

Université d'Antananarivo  
Faculté des Sciences d'Antananarivo  
Département de Physique  
B.P. 906  
101 Antananarivo Madagascar

Laboratoire de  
Physique Nucléaire et  
de l'Environnement



**MEMOIRE DE**  
**Diplôme d'Etudes Approfondies**  
**DE PHYSIQUE**  
**(OPTION : PHYSIQUE NUCLEAIRE,**  
**PHYSIQUE THEORIQUE ET PHYSIQUE**  
**APPLIQUEE)**  
**(Département de Fluorescence X)**  
**présenté par**

RASATATSIHOARANA Sergio Francesco

ETUDE DE LA QUALITE DES EAUX DE CONSOMMATION DANS QUELQUES  
REGIONS DE LA PROVINCE D'ANTANANARIVO PAR LA TECHNIQUE  
D'ANALYSE PAR FLUORESCENCE X REFLEXION TOTAL

Soutenu publiquement à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo  
Le 29 Décembre 2003 devant la commission d'examen composée de:

- Président : **Monsieur RABOANARY Roland**  
*Professeur Responsable de l'option physique Nucléaire, Physique  
Théorique et Physique Appliquée à la Faculté des Sciences –  
Université d'Antananarivo*
- Rapporteur : **Madame RAKOTOZAFY RANDRIAMANIVO Lucienne**  
*Docteur de Troisième Cycle  
à la Faculté des Sciences – Université d'Antananarivo*
- Examineurs : **Madame RAHARISOLOLALAO Amélie**  
*Professeur Titulaire  
Chef du laboratoire de Chimie des Substances Naturelles et de  
Chimie Organique Biologique  
à la Faculté des Sciences – Université d'Antananarivo*
- Monsieur RASOLOFONIRINA Mamisheho**  
*Docteur de Troisième Cycle  
à la Faculté des Sciences – Université d'Antananarivo*

*Je remercie Dieu, tout puissant pour la grace, la santé et le courage, qui m'ont aidé durant  
la période de réalisation de mes travaux.*

*Ma profonde reconnaissance s'adresse particulièrement à Monsieur **RAOELINA  
ANDRIJAMBOLOLONA**, Professeur Emérite à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo ,*

Directeur Général de Madagascar-INSTN qui m'a accepté de prendre un de ses étudiants dans son Institut. Je suis très reconnaissant pour ces précieux conseils ainsi que pour tous les enseignements qu'il m'a offerts. J'exprime ma sincère reconnaissance à Monsieur **RABOANARY Roland**, Professeur Responsable de l'option physique Nucléaire, Physique Théorique et Physique Appliquée à la Faculté des Sciences – Université d'Antananarivo pour avoir bien voulu être le Président de Jury de ce rapport.

J'adresse ma profonde gratitude à tous les membres du Jury :

Président : **Monsieur RABOANARY Roland**  
Professeur Responsable de l'option physique Nucléaire, Physique Théorique et Physique Appliquée à la Faculté des Sciences – Université d'Antananarivo

Examineurs : - **Madame RAHARISOLOLALAO Amélie**  
Professeur Titulaire  
Chef du laboratoire de Chimie des Substances Naturelles et de Chimie Organique Biologique

**A la Faculté des Sciences – Université d'Antananarivo**

- **Madame RAKOTOZAFY RANDRIAMANIVO Lucienne**  
Docteur de troisième cycle

**A la Faculté des Sciences – Université d'Antananarivo**

- **Monsieur RASOLOFONIRINA Mamiseheno**  
**Docteur de Troisième Cycle**  
à la Faculté des Sciences – Université d'Antananarivo

J'adresse également mes sincères remerciements à :

Madame **RAKOTOZAFY RANDRIAMANIVO Lucienne**, Docteur de troisième Cycle à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, Chef de Département de la Fluorescence X à Madagascar-INSTN, mon Encadreur et Monsieur **RASOLOFONIRINA Mamiseheno**, Docteur de Troisième Cycle à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, pour leurs précieux conseils et aides qu'ils m'ont apporté pour mener à terme ce travail malgré leur lourde responsabilité.

Par ailleurs, que les nombreuses personnes membres de l'Institut Madagascar-INSTN qui m'a aidé à la réussite du présent travail en soient vivement remerciés.

Ensuite, les prélèvements effectués sur différents sites ont été permis par la grande compréhension de tous les peuples Tananarivien. Je lui témoigne ma profonde reconnaissance.

Enfin, ce travail n'aurait pu être mené à son terme sans l'aide de toute ma famille : mon Père, ma Mère, mes frères et mes sœurs, ... pour leur soutiens moral, financier, et matériel. Je leur exprime toute ma profonde reconnaissance.

**SOMMAIRE**

**REMERCIEMENTS**

*PREFACE*

**INTRODUCTION** 1

**Chapitre 1. GENERALITES SUR L'EAU**

1.1. Cycle de l'eau	2
1.2. Propriété de l'eau	2
1.3. Composition de l'eau	2
1.4. Pollution de l'eau	2
1.4.1. Pollution biologique	2
1.4.2. Pollution chimique	3
1.5. Normes et critères de potabilité	3
1.6. Effets néfastes de quelques éléments indésirables et toxiques	4

**PARTIE THEORIQUE**

**Chapitre 2. GENERALITES SUR LES RAYONS X**

2.1. Les rayons X	6
<b>2.1.1. Origine des rayons X</b>	<b>6</b>
<b>2.1.2. Production des rayons X</b>	<b>6</b>
<b>2.1.3. Propriété des rayons X</b>	<b>7</b>
2.2. Interaction des rayons X avec la matière	7
2.2.1. Mécanismes interactionnels	7
2.2.1.1. Effet photoélectrique	7
2.2.1.2. Effet de diffusion Compton	10
2.3. Atténuation des photons X	12
2.4. Phénomène connexe	14
2.4.1. Effet Auger	14
2.4.2. Rendement de fluorescence	15

**Chapitre 3. ANALYSE PAR FLUORESCENCE X A REFLEXION TOTALE**

3.1. Principe	16
3.2. Réflexion totale	16
3.2.1. Angle critique	16
3.2.2. Réflectivité	19

3.2.3. Pouvoir de pénétration	19
3.3. Intensité de fluorescence	20
3.4. Effet de matrice	24
3.4.1. Absorption	24
3.4.2. Excitation secondaire	25

#### *Chapitre 4. INSTRUMENTATION*

4.1. Spectrométrie X à énergie dispersive à réflexion totale	26
4.1.1. : Source excitatrice	27
4.1.2.: Collimateur	27
4.1.3. Réflecteur de séparation	27
4.1.4. Réflecteur porte échantillon	28
4.1.5. Haute tension	28
4.1.6 . Détecteur	28
4.1.7. Préamplificateur et amplificateur	28
4.1.8. Analyseur multicanal	28
4.1.9. Terminal informatique	28
4.2. Détection des photons X	29
4.3. Les paramètres caractéristiques du détecteur	29
4.3.1. Résolution du détecteur	29
4.3.2. Efficacité d'un détecteur	30

### **PARTIE EXPERIMENTALE**

#### **Chapitre 5. ETALONNAGE DU SYSTEME**

<b>5.1. Etalonnage en énergie</b>	<b>31</b>
5.2. Etalonnage en sensibilité	31

#### **Chapitre 6. METHODE ANALYTIQUE**

6.1. Précision de la méthode	35
6.1.1. Limite de détection	35
6.1.2. Contrôle de la fidélité	36
6.1.3. Contrôle de la justesse	36

6.2. Incertitude des mesures	37
------------------------------	----

## **RESULTATS D'ANALYSES ET INTERPRETATION**

### **Chapitre 7. APPLICATION DE LA TXRF SUR LE CONTROLE DE QUALITE DES EAUX DE CONSOMMATION**

7.1. Méthodologie	
7.1.1. Echantillonnage	39
7.1.2. Appareils des mesures	39
7.2. Normes utilisées pour le contrôle	39
7.3. Cartes et tableaux des résultats synthétiques      expérimentaux	
7.3.1. Vinaninkarena	42
7.3.2. Antsirabe	45
7.3.3. Ambatolampy	47
7.3.4. Atsimondrano	49
7.3.5. Miarinarivo	51
7.3.6. Arivonimamo	53
7.3.7. Manjakandriana	55
7.3.8. Ambohidratrimo	57
7.4. Comparaison des résultats obtenus dans toutes les zones d'études	59
<b>CONCLUSION</b>	<b>66</b>
<b>ANNEXE</b>	<b>69</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b>	<b>75</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	
<i>RESUME</i>	

---

---

## INTRODUCTION

Le nucléaire était considéré comme un instrument de guerre au début du XX<sup>ème</sup> siècle. Son utilisation est très développée actuellement dans plusieurs domaines tels que la médecine, l'environnement, l'industrie, l'archéologie, etc.

Notre étude est un exemple d'utilisation pacifique du nucléaire dans le domaine de l'environnement concernant la qualité de l'eau. L'eau est essentielle, non seulement, aux processus vitaux de l'homme et des espèces animales ou végétales mais aussi à nos activités quotidiennes (hygiène, économie, etc.). La santé de l'homme dépend également de la qualité de l'eau. L'eau de mauvaise qualité engendre des nombreuses maladies telles que le diarrhée, le choléra, etc.

Le principal problème lié à la consommation de l'eau à Madagascar concerne aussi bien sa qualité que sa quantité. Il s'ensuit de l'importance de la gestion rationnelle des ressources en eau dans toutes les régions de l'Ile. Antananarivo en fait partie. Très peu des gens ont bénéficié de l'eau potable.

Le présent travail ayant comme titre : « Etude de la qualité des eaux de consommation dans quelques régions de la province d'Antananarivo » a pour principal objectif d'effectuer des analyses élémentales afin d'envisager une meilleure qualité de l'eau pour les consommateurs, et d'apporter aux propriétaires et autorités compétentes des suggestions et solutions pouvant améliorer la qualité de l'eau dans toute la province.

L'analyse par Fluorescence X à Réflexion Totale (TXRF) est la technique utilisée pour effectuer les analyses. La TXRF est une technique récente dans le domaine du nucléaire, cette méthode est conçue spécialement à l'analyse des échantillons liquides. Elle est capable d'analyser simultanément plusieurs éléments.

L'étude a été menée dans huit régions de la Province d'Antananarivo. Il s'agit de Vinankarena, Antsirabe, Ambatolampy, et Atsimondrano dans le sud ; Miarinarivo et Arivonimamo Ambohidratrimo à l'Ouest ; et enfin Manjakandriana au Nord.

Le travail comprend quatre grandes parties. La première partie décrit la généralités sur l'eau. La partie théorique est traitée dans la deuxième partie. La troisième partie est consacrée à la partie pratique et expérimentale. Et enfin, les résultats synthétiques expérimentaux et les interprétations sont rapportés dans la dernière partie.

## Chapitre 1.GENERALITES SUR L'EAU

La terre est recouverte à plus de 70% d'eau. A l'origine, il y a plusieurs milliards d'années, l'eau recouvrait la quasi-totalité de la planète terre. C'est au milieu de cette eau que se sont constituées les premières cellules vivantes qui sont à l'origine de toutes les matières vivantes : les végétaux, les animaux, et les hommes. Cette origine atteste de l'étroite dépendance que toute vie sur terre entretient avec l'eau [1]. L'eau est indispensable à la vie. Elle est une ressource aussi précieuse que vitale.

