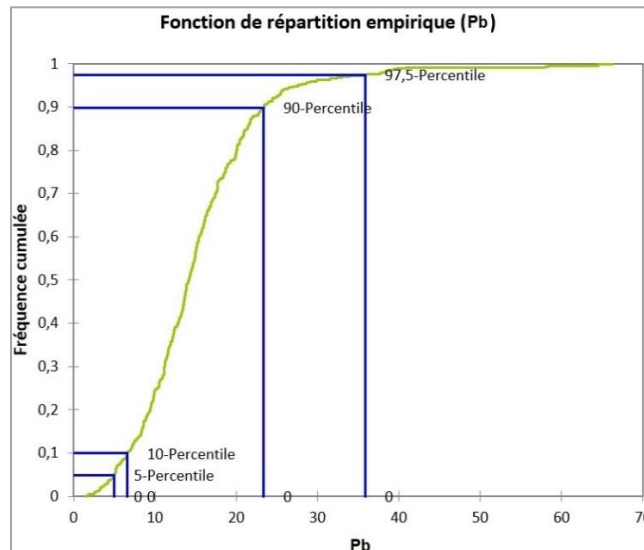
Tableau 3: Distribution des éléments chimiques

Élément	M - 2*S0	Distribution
V	-60,062	lognormale
Mn	-1587,132	lognormale
Cu	-35,044	lognormale
Mo	0,362	normale
Ag	0,0203	normale
Sb	-0,0562	lognormale
Te	-0,0041	lognormale
Ba	-90,8332	lognormale
Pb	-0,880	lognormale
Bi	-0,0678	lognormale
Cr	-144,743	lognormale
Co	-18,192	lognormale
Cd	-0,0281	lognormale
Th	-3,894	lognormale
Zn	20,862	normale
As	-2,271	lognormale
Y	1,942	normale
Nb	-0,441	lognormale
Sn	-1,124	lognormale
La	2,447	normale
Ce	-2,703	lognormale
W	-106,814	lognormale
U	-0,917	lognormale
Ti	0,218	normale
Fe	3,997	normale
Ni	-44,728	lognormale
Rb	-21,190	lognormale
Sr	-24,947	lognormale
Zr	-492,968	lognormale
Nd	8,062	normale
Yb	-2,328	lognormale
Hg	-10,304	lognormale
Au	-8,539	lognormale
C	-0,370	lognormale

Le tableau 3 montre que les éléments chimiques Mo, Ag, Zn, Y, La, Ti, Nd et Fe suivent une distribution normale. Le seuil d'anomalie de ces éléments sont calculés par la méthode de l'écart type.

En poursuivant l'observation du tableau 3, 26 éléments chimiques suivent une distribution lognormale à savoir : V, Mn, Cu, Sb, Te, Ba, Pb, Bi, Cr, Co, Cd, Th, As, Nb, Sn, Ce, W, U, Ni, Rb,

Sr, Zr, Yb, Hg, Au et C. Le seuil d'anomalie pour les éléments qui suivent une distribution lognormale est pourtant déterminé par la courbe des fréquences cumulées.



Graph e i: Exemple de courbe de répartition empirique (*Plomb*)

Le Graphe i montre la courbe de fréquence cumulée ou courbe de répartition empirique de l'élément chimique Pb. Le seuil d'anomalie est ici déterminé par la valeur de l'abscisse x correspondant au quartile 97,5%. Le seuil d'anomalie de l'élément Pb est donc la valeur 35,837 g/Tonne.

Après avoir déterminé les lois de distributions de chaque élément chimique, on passe tous de suite à la présentation des résultats de calcul du seuil d'anomalie.

Tableau 4: Seuil d'anomalie

Elément	V	Mn	Cu	Sb	Te	Ba	Pb	Bi	Cr
Seuil d'anomalie	623,764	5258,444	204 ,280	0,158	0,092	493,028	35,837	0.159	510.502
Elément	Co	Cd	Th	As	Nb	Sn	Ce	W	U
Seuil d'anomalie	113,585	0,185	23,422	6,866	26,632	3,604	171,224	3,486	5,006
Elément	Ni	Rb	Sr	Zr	Yb	Hg	Au	C	Mo
Seuil d'anomalie	253,12	99,142	147,124	2309,866	7,198	329,826	6,89	2,75	2,552
Elément	Ag	Zn	Y	La	Ti	Fe	Nd		
Seuil d'anomalie	0.107	128.179	57.076	71.87	2.466	19.688	67.747		

Note : Fe et Ti en %, Au et Hg en ppb (mg/Tonne), les autres éléments en ppm (g/Tonne)

Dans toute la zone, on a compté 464 points d'anomalies positives provoquées par ces 34 éléments chimiques.

5.2. Résultats de l'étude statistique multivariable

Deux méthodes d'analyses statistiques multivariées ont été utilisées dans le traitement des données géochimiques Stream sediment issues de la zone d'investigation.

5.2.1. Coefficient de corrélation de Pearson

Au seuil de probabilité de 95%, la variable de Student t prend la valeur 1,975. Avec 464 échantillons, r_0 est égale à 0,091 et la valeur du paramètre f est de 0,227.

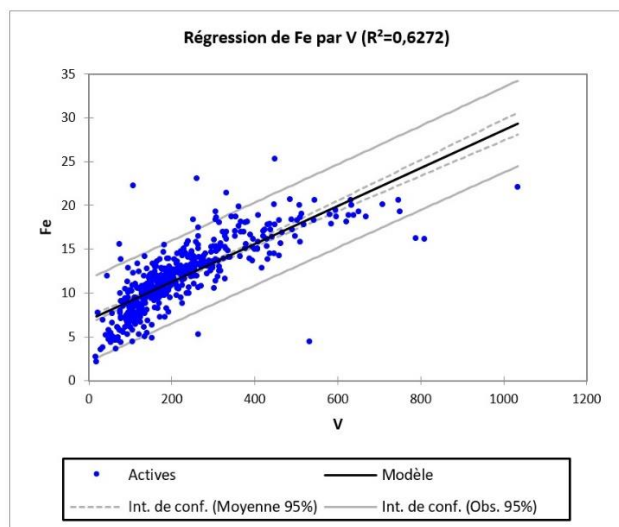
Tableau 5: Valeur de r_0

Intervalle	Type de corrélation	Valeur de r
r_0 à $r_0 + f$	Faible	$0,091 < r \leq 0,318$
$r_0 + f$ à $r_0 + 2f$	Moyenne	$0,318 < r \leq 0,545$
$r_0 + 2f$ à $r_0 + 3f$	Fort	$0,545 < r \leq 0,772$
$r_0 + 3f$ à $r_0 + 4f$	Très fort	$0,772 < r \leq 1$

