

AMELIORATION DES CONDITIONS SOCIO-ECONOMIQUES DES PETITS EXPLOITANTS AURIFERES PAR BATEE : CARACTERISATION ET QUANTIFICATION DES MINERAIS DANS LE DISTRICT DE VAVATENINA

A.O. RAVONINJATOVO¹, L. MOMA², V.M. RAZAFINDRATSIMBA³, J. L. RASOANAIVO¹, L. ANDRIANAIVO³,

¹ Département Energétique, Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT), BP 6294 Antananarivo 101 Madagascar

² Doctorant ISSIDD, Université Toamasina Madagascar

³ Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Petroleum Engineering Department, Equipe d'Accueil Exergie et Géoingénierie, Université d'Antananarivo, BP 1500 Antananarivo 101 Madagascar

e-mail : achillegc@yahoo.fr

Résumé

Madagascar fait partie des pays riches en ressources naturelles, et en particulier en ressources minières. Cependant, hier comme aujourd'hui, cette richesse en minerais n'a pas apporté le développement requis pour le pays et le bien-être de la population, ce qui est un paradoxe flagrant. Le secteur minier est parmi la filière porteuse du pays par le biais des grandes mines. Par contre, les petites mines gérées par les petits exploitants miniers n'y font pas partie. Leur moyen de production est archaïque, manuelle et à faible productivité, mais elles ont une importance particulière au niveau de leur zone d'intervention respective : ils absorbent le chômage, la pauvreté en milieu rural et la réduction de l'exode rural.

Le district de Vavatenina, réputé comme étant une zone aurifère très connue dans la région Analanjirifo, attire une forte affluence de population pour l'extraction aurifère artisanale. La commune urbaine de Vavatenina et les communes rurales d'Ambohibe et de Miarinarivo sont les plus touchées par cette activité. C'est aussi la zone d'études de ce travail de recherches.

Les exploitants aurifères artisanaux pratiquent la méthode d'extraction aurifère par batée. La batée est l'outil de travail approprié pour extraire l'or des autres composants (sables, terre, minerais) y associés. La manipulation de la batée demande de la force et de la persévérance et c'est pendant les opérations d'extraction d'or où plusieurs minerais à haute valeur ajoutée y sont perdus. Les minerais récupérés permettront aux exploitants d'améliorer leur condition de vie, de développer la zone touchée par l'activité et par ricochet de considérer cette filière (petite mine) comme étant parmi les facteurs porteurs du pays.

Les travaux de recherches effectués ont pour but de caractériser et de quantifier les minerais associés à l'or pendant l'extraction aurifère par batée. La méthodologie adoptée pour la concrétisation de ce travail de recherches est à la fois qualitative et quantitative. Sa concrétisation à termes nécessite a priori par le passage à travers l'ordre chronologique des activités suivantes : la capitalisation des données relatives à la filière aurifère artisanale, la descente dans la zone d'études pour réaliser des enquêtes sur la filière minière et collecter des échantillons (sol, sable, roche) dans 13 gisements primaire et secondaire (alluvion, éluvion,...) enfin, l'analyse de ces échantillons permettant de déceler les différents minerais associés à l'or. La spectrométrie à fluorescence X (XRF) est la technologie appropriée. La méthode d'analyse par Turbo Quante-pellets Powder est une des méthodes analytiques pratiquée, la plus simple, la plus précise et la plus économique pour la détermination de la composition chimique de minerais y détectés et qui a aussi permis d'obtenir le résultat d'Analyses qualitative et quantitative relatives à l'AFC (Analyse Factorielle Correspondante) et à l'ACP (Analyse en Composantes principales).

Quarante-huit (48) minerais de concentrations différentes y ont été identifiés. Le Manganèse, le Vanadium et l'Yttrium sont les minerais les plus abondants dans tous les échantillons avec une concentration respective de 47,22%, 37,12 % et 37,900 %. Des métaux lourds y sont aussi présents : le Mercure, le Cobalt et le Nickel en quantités intéressantes en termes de valorisation.

Des travaux de recherches visant à récupérer ces minerais moyennant un équipement simple, mécanisé à portée des bourses des petits exploitants aurifères sont en cours.

Keys Word : gisement aurifère, Fluorescence X, minerais, exploitation artisanale.

1. INTRODUCTION

La mondialisation conduit à l'évolution des rapports entre les Etats. L'accroissement de la demande mondiale en minerais amène les multinationales des grands pays industriels, mais aussi des pays émergents à rechercher de nouveaux gisements miniers à exploiter. Le paysage de l'exploitation des ressources minières s'en trouve modifier, sans pour autant avoir une influence positive sur le développement en général et à la lutte contre la pauvreté au sein des pays africains producteurs miniers, dont Madagascar en particulier. Cette activité implique aujourd'hui probablement au moins 15 millions de personnes dans le monde, soit près de deux fois plus qu'il y a dix ans. Pour le seul continent africain entre 4,5 et 6 millions d'actifs sont concernés dont 30% à 40 % de femmes et entretiennent près de 40 millions de dépendants, soit 1 africain sur 20 (Jaques & Zida, 2004).

Le district de Vavatenina figure parmi les régions aurifères de Madagascar avec des places alluviales et éluviales (Blanchot, 1978 ; Yarmoluk et al, 1980 et Bournat et al 1985). L'exploitation à petite échelle ou petite mine, souvent informelle, joue un rôle important dans l'extraction de l'or. L'orpaillage représente l'activité économique principale de la majorité de la population, surtout en milieu rural où les conditions de vie sont souvent déplorable. La commune urbaine de Vavatenina et les communes rurales d'Ambohibe et de Miarinarivo sont les plus touchées par cette activité. Les gisements les plus exploités actuellement sont : les alluvions anciennes élevées, les dépôts alluvionnaires de berges, les flats marécageux et les sables des rivières.

Plusieurs raisons ont poussé la population locale à exercer cette activité d'extraction aurifère artisanale entre autres : la croissance démographique dans le District de Vavatenina qui a passé de 221 625 à 305 399 habitants de l'année 2008 à 2012, soit un taux d'accroissement de 0,2% par an (PCD CU Vavatenina, 2012), l'intensification du taux moyen de pauvreté passant de 65 % en 2008 à 76,5 % en 2010, la faible source de revenu des ménages obligeant la population à trouver d'autres alternatives une nouvelle source de revenu et enfin la crise politique de l'année 2009 dans le pays.

L'exploitation aurifère artisanale est un métier saisonnier où les produits obtenus sont plus ou moins rentables, aléatoires, voire hasardeux et les orpailleurs peuvent être gagnants ou perdants. Pour faire face à cette situation des orpailleurs, c'est-à-dire rentabiliser leur métier, il ne faut pas se contenter d'extraire uniquement l'or mais aussi de récupérer les minerais l'accompagnant lors de son extraction par batée. Des questions se posent entre autres :

- Quels sont les minerais associés à l'or, pendant l'opération d'extraction par batée ?.
- Comment récupérer ces minerais de l'or ?
- La majorité des orpailleurs n'ont pas de niveau d'éducation suffisant ou de formation appropriée relative à l'extraction minière et comment pourront-ils les détecter et les récupérer ?

La récupération en même temps l'or et les minerais y associés ont des impacts directs non seulement sur les conditions socio-économiques des exploitants miniers mais aussi sur le développement local de la zone d'exploitation.

Ce travail de recherches a pour finalité de caractériser et de déterminer la quantité des minerais présents dans les échantillons pris dans les gisements primaire et secondaires du district de Vavatenina par la technologie par fluorescence X à réflexion totale.

2. METHODOLOGIE

2.1. Zone d'études: District de Vavatenina

Le District de Vavatenina (Figure 1) appartient administrativement à l'ex-Province Autonome de Toamasina. Il est situé dans la partie Sud de la région Analanjirifo et s'étend sur une superficie de 2 926km². C'est le seul district de la région Analanjirifo qui ne dispose pas de la zone balnéaire. Il est délimité au Nord et à l'Est par le District de Fénérive-Est, au Sud par le District de Toamasina II, à l'Ouest par les districts d'Amparafaravola et d'Ambatondrazaka. Le chef-lieu du District de Vavatenina, est situé à 45 km au Sud-Est de Fénérive-Est. Il est relié à ce dernier par la RN5 puis par la RN22.