### 1.1. Cycle de l'eau

Sous l'effet du soleil, l'eau s'évapore et monte dans l'atmosphère. On estime à 1 000 km<sup>3</sup> l'eau des océans qui, chaque jour, s'évapore et monte dans l'atmosphère. Elle emmagasine de la chaleur. Tôt ou tard (en moyenne huit jours), l'action du froid rencontré en haute altitude condense cette eau : les nuages se forment et il pleut. 60 % de cette eau s'évaporent à nouveau. 15 % ruissellent et rejoignent les cours d'eau, les mers et les océans. 25 % s'infiltrent et alimentent les nappes et les rivières souterraines [1].

### 1.2. Propriété de l'eau

L'eau peut se trouver sous trois états : liquide, solide, et gazeux. A l'état liquide et solide, l'eau a des caractères exceptionnels. Elle est une substance qui a une tendance et une forte propension à dissoudre d'autres éléments. Elle peut dissoudre des éléments présents dans la terre (K, Ca, etc...) ainsi que des gaz présents dans l'air comme le CO<sub>2</sub>. Elle peut aussi sculpter des paysages. Sa densité est de 0,997g/cm<sup>3</sup>

### 1.3. Composition de l'eau

La composition de l'eau est variable. Plusieurs éléments y sont probablement trouvés tels sont les cations : Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, les anions : HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, ..., les éléments indésirables : Fe, Mn, ..., et les éléments toxiques : Pb, Hg, Cr, U, Ni, ....

### 1.4. Pollution de l'eau

#### 1.4.1. Pollution biologique

***La dégradation de l'écosystème est à l'origine du rejet d'effluents chargés des matières organiques fermentescibles et de nombreux agents pathogènes . Les matières organiques présentes dans l'eau proviennent de diverses sources : les rejets domestiques et urbains, les rejets industriels, la décomposition d'animaux et de végétaux morts, des activités agricoles (épandage, pesticides, fongicides, herbicides...)***

**[2]. Elle est souvent responsable d'odeur désagréable, de couleur et de saveur, c'est la source de la pollution des eaux fluviales .**

#### **1.4.2. Pollution chimique**

Les atteintes à la qualité de l'eau dues à l'activité humaine sont très nombreuses. Les déchets chimiques rejetés par les usines et industries sont responsables de la pollution des rivières et lacs. Le phosphate, dans la nature provient essentiellement de la décomposition des cellules mortes qui sont minéralisées par les micro-organismes pour donner des phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) rapidement assimilés [2]. Le nitrate et le sulfate provenant du lessivage des terres cultivées, et de la pollution due aux décharges domestiques représentent une importante cause de pollution des eaux. Dans les régions d'agriculture intensive, les rivières, les lacs, les nappes phréatiques pourraient renfermer des concentrations anormalement élevées de ces sels minéraux nutritifs [3].

Les eaux sont également polluées de façon permanente ou épisodique par divers composés minéraux et organiques fortement toxiques. Ce sont des métaux lourds tels que Cd, Hg, Pb, Zn, V, provenant des rejets d'origine domestique et urbaine (pile, savon, carburant, lubrifiant,...), d'origine agricole ( pesticides, impuretés des engrais ) ou industrielle, et les anions toxiques ( dérivés arséniés, cyanures et chromates en particulier ), ainsi que des substances provenant des altérations des réseaux de distribution. L'eau douce « agressive » peut contribuer à dissoudre le plomb des tuyauteries en plomb. La présence de plomb dans les eaux naturelles provient également, de la dissolution des roches et des minerais qu'elles contiennent, de la pollution atmosphérique, ainsi que des effluents industriels [4].

#### **1.5. Normes et Critères de potabilité**

Les normes de potabilité de l'eau ont été établies pour fixer les quantités maximales admissibles de certaines substances indésirables ou toxiques pour notre organisme afin qu'elles ne soient pas nocives pour la santé. Une eau qui correspond aux normes est donc potable. Toutefois, elle peut toujours contenir des matières polluantes, indésirables ou toxiques mais en très faibles quantités qui ne mettent pas en danger notre santé. Pour être consommable, l'eau doit répondre à des critères de qualité très stricts. Ils portent sur :

**la qualité microbiologique** : L'eau ne doit contenir ni microbes, ni parasite, ni bactéries pathogènes ni virus pour éviter sa contamination micro biologique qui pouvait être cause d'une épidémie.

**la qualité chimique** : les substances chimiques autres que les sels minéraux font l'objet de normes très sévères. Ces substances sont dites "indésirables" ou "toxiques". Elles sont

quelquefois recherchées à l'état de trace. Ces normes sont établies sur la base d'une consommation journalière normale.

Pour les substances "indésirables", leur présence est tolérée tant qu'elle reste inférieure à un certain seuil. Ces substances peuvent provoquer des désagréments pour l'homme et peuvent causer des effets gênants pour la santé.

Pour les substances aux effets toxiques, les teneurs tolérées sont extrêmement faibles, parfois de l'ordre du  $\mu\text{g/l}$ . Leur présence dans l'eau peut être dangereuse pour la santé en cas de consommation régulière.

Les normes tolérées de ces substances sont infimes et nécessitent donc des analyses strictes.

**la qualité physique et gustative** (les paramètres organoleptiques) : l'eau doit être limpide, claire, aérée et ne doit présenter ni saveur ni odeur désagréable. Cependant, l'eau qui ne satisfait pas pleinement à ces critères ne présente pas forcément de risque pour la santé. Mais leur altération peuvent être signe de pollution ou d'un mauvais fonctionnement des installations (canalisations).

### **1.6. Effets néfastes de quelques éléments indésirables et toxiques**

#### **Le Nitrate:**

L'excès de nitrates dans l'alimentation humaine est susceptible de provoquer une anémie, la méthémoglobinémie. En outre, les nitrates en excès sont suspectés de provoquer la formation, dans le tube digestif, de nitrosamines, composés hautement cancérigènes.[3]

#### **Le Plomb :**

**Le plomb est pour l'homme un élément toxique à effet cumulatif. A partir d'une forte dose journalière répétée pendant une période suffisamment longue, le plomb est susceptible de provoquer des effets nocifs. Il est , en grande partie, éliminé par l'organisme. L'adulte élimine 90% du plomb qu'il ingère. Un enfant n'en élimine que 50%. Les doses admissibles de plomb qui ont servi de référence à la fixation de la norme pour l'eau sont établies en fonction des individus les plus « vulnérables » au plomb : les jeunes enfants et les femmes enceintes. C'est le « principe de précaution ». Le risque sanitaire le plus probable est le saturnisme provoqué par une trop forte teneur de plomb dans le sang. Les troubles graves de cette maladie, encéphalopathie et régression du développement intellectuel chez l'enfant, troubles digestifs et neurologiques chez l'adulte, ne s'observent cependant que chez les individus à santé précaire, ayant absorbé une quantité importante de plomb. Une autre conséquence sur l'être humain est aussi la**

**perturbation des fonctions rénales, dysfonctionnement des vaisseaux sanguins du cerveau...Ils sont particulièrement dangereux pour les enfants en nuisant à leur développement cérébral. [4 ].**

**Nous allons décrire dans les chapitres qui suivent la méthodologie pour déterminer la qualité des eaux.**

## Chapitre 2. GENERALITES SUR LES RAYONS X

### 2.1. Les rayons X

**Les rayons X ont été découverts par le Physicien Allemand Wilhem Röntgen [5]. Ils sont surtout connus par leur pouvoir pénétrant, caractéristique utilisée en médecine pour les radiographies et les tomographies. Ils connaissent aujourd'hui d'autres applications dans l'industrie, l'archéologie, et la recherche scientifique.**

#### 2.1.1. Origine des rayons X

**Les rayons X sont produits par suite de l'impact d'un faisceau de rayons cathodiques d'énergie suffisante sur une électrode métallique appelée anticathode ou anode. Ils présentent un spectre continu auquel se superpose un spectre de raies.**

**La valeur maximale de l'énergie du spectre continu dépend de la tension d'accélération des rayons cathodiques et est indépendante de la nature du métal employé comme anticathode tandis que le spectre des raies est caractéristique du métal. Dans notre cas, le Mo est utilisé comme anode.**

#### 2.1.2. Production des rayons X

**Les rayons X primaires sont produits par différentes sources de rayonnement :**

- **Le tube à rayons X**

Le tube produit des rayons cathodiques. Ce sont des faisceaux de négatons, porteurs de charge électrique. Lorsque les rayons cathodiques heurtent un obstacle métallique, ils produisent des rayons X appelés rayons X primaires. Les rayonnements sont provoqués par le freinage des négatons, on parle de rayonnements continus de freinage ou Bremsstrahlung.

- **La source radioactive**

La source est utilisée pour l'excitation directe d'un échantillon. Les rayonnements de la source (rayonnement  $\gamma$ ) provoquent l'émission du rayonnement secondaire dit de fluorescence X. Le choix des sources s'effectue en fonction de l'énergie des photons ( $\gamma$ ) émis et de la demi-période du radioélément. Trois sources sont utilisées pour couvrir la totalité du spectre [6]:

$^{241}\text{Am}$  (60 keV),  $t_{1/2} = 458$  ans

$^{238}\text{Pu}$  (12 et 17 keV),  $t_{1/2} = 86,4$  ans

$^{55}\text{Fe}$  (5,9 keV),  $t_{1/2} = 4,7$  ans

### 2.1.3. Propriétés des rayons X

*Les rayons X sont des radiations électromagnétiques de haute fréquence, d'énergie moyenne, non détectable par nos cinq sens, ayant comme longueur d'onde variant entre  $0,05 \text{ \AA}$  et  $100 \text{ \AA}$ , et se propageant à la vitesse de la lumière [7]. Ils ne peuvent pas être déviés par les champs électriques et magnétiques.*

## 2.2. Interaction des rayons X avec la matière

### 2.2.1. Mécanismes interactionnels

Si le photon et l'atome interagissent, cela peut se faire de plusieurs manières. Le mécanisme interactionnel est basé sur les phénomènes :

- effet photoélectrique
- effet de diffusion Compton

#### 2.2.1.1. Effet photoélectrique

*Le phénomène est dû à la désexcitation (retour à l'état stable) d'un élément chimique préalablement excité par une source de rayon X primaire. En effet, au cours d'un bombardement par des photons X d'énergie suffisante, les électrons des couches internes de l'élément considéré sont extraits en laissant des trous. L'atome est dit dans un état excité. Cette instabilité n'est pas permanente. Ce phénomène se produit lorsque l'énergie de liaison du électron sur sa couche est inférieure à l'énergie du rayonnement incident. L'ionisation de la matière par des photons porte le nom d'effet photoélectrique et a été découvert par Heinrich Hertz en 1887 [6].*