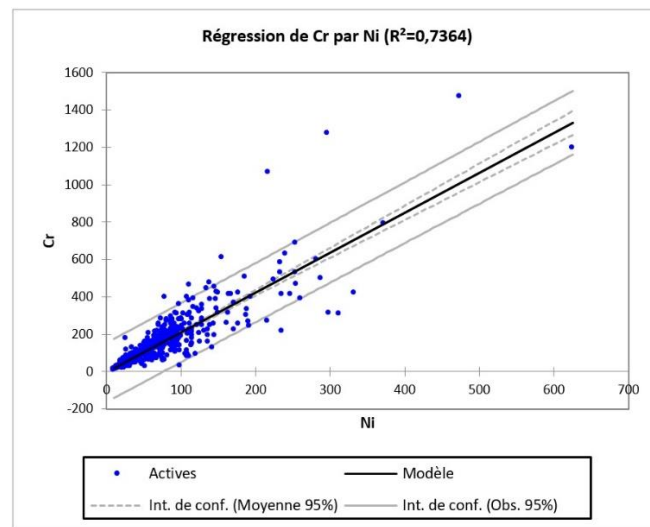
Pour mieux discerner les éléments chimiques typiques de la zone, nous allons nous focaliser sur les couples d'éléments chimiques qui ont un type corrélation forte et très forte.

- Couples d'éléments de corrélation très forte

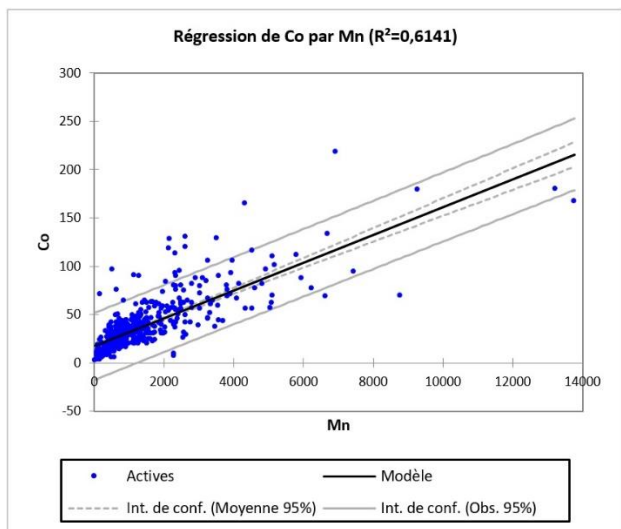
Quatre couples d'éléments chimiques ont une corrélation très forte à savoir Fe_V : 0,792 Cr_Ni : 0,858 Mn_Co : 0,784 La_Nd : 0,873. Des droites de régression linéaires sont tracées pour mieux refléter les couples d'éléments qui ont un type de corrélation très forte dans la zone. Cette droite permet aussi de visualiser les liens existant entre deux éléments de corrélation élevé. Ainsi, la droite sert à estimer la teneur quelconque d'un élément chimique à partir des valeurs de l'autre élément avec qui il partage un coefficient de corrélation élevé.



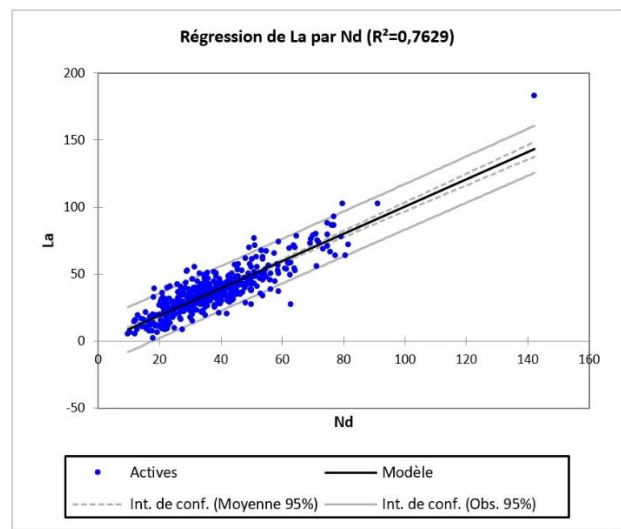
Graphie ii: Droite de régression de Fe par V