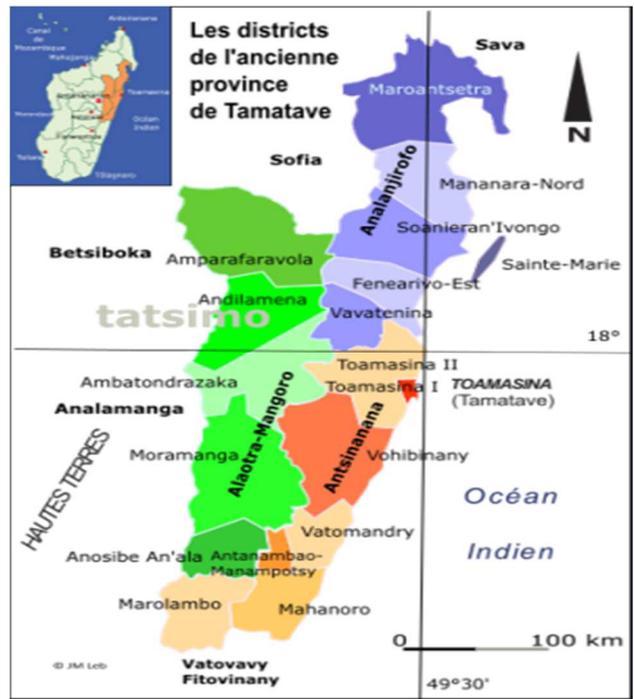


Figure 1 : Présentation de la carte de l'ex-province de Toamasina

La zone d'étude (Figure 2) se trouve dans le District de Vavatenina, en particulier dans les Communes rurales de Vavatenina, d'Ambohibe et de Miarinarivo. Ces Communes, en forme de cloche s'ouvrant vers le sud, sont séparées l'une de l'autre par une route provinciale saisonnière de 25 km depuis le Chef-lieu du District : Vavatenina. La zone d'étude est localisée à la latitude : 17°36'43"S et à la longitude : 49°9'23"E.

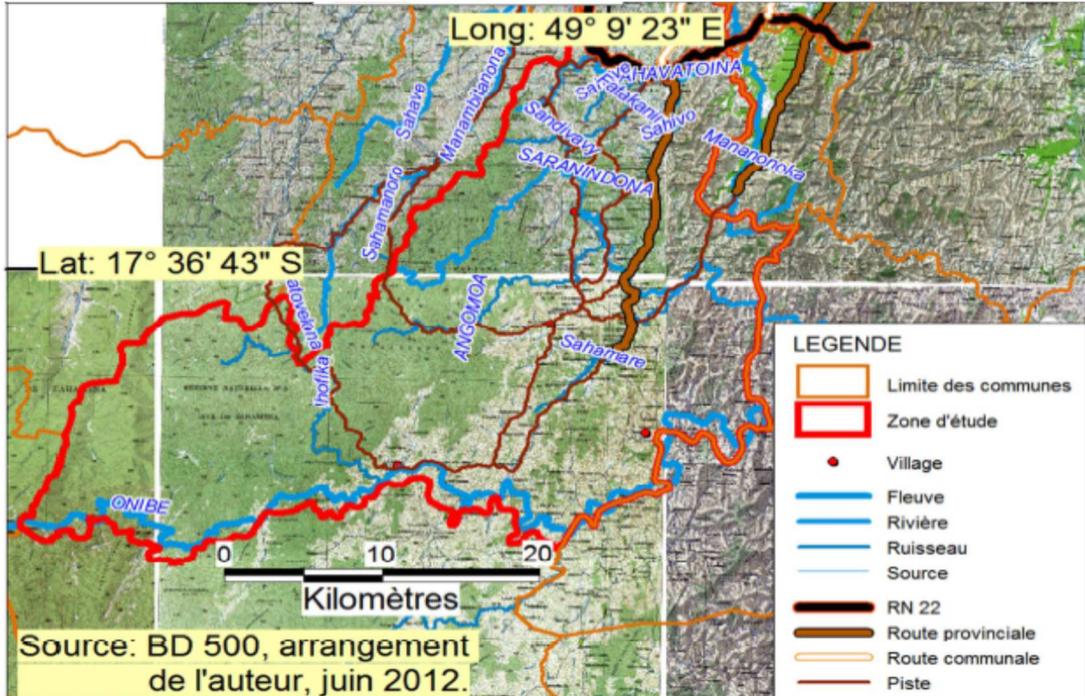


Figure 2 : Présentation de la carte de la zone d'étude du District de Vavatenina

2.2. Généralités sur les rayons X

Les rayons X sont des radiations électromagnétiques de haute fréquence et de courtes longueurs d'onde.

2.2.1. Définition et production des Rayons X

Les rayons X sont des radiations électromagnétiques comprises entre 0,05 et 100Å. Ils sont définis par leur mode de production. Ils sont émis par le bombardement de la surface d'un solide par des rayons cathodiques qui sont des faisceaux d'électrons accélérés par des tensions variant entre 103 et 106V.

Le domaine des rayons X est limité du côté des grandes longueurs d'onde, car l'absorption des rayons X par la matière se fait proportionnellement à la longueur d'onde. Ainsi, les rayons mous deviennent très difficiles à utiliser et à détecter quand la longueur d'onde croît.

Du côté des petites longueurs d'onde, des sources à très haute tension deviennent nécessaires à la production des rayons X appelés rayons durs. Le domaine des rayons X recouvre celui des rayons gamma, qui sont des radiations électromagnétiques émises par certains atomes radioactifs. Il y a une grande différence dans la production des rayons gamma et des rayons X. L'émission des rayons gamma est faite depuis le noyau de l'atome tandis que les rayons X viennent des processus qui se produisent dans les orbites des électrons. Deux sources de rayons X en spectrométrie de fluorescence X sont pratiquement utilisées.

- Les tubes à rayons X qui utilisent le bombardement électronique.
- Les éléments radioactifs qui utilisent les rayons gamma émis par les noyaux de ces éléments.

Il existe d'autres moyens de production, comme le rayonnement synchrotron (accélérateurs de particules) ou l'émission X induite par le proton.

2.2.2. Tubes à rayons X

La source usuelle des rayons X est le tube de *Coolidge*. C'est un tube à vide comportant deux électrodes :

- Une cathode émettrice, des négatons sont émis par un filament de tungstène chauffé par courant, ils sont ensuite accélérés par une tension élevée et focalisés sur une cible métallique (anode) refroidie par eau.
- Une anode, ou anticathode, qui est une masse métallique portée à un potentiel positif.

Le tube à rayons X (Figure 3) comporte également une fenêtre de nature telle qu'elle n'absorbe pas trop les rayons X émis.

Sous l'effet du bombardement d'électrons, les atomes de l'anticathode vont être excités puis reviennent à leur état fondamental en réémettant un rayonnement de photon X. Ce rayonnement correspond à l'excédent d'énergie (appelé rayons X).

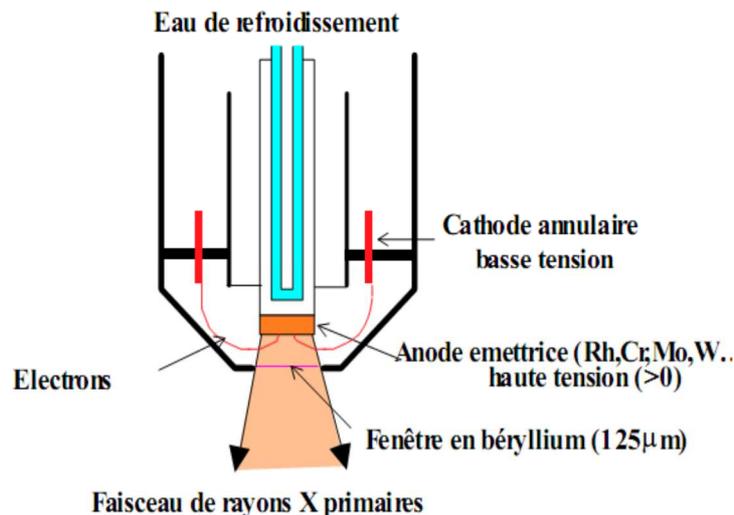


Figure 3. Tube à rayons X

Deux phénomènes bien distincts sont à l'origine de la nature des rayons X produits :

- *L'émission du spectre continu* : le spectre d'émission est constitué par un ensemble de radiations dont l'intensité varie d'une manière continue avec la longueur d'onde.

- *L'émission des raies caractéristiques:* au spectre continu se superpose un spectre de raies dont les longueurs d'ondes, indépendantes des conditions de fonctionnement du tube et ne dépendent que de la nature de l'anticathode.

2.2.3. Spectre continu

Le spectre continu résulte de la perte d'énergie des électrons entrants en collision avec les électrons faiblement liés de la cible. Le fond continu présente les caractéristiques suivantes :

- Il apparaît quelle que soit la différence de potentiel à l'intérieur du tube.
- Le spectre continu a une limite inférieure en longueur d'onde. Le spectre démarre brutalement à cette longueur d'onde qui ne dépend pas du matériau constituant l'anode mais qui suit la relation de *Duane-Hunt* :

$$h \nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0} \quad (2.1)$$

Avec

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$:	constante universelle de Planck
$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$:	vitesse de la lumière
λ_0	:	longueur d'onde associée à la fréquence ν_0
$h \nu_0$:	Energie du photon exprimée en [eV]

La relation (2.1) montre que l'énergie des radiations dans les spectres d'émission ne peut jamais être supérieure à l'énergie cinétique des électrons frappant la cible. Elle peut s'écrire sous la forme

$$E = h \nu = \frac{12,398}{\lambda} \quad (2.2)$$

Cette relation est valable si l'énergie E est exprimée en électron-volt [eV] et la longueur d'onde λ en [Å].