Photon X  
incident

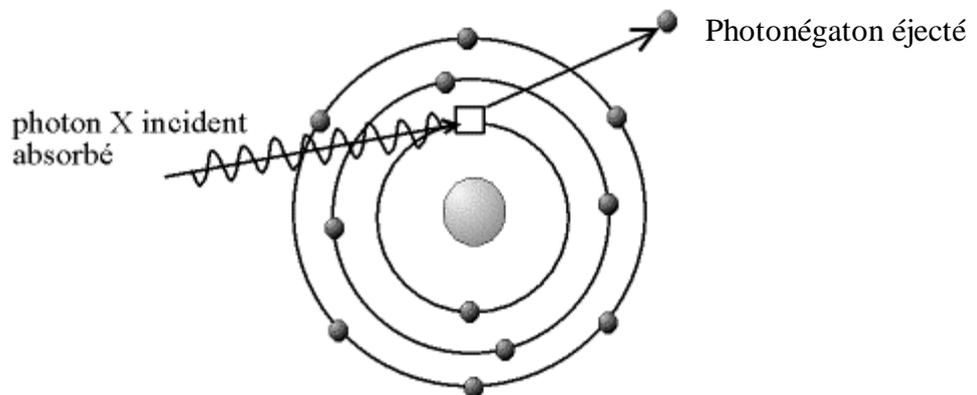


Figure 2.1. Ionisation de l'atome par effet photoélectrique

Pour revenir à l'état stable, les négatons des couches d'ordre supérieur vont occuper les trous sur la couche interne vacante (Figure 2.2.). Au cours de cette désexcitation, il peut y avoir une émission de rayon X appelé raie X caractéristique ou rayonnement fluorescent de fréquence  $\nu$  définie par la loi de Planck

$$h\nu = E_f - E_i \quad (2.1)$$

avec :  $\nu = \frac{c}{\lambda}$

$c$  étant la vitesse de la lumière ( $c = 3.10^8 \text{m.s}^{-1}$ ),

$\lambda$  la longueur d'onde du photon exprimée en m,

$h$  la constante de Planck ( $h = 6,6.10^{-34} \text{Js}$ )

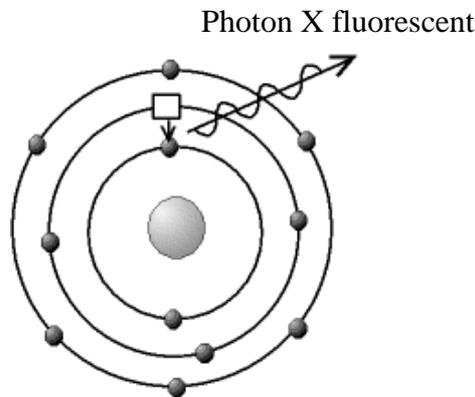


Figure 2.2. Emission de raie X caractéristique

*Comme il peut y avoir plusieurs transitions négatoniques possibles, un atome peut émettre plusieurs types de photons.*

A chaque transition négatonique correspond une émission des raies X caractéristiques. Pour pouvoir analyser les raies X caractéristiques (rayonnements de fluorescence), il faut pouvoir compter les nombres de photons de chaque type émis. L'ensemble des raies réparties en fonction de l'énergie constitue les spectres.

Le spectre des raies caractéristiques obtenues peuvent être des séries K, L, M, N,...

Pourtant, les transitions négatoniques doivent satisfaire les règles de sélection [8].

$$\left. \begin{array}{l} \Delta J = -1, 0, 1 \\ \Delta L = \pm 1 \\ \Delta n \neq 0 \end{array} \right\} \quad (2.2)$$

avec  $n$  est le nombre quantique principal (entier positif),

$J$  le moment cinétique total,

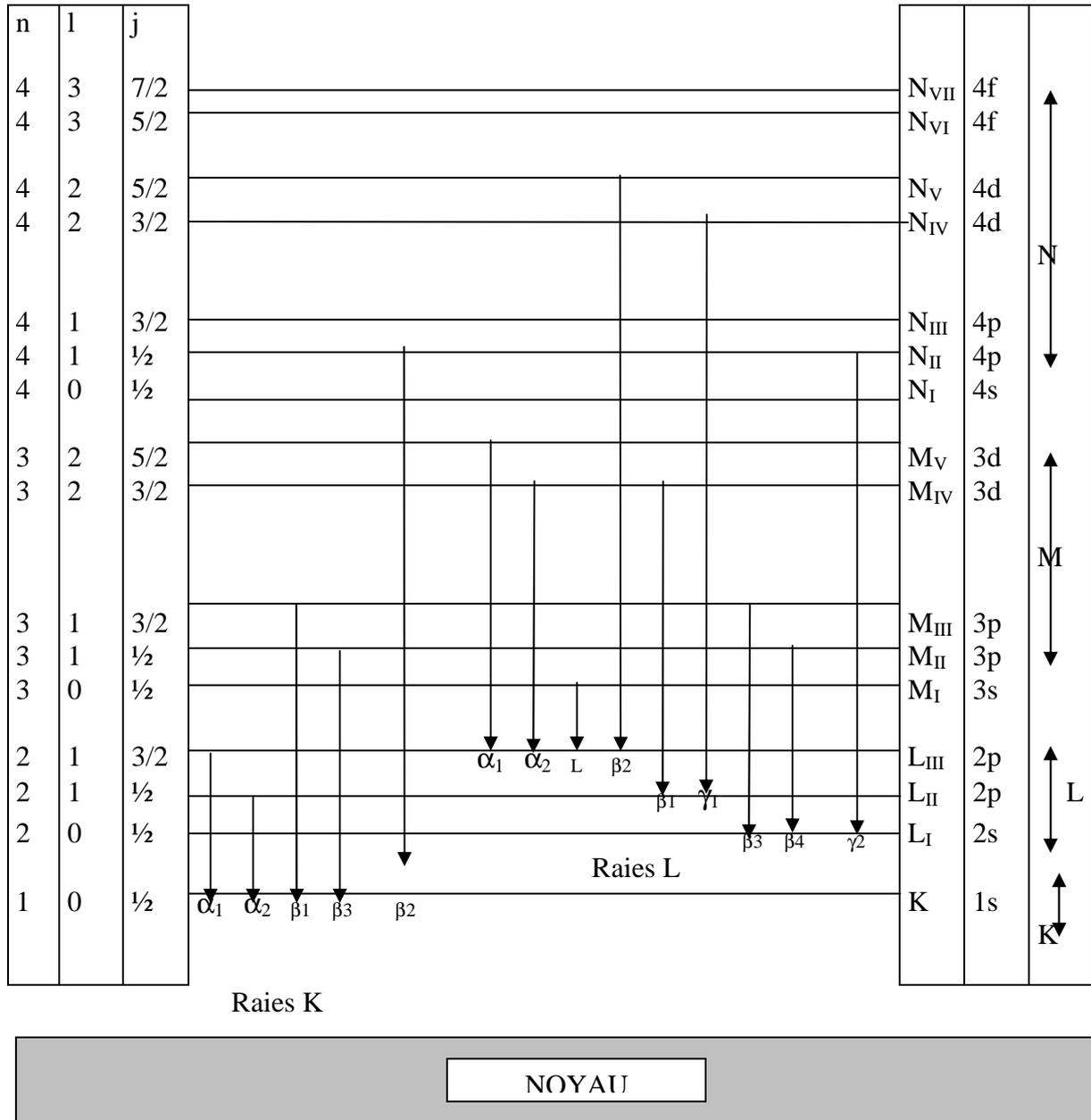
$L$  le nombre quantique azimutal entier positif ou nul,

$$L = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1$$

La transition  $J = 0$  est interdite

Au cours du remplissage des trous lors de la désexcitation de l'atome, les couche K et L sont remplies par les négatons en émettant des raies X appelées  $K\alpha$ ,  $K\beta$ ,  $L\alpha$ ,  $L\beta$ , ...

La figure 2.3 montre les transitions négatoniques permises des spectres des raies X.



**Figure 2.3. Transition négatoniques produisant le spectre des photons X**

**2-2-1-2. Effet de diffusion Compton (Incohérente, Inélastique)**

La diffusion Compton est définie par une diffusion du photon X incident d'énergie  $E_X$  sur un négaton libre d'un atome dont  $E_X$  est supérieur à l'énergie au repos du négaton ( $E_X > 511\text{eV}$ ). Après le choc, une partie de l'énergie  $E_X$  sera transférée au négaton, ce qui explique l'éjection du négaton appelé négaton Compton. Alors, l'énergie  $E_X$  dévient  $E'_X$  qui est l'énergie du photon diffusé.

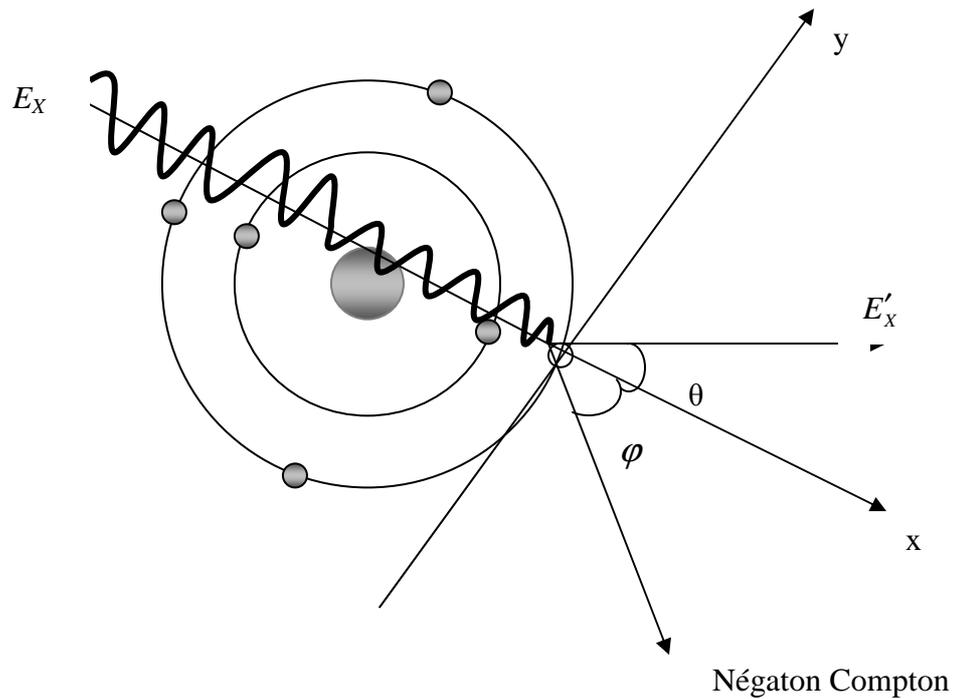
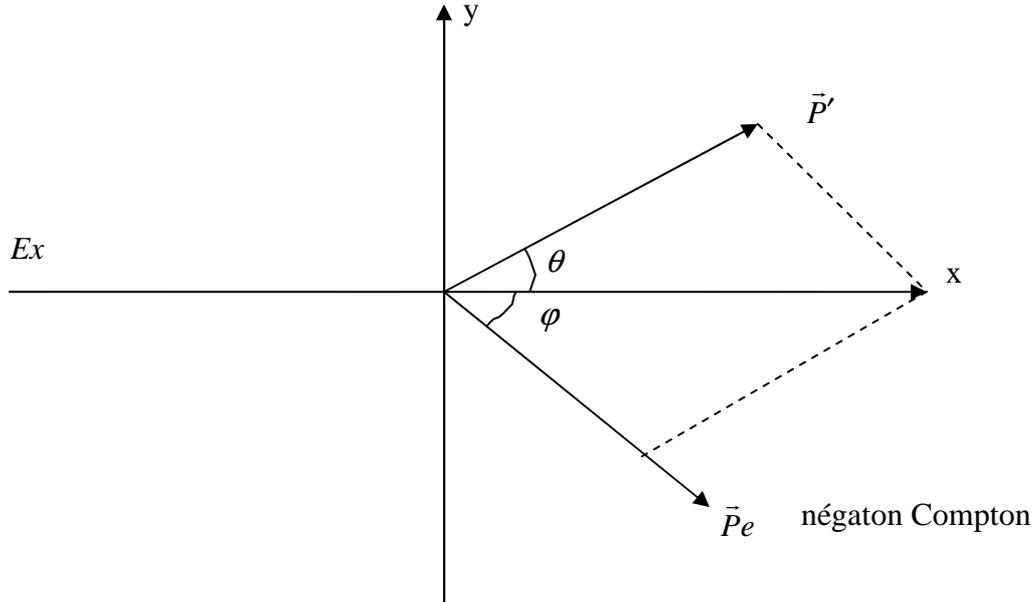


Figure 2.4. Mécanisme de l'effet Compton

Seule une partie de l'énergie  $E_X$  du photon incident est transférée à un négaton sous forme d'énergie cinétique  $T$  tandis que le reste est l'énergie  $E'_X$  du photon secondaire définie par la relation  $E_X = T + E'_X$  (2.3)



$\vec{P}_e$  et  $\vec{P}'$  sont respectivement les impulsions du négaton Compton et du photon secondaire (ou diffusé).