Graphie iii: Droite de régression de Cr par Ni



Graphes iv: Droite de régression de Co par Mn



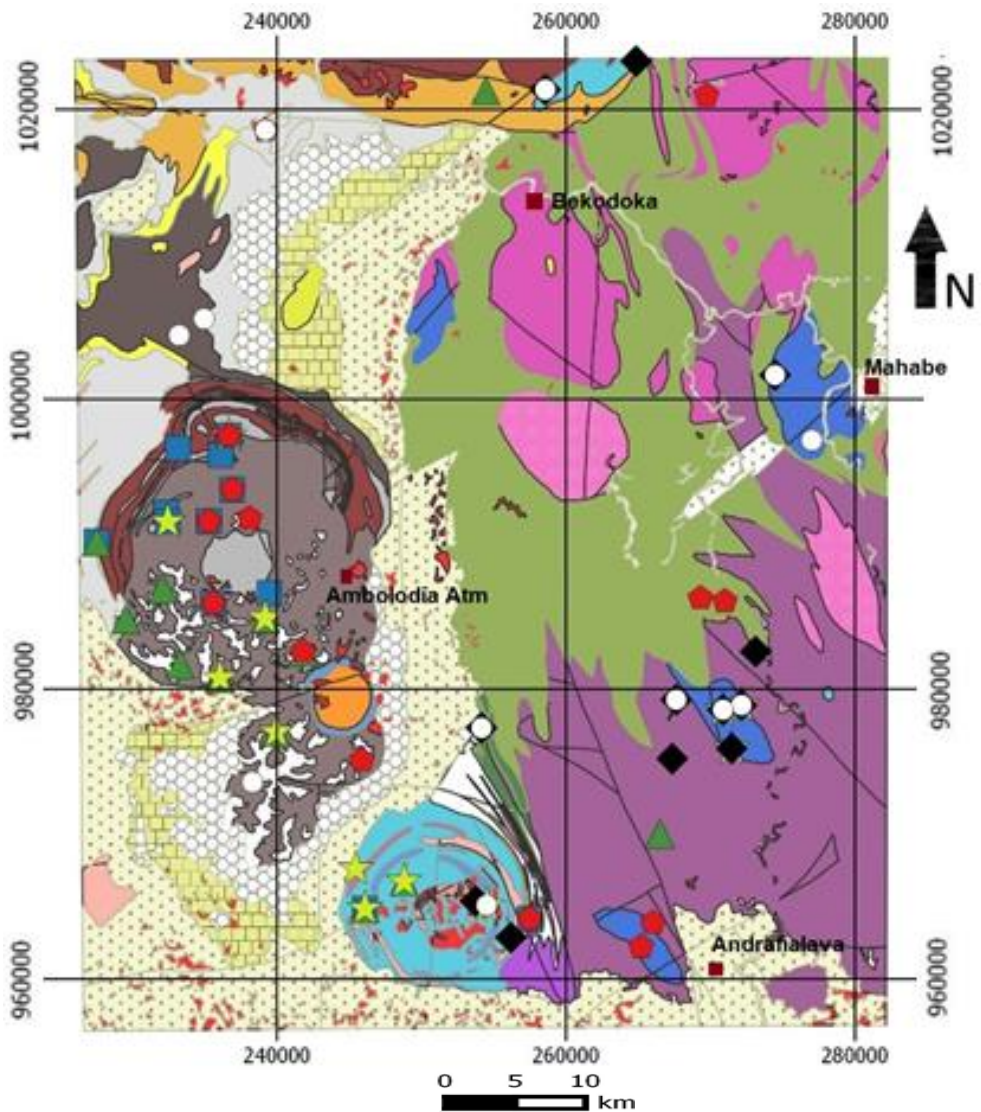
Graphes v: Droite de régression de La par Nd

Les couples d'éléments avec un type de corrélation très forte sont des éléments de transition. Ils occupent les colonnes entre IIIB et VIIB du Tableau périodique des éléments. Ils présentent des caractéristiques communes dont leur point de fusion élevé et leur moindre variation de rayon ionique. On peut les distinguer en deux groupes : les éléments du groupe Fer et les Lanthanides.

❖ Les éléments du groupe Fer

Les éléments du groupe Fe regroupent Fe, V, Cr, Ni, Mn et Co. Du point de vue géochimique, ce sont des éléments lithophiles qui présentent une certaine affinité avec l'oxygène. V, Cr et Mn sont à la fois lithophile et chalcophile puisqu'ils ont aussi une forte affinité avec le soufre. Ni, Co et Fe sont en même temps lithophile et sidérophile en raison de leur affinité particulière avec l'élément Fe.

Afin de ressortir une explication géologique entre les couples d'élément du groupe Fe ayant une très forte corrélation, on va superposer sur une carte à fond géologique les indices minéraux correspondant aux éléments du groupe Fer. Une observation nette de la carte de superposition des indices minéraux et la carte géologique montre que les éléments du groupe Fe sont souvent associés à des roches basiques-ultrabasiques comme les pyroxénites-basaltiques ou gabbroïques. La zone volcanique du Crétacé où affleurent les coulées basaltiques renferment plusieurs indices des éléments du groupe Fer.



Légende

- | | | |
|-------------|-------------------------------|----------------------------|
| ○ Indice_Ni | Calcaire marneux | Microgabbro |
| ● Indice_Fe | Dacite, trachydacite | Microgranite |
| ★ Indice_Co | Dolerite | Microsyénite |
| ▲ Indice_Mn | Gabbro | Orthogneiss granitiques |
| ◆ Indice_Cr | Granite | Sédiments latéritique |
| ■ Indice_V | Grès | Quartzite |
| | Grès, argile | Rhyolite |
| | Grès, conglomérats, argile | Schiste actinote_trémolite |
| | Marbre, méta-psammite | Sédimentaire |
| | métagabbro | Syénite |
| | Métagranite | Trachydacite |
| | Métagranodiorite, métadiorite | Trachyte |
| | Métagranodiorite, Migmatite | Localité |
| | Alluvions, Sables | |
| | Amphibolite | |
| | Basalte | |
| | Basalte, andésite | |
| | Basaltes | |