2.2.3.1. Sources radioactives

Lorsqu'on a besoin d'une source monochromatique, il faut utiliser des radio-isotopes à cause de leur stabilité et leur petite taille. Certains atomes radioactifs sont des sources radioactives monochromatiques. Ces dernières sont moins intenses que les émissions caractéristiques d'un tube à rayons X. Le caractère monochromatique de la plupart des sources radioactives les rendent avantageuses pour l'excitation sélective de certains éléments.

Souvent, la technique de la fluorescence X secondaire est utilisée avec de telles sources. Cette technique consiste à provoquer l'émission X d'une cible soumise aux rayonnements gamma de la source radioactive. Le rayonnement caractéristique des atomes de la cible provoque la fluorescence X de l'échantillon. Le choix des sources radioactives est fonction de l'énergie des photons $h\nu$ émise et de la demi-période du radioélément. Les différentes sources les plus utilisées sont représentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Quelques sources radioactives avec leur période ou demi-vie

Sources	Période	Mode de désintégration
$^{241}_{95}\text{Am}$	470 ans	Emission α
$^{109}_{48}\text{Cd}$	455 jours	C.E.O
$^{55}_{26}\text{Fe}$	2,7 ans	C.E.O

2.2.3.2. Propriétés des rayons X

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques. Il incarne la dualité onde-corpuscule. Ses longueurs d'onde varient de 10^{-5} à 100 \AA .

Par ses propriétés corpusculaires, il y a des phénomènes d'absorption photoélectrique, de diffusion incohérente (modification de longueur d'onde), d'ionisation des gaz, de production de scintillation. Par ses propriétés ondulatoires, il y a une vitesse de propagation : c . La diffusion, la réflexion, la diffraction, la polarisation et la diffusion cohérente sont considérables.

2.2.3.3. Interactions des rayons X avec la matière

Les interactions des rayons X avec la matière sont complexes. Lorsqu'un faisceau de rayons X pénètre dans un milieu matérialisé, une diminution progressive de son intensité (ou son énergie) est constatée. Cette diminution est due à l'interaction des rayons X (photon) avec la matière (négaton). L'énergie perdue se retrouve sous deux formes :

- une partie de l'énergie est absorbée par la matière (milieu)
- l'autre partie est dispersée.

La figure 4 montre un schéma simplifié de l'interaction de rayons X avec la matière.

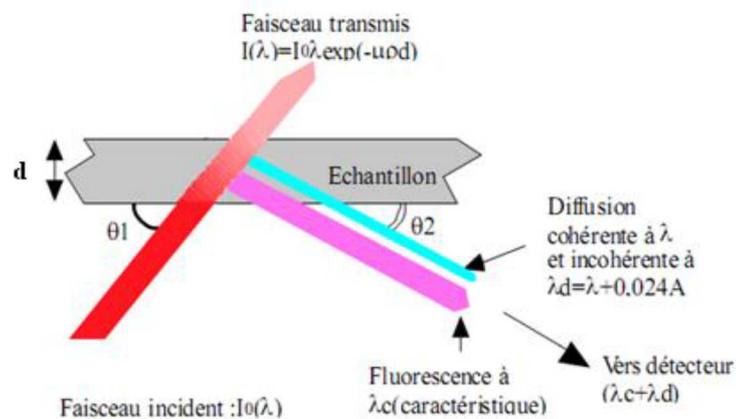


Figure 4. Interaction des rayons X avec la matière

Dans cette figure 4, « d » : représente l'épaisseur de l'échantillon.

Lorsqu'un faisceau de rayons X traverse une matière d'épaisseur : x , de masse spécifique : ρ , d'intensité incidente : I_0 , subit une atténuation suivant la loi de *Beer-Lambert*:

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \quad (2.3)$$

- $\mu \cdot dx$ représente l'atténuation du faisceau à travers une épaisseur dx ;
- μ est le coefficient d'absorption linéique ;
- le signe moins (-) indique que l'intensité est toujours décroissante en traversant la matière.

La figure 5 illustre le mécanisme simplifié de la traversée d'un faisceau de rayons X dans la matière.

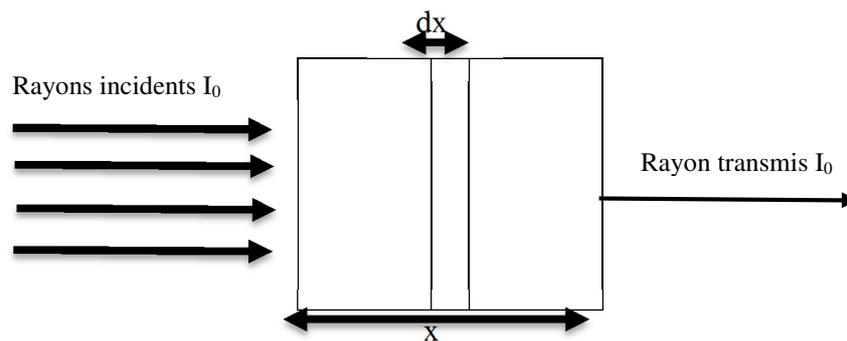


Figure 5. Mécanisme simplifié de la traversée d'un faisceau de rayons X dans la matière.

2.3. Théorie de la méthode d'analyse par la fluorescence X à énergie dispersive

La fluorescence X est une spectroscopie⁸ qui met en jeu des transitions internes de négatons. En effet, les négatons entourant le noyau remplissent successivement les couches K, L, M, N suivant la valeur du nombre quantique principal : n . Quel que soit l'atome considéré, l'énergie des négatons internes est grande et décroît en allant du noyau vers les couches périphériques. Pour expulser un négaton interne de l'orbite de l'atome, il faut une énergie d'excitation supérieure à l'énergie de liaison des négatons. En spectroscopie de fluorescence X, cette expulsion est provoquée par un photon X.

2.3.1. Principe de la fluorescence X

Lorsqu'un photon d'énergie suffisante arrache un électron des couches internes d'un atome, cet atome va ainsi se retrouver dans un état instable. L'atome va retrouver sa stabilité par réarrangement interne où les négatons issus des couches externes vont combler le trou. La différence d'énergie entre les couches initiale et finale du négaton est libérée par l'atome sous forme de rayonnement électromagnétique de haute énergie (photon X). Le spectre de rayonnement électromagnétique émis pendant ce processus révèle un certain nombre des pics caractéristiques. Les énergies des pics nous permettent d'identifier les éléments présents dans l'échantillon (analyse qualitative) tandis que les intensités des pics fournissent la concentration des éléments (analyse quantitative).

2.3.2. Différents types d'analyse par la fluorescence X

Il y a deux types d'analyses par la fluorescence X.

- l'analyse par fluorescence X à énergie dispersive (EDXRF)
- l'analyse par fluorescence X à longueur d'onde dispersive (WDXRF).

2.3.2.1. Analyse par fluorescence X à énergie dispersive

L'analyse par fluorescence X à énergie dispersive (Figure 6) repose sur la détermination directe de l'énergie des raies collectées par le détecteur. Ce type d'analyse est approprié à l'analyse par fluorescence X à excitation directe des échantillons solides où une cible secondaire (plaque homogène) est insérée entre le tube à rayons X et l'échantillon à analyser. Les rayons X venant du tube excitent la cible secondaire et cette dernière émet ses raies caractéristiques qui, à son tour, vont exciter l'échantillon. Par conséquent, cette méthode est utilisée dans la partie expérimentale pour l'analyse des échantillons d'écrevisses.

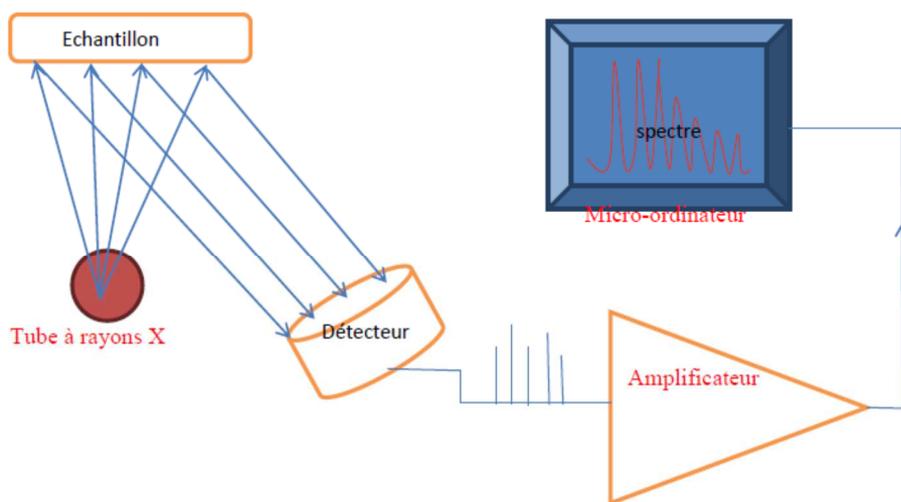


Figure 6. Spectromètre de fluorescence X à énergie dispersive

2.4. Travaux de laboratoire

2.4.1. Procédure d'échantillonnage

Etant donné que les échantillons sont des minerais solides transformés en poudre, leurs procédures de préparations comprennent six étapes ci-après (Figure 7):