En tenant compte de la conservation du mouvement, de la mécanique relativiste [10], et de la loi de conservation de l'énergie, l'expression de l'énergie  $E'_x$  est donnée par la formule

$$E'_x = \frac{m_0 c^2 E_x}{(1 - \cos \theta) E_x + m_0 c^2} \quad [7] \quad (2.4)$$

$c$  étant la vitesse de la lumière ( $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ),

$m_0$  la masse au repos du négaton,

$\theta$  l'angle de diffusion.

Posons  $\alpha = \frac{E_x}{m_0 c^2}$

Alors  $E'_x = \frac{E_x}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}$  (2.5)

D'où l'énergie cinétique  $T$  du négaton Compton

$$T = E_x \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \right\} \quad (2.6)$$

Les deux angles  $\theta, \varphi$  vérifient la relation

$$\text{tg } \varphi = \frac{\text{tg } \frac{\theta}{2}}{1 + \alpha} \quad (2.7)$$

Et enfin,  $\lambda'$  et  $\lambda$  les longueurs d'onde respectivement diffusée et incidente vérifient la relation  $\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 C}(1 - \cos \theta)$  (2.8)

qui ne dépend que l'angle de diffusion  $\theta$  et ne dépend pas de l'énergie du rayonnement.

### 2.3. Atténuation des photons X

Lorsqu'un faisceau de rayon X pénètre dans un matériau homogène, son intensité subit une atténuation. Ce phénomène est dû à l'absorption et à la diffusion des photons par la matière.

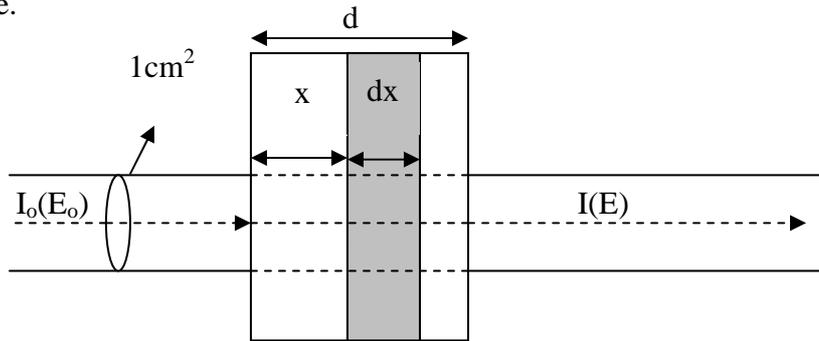


Figure 2.5. Atténuation des photons X à travers la matière

L'atténuation des photons X obéit à la loi de Beer-Lambert [9]

$$\frac{dI}{I} = -\mu \cdot dx \quad (2.9)$$

après intégration nous avons

$$I = I_0 \exp(-\mu \cdot x) \quad (2.10)$$

où  $I_0$  est l'intensité du faisceau incident d'énergie  $E_0$ ,

$I$  l'intensité du faisceau transmis,

$\mu$  le coefficient d'absorption linéaire total exprimé en  $\text{cm}^{-1}$ ,

$x$  l'épaisseur du matériau considéré exprimé en cm.

La constante  $\mu$  est donnée par la relation :  $\mu = \mu_\tau + \mu_\sigma + \mu_\pi$

Où  $\mu_\tau$  est le coefficient d'atténuation photoélectrique,

$\mu_\sigma$  le coefficient d'atténuation d'effet Compton,

$\mu_\pi$  le coefficient d'atténuation de matérialisation.

En considérant la masse volumique  $\rho$  et le nombre d'atomes par unité de masse

on a

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.11)$$

Avec  $\mu_m$  est le coefficient d'absorption massique, exprimé en  $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$

Le coefficient d'absorption atomique  $\mu_{at}$  est donné par

$$\mu_{at} = \frac{\frac{\mu}{\rho}}{\frac{N}{A}} \quad (2.12)$$

où  $N$  est le nombre d'Avogadro ( $N = 6.023 \cdot 10^{23}$ ),

$A$  la masse atomique d'un élément en  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,

$\mu_{at}$  s'exprime en  $\text{cm}^2 \cdot \text{atome}$

les trois coefficients  $\mu, \mu_m, \mu_{at}$  sont liés par la relation

$$\mu = \mu_m \cdot \rho = \mu_{at} \cdot \rho \frac{N}{A} \quad (2.13)$$

Pour un matériau de  $n$  éléments,  $\mu$  s'écrit

$$\mu = \sum_{i=1}^n C_i \cdot \mu_i \quad (2.14)$$

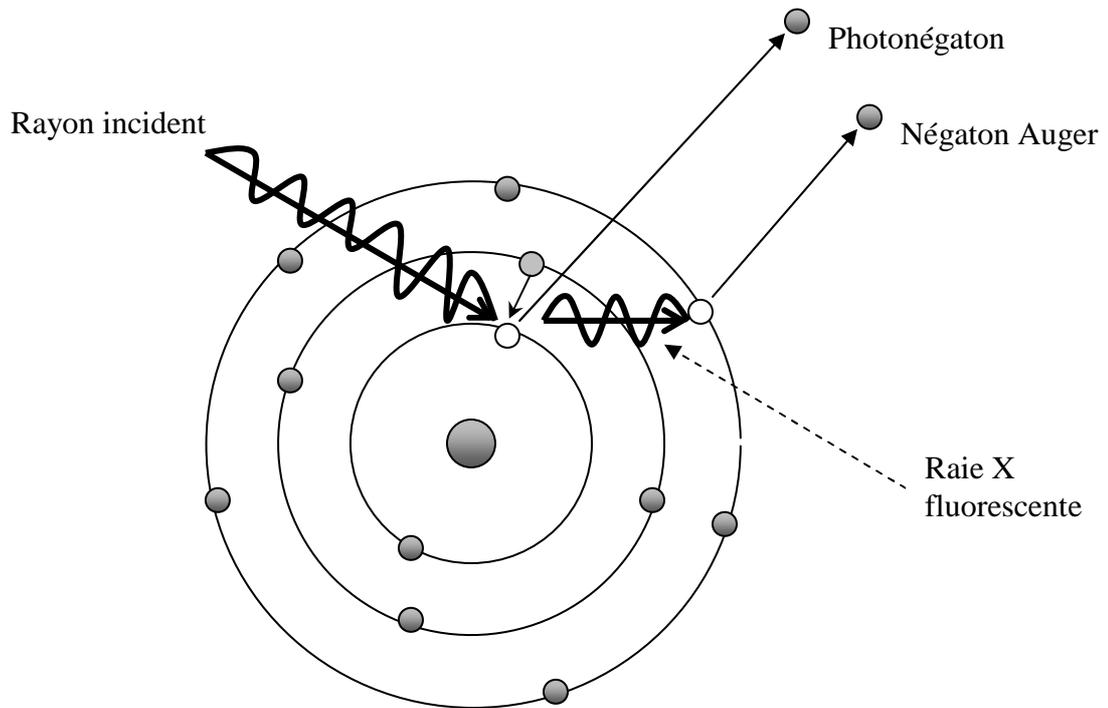
avec  $\mu_i$  est le coefficient d'absorption linéaire de l'élément  $i$ ,

$C_i$  la concentration de l'élément  $i$

## 2.4. Phénomène connexe

### 2.4.1. Effet Auger

Les rayons X sont absorbés par la matière. Quand ils pénètrent dans l'échantillon, ils sont atténués, essentiellement absorbés par effet photoélectrique. L'effet Auger est l'ionisation de la couche externe d'un atome par la raie X caractéristique à l'intérieur de l'atome lui-même. Il apparaît de nouveau un négaton appelé négaton Auger. Les atomes légers ont tendance à émettre un négaton Auger tandis que les atomes lourds un photon X.



**Figure 2.6. Emission de négaton AUGER**

#### 2.4.2. Rendement de fluorescence

***L'émission des raies X caractéristiques lors de l'interaction du photon X primaire avec la matière dépend d'un certain nombre de probabilité, entre autre le rendement de fluorescence.***

Le rendement de fluorescence est la probabilité pour qu'il y ait émission de photon X caractéristique c'est-à-dire que le photon X caractéristique quitte l'atome sans être absorbé dans l'atome lui-même (sous l'effet Auger).

***Il est défini par le rapport***

$$\omega = \frac{n_f}{n} \quad (2.15)$$

Ou,  $\omega$  est le rendement de fluorescence,

$n_f$  le nombre de photons induits quittant effectivement l'atome,

$n$  le nombre de photons ionisateurs,

La différence  $(n - n_f)$  est donc le nombre de photons absorbés à l'intérieur de l'atome.

La probabilité d'émission de raies X caractéristique est beaucoup plus élevée pour les éléments lourds. Elle est de 10% pour le soufre et de 90% pour l'Uranium [6]. Par conséquent, l'analyse par fluorescence X est limitée aux éléments qui ont un faible numéro atomique ( $Z < 18$ ).