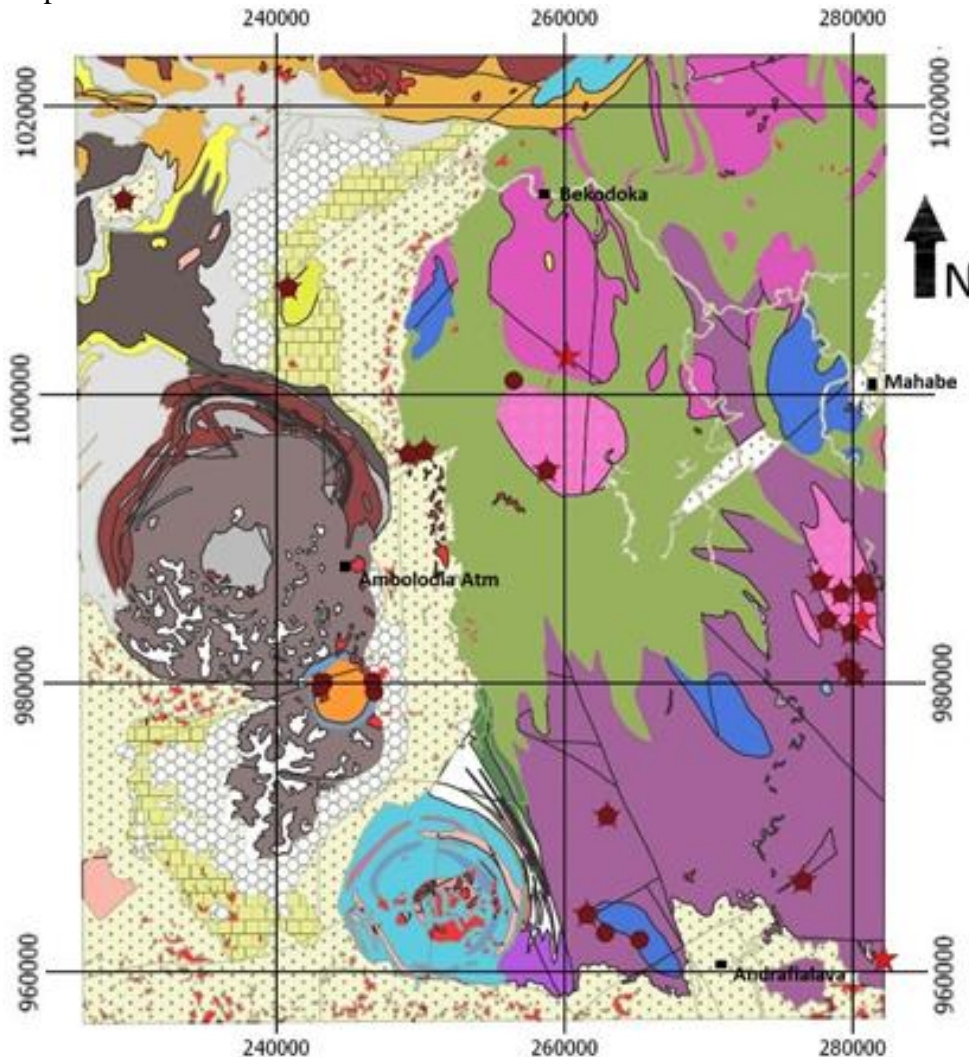
Figure 4. Carte des indices Fe, Mn, Co, Ni, Cr et V

Autour des coordonnées X=235.271m et Y=993.669m, on observe sept indices de V et quatre de Fe, ceci peut être provoqué par l'existence de magnétite. En outre, cette formation basaltique renferme aussi huit indices de Mn et 5 indices de Co dont une minéralisation en pyrolusite vue l'existence de nombreux dykes au sein de cette formation basaltique.

Les éléments chimiques Cr et Ni ont une forte affinité avec les roches ultrabasiques. L'affleurement de gabbros autour de X=270.000m et Y=980.000m, on observe quatre indices de Cr et trois indices de Ni. Ceci peut être provoqué par la présence de minéralisation de chromite nickélifère magmatique vue que la formation gabbroïque est intrusive au sein des formations métamorphiques sombres.

❖ Les lanthanides

Les lanthanides ou terre rare ayant un type de corrélation très forte sont représentés par les éléments La et Nd. Ce sont des éléments qui ont une forte affinité à la phase liquide du magma. Du point de vue géochimique, ces éléments sont classés parmi les hygromagmatophiles. Ils accompagnent souvent les formations à minéralisation tardive. Comme étant des éléments lithophiles, les substances minérales porteurs des éléments La et Nd sont souvent des oxydes tels que les phosphates ou les carbonates.