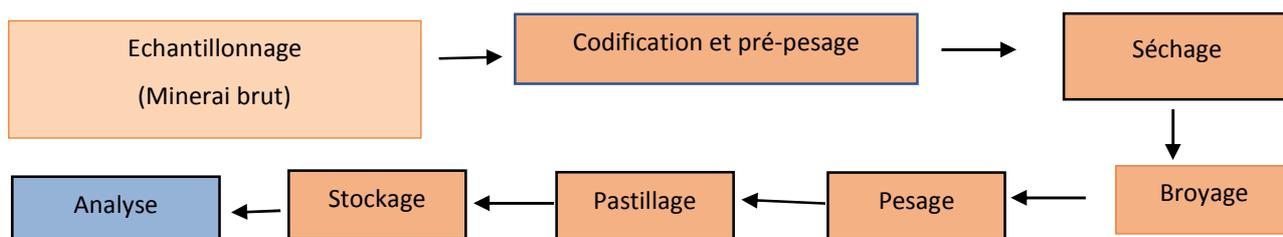


Figure 7. Processus de préparation d'échantillons

2.4.2. Lieux de prise d'échantillon

Les échantillons de sol, de sable et de roche ont été pris en 13 points (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12 et P13) différents dont dix provenant du gisement secondaire (quatre dépôts alluvionnaires et six dépôts éluvionnaires) et trois provenant du gisement primaire (Figure 8).

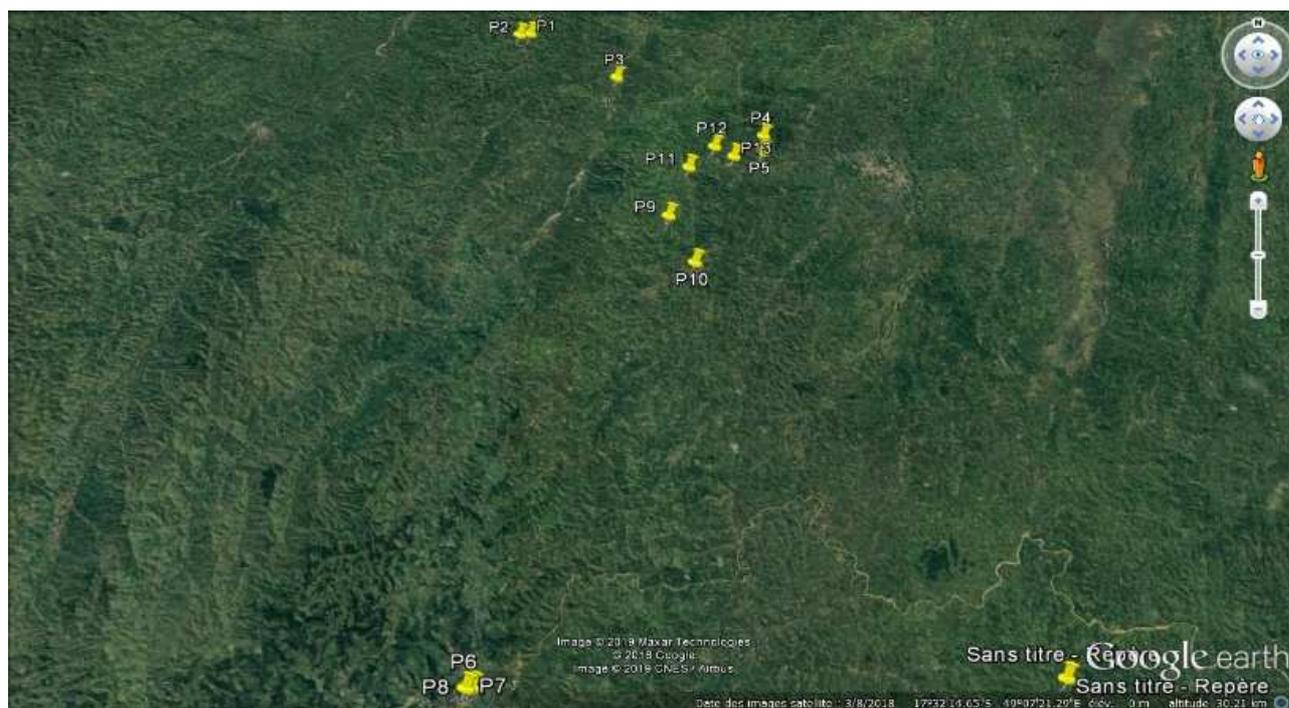


Figure 8. Image satellite de localisation des sites de prélèvement des échantillons

2.4.3. Codification d'échantillon

Avant de faire le séchage au four électrique, les échantillons ont été codés au site de prélèvement avant de faire l'analyse au laboratoire de l'INSTN pour mieux distinguer et peser pour connaître la perte d'eau. Le sol, les sables et les blocs des minerais ont été codifiés selon le besoin. Le tableau 2 ci-dessous contient tous les renseignements et les mesures obtenues lors de l'échantillonnage

Tableau 2. Echantillonnage et codification

Code	Lieu		Date et heure	Coordonnée géographique		Gisement	Dépôt
	Village	Commune		Latitude	Longitude		
E01GSA	Ambodiovitra Nord	Ambohibe	14/10/16 à 9h	17°24'37,8"S	49°04'41,3"E	Secondaire	alluvionnaire
E02GSA	Ambodiovitra Sud	Ambohibe	15/10/16 à 15h	17°24'47,0"S	49°04'34,2 E	Secondaire	alluvionnaire
E03GSE	Ambodimanga Nord	Ambohibe	15/11/16 à 14h	17°25'49,2" S	49°06'32,5"E	Secondaire	éluvionnaire
E04GSA	Mahanoro	Vavatenina	16/12/16 à 10h	17°27'25,2"S	49°09'24,5"E	Secondaire	alluvionnaire
E05GSE	Ambolofotsy	Vavatenina	28/12/16 à 17h	17°26'50,8"S	49°09'24,5"E	Secondaire	éluvionnaire
E06GP1	Betsakotsako	Miarinarivo	04/01/17 à 9h	17°37'52,6"S	49°04'29,8"E	Primaire	Montagne
E07GP2	Betsakotsako	Miarinarivo	25/01/17 à 14h	17°40'13,3"S	49°10'33,6"S	Primaire	Montagne
E08GP3	Betsakotsako	Miarinarivo	10/02/17 à 13h	17°46'10,6"S	49°18'34,9"E	Primaire	Montagne
E09GSA	Bongarano	Vavatenina	10/08/18 à 11h	17°28'13,6"S	49°09'43,6"E	Secondaire	alluvionnaire
E10GSE	Ambalahady	Vavatenina	18/08/18 à 17h	17°29'24,6"S	49°29'46,8"E	Secondaire	éluvionnaire

E11GSE	Tanambiavy	Vavatenina	30/08/18 à 9h	17°28'44,6"S	49°06'24,2"E	Secondaire	éluvionnaire
E12GSE	Ambalafary	Vavatenina	09/09/18 à 15h	17°28'64,3"S	49°08'692"E	Secondaire	éluvionnaire
E13GSE	Miandravato	Vavatenina	21/08/18 à 13h	17°24'13,6"S	49°05'46,4"E	Secondaire	éluvionnaire

2.4.4. Traitement des données

Les analyses suivantes ont été choisies pour traiter les données : l'analyse de variance (ANOVA), l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) et l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Elles sont appliquées sur les résultats obtenus à partir de tous les éléments minéraux détectés par la spectrométrie fluorescence X avec de concentration mg/kg, répartition des minéraux dans les lieux de prélèvement par échantillons.

2.4.4.1. Analyses de variances

Les analyses de variances ont été réalisées sur les éléments minéraux. L'objectif de cette méthode d'analyse est de rechercher si l'effet « traitement » est « significatif » au risque d'erreur ou au seuil de probabilité près (5%). Le logiciel XLSTAT, a été utilisé. Il permet de réaliser des analyses de variances aux types de dispositifs expérimentaux les plus courants (randomisation totale, dispositifs factoriels en blocs...). La notion de la signification de différence au seuil de probabilité 0,05 est la suivante :

- La différence est non significative (NS) lorsque la probabilité observée du test de Fisher (F) est supérieure à 0,05 ;
- La différence est significative (S) lorsque la probabilité observée de F est comprise entre 0,01 et 0,05 ;
- La différence est hautement significative (HS) lorsque la probabilité observée de F est inférieure à 0,01.

Les moyennes des valeurs des paramètres étudiés obtenues après test, ont été représentées à l'aide d'un histogramme. Selon le test de Newman-keuls qui a été appliqué, les moyennes suivies d'une même lettre constituent un groupe statistiquement homogène au seuil de 5%.