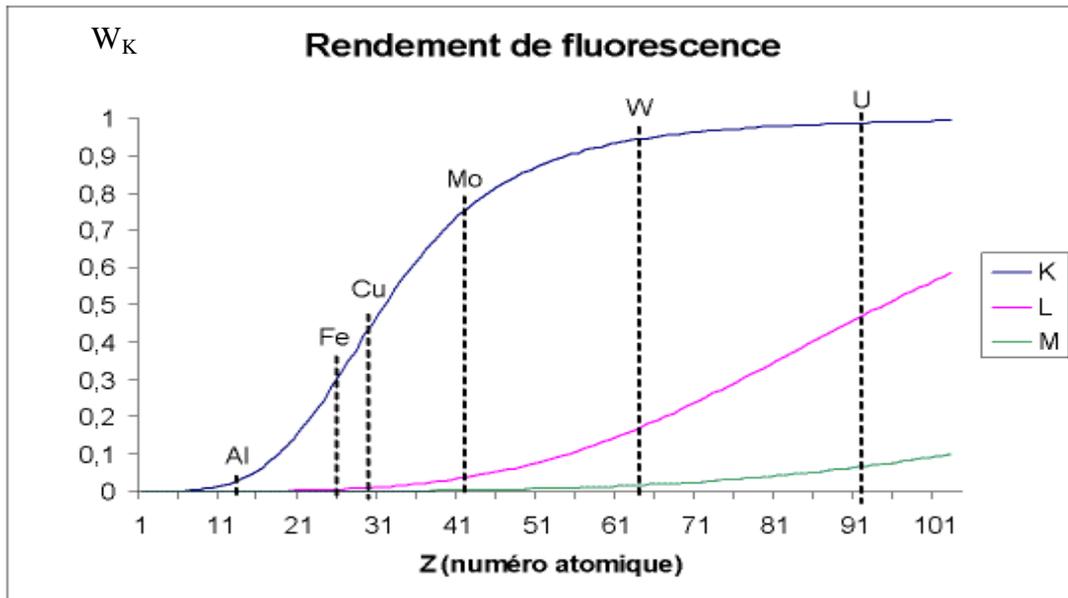


Figure 2.7. Rendement de fluorescence en fonction de Z  
*Dans le chapitre 3, nous décrivons en détail le principe de la fluorescence X à réflexion totale.*

## Chapitre 3. ANALYSE PAR FLUORESCENCE X A REFLEXION TOTALE

*L'analyse par fluorescence X à réflexion totale (TXRF) est une méthode analytique permettant d'effectuer l'analyse élémentaire. Elle utilise des phénomènes physiques qui ont été découverts et développés dans le domaine de la physique quantique (effet photoélectrique). Elle permet de mesurer différentes sortes d'échantillons: eau, air, huile, etc....*

### 3.1. Principe

La TXRF comprend deux parties :

- L'excitation
- La détection

L'excitation consiste à soumettre l'échantillon à analyser sous l'action des rayons afin qu'il émette à son tour des raies caractéristiques de ses éléments constitutifs. La détection revient à identifier les raies caractéristiques émises.

### 3.2. Réflexion totale

La réflexion totale est caractérisée par trois paramètres :

- L'angle critique
- La réflectivité
- Le pouvoir de pénétration

#### 3.2.1. L' angle critique

On obtient la réflexion totale des raies X de fluorescence lorsque le faisceau incident frappe le réflecteur sous un angle  $\theta$  inférieur à l'angle critique  $\theta_c$  de la réflexion totale.

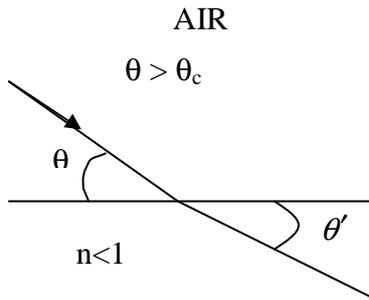


Figure 3.1.1.  
Réfraction du faisceau incident

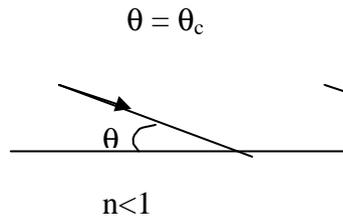


Figure 3.1.2. Propagation du faisceau incident

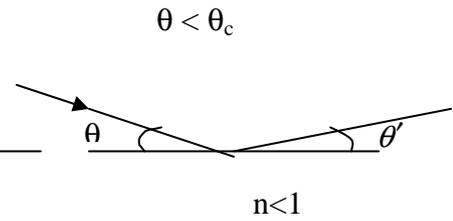


Figure 3.1.3. Réflexion du faisceau incident

$n$  étant l'indice de réfraction

La réflexion totale des raies X a lieu dans un milieu où l'indice de réfraction  $n$  est inférieur à l'unité

$$n = 1 - \delta(\lambda) \quad (3.1)$$

où  $\delta$ , un réel positif est fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  des rayons X primaires.

$\delta(\lambda)$  est donnée par la relation

$$\delta(\lambda) = 2,7 \cdot 10^{11} \frac{Z\rho}{A} \lambda^2 \quad (3.2)$$

$Z$  étant le numéro atomique de la matière de réflecteur,

$A$  la masse atomique exprimée en  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,

$\rho$  la densité exprimée en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,

$\lambda$  la longueur d'onde des rayons X incidents exprimée en m.

D'après la loi de la réfraction qui s'écrit

$$\cos \theta = n \cos \theta' \quad (\text{figure 3.1.1}) \quad (3.3)$$

nous avons :  $\cos \theta_c = n$  (figure 3.1.2)

or  $n = 1 - \delta(\lambda)$

$$\cos \theta_c = 1 - \delta(\lambda)$$

comme  $1 - \delta(\lambda)$  tend vers 1 alors  $\theta_c$  est très petit,  $\cos \theta_c \approx 1 - \frac{\theta_c^2}{2}$

$$\theta_c \text{ s'écrit alors : } \theta_c = \sqrt{5,4 \cdot 10^{11} \cdot \frac{Z\rho}{A} \lambda^2} \quad (3.4)$$

$$\theta_c = \left(5,4 \cdot 10^{11} \frac{Z\rho}{A}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda \quad (3.5)$$

en MKSA :

$\lambda$  en m

$\theta_c$  en rad

$\rho$  en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $\rho = 2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  pour le réflecteur en quartz Suprasil)

En utilisant la relation

$$\lambda = \frac{hc}{E}$$

avec  $h$  étant la constante de Planck ( $h = 4,135 \cdot 10^{-18} \text{ keV}\cdot\text{s}^{-1}$ ),

$c$  la vitesse de la lumière ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

L'équation (3.5) s'écrit

$$\theta_c = \frac{91,16 \cdot 10^{-5}}{E} \sqrt{\frac{Z\rho}{A}} \quad (3.6)$$

$E$  est exprimée en keV

*À l'INSTAN nous avons utilisé un tube à rayon X en anode à molybdène dont les énergies caractéristiques sont*

Mo -  $K_\alpha = 17,44 \text{ keV}$

Mo -  $K_\beta = 19,60 \text{ keV}$

En prenant  $E = 20 \text{ keV}$ , nous avons

$$\theta_c = \frac{32,24}{20} = 1,6 \text{ mrad} \quad (3.7)$$

*Il faut donc mettre le réflecteur de séparation sous un angle de 1,6 mrad pour avoir la réflexion totale*

*Dans la zone d'énergie supérieur à 20 keV, les rayons sont réfractés et absorbés par le réflecteur de séparation. Alors que dans la zone inférieure à 20keV on obtient la réflexion totale avec un pouvoir de réflexion de 100%.*

### 3.2.2. La réflectivité

La réflectivité est définie par le rapport entre l'intensité du rayonnement réfléchi et du rayonnement incident. Elle caractérise le pouvoir réflecteur du miroir des réflecteurs de séparation et du porte échantillon [3].

$$R = \frac{\left\{ \sqrt{2}X - \left[ (X^2 - 1)^2 + Y^2 \right]^{1/2} + (X^2 - 1)^{1/2} \right\}^2 + \left[ (X^2 - 1)^2 + Y^2 \right]^{1/2} - (X^2 - 1)}{\left\{ \sqrt{2}X + \left[ (X^2 - 1)^2 + Y^2 \right]^{1/2} + (X^2 - 1)^{1/2} \right\}^2 + \left[ (X^2 - 1)^2 + Y^2 \right]^{1/2} - (X^2 - 1)} \quad (3.8)$$

$$\text{avec } X = \frac{\phi}{\phi_{\text{crit}}} \quad \text{et} \quad Y = \frac{\beta}{\delta}$$

### 3.2.3. Le pouvoir de pénétration

Il est exprimé analytiquement par la relation

$$Z_p = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{\delta} \left\{ \left[ (X^2 - 1)^2 + Y^2 \right]^{1/2} - (X^2 - 1) \right\}^{1/2}} \quad (3.9)$$

$$\text{Pour } \phi \rightarrow 0 \quad Z_p = 3,4 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{A}{Z}} \quad (3.10)$$

$$\text{Pour } \phi = \phi_{\text{crit}} \quad Z_p = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{\pi\mu^*}} \quad (3.11)$$

$$\text{Pour } \phi \gg \phi_{\text{crit}} \quad Z_p = \frac{\phi}{\mu^*} \quad (3.12)$$

Où  $\mu^*$  est le coefficient d'absorption linéaire du réflecteur

### 3.3. Intensité de fluorescence

*Etant donné un échantillon homogène et uniforme, excité par une source excitatrice monochromatique. Pendant toute l'analyse la géométrie de l'expérience reste inchangée. Les rayons des faisceaux incidents sont tous parallèles, et il n'y a pas d'excitation secondaire.*

La section efficace totale  $\sigma_i$  pour un élément  $i$  est définie par la relation

$$\sigma_i = \frac{\frac{P_i}{n_i}}{I_0} \quad (3.13)$$

Où  $P_i$  indique la puissance émise par un atome d'un élément  $i$ ,

$n_i$  représente le nombre d'atomes présents dans un échantillon ,

$I_0$  est l'intensité émise par la source excitatrice.

La puissance  $P_i$  est diffusée dans un angle solide  $4\pi$  stéradian.

*L'intensité d'un élément  $i$  dans une surface fictive d'une sphère de rayon  $R$  quelconque de centre  $i$  s'écrit*

$$I_i = \frac{P_i}{4\pi R^2} \quad (3.14)$$

Pour une distance  $R$  entre l'élément  $i$  et le détecteur , l'intensité observée est

$$I'_i = \frac{P_{D,i}}{A_D} \quad (3.15)$$

avec  $P_{D,i}$  est la puissance reçue par le détecteur,

$A_D$  la surface du détecteur,

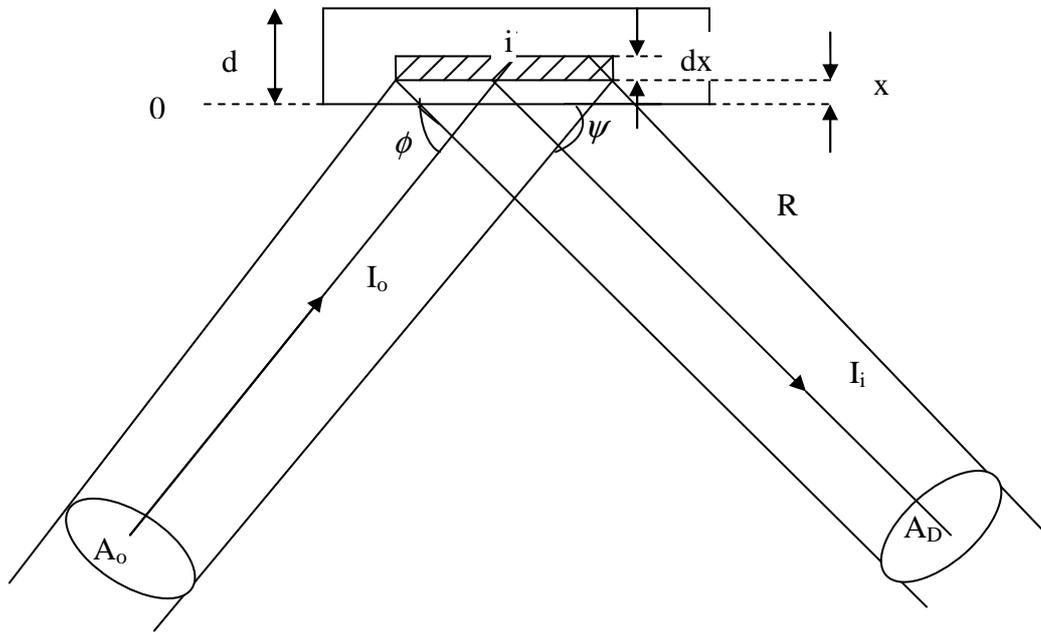
A la distance  $R$ , les deux intensités  $I_i$  et  $I'_i$  sont les mêmes en considérant que  $R$  est la distance entre l'échantillon  $i$  et le détecteur.