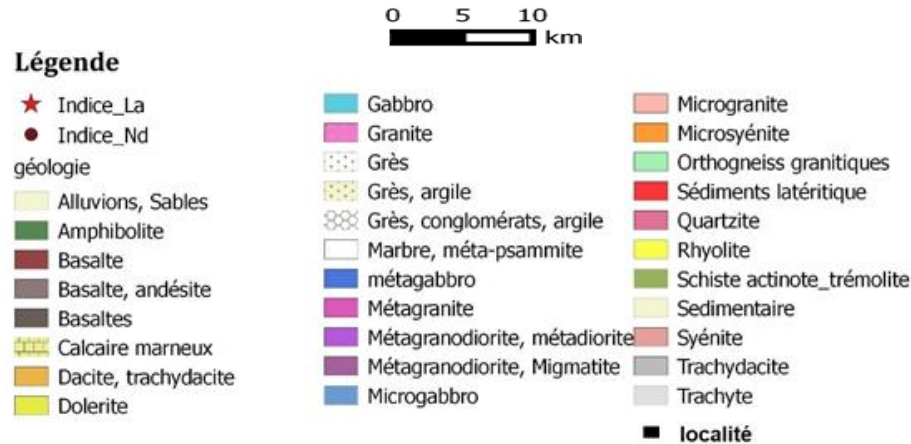


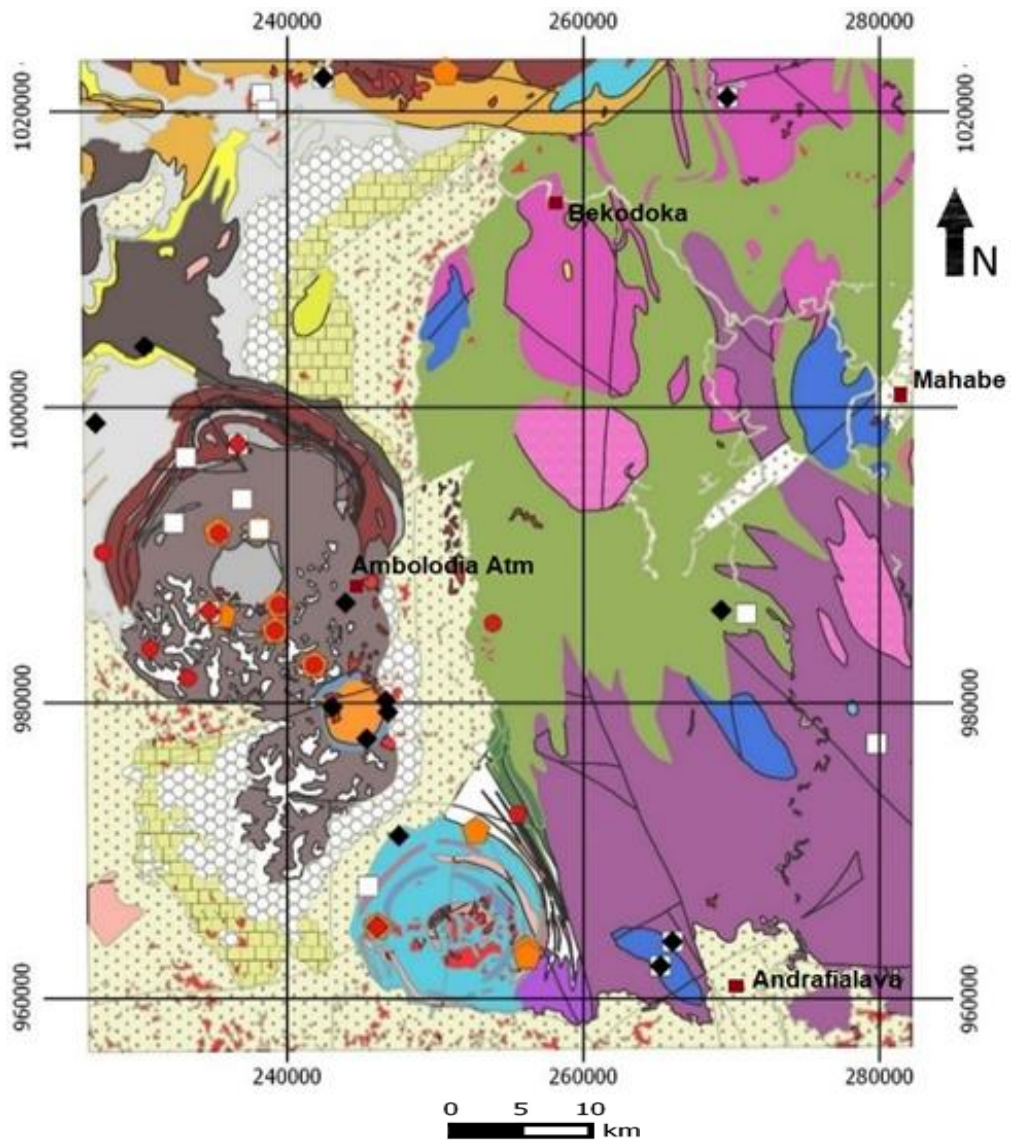
Figure 5. Carte d'indice La et Nd

Après avoir superposé les indices de l'élément La et Nd sur la carte géologique de la zone, on a pu détecter que la plupart de ces indices minéraux se trouve dans les roches granitiques acides. Sept indices de La et six indices de Nd se localisent autour des coordonnées X=280.000m et Y=985.000m où affleure une formation granitique de type porphyrique. La présence des porphyres témoigne une minéralisation tardive des composants minéraux de la formation granitique. Cette zone d'affleurement granitique pourrait renfermer une minéralisation en monazite qui est un phosphate de terre rare plus répandue dans les roches granitiques très évolués.

- Couples d'éléments de corrélation forte

Les couples d'éléments ayant un type de corrélation forte sont représentés ci-dessous :

V_Cu : 0,760	V_Co : 0,656	V_Ti : 0,701	Mn_Cu : 0,549
Mn_Cd : 0,589	Cu_Co : 0,683	Cu_Cd : 0,546	Cu_Fe : 0,639
Te_Bi : 0,615	Co_Cd : 0,590	Co_Fe : 0,604	Cd_Zn : 0,572
Th_Rb : 0,632	Zn_Y : 0,600	Zn_Ti : 0,615	Zn_Fe : 0,685
As_W : 0,621	Y_Nd : 0,581	Y_Yb : 0,647	Nb_La : 0,637
Nb_Ce : 0,5627	Nb_Zr : 0,627	Nb_Nd : 0,634	La_Ce : 0,770
Ce_Nd : 0,718	Ti_Fe : 0,743		



Légende

- | | | |
|---------------------|---------------------------------|---------------------------|
| ● Indice_Cd | ■ Dacite, trachydacite | ■ Microgabbro |
| ◆ Indice_Zn | ■ Dolerite | ■ Microgranite |
| □ Indice_Ti | ■ Gabbro | ■ Microsyénite |
| ■ Indice_Cu | ■ Granite | ■ Orthogneiss granitiques |
| géologie | | |
| ■ Alluvions, Sables | ■ Grès | ■ Sédiments latéritique |
| ■ Amphibolite | ■ Grès, argile | ■ Quartzite |
| ■ Basalte | ■ Grès, conglomérats, argile | ■ Rhyolite |
| ■ Basalte, andésite | ■ Marbre, méta-psammite | ■ Schiste actinote_trémol |
| ■ Basaltes | ■ métagabbro | ■ Sedimentaire |
| ■ Calcaire marneux | ■ Métagranite | ■ Syénite |
| | ■ Métagranodiorite, métadiorite | ■ Trachydacite |
| | ■ Métagranodiorite, Migmatite | ■ Trachyte |
| | | ■ localité |

Figure 6. Carte d'indice Cd, Zn, Ti et Cu

Au total 26 couples d'éléments ont un type de corrélation forte. Il est à noter que les éléments chimiques formant ces couples sont essentiellement les métaux du groupe de Fer et les lanthanides. A part les couples d'éléments qui ont un coefficient de corrélation très forte, on constate que les éléments chimiques Cu, Ti, Cd, Zn, Ce, Y, Nb présente nettement plus de corrélation dans la zone.