2.4.4.2. Analyse Factorielle des Correspondances (A.F.C.)

L'Analyse Factorielle des Correspondances est une méthode d'analyse de données utilisée lorsque les variables à étudier sont de nature qualitative ou à la fois qualitative et quantitative. Dans cette étude, les variables sont les différents sites d'étude et les individus sont les éléments minéraux. Cette méthode a pour but de représenter graphiquement les relations entre les sites d'étude et les éléments minéraux et de mettre en évidence les minéraux caractéristiques de chaque lieu de prélèvement. L'Analyse Factorielle des Correspondances consiste à dresser un tableau de contingence sur Excel à partir des listes des minéraux des différents sites de prélèvement ou de site d'exploitation. C'est un tableau à double entrée où les lignes correspondent aux échantillons et les colonnes aux minéraux. Les espèces présentes dans un échantillon ont été codées par « 1 » et les minéraux absents par « 0 ».

L'analyse a été effectuée à l'aide du logiciel XL-STAT 8.2 et les résultats sont sous forme d'un plan factoriel.

L'interprétation de ce plan prend en considération la proximité des points, la forme des nuages de points et la signification des axes. Ne sont représentées sur la figure que des espèces à forte contribution à l'axe.

2.4.4.3. Analyse en Composantes Principales (A.C.P.)

Pour déterminer l'origine des variabilités du Sable, du sol et de la roche à partir des données spectrométrie de fluorescence X, l'Analyse en Composantes Principales ou ACP est l'outil statistique adapté. Les ACP ont été faits sur le logiciel XLSTAT PRO.

L'étude simultanée d'un nombre important de variables quantitatives de plusieurs individus représentés dans un espace de dimension supérieure à 2 est difficile. L'objectif de l'ACP est ainsi de représenter globalement et graphiquement toutes ces données complexes dans un espace de dimension réduite de 2 dimensions en déformant le moins possible la réalité.

En effet, l'ACP va permettre la projection d'une matrice de données à « n » dimensions sur un plan factoriel à 2 dimensions dont les premiers axes factoriels appelées composantes principales qui vont conserver une grande partie de la variabilité du jeu de données (Jolliffe, 2002).

Par la suite, l'interprétation de ces graphiques permettra de comprendre la structure des données spectrales analysées. L'ACP des spectres a été effectuée pour étudier le mode de regroupement des échantillons. Ce dernier a été fait en fonction des caractéristiques spectrales des échantillons correspondant aux caractéristiques des minéraux.

3. RESULTATS

3.1. Résultats d'analyse par fluorescence X

La concentration affichée sur l'écran est notée X en mg.l^{-1} de solution pour avoir le résultat en mg par 100g nous procédons au calcul :

$$C \text{ en } \text{mg} / 100\text{g} = \frac{X \cdot 10^{-3} \times \text{dilution} \times V \times 100}{\text{Masse de l'échantillon}}$$

D'après l'analyse, on a pu détecter quarante-huit (48) éléments minéraux dans les treize (13) échantillons analysés par la méthode Turbo Quante-pellets powders. Ces éléments sont mentionnés dans les tableaux ci-dessous. La plage d'étude concerne les éléments minéraux ayant les numéros atomiques Z allant de 11 à 92. Une mesure sur les échantillons donne les concentrations mentionnées dans le tableau suivant où les colonnes indiquent l'échantillon et les lignes montrent les éléments détectés. Les concentrations s'expriment en milligramme par kilogramme (mg/kg) ou en pourcentage. Les résultats montrent que les échantillons des sols, des sables et des roches prélevées dans les différents sites renferment en majeure partie du Manganèse, de Vanadium et de l'Yttrium. Tandis que les éléments présents à l'état de traces sont le Sodium, Magnesium, Aluminium, Silicon, Phosphorus, Sulfur, Chlorine, Potassium, Calcium, Titanium, Vanadium, Chromium, Manganese, Iron, Cobalt, Nickel, Copper, Zinc, Gallium, Germanium, Arsenic, Selenium, Bromine, Rubidium, Strontium, Yttrium, Iridium, Niobium, Molybdenum, Silver, Cadmium, Tin, Antimony, Tellurium, Iodine, Cesium, Barium, Lanthanum, Cerium, Praseodymium, Neodymium, Erbium, Ytterbium, Hafnium, Tantalum, Tungsten, Mercury, Thallium, Lead, Bismuth, Thorium et Uranium. Mais il existe aussi des autres éléments qui sont le Silver, le Antimony, le Cesium, le Mercury à l'inférieur de la limite de détections de spectre par Turbo Quante-pellets powder.

4. DISCUSSION

4.1. Discussions sur les éléments dans les échantillons

Les résultats des analyses en turbo Quante-pellets powders sont présentés d'une part sous forme de spectre et d'autre part sous forme de tableau.

Pour faciliter l'analyse des résultats, nous allons classer nos points de vue sur trois (03) gisements aurifères artisanaux et par classe des échantillons :

- *Gisement secondaire alluvionnaire (GSA)* : Les échantillons dans les dépôts alluvionnaires se trouvent soit sur le lit de la rivière, de la rive de la rivière et dans le fond de la rivière. Les échantillons analysés sont les sables. Les résultats obtenus après l'analyse fluorescence de rayon X sont classés par E01GSA, E02GSA, E04GSA et E09GSA (gisement secondaire alluvionnaire).

- *Gisement secondaire éluvionnaire (GSE)* : Les échantillons sur les dépôts éluvions dans la couche aurifère sont couverts des matériaux latéritiques. Les échantillons analysés sont les sols. Les résultats sont classés dans les six (06) échantillons suivants : E03GSE, E05GSE, E10GSE, E11GSE, E12GSE et E13GSE.

- *Gisement primaire (GP)* : Les échantillons dans les dépôts primaires se trouvent dans les roches montagneuses. Les échantillons analysés sont des roches magmatiques. Ils sont composés de trois échantillons : E06GP (1), E07GP (2) et E08GP (3).

4.1.1. Cas de l'échantillon de sable

4.1.1.1. *Spectre*

La figure 11 représente le spectre de sable.

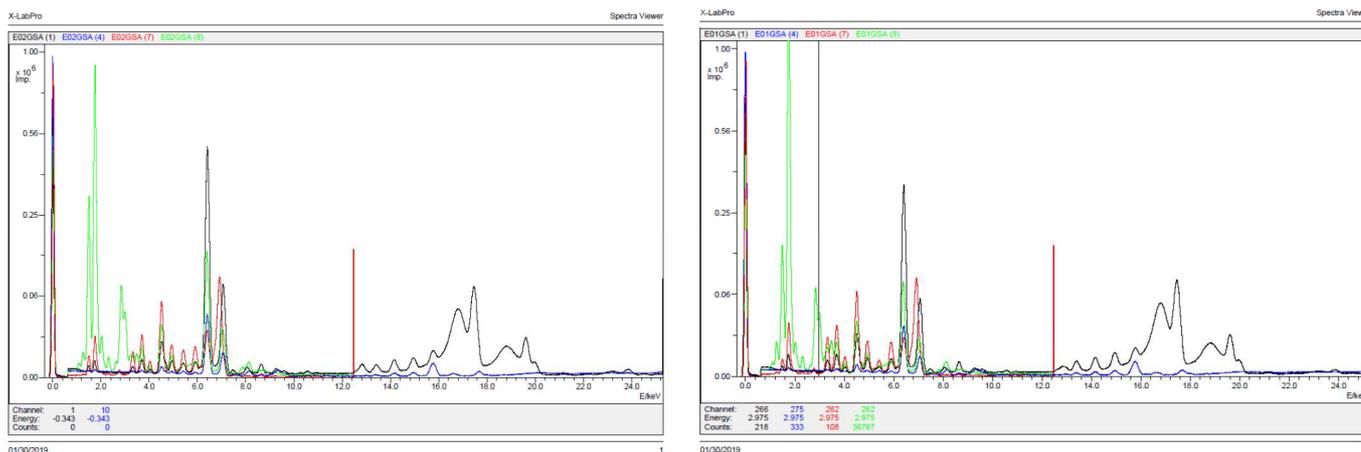


Figure 9. Spectre de l'échantillon de sable, (Graphe 9a) n° E01GSA, (Graphe 9b) n° E02GSA

Trente-trois (33) éléments sont totalement significatifs dans tous les échantillons analysés. On peut dire que ces éléments constituent le sable aurifère de Vavatenina. Les quantités de ces éléments sont variées selon le lieu de prélèvement et la catégorie dépôts. Les minéraux qui ont la concentration la plus élevée est le Vanadium. La concentration maximale est 1526 ppm et qui se situe dans le gisement aurifère secondaire alluvionnaire d'Ambodihovitra au Nord de la Commune d'Ambohibe. Il est à noter que le hasard de 37,120% dans l'échantillon E01GSA. Après le Vanadium, l'Yttrium et le Manganese toujours dans l'échantillon E09GSA avec de 1002 ppp et de 22.418 % pour de l'Yttrium et 940,2 ppm avec de 21,035% celle de Manganese. Ils se localisent à Bongarano Commune de Vavatenina.