La section efficace s'écrit alors

$$\sigma_i = \frac{I_i 4\pi R^2}{I_0 n_i} \quad (3.16)$$

d'où la valeur de  $I_i$

$$I_i = I_o n_i \sigma_i \frac{1}{4\pi R^2} \quad (3.17)$$



**Figure 3.2. Schéma pour la détermination de l'intensité de fluorescence**

Considérons le volume élémentaire

$$dV = dx.A_o \frac{1}{\sin \phi} \quad (3.18)$$

avec  $A_o$  représente l'aire du faisceau incident,

$\Phi$  angle d'incidence du faisceau incident,

$dx$  épaisseur élémentaire de l'élément  $i$ .

Soit  $N_i$  le nombre d'atomes par unité de volume de l'échantillon

Le nombre d'atome dans  $dV$  est

$$n_i = N_i dx A_o \frac{1}{\sin \phi} \quad (3.19)$$

Si les rayons incidents ne subissent aucun effet d'absorption, l'intensité de fluorescence dans le volume  $dV$  pourra s'écrire :

$$dI_i = I_o \sigma_i \frac{A_o N_i}{4\pi R^2 \sin \phi} dx \quad (3.20)$$

En tenant compte de l'atténuation du photon incident, des paramètres fondamentaux d'effet photoélectrique et d'émission de fluorescence, l'intensité de fluorescence s'écrit

$$dI_i = \frac{I_o A_o N_i \sigma_i}{4\pi R^2 \sin \phi} \left[ 1 - \frac{1}{J_j} \right] \omega_i^j f_i^j \varepsilon_i \exp \left[ - \left( \frac{\mu_o^s}{\sin \phi} + \frac{\mu_i^s}{\sin \psi} \right) x \right] \quad [7] \quad (3.21)$$

Où  $\sigma_i$  est la section efficace photoélectrique de l'élément i

$\left[ 1 - \frac{1}{J_j} \right]$  la probabilité pour que la couche j de l'élément i subisse l'effet photoélectrique

$\omega_i^j$  le rendement de fluorescence relatif à la couche j de l'élément i,

$f_i^j$  la fraction de la raie mesurée j par rapport aux raies totales émises,

$\varepsilon_i$  le facteur d'absorption sans unité relatif aux radiations émises par l'élément i, L'efficacité du détecteur est comprise dans ce facteur

$\mu_o^s$  coefficient d'absorption linéaire de l'échantillon relatif aux radiations incidentes d'énergies  $E_o$ ,

$\mu_i^s$  coefficient d'absorption linéaire de l'échantillon correspondant aux radiations fluorescentes  $I_i$  (rayons émis),

$\phi$  l'angle d'incidence du faisceau incident,

$\psi$  l'angle d'émergence des rayons émis.

En intégrant l'expression de l'intensité de fluorescence  $dI_i$  sur toute l'épaisseur d de l'échantillon, l'intensité totale émise par l'élément i sera

$$I_i = \frac{I_o A_o N_i \sigma_i}{4\pi R^2 \sin \phi} \left[ 1 - \frac{1}{J_j} \right] \omega_i^j f_i^j \varepsilon_i \frac{1 - \exp \left[ - \left( \frac{\mu_o^s}{\sin \phi} + \frac{\mu_i^s}{\sin \psi} \right) d \right]}{\frac{\mu_o^s}{\sin \phi} + \frac{\mu_i^s}{\sin \psi}} \quad [9] \quad (3.22)$$

On peut introduire la concentration  $C_i$  de l'élément i dans l'échantillon

$$C_i = \frac{m_i}{m_e} \quad (3.23)$$

où  $m_i$  désigne la masse de l'élément i dans l'échantillon exprimée en gramme

$m_e$  représente la masse totale de l'échantillon en gramme

soit  $\rho$  la masse volumique de l'échantillon et  $V$  son volume, alors  $m_e$  pourra s'écrire

$$m_e = \rho V \quad (3.24)$$

et  $m_i = \rho_i V$

Où  $\rho_i$  est la masse volumique de l'élément  $i$

$$\text{Or, } \rho_i = \frac{N_i A_i}{N_A} \quad (3.25)$$

Avec  $A_i$  la masse atomique d'un élément  $i$

$N_A$  le nombre d' Avogadro

$$\text{Donc } m_i = \frac{N_i A_i}{N_A} V \quad (3.26)$$

L'expression de  $C_i$  devient alors

$$C_i = \frac{N_i A_i}{N_A \rho} \quad (3.27)$$

$$\text{D'où } N_i = \frac{\rho N_A}{A_i} C_i \quad (3.28)$$

En remplaçant  $N_i$  dans l'équation (3.22) par sa valeur, on obtient

$$I_i = \frac{I_o A_o N_A \sigma_i}{4\pi R^2 A_i \sin \phi} \left[ 1 - \frac{1}{J_j} \right] \omega_i^j f_i^j \varepsilon_i C_i \frac{1 - \exp \left[ - \left( \frac{\mu_o^s}{\rho \sin \phi} + \frac{\mu_i^s}{\rho \sin \psi} \right) \rho d \right]}{\frac{\mu_o^s}{\rho \sin \phi} + \frac{\mu_i^s}{\rho \sin \psi}} \quad (3.29)$$

Posons  $G_o$ ,  $K_i$ ,  $a_i$ , le facteur de géométrie du système exprimée en  $s^{-1}$ , l'efficacité relative d'excitation-détection en  $cm^2 g^{-1}$ , le coefficient d'absorption massique de l'échantillon respectivement

$$G_o = \frac{I_o A_o}{4\pi R^2 \sin \phi} \quad (3.30)$$

$$K_i = \frac{N_i \sigma_i}{A_i} \varepsilon_i \left( 1 - \frac{1}{J_j} \right) \omega_i^j f_i^j \quad (3.31)$$

$$a_i = \frac{\mu_o^s}{\rho \sin \phi} + \frac{\mu_i^s}{\rho \sin \psi} \quad (3.32)$$

L'équation (3.29) dévient

$$I_i = G_o K_i C_i \frac{1 - \exp(-a_i \rho d)}{a_i \rho d} \quad (3.33)$$

Soit  $T_i$  le coefficient de transmission ou le facteur de correction d'absorption

$$T_i = \frac{1 - \exp(-a_i \rho d)}{a_i \rho d} \quad (3.34)$$

D'où l'expression finale de  $I_i$

$$I_i = G_o K_i C_i T_i \quad (3.35)$$

### 3.4. Effet de matrice

La matrice se définit comme étant la matière constituante autre que l'élément d'intérêt pour un échantillon donné. En fluorescence X, l'effet de matrice provoque généralement des phénomènes d'absorption et d'excitation secondaire de l'atome voisin.

#### 3.4.1. Absorption

Les rayons X sont absorbés par la matière . Quand les rayons X pénètrent dans l'échantillon, ils sont atténués, essentiellement absorbés par effet photoélectrique.

L'absorption en fluorescence X est caractérisée par la quantité  $a_i$  , définie par

$$a_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} C_j \quad (3.36)$$

$$\text{avec } a_{ij} = \left\{ \frac{\mu_j^o}{\sin \phi} + \frac{\mu_j^i}{\sin \psi} \right\} \frac{1}{\rho}$$

$C_j$  étant la concentration de l'élément j

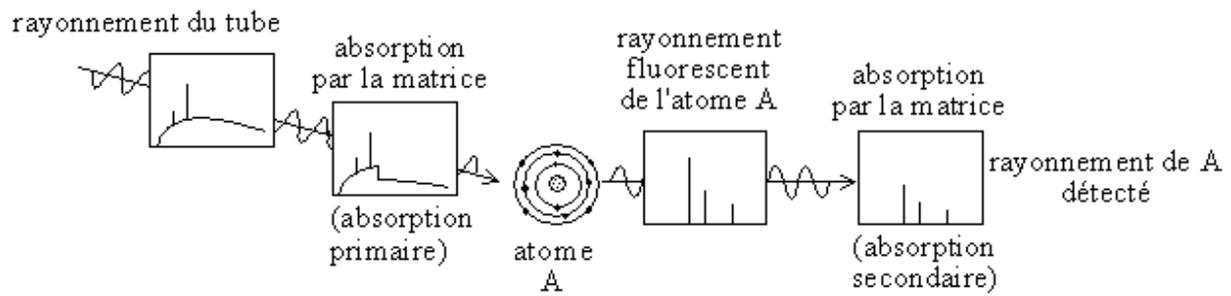


Figure 3.3. Effet d'absorption par la matrice

### 3.4.2. Excitation secondaire

Les photons fluorescents ou raies X caractéristiques émises par l'élément d'intérêt peuvent aussi à leur tour provoquer une excitation des atomes voisins [12], et donc de la fluorescence : c'est l'excitation secondaire.

Le chapitre suivant sera consacré aux appareils de mesures utilisés lors de cette étude.

## Chapitre 4. INSTRUMENTATION

### 4.1. Spectrométrie X à énergie dispersive à réflexion totale

La chaîne de spectrométrie X à énergie dispersive à réflexion totale permet d'analyser simultanément plusieurs éléments. Il comprend :

- ❖ Une source excitatrice
- ❖ Un collimateur
- ❖ Un réflecteur de séparation
- ❖ Un réflecteur porte échantillon
- ❖ Une haute tension
- ❖ Un détecteur
- ❖ Un préamplificateur et amplificateur
- ❖ Un analyseur multi canal (MCA)
- ❖ Un terminal informatique