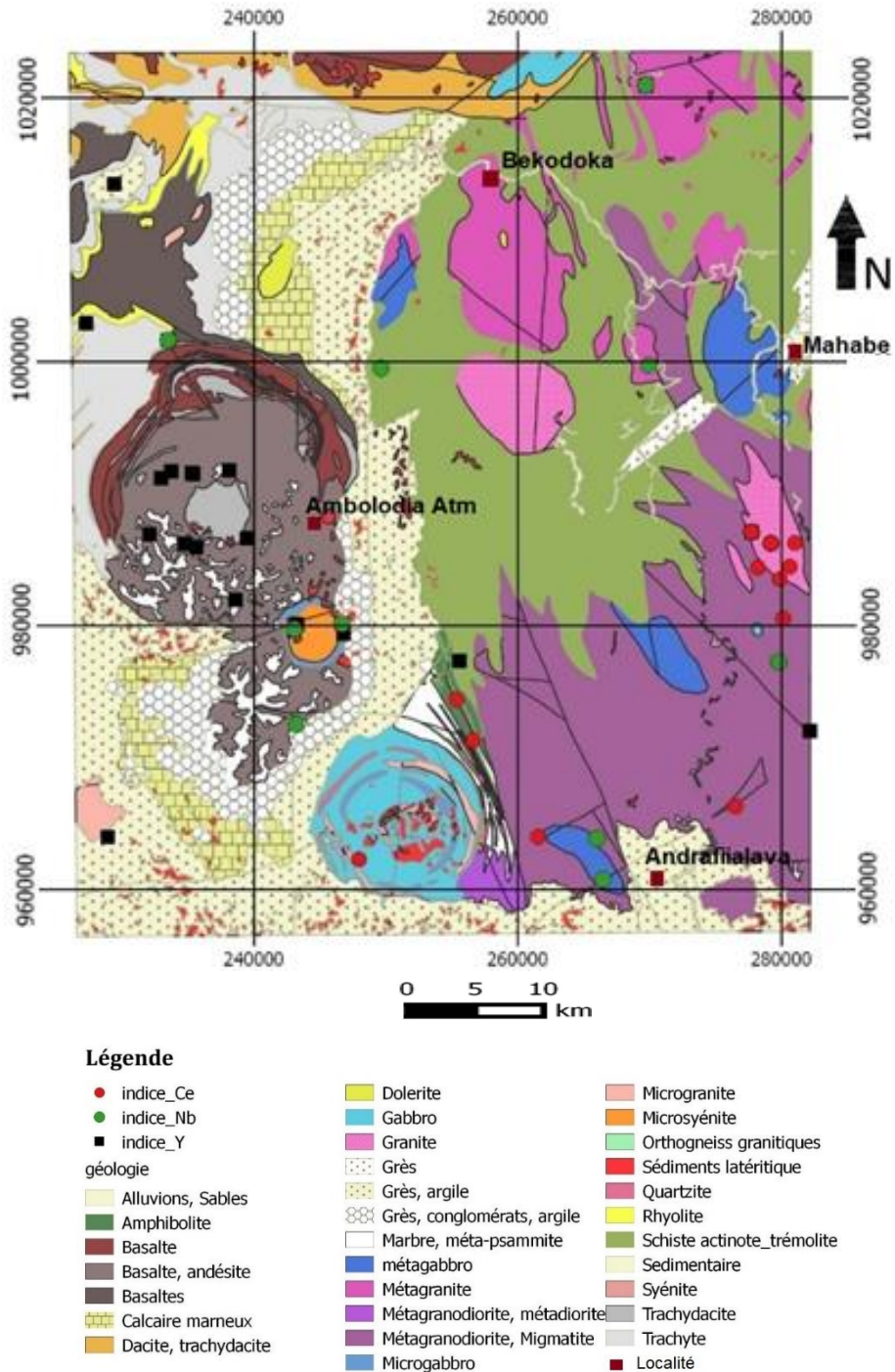


Figure 7. Carte d'indice Ce, Nb, Y

Avec l'observation de la carte (*Fig. 6*) montrant les indices des éléments Cu, Ti, Cd, Zn, nous pouvons ressortir les informations suivant :

- ❖ la plupart des indices de Cu, Ti et Cd se trouvent au sein de la formation volcanique basaltique du Crétacé, ce qui explique les fortes corrélations entre ces élément et d'autres éléments du groupe de fer dont Fe, V, Mn, Co.
- ❖ 7 indices de Ti se trouvent au sein de l'affleurement des coulées Basaltiques du Crétacé autour des coordonnées X=235.271m et Y=993.669m où on a rencontré des zones de hautes valeurs en Fe et V. L'association d'éléments (Fe, Ti, V) marque une minéralisation probable de titanomagnétite à vanadium.
- ❖ 7 des indices de Cu et 6 des indices de Cd se localisent dans la zone d'affleurement de la coulée basaltique du Crétacé dont la plupart se trouve entre les coordonnées où on a enregistré de nombreux indices de Mn. Il se fait qu'une circulation de fluide hydrothermal s'est probablement épanchée dans la zone. La présence de minéralisations de sulfures de Cu et de Cd est envisagée.
- ❖ 4 indices de Zn se trouvent dans la zone de contact entre la formation intrusive de syénite et de gabbro. Ceci montre qu'une circulation de fluide hydrothermal s'est faite dans cette zone de contact.

Avec l'observation de la carte (*Fig. 7*) qui montre les indices de Y, Ce et de Nb, on peut observer :

- ❖ 6 indices de Ce et 2 indices de Nb au sein de la formation de granite porphyrique. A rappeler que cette formation renferme plusieurs indices de La et Nd, il est certain que cette formation granitique renferme des minéraux de monazite (La,Ce, Nd) PO₄.
- ❖ 9 indices de Y se trouve dans la zone d'affleurement des coulées basaltiques du Crétacé.