4.1.2. Cas de l'échantillon de sol

4.1.2.1. Spectre

La Figure 10 représente le spectre de l'échantillon de sol

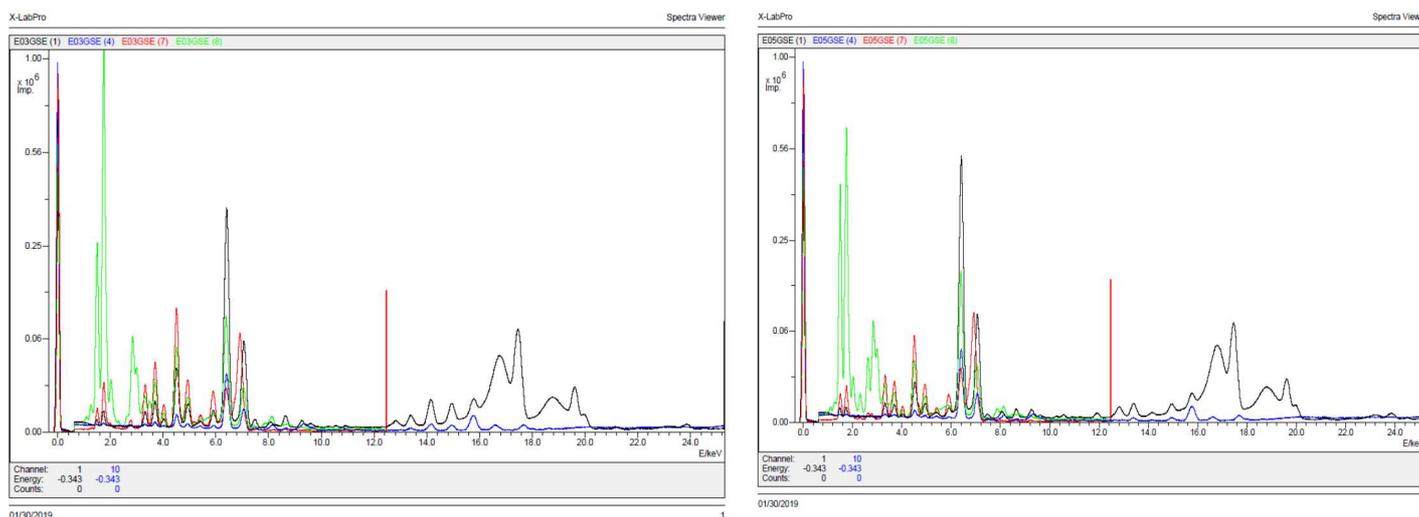


Figure 10. Spectre de l'échantillon de sol, (Graphe 10a) n° E03GSE, (Graphe 10b) n° E05GSE,

Le gisement secondaire éluvionnaire de Vavatenina est composé par trente-cinq (35) éléments minéraux dans les 52 éléments détectés par la spectrométrie fluorescence X avec de signification à 100%. Le Manganèse est le minéral toujours présent presque dans tous les échantillons analysés avec une quantité plus importante par rapport aux autres minéraux. Ces quantités élevées varient au maximum de 2463 ppm dans l'échantillon n° E12GSE avec 47,222% et au minimum 421,7 ppm dans l'échantillon n° E05GSE avec de 15,361%. La concentration moyenne de Manganèse dans tous les échantillons est de 1258,36 ppm. Ces deux échantillons se trouvent dans les sites d'Ambalafary et d'Ambolofotsy de la Commune de Vavatenina. Après le Manganèse, c'est le Zirconium qui est le minéral qui porte une quantité plus élevée avec la concentration moyenne de 491,9 ppm dans six (06) échantillons analysés. La quantité plus remarquable est de 909,5 ppm dans l'échantillon n° E12GSE avec 17,437%. Elle se trouve dans le site d'Ambalafary de la Commune de Vavatenina.

L'Yttrium, le Cerium et le Chlorine ont des concentrations plus ou moins élevées dans le gisement éluvionnaire de Vavatenina. Pour l'Yttrium, le taux le plus remarquable est de 570,8 ppm avec 14,259% de l'échantillon n° E11GSE. Pour le Chlorine et le Cerium les concentrations les plus importantes sont respectivement de 552,7 ppm avec 16,491% de l'échantillon n° E05GSE et de 458 ppm avec 8,781% de l'échantillon n° E12GSE.

4.1.3. Cas de l'échantillon de roche

4.1.3.1. Spectre

La Figure 11 représente le spectre de l'échantillon de sol

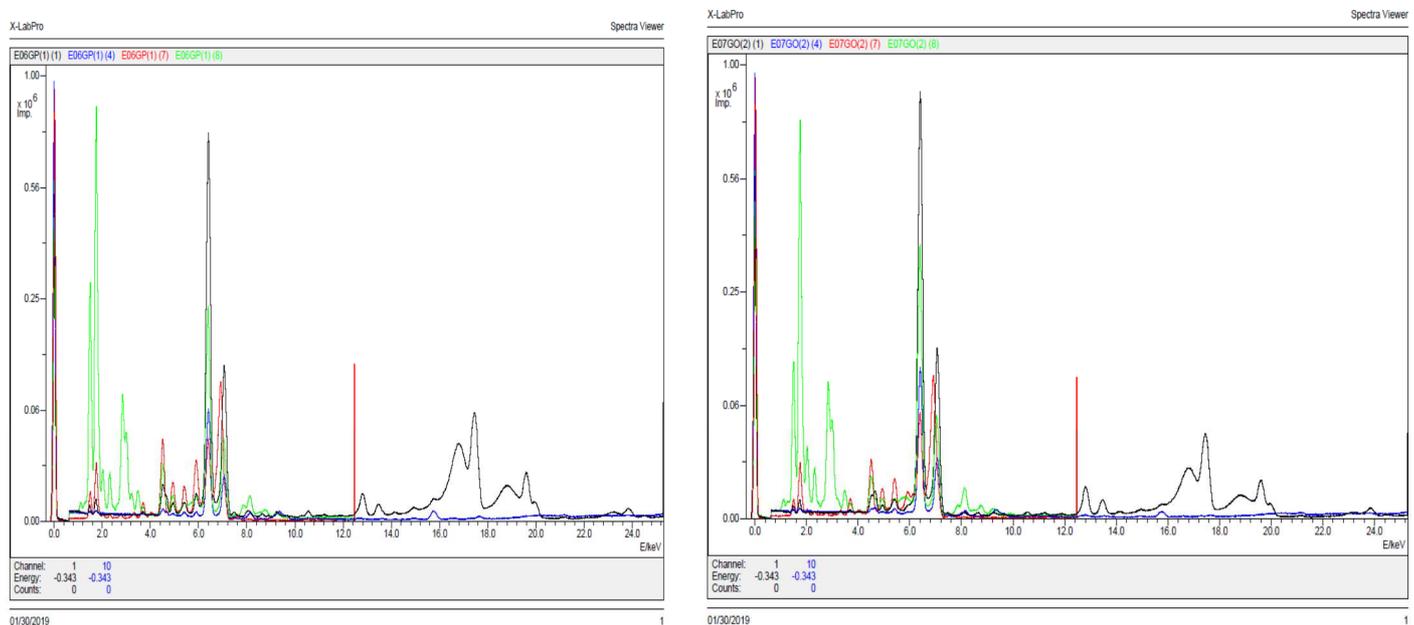


Figure 11. Spectre de l'échantillon de roche, (Graphe 11a) n° E06GP(1), (Graphe 11b)

Dans le cas de gisement primaire, presque la majorité des éléments minéraux détectés par l'appareil de l'analyse de spectrométrie de fluorescence de rayon X sont présentes dans ce gisement avec une signification à 84, 61% des éléments détectés qui sont présents. Parmi les 44 éléments détectés, le Manganèse est le minéral qui présente la concentration la plus élevée. La concentration la plus remarquable se situe dans le site d'exploitation d'Andragazaha Betsakotsako de la Commune Miarinarivo dans l'échantillon n° E06GP(1). La concentration en Manganèse est de 1280 ppm avec 48,094% de l'échantillon. Le Sulfure, le Calcium et le Vanadium sont les minéraux qui ont des concentrations les moins élevés après le Manganèse. Ces trois (03) minéraux ont à peu près la même valeur en ppm dont 335,8 ppm avec 25,98 % dans l'échantillon n° E07GP(2) pour le Calcium ; 325,8 ppm avec 22,991% dans l'échantillon n° E08GP(3) pour le Vanadium et enfin 320,3 ppm avec 12,039% dans l'échantillon n° E06GP(1) pour le sulfure. Le Potassium présente une concentration plus faible par rapport aux autres minéraux qui pèsent 0, ppm et qui vaut 0,001% dans l'échantillon n° E08GP(3).