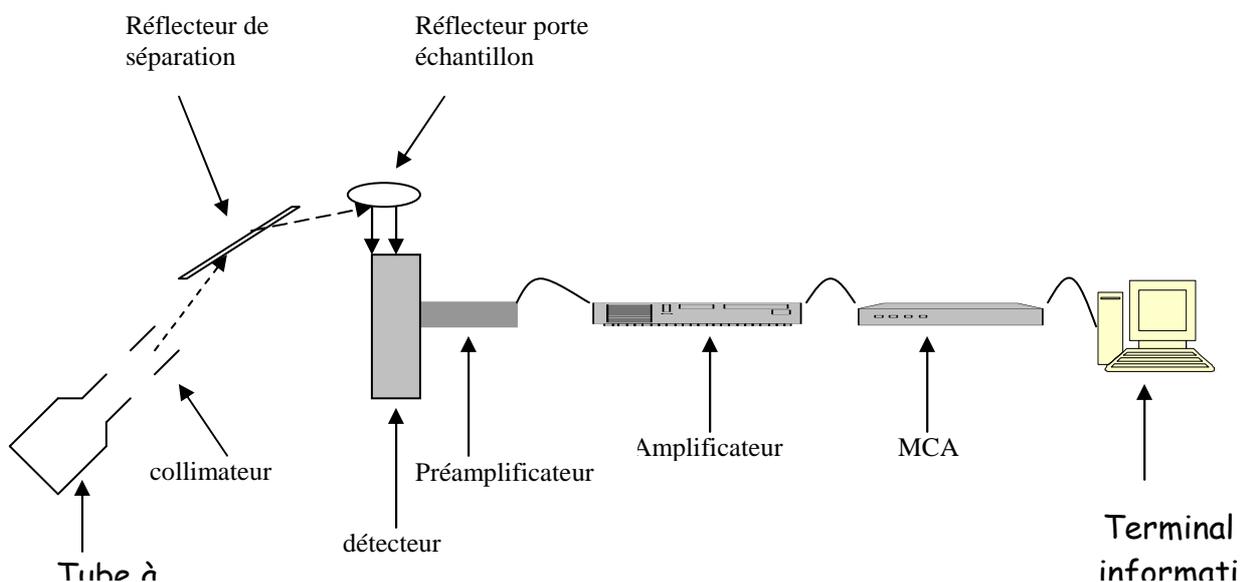


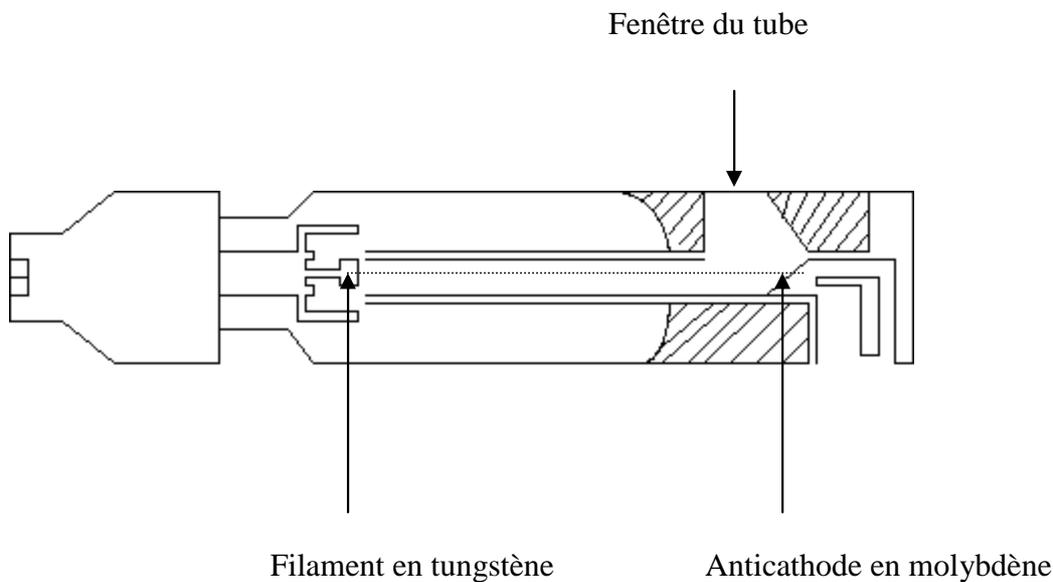
Figure 4.1. Schéma simplifié d'une chaîne de spectrométrie X à réflexion totale

Chaque élément de la chaîne a son propre rôle pour la TXRF.

#### 4.1.1. Source excitatrice

La source excitatrice appelée tube de Coolidge produit les rayons X primaires dans lequel les négatons sont émis par un filament en tungstène porté à incandescence (cathode), accélérés par une haute tension, convergés sur une cible métallique (anticathode) refroidie en eau. Les photons X sont ainsi émis et vont passer à travers la fenêtre du tube sous forme de rayonnements polychromatiques.

La figure 4.2. montre le schéma simplifié d'un tube à rayons X



**Figure 4.2. Schéma simplifié d'un tube à rayons X**

#### 4.1.2. Collimateur

*Le collimateur, composé de deux fentes parallèles a pour rôle de focaliser les rayons X provenant du tube car ils se propagent dans toute les directions à la sortie du tube.*

#### 4.1.3. Réflecteur de séparation

Le réflecteur de séparation est une substance rectangulaire en quartz de densité  $2,5.10^3 \text{ kg/m}^3$  et de dimension  $50 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$ . Il a pour rôle d'éliminer le rayonnement de freinage (Bremsstrahlung) diffus et de baisser le bruit de fond.

#### 4.1.4. Réflecteur porte échantillon

*Le réflecteur porte-échantillon est fabriqué en quartz, lisse, plane, bien polie. Il porte en son centre l'échantillon très mince à analyser. Les rayons X primaires arrivent sur le réflecteur porte échantillon après être filtrés par le réflecteur de séparation.*

#### 4.1.5. Haute Tension

La haute tension a pour rôle de polariser le détecteur afin que ce dernier collecte les charges créées par l'ionisation de l'atome. La valeur de la haute tension appliquée au détecteur est  $-500\text{V}$ .

#### 4.1.6. Détecteur

**Le détecteur transforme les radiations fluorescentes en charge électrique proportionnelles à l'énergie des photons qui y pénètrent. Il permet aussi de séparer les photons suivant leur énergies. La chaîne de spectrométrie X à énergie dispersive dispose d'un détecteur semi-conducteur en Silicium dopé au Lithium Si(Li).**

#### 4.1.7. Préamplificateur et amplificateur

**Le préamplificateur convertit en impulsions les charges collectées aux bornes du détecteur. Ces impulsions sont amplifiées par l'amplificateur sous forme de signaux traitables avant de pénétrer dans le MCA.**

#### 4.1.8. Analyseur multicanal (MCA)

Les impulsions sont classées par le MCA dans les différents canaux suivant leur énergies par l'intermédiaire d'un convertisseur analogique digital sous forme de coups. Dans un canal donné les coups sont accumulés pour former un pic. Le nombre de coups d'un pic est considérablement lié à l'intensité de la raie spectrale donc à la concentration de l'élément.

#### 4.1.9. Terminal informatique

Le terminal informatique permet d'enregistrer, de stocker et de traiter les données spectrales à partir du MCA. L'acquisition et le traitement des données se font à l'aide des logiciels S100 et AXIL [13].

### 4.2. Détection des photons X

L'interaction entre les radiations fluorescentes-détecteur est régie essentiellement par un phénomène d'ionisation. L'énergie d'ionisation est de  $2,9\text{eV}$  pour le détecteur semi-

conducteur en Silicium dopé au Lithium Si(Li). En effet, l'ionisation crée une charge de  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$

Pour une énergie  $E(\text{eV})$  d'un photon X, la charge collectée est

$$Q(\text{C}) = \frac{E}{3.76} 1,6 \cdot 10^{-19} \quad (4.1)$$

### 4.3. Les paramètres caractéristiques du détecteur

#### 4.3.1. Résolution d'un détecteur [14]

La résolution en énergie du détecteur s'écrit

$$\Gamma_{\text{dét}}(\%) = 2,35 \sqrt{\omega F E} \quad (4.2)$$

où  $\omega$  désigne l'énergie nécessaire pour créer une paire négaton-positon ( $\omega = 2,9 \text{eV}$  pour le Si à 77K ),

F le facteur de Fano ( 0,08 à 77K ),

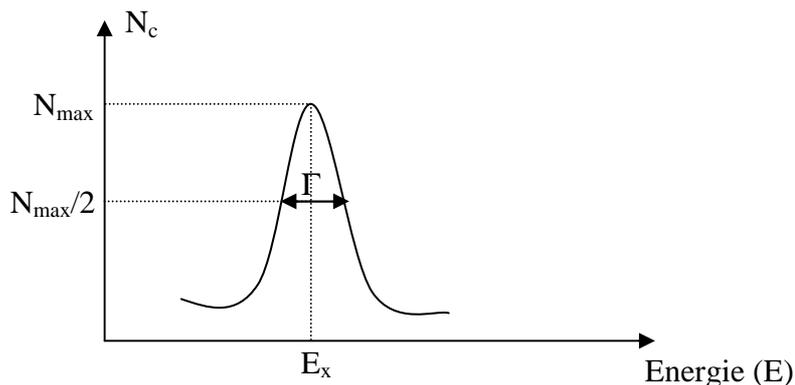
E l'énergie du photon incident (eV)

Le pouvoir de résolution en énergie du détecteur est défini par

$$R(\%) = \frac{\Gamma}{E} \quad (4.3)$$

Avec  $\Gamma$  indique la largeur totale à mi-hauteur ( FWHM ) du pic,

E l'énergie du photon incident (eV)



**Figure 4.3. Représentation de la FWHM d'une courbe Gaussienne**

$N_c$  est le nombre des coups enregistrés

Soit N le nombre de porteur de charge produit par l'énergie  $E_x$

$$N = \frac{E_x}{\omega} \quad (4.4)$$

L'expression de R s'écrit alors

$$R (\%) = 2,35 \sqrt{\frac{F}{N}} \quad (4.5)$$

#### 4.3.2. Efficacité du détecteur

**L'efficacité du détecteur est définie par la formule**

$$\varepsilon_i = \frac{N_{x,d}}{N_{x,t}} \quad (4.6)$$

avec  $N_{x,d}$  représente le nombre des rayons X détectés

$N_{x,t}$  est le nombre total des rayons X arrivant sur le détecteur

$\varepsilon_i$  varie en fonction de l'énergie  $E_i$  de l'élément  $i$ .

L'application de la technique de fluorescence X à réflexion totale aux analyses des échantillons prélevés est décrite dans les trois derniers chapitres.

## Chapitre 5. ETALONNAGE DU SYSTEME

L'étalonnage du système consiste à établir deux sortes d'étalonnages: l'étalonnage en énergie pour l'analyse qualitative et l'étalonnage en sensibilité relative pour l'analyse quantitative.

## 5.1. Etalonnage en énergie

**L'étalonnage en énergie consiste à classer les coups enregistrés en fonction du canal sous forme de pic. Chaque pic du spectre de l'échantillon correspond à un élément bien déterminé d'énergie  $E(eV)$ . C'est l'analyse qualitative de l'échantillon.**

La plage d'énergie calibrée se situe entre 2.3 keV et 17.4 keV

L'étalonnage en énergie se traduit par la relation

$$E_i(eV) = \text{Gain} \cdot \text{Canal} + \text{Zéro} \quad (5.1)$$

Où  $E_i$  représente l'énergie correspondant au canal  $i$ ,

Zéro l'énergie du canal 0 exprimée en eV (énergie offset).

L'expression de  $E_i$  obtenue expérimentalement est

$$E_i (eV) = 19.983 \cdot \text{canal} + 270.737$$

## 5.2. Etalonnage en sensibilité

L'étalonnage en sensibilité consiste à établir la courbe de sensibilité en fonction du numéro atomique des éléments.

**Pour un échantillon infiniment mince, l'équation de l'intensité s'écrit**

$$I_i = G_o K_i (\rho_i d) \quad (5.2)$$

où  $\rho_i$  est la masse par unité de surface de l'élément  $i$  dans l'échantillon en  $g.cm^{-2}$

Ainsi, il existe une linéarité entre la concentration et l'intensité de fluorescence dans l'échantillon dont la linéarité dépend de la géométrie du système.