5.2.2. Résultats de l'analyse factorielle

Les corrélations des éléments chimiques avec les axes factoriels sont présentées sur le Tableau 6. Avec plus de 50% de la variance totale, l'interprétation se focalise principalement sur les quatre axes factoriels F1, F2, F3 et F4. L'axe F1 met en évidence les associations d'éléments suivant : V, Mn, Cu, Co, Cd, Zn, Ti, Fe et Ni. F1 représente les éléments chimiques du groupe Fer. Ces éléments chimiques s'associent aux roches ultrabasiques. L'axe F2 représente les éléments : Y, Nb, Ti, La, Ce, Nd et Yb, axe dominé par les éléments des terres rares. F2 met en évidence les éléments chimiques qui ont une forte affinité à la phase liquide du magma et se sont souvent associés à des formations très évoluées avec des minéraux ayant plus de temps pour se cristalliser.

Tableau 6: Corrélation des axes factoriels avec les éléments chimiques

	F1	F2	F3	F4
V	0,7940	0,2682	-0,0570	0,0129
Mn	0,6644	0,2087	0,1184	-0,1907
Cu	0,8109	0,1018	0,1341	-0,0203
Mo	-0,0451	0,4926	0,2428	-0,1472
Ag	0,3807	0,3866	-0,2756	-0,0774
Sb	-0,0393	0,2926	0,5493	-0,1968

Te	0,4415	0,3422	0,4453	-0,1763
Ba	0,1362	0,1090	-0,2906	-0,2001
Pb	-0,5137	0,1668	0,0545	-0,2362
Bi	0,0675	0,2614	0,5861	-0,2846
Cr	0,4923	-0,3667	0,0011	0,2718
Co	0,8385	0,0875	0,1273	0,0794
Cd	0,5952	0,3764	0,1245	-0,2394
Th	-0,5478	0,3547	0,2919	0,1833
Zn	0,5906	0,4747	-0,3602	-0,0648
As	-0,0056	0,2691	0,5642	0,4556
Y	0,1985	0,8160	-0,0765	-0,0648
Nb	-0,3871	0,7392	-0,1379	0,0952
Sn	-0,5087	0,1702	0,0759	-0,1646
La	-0,5083	0,6188	-0,3628	0,0245
Ce	-0,4552	0,5575	-0,3056	0,0012
W	-0,1029	0,1754	0,3767	0,8067
U	-0,3678	0,3567	0,4709	-0,0571
Ti	0,5356	0,5585	-0,1713	0,1111
Fe	0,8235	0,2530	-0,2967	0,1397
Ni	0,6082	-0,3368	0,0511	0,2275
Rb	-0,7171	0,1267	0,2591	-0,2245
Sr	-0,3189	-0,2484	-0,1879	-0,0151
Zr	-0,4318	0,4268	-0,0326	0,2350
Nd	-0,2310	0,7667	-0,4448	0,0417
Yb	0,0317	0,6217	0,0549	0,3475
Hg	0,4316	0,2601	0,3798	-0,1214
Au	0,1000	-0,0010	0,0001	0,0188
C	0,2356	0,0841	0,2480	-0,2241
% Cumulé de la variance	22,36	37,60	45,33	50,20

L'axe F3 représente les éléments Sb, Bi et As, trois éléments chimiques groupés parmi les métalloïdes. Ils ont des propriétés chimiques intermédiaires entre les métaux et les non métaux. L'axe F4 représente l'élément W.

6. Synthèse des résultats et discussion

La comparaison entre la moyenne arithmétique et le Clarke de chaque élément chimique montre que 18 éléments chimiques présentent des caractéristiques d'enrichissement dans la zone à savoir : V, Mn, Cu, Mo, Te, Pb, Bi, Cr, Co, Zn, As, Ce, W, Ti, Fe, Hg et Zr. Plus de 400 anomalies ponctuelles ont été détectées.

D'après les résultats de l'étude de corrélation entre les éléments chimiques, on a pu trouver 30 couples d'éléments avec des coefficients de corrélation élevés.

L'analyse factorielle donne des informations sur les associations d'éléments chimiques existant dans la zone ainsi qu'une classification nette de ces éléments selon leurs conditions de formation. Enfin, les résultats de la méthode statistique amène à délimiter 6 zones favorables à d'éventuelles minéralisations. De même, 15 éléments chimiques présentent des affinités dans la zone : Fe, Mn, V, Ni, Cr, Cu, Co, Cd, Zn, Ti, La, Nd, Y, Nb et Ce.

❖ Zone I

La zone est marquée par la teneur élevée des éléments du groupe Fer dans toute la zone étudiée. Du point de vue géologique, les coulées basaltiques volcaniques du Crétacé dominant la zone avec prépondérance de masses filoniennes. On a localisé des teneurs élevées en éléments (*Fe, Ti et V*) autour de X=237.847m et Y=994.578m qui pourraient témoigner de l'existence des minéralisations de magnétite et vanadium. En outre, les pics des éléments Mn, Cu, Cd, ont été localisés entre les coordonnées (X=239.788m ; Y=984.615m). Il est à noter que ces éléments disposent d'un degré de chalcophile élevé, ce qui démontre qu'une minéralisation sulfurée est probablement présente dans la zone, favorisée en quelque sorte par la circulation d'un fluide hydrothermal. Pour mieux identifier l'existence de minéralisations métalliques de cette zone, il est vivement recommandé d'exécuter une prospection magnétique au sol de haute résolution. Une étude plus avancée sur les intrusions filoniennes de la zone est aussi souhaitée.

❖ Zone II

Dans cette zone affleure une formation syénitique intrusive entourée de quelques intrusions de gabbro. Autour de X=244.317m et Y=979.180m se présentent des teneurs élevées en Nd et Y dont on peut en déduire qu'une minéralisation en bastnaésite est probablement présente. L'abondance de l'élément chimique Zn confirme l'existence possible de minéralisation sulfurée favorisée par la circulation de fluide de type hydrothermal. La zone II nécessite une étude un peu plus approfondie sur les zones de contacts entre les gabbros et la formation syénitique intrusive.

❖ Zone III

Tout comme la zone I, cette zone est dominée par des teneurs élevées en éléments Co, Fe, Mn, V, Cu et Ti surtout autour de X=251.434m et Y=965.205m. La zone est géologiquement formée par des complexes gabbroïques comme des gabbros intrusifs avec intercalations de microgabbro, d'intrusions de magnétite. Vue les anomalies relativement importantes en minerais métalliques de la zone III, une prospection magnétique de haute résolution est fortement encouragée.

❖ Zone IV

La Zone est géologiquement formée par des gneiss gabbroïques du dôme cristallin de Betsiboka. Des teneurs élevées en éléments Zn, Ti, Nb, Nd et Fe se présentent autour des coordonnées X=265.410m et Y=962.487m. En raison des fortes concentrations en éléments métalliques, une prospection magnétique de haute résolution est recommandée.

❖ Zone V

La zone autour de X=271.233m et Y=978533m se caractérise par des teneurs élevés en Ni et Cr. Du point de vue lithologique, la zone est formée essentiellement de métagabbro et de gneiss gabbroïque. La zone présente une forte probabilité de trouver des minerais de chromite nickélicifère. De même, il est probable que la formation de gabbro a subi un phénomène de serpentinitisation.

7. Conclusion

Cette étude s'est focalisée sur l'interprétation des données de campagnes de prospection géochimique Stream sediment menée dans la Commune de Bekodoka, District Besalampy, Région Melaky. La zone d'investigation se caractérise principalement par le contact de deux formations géologiques majeures de Madagascar, le socle cristallin dans la partie orientale et la série sédimentaire dans la partie occidentale. La méthode statistique a été utilisée dans la l'interprétation des données. La méthode statistique univariable permet de caractériser globalement chacune des 34 éléments chimiques en montrant :

- les distributions des éléments chimiques considérés ainsi que leurs paramètres statistiques relatifs
- le nombre total d'anomalie ponctuelle

Deux méthodes statistiques multivariées ont été utilisées. En premier lieu, la méthode de corrélation de Pearson, elle permet de détecter les éléments chimiques qui ont plus corrélation dans la zone. La combinaison de cette méthode à la méthode statistique univariable nous conduit à la création des cartes des indices métallogéniques de la zone. La superposition des cartes d'indices minérales avec la carte géologique spécifie les formations géologiques à haut potentiel de minéralisation. En second lieu, l'analyse factorielle qui permet de visualiser d'éventuelles associations d'éléments au sein d'une formation géologique spécifiée ainsi qu'une classification des éléments chimiques selon leurs affinités aux axes factoriels.

464 anomalies ponctuelles ont été détectées dans la zone à partir de l'étude statistique univariable des 34 éléments chimiques concernés. Selon la méthode multivariable, 15 éléments chimiques dominent la zone d'investigation. Parmi ces 15 éléments chimiques figurent : Fe, Mn, V, Ni, Cr, Cu, Co, Cd, Zn, Ti, La, Nd, Y, Nb et Ce. Six zones à fort potentiel minier ont été localisées dans la zone d'investigation. Ces 6 zones méritent une exploration plus avancée pour mieux vérifier leurs potentialités en matière de minéralisation.

Il est vivement recommandé de faire une étude par télédétection des traces de linéament dans les 6 zones d'anomalies ainsi qu'une étude pétrographique avancée combinée à une étude géochimique tactique. Les Zones I, III, IV et V méritent une investigation de géophysique magnétique au sol en raison des teneurs élevées en métaux du groupe Fer. Une étude un peu plus poussée sur les masses filoniennes intrusives est nécessaire pour les Zones I, II et III en raison de la forte concentration en éléments des terres rares légères, une étude géochimique sol est recommandée pour la zone VI.

Références bibliographiques

- Andrianaivoravelona H. T., (2014). Analyse et traitement des données géologiques en vue de l'élaboration d'une carte d'indice cas de la zone d'Andrafialava Nord-Ouest de Madagascar, mémoire d'ingénieur géologue ESPA.
- Besairie H., (1948). Les diverses interprétations du socle malgache. Doc. Bur. Géol. N°188. Tananarive. pp.58-74.
- Besairie H., (1933). Rapport annuel du Service géologique. Dans Rapport annuel du Service géologique de Tananarive Madagascar
- Besairie H., (1962). Précis de Géologie malgache. Annales géologiques de Madagascar. Rapp. annuel. Serv. Géol Tananarive, fasc. n°XXXVI, pp.133-134

- Besairie H., (1967). Itinéraires géologiques le long des principales routes de Madagascar. Service géologique d'Antananarivo. 100p.
- Besairie H., (1972). Géologie de Madagascar. I. Les terrains sédimentaires. Annales Géologiques Madagascar, Fascicule n° 35, 463p.
- Besairie H., (1973). Précis de géologie de Madagascar
- BPGRM, (2005). Synthèse de la Géologie de Madagascar, MEM Antananarivo. 14p
- Goldfarb Bernard P. C., (s.d.). Introduction à la méthode statistique, manuel et exercice corrigé. 6è édition Dunod.
- Gournay A., (2012). Analyse statistique multivariée. Institut de Mathématiques, Université de Neuchâtel Suisse.
- Parfait, T. Y., (s.d.). Géochimie. MGP elearning.
- Perdrial, N., (s.d.). Pétrologie & Minéralogie Aide aux Travaux Pratiques et Dirigés. Université Louis Pasteur Strasbourg.
- PGRM-Ministère des Mines, (2012). Carte géologique et métallogénique de la République de Madagascar au 1/1.000.000e. Notice explicative. 261p
- Rakotondrasoa M. A., (2018). Interprétation des données de prospection géochimique Stream-sédiment par méthode statistique exploratoire cas de la zone d'Ambatondrazaka, mémoire de Master Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo.
- Rakotoniriana R. H., (2015). Mise en évidence des minéralisations en Béryl, Monazite et Corindon dans la région d'Ampanrandava, feuille J60 par méthode géochimique et Géophysique, mémoire de fin d'étude DEA, ESPA.
- Rasoamanarivo L. P. *et al.*, (2019). Traitements statistiques des données géochimiques sols de la région Itasy, articles Madamines
- Tucker, R. P., (2012). Notice explicative des cartes géologique et métallogéniques de la République de Madagascar à 1/1 000 000. Antananarivo: Ministère des Mines, République de Madagascar.