En bref, on peut dire que ces trente minerais représentent la caractéristique du gisement primaire d'origine de roche magmatique de Vavatenina. Pour la série de Vavatenina, leur répartition dans l'espace est hétérogène surtout dans la commune de Vavatenina même et dans la région d'Angomoa (Mahavita, 2014).

4.2. Distribution des éléments minéraux suivant le gisement aurifère alluvionnaire

L'analyse des résultats d'expérimentation de l'analyse de spectrométrie à fluorescence X des échantillons du sol, du sable et de roche auprès du laboratoire d'analyse de Physique Nucléaire et de Physique de l'Environnement de l'INSTN a pour objectif d'identifier les éléments minéraux constituant le gisement aurifère. Elle a été faite en appliquant l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) sur les résultats d'analyses, des éléments minéraux qui se répartissent dans le gisement secondaire alluvionnaire, le gisement secondaire éluvionnaire et le gisement primaire.

La première AFC a été faite sur le fichier global de présence / absence de 33 éléments minéraux issus dans le gisement secondaire alluvionnaire. La figure 12 suivante représente le premier plan factoriel qui explique les 78,73% de la variabilité totale.

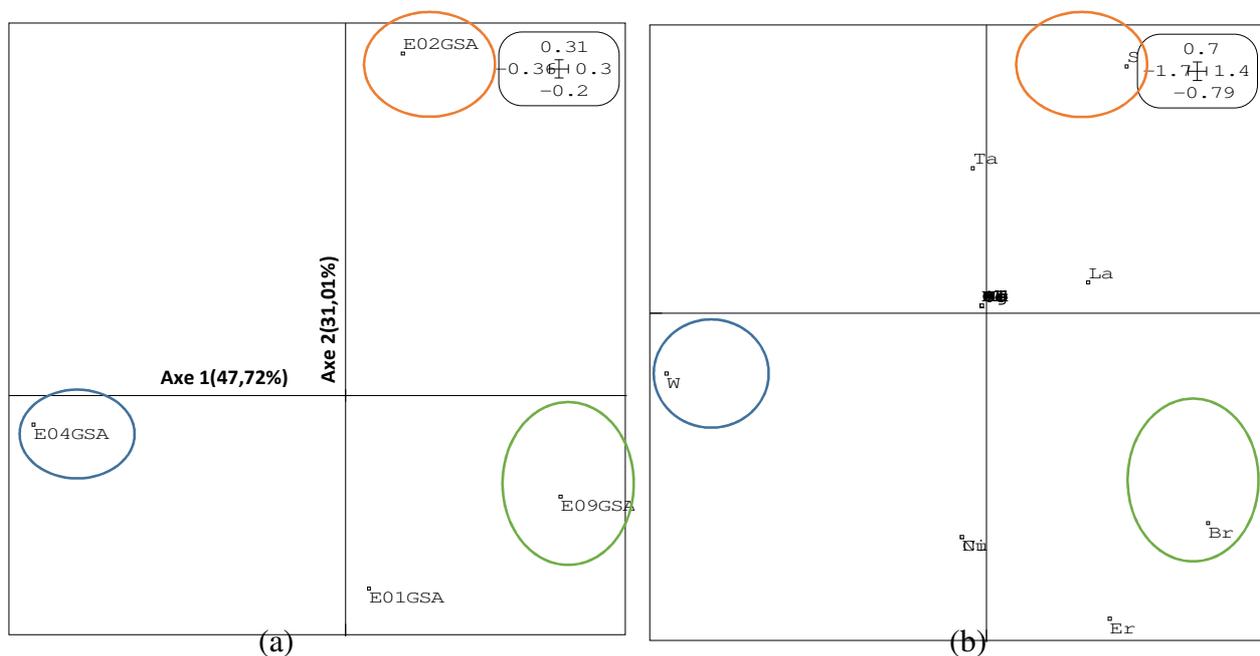


Figure 12. Cartes factorielles dans le gisement secondaire alluvionnaire, (a) 4 échantillons et (b) des 33 minéraux

Des échantillons collectés dans le type de gisement alluvionnaire suivant l'axe 1 montre E09GSA, E02GSA et E01GSA (en abscisses positives) et les autres échantillons dans le gisement d'E04GSA (en abscisses négatives). Cette répartition conduit à interpréter cet axe comme représentant les minerais qui constituent ce gisement. Le gisement aurifère alluvionnaire de Mahanoro (E04GSA) est caractérisé par le minerai de Tungsten (W).

Le long de l'axe 2 sont associées en ordonnées positives les minerais caractéristiques du gisement alluvionnaire d'Ambodiovitra-2 (E02GSA) telles que Tin (Sn) et en ordonnées négatives de Gisement alluvionnaire de Bongarano de (E09GSA) Brome (Br).

La deuxième analyse a été effectuée sur la matrice de 06 échantillons avec 35 éléments minéraux dans le gisement secondaire éluvionnaire secondaire. Les résultats de cette analyse sont représentés sur la figure 13 ci-dessous. Les axes 1 et 2 absorbent 73,63% de la variabilité totale.

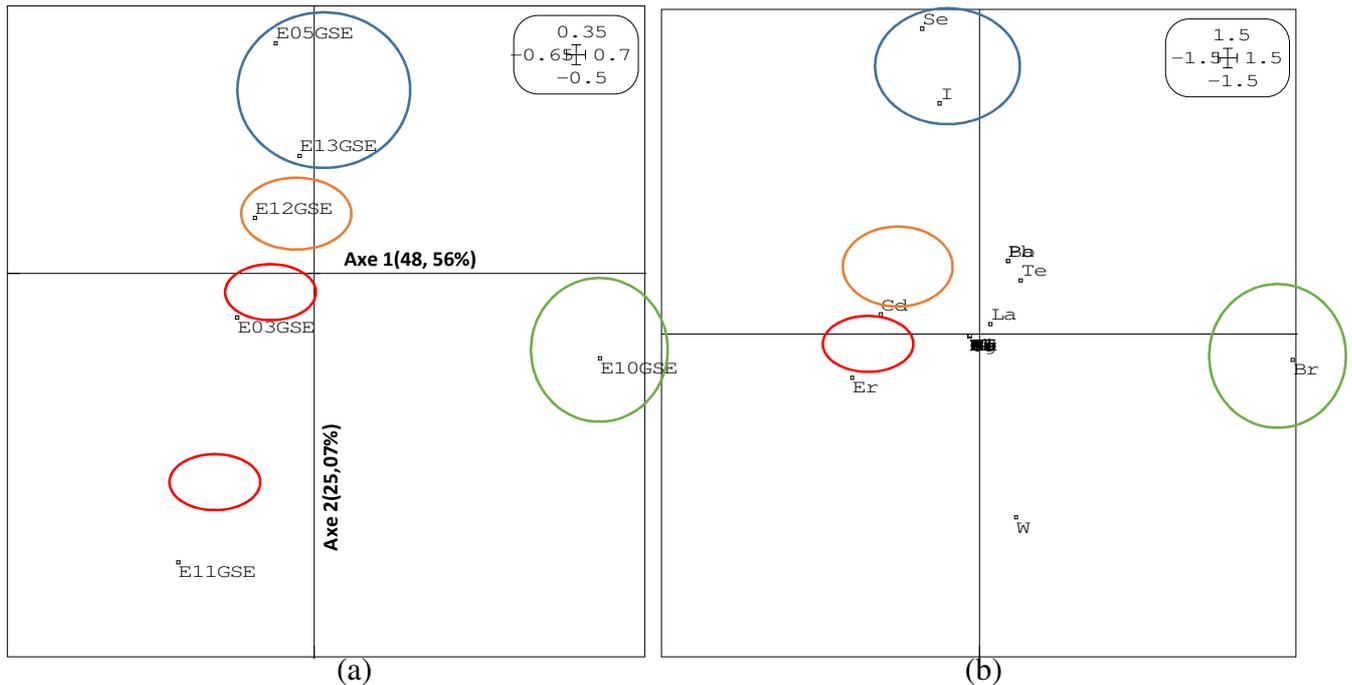


Figure 13. Cartes factorielles dans le gisement secondaire éluvionnaire, (a) 6 échantillons et (b) des 35 minéraux

L'agencement des points représentatifs des échantillons les plans factoriels a et b montrent une très nette représentativité des minéraux dans le gisement éluvionnaire (E05GSE, E012GSE et E013GSE) en ordonnées positives et les autres échantillons (E03GSE, E10GSE et E11GSE) en ordonnées négatives.

Les 05 échantillons analysés sont caractérisés par les éléments minéraux suivants : E05GSE et E13GSE (Selenium et Iodine), E12GSE (Cadmium), E03GSE (Erbium) et E10GSE Bromine. La présence de ces minéraux détermine la caractéristique distinctive du gisement secondaire éluvionnaire.

Pour déterminer les éléments minéraux dans le gisement primaire, la matrice de similitude qui a servi à l'analyse factorielle est constituée en ligne par 44 éléments et en colonnes par 03 échantillons. Les résultats de cette analyse seront détaillés dans la figure 14. Les axes 1et 2 absorbent 100% de la variabilité totale.