En introduisant une solution standard interne de concentration connue  $C_s$  dans l'échantillon, on obtient la même équation

$$I_s = G_o K_s (\rho_s d) \quad (5.3)$$

En faisant le rapport entre ces deux équations, nous avons :

$$Q_i = \frac{I_i}{I_s} = \frac{K_i \rho_i}{K_s \rho_s} = \frac{K_i}{K_s C_s} C_i \quad (5.4)$$

Pour un élément  $i$  donné et pour un standard interne de concentration constante, le terme  $\frac{K_i}{K_s C_s}$  reste toujours constante. C'est la sensibilité relative de l'élément  $i$  par rapport au standard interne utilisé.

Dans la pratique, nous utilisons comme standard interne le cobalt

Alors, nous pouvons écrire :

$$Q_i = \frac{I_i}{I_{Co}} = \frac{K_i}{K_{Co}C_{Co}}C_i \quad (5.5)$$

En faisant varier la concentration de l'élément i, nous obtenons différentes valeurs de  $Q_i$ . Ce qui nous permet de tracer des droites donnant la variation de  $Q_i$  en fonction de  $C_i$  pour chaque élément standard i.

Connaissant la valeur de  $\frac{K_i}{K_{Co}C_{Co}}$  pour chaque élément, nous pourrions calculer  $C_i$

$$C_i = \frac{K_{Co}C_{Co}}{K_i}Q_i \quad (5.6)$$

**Lors de cette étude, l'étalonnage consiste à établir deux courbes de sensibilité relative : l'une pour les raies K et l'autre pour les raies L.**

**La sensibilité relative pour les raies K en fonction du numéro atomique Z, notée  $S_{rel,K}$  est donnée par la formule suivante :**

$$S_{rel,K}(Z) = A_0 + A_1Z + A_2Z^2 + A_3Z^3 \quad (5.7)$$

**Avec  $A_0 = -6,4463$**

$$A_1 = 4,6847 \cdot 10^{-1}$$

$$A_2 = -7,4252 \cdot 10^{-3}$$

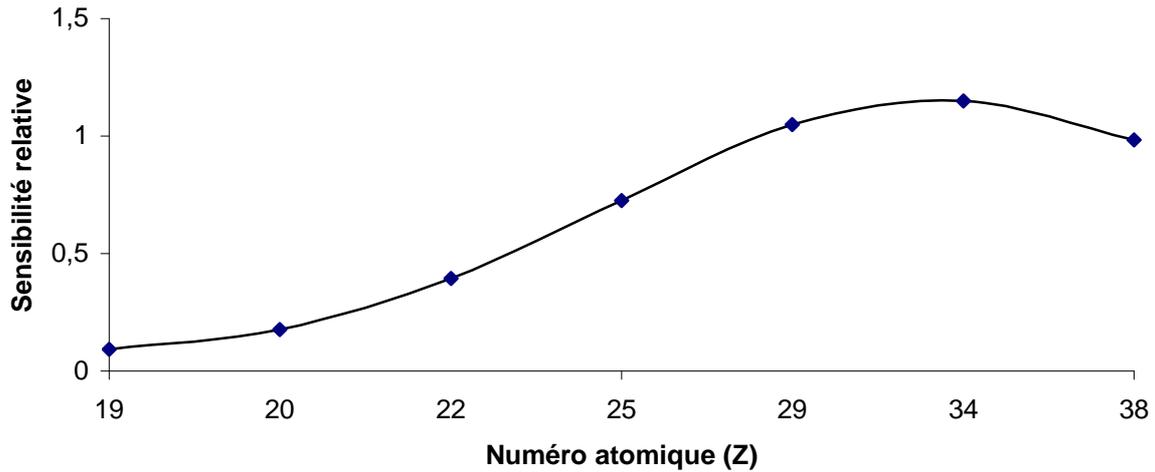
$$A_3 = 6,4104 \cdot 10^{-6}$$

Le tableau 5.1. montre les résultats expérimentaux pour l'étalonnage en sensibilité relative des raies K

Elément	Valeur calculée	Valeur expérimentale	Ecart (%)
K	$9,26 \cdot 10^{-2} \pm 1,95 \cdot 10^{-3}$	$8,90 \cdot 10^{-2} \pm 4,45 \cdot 10^{-3}$	4,1
Ca	$1,76 \cdot 10^{-1} \pm 7,03 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-1} \pm 9,34 \cdot 10^{-3}$	-5,9
Ti	$6,33 \cdot 10^{-1} \pm 2,53 \cdot 10^{-2}$	$6,20 \cdot 10^{-1} \pm 3,10 \cdot 10^{-2}$	2,0
Mn	$7,25 \cdot 10^{-1} \pm 7,70 \cdot 10^{-14}$	$7,25 \cdot 10^{-1} \pm 3,62 \cdot 10^{-2}$	0,0
Cu	$1,05 \pm 1,33 \cdot 10^{-13}$	$1,05 \pm 5,25 \cdot 10^{-2}$	0,0
Se	$1,15 \pm 1,45 \cdot 10^{-13}$	$1,15 \pm 5,75 \cdot 10^{-2}$	0,0
Sr	$9,85 \cdot 10^{-1} \pm 1,25 \cdot 10^{-13}$	$9,85 \cdot 10^{-1} \pm 4,93 \cdot 10^{-2}$	0,0

Tableau 5.1. Valeurs pour l'étalonnage en sensibilité des raies K

Courbe d'étalonnage en sensibilité pour les raies K



*Figure 5.1. Courbe d'étalonnage en sensibilité pour les raies K*

La sensibilité relative pour les raies L en fonction du numéro atomique Z, notée  $S_{rel,L}(Z)$  est donnée par la formule

$$S_{rel,L}(Z) = A_0 + A_1Z + A_2Z^2 + A_3Z^3 \quad (5.8)$$

Avec  $A_0 = -3,979$

$A_1 = 0,9195$

$A_2 = -3,0607 \cdot 10^{-3}$

$A_3 = 1,6863 \cdot 10^{-5}$

Le tableau 5.2. montre les résultats expérimentaux pour l'étalonnage de la courbe de sensibilité relative pour les raies L

Elément	Valeur calculée	Valeur expérimentale	Ecart (%)
Ba	$1,33.10^{-1} \pm$	$1,31.10^{-1} \pm$	1,4
	$2,13.10^{-3}$	$6,57.10^{-3}$	
Nd	$1,62.10^{-1} \pm$	$1,68.10^{-1} \pm$	-3,4
	$2,58.10^{-3}$	$8,38.10^{-3}$	
Gd	$1,90.10^{-1} \pm$	$1,85.10^{-1} \pm$	2,6
	$3,03.10^{-3}$	$9,24.10^{-3}$	
W	$2,98.10^{-1} \pm$	$3,00.10^{-1} \pm$	-0,5
	$4,76.10^{-3}$	$1,50.10^{-2}$	
Pb	$4,79.10^{-1} \pm$	$4,78.10^{-1} \pm$	0,1
	$7,63.10^{-3}$	$2,39.10^{-2}$	

Tableau 5.2. Valeurs pour l'étalonnage en sensibilité relative des raies L

Courbe d'étalonnage en sensibilité pour les raies L

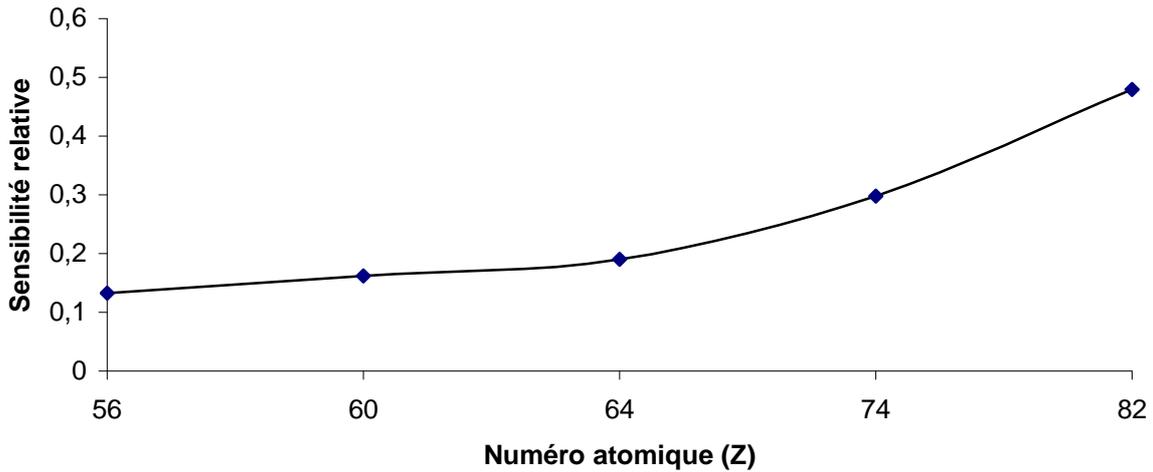


Figure 5.2. Courbe d'étalonnage en sensibilité pour les raies L

## Chapitre 6. METHODE ANALYTIQUE

### 6.1.Precision de la méthode

Elle consiste à déterminer la limite de détection, la fidélité et la justesse de la méthode.

#### 6.1.1. Limite de détection

La limite de détection d'un élément donné représente la concentration minimale détectable pour cet élément. Elle est définie par la formule

$$(LD)_i = 3.C_i \frac{\sqrt{(Nb)_i}}{N_i} \quad (6.1)$$

Où  $C_i$  désigne la concentration de l'élément  $i$ ,

$N_i$  l'aire nette de l'élément  $i$ ,

$Nb$  le bruit de fond.

La limite de détection est déterminée à partir de la mesure d'une solution étalon

**Tableau 6.1. Composition de la solution étalon**

<b>Elément</b>	<b>Unité</b>	<b>Concentration</b>
<b>K</b>	$\mu\text{g/l}$	<b>1300</b>
<b>Ca</b>	$\mu\text{g/l}$	<b>10000</b>
<b>Ti</b>	$\mu\text{g/l}$	<b>700</b>
<b>Cr</b>	$\mu\text{g/l}$	<b>50</b>
<b>Mn</b>	$\mu\text{g/l}$	<b>100</b>
<b>Fe</b>	$\mu\text{g/l}$	<b>50</b>
<b>Ni</b>	$\mu\text{g/l}$	<b>300</b>
<b>Cu</b>	$\mu\text{g/l}$	<b>1000</b>
<b>Zn</b>	$\mu\text{g/l}$	<b>1500</b>
<b>Se</b>	$\mu\text{g/l}$	<b>100</b>
<b>Br</b>	$\mu\text{g/l}$	<b>100</b>
<b>Sr</b>	$\mu\text{g/l}$	<b>1000</b>
<b>Ba</b>	$\mu\text{g/l}$	<b>800</b>
<b>Pb</b>	$\mu\text{g/l}$	<b>250</b>

**Temps de comptage : 250s**

Les valeurs de la limite de détection obtenues sont données dans le tableau 6.2.

**Tableau 6.2. Limite de détection**

Eléments	Numéro atomique (Z)	Limite de détection (µg/l)
K	19	33
Ca	20	25
Ti	22	15
Cr	24	6
Mn	25	6
Fe	26	10
Ni	28	6
Cu	29	7
Zn	30	7
Se	34	8
Br	35	8
Sr	38	14
Ba	56	33
Pb	82	14

#### 6.1.2. Contrôle de la fidélité

Le contrôle de la fidélité d