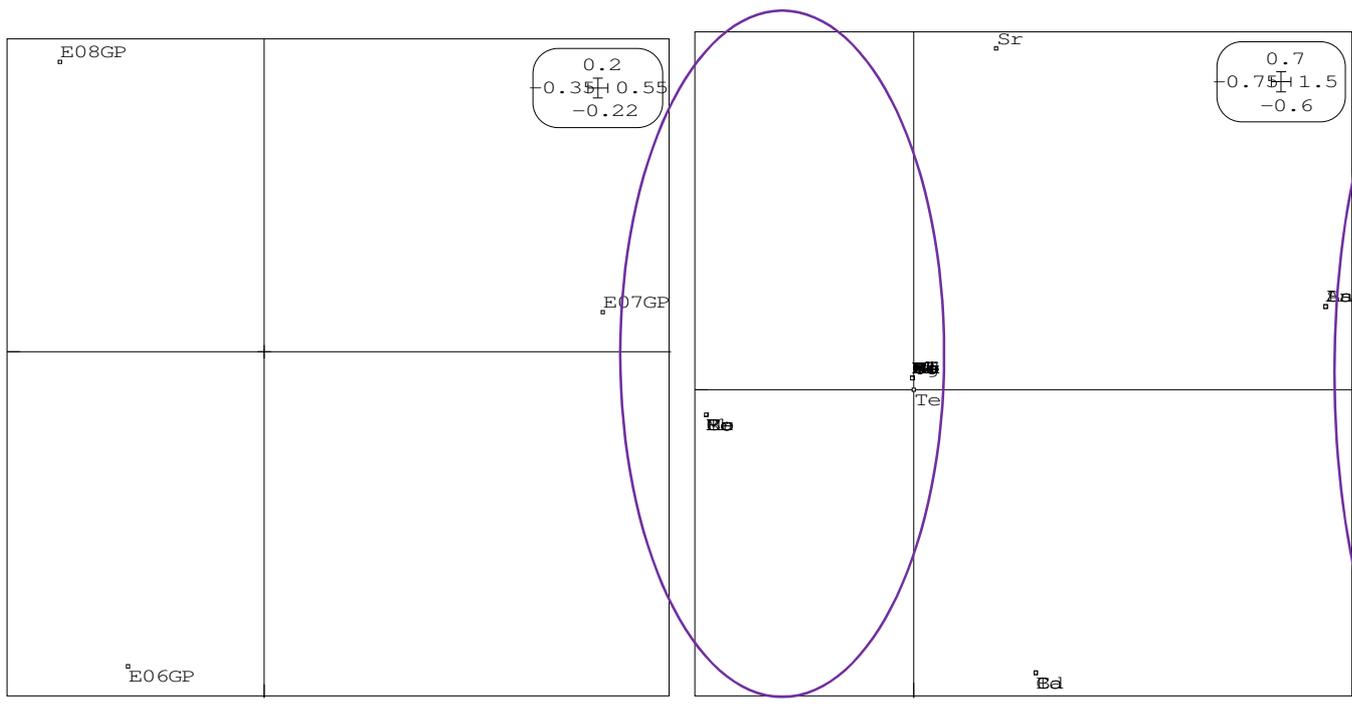


Figure 14. Cartes factorielle dans le gisement primaire, (a) 6 échantillons et (b) des 44 minéraux

L'axe 1 est constitué de l'échantillon E06GP1 et E08GP1 (en abscisses négatives) qui est caractérisée par Bromine, Molybdenum, Cerium, et Tantalum en abscisse négative. L'axe 1 discrimine les types de gisement dans le rocheux d montagne, de ceux des autres échantillons (en abscisses positive) tel qu' Arsenic, Tin et Lanthanum.

4.3. Quantité en minéraux dans le gisement aurifère

L'Analyse en Composantes Principales ou ACP a été utilisée pour discerner les quantités et qualités des minéraux dans les gisements. Le tableau de contingence est constitué en ligne par les échantillons E01GSA, E02GSA, E03GSE, E04GSA, E05GSE, E06GP1, E07GP2, E08GP3, E09GSA, E10GSE, E11GSE, E12GSE, E13GSE) et en colonnes par les variables éléments minéraux du sol, du sable et de roche : Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Te, I, Ba, La, Ce. Pr, Nd, Er, Yb, Hf, Ta, W, Pb, Bi, Th et U. Le résultat de cette analyse est détaillé dans la figure 15 suivante

Le plan factoriel absorbe 41,86% des informations totales, soit 25,57% pour l'axe 1 et 16,29 % pour l'axe 2. La figure xx ci-dessous représente le cercle de corrélation des différents minéraux présent dans les 13 échantillons. Sur l'axe des abscisses tel qu'Yb, Er, Sr, La, Rb, K, Y, Sn, W, Ti, Zn, Na, Nb, Sr, Ba, P, Ga, Cu, Mg, Mn et Zr sont corrélés en abscisse positive. L'élément corrélés en abscisse négative sont Y, U, Se, Te, Mo et Pb. Sur l'axe des ordonnées, le Fe, Co, As, Ca, Ge, Ni, Ta, Cd, Bi et Pr sont corrélés en ordonnée positive et s'opposent à la S, Cr, Br, Cl, Ce, Hf, Nd, Th, Cu et Al en ordonnée négative. Le Pr, Bi, Cd, Ta, Re, La, Sr, Rb, K, Y et Zn contribue le plus à la formation de l'axe des abscisses qui constitue la quantité plus élevées dans l'E11GSE, ainsi que le facteur prépondérant de cet axe s'oppose à la Pb a forte quantité de Pb sur E13GSE. Par contre dans l'axe de l'ordonné positive l'E07GP2 qui signifie plus de quantité en Fe, Co, As, Ca, Ge et Ni, de même axe le Hf et le Zr porte de quantité remarquable dans l'E012GSE de l'ordonné négative.

- Jenkins R., Golde R. W., Gedeke D.. Quantitative X-Ray Spectrometry 20. New York : Marcel Dekker, 1995.
- Van Grieken R.E., Markowicz A.A.. Handbook of X-Ray Spectrometry 14. New York : s.n., 1993.
- Rodrigues M., 2007. Développement d'un bolomètre magnétique haute résolution en énergie pour la spectrométrie gamma appliquée à la détermination des intensités d'émission photonique. Thèse de doctorat. Université de Paris XI. p. 13.
- D'yakonov Y. S. (1963) - Results from an X-ray study of cerolites. Doklady Acad. Nauk SSSR, 148, Earth Science Sections (English Transl., Am. Geol. Inst.), 107-109.
- Rose M.J. , Adler I., Flanagan F. (1963) - Applied Spectroscopy, n° 4, p. 81-85.
- Sposito. G. 1997.The Chemical Composition Of Soils. The Chemistry Of Soils. Oxford University Press.New-York:P3-27
- Raynal, F., et Rieunier A. Pédagogie: dictionnaire des concepts clés. Édité par Revue Française de Razafimahatratra, H.M. 2010. Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen infra-rouge:
- Salomon, J.N. 2009. L'accrétion littorale sur la côte Ouest de Madagascar. Physio-Géo 3 :14-19.
- Duchaufour, P. , Abrégés De Pédologie. Ed. Masson. Paris, 220 P. 1984.
- Calvet, R. « Le Sol Propriétés Et Fonctions », Tome 1, France Agricole DUNOD, 455 P. (2003).
- Soltner, D : Distribution Liquid Et Voie Métabolique Chez Quatre Bactéries Gramnégative Hydrocarbonoclaste. Variation En Fonction De Sources De Carbone. Docteur De L'université PARIS 6 2004
- Gobat .J.M, Aragno M Et Matthey W : Le Livre (Le Sol Vivant : Base De Pédologie Et Biologie Des Sols). 3eme Edition Revue Et Augmentée P150-165/2010
- Redlich G.C. Et Verdure - Le Comportement Physique Des Tourbes En Cours De Culture PHM.Revue Horticole.160 ; P 13-20 1975
- Koller Emilian. Traitement Des Pollutions Industrielles. Edition DUNOD Paris.P 277-347, 2004.
- Blanc D. Les Structures Hors Sol INRA Ed Louis.Paris.409p 1985
- Boudouch.O. « Étude De Dépollution Des Sols Par Extraction Sous Pression Réduite.2009
- Jean Dercout et Jacques Paquet dans « Géologie Objets et méthodes page 199, 8è édition, Paris 1990)
- http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/4_2/4_2_1.html. X-ray absorption edges, characteristic X-ray lines and fluorescence yields, National Physical Laboratory,2015, (consulté le 15 janvier 2018)
- <http://www.ondraf.be/sites/niras.be/files/radioactivit%C3%A9%2C%20une%20introduction.pdf> (Consulté 18 Décembre 2028)
- www.une-eaupure.com/purification-de-l-eau/filtration-et-filtre-sable.html.(Consulté le 20 novembre 2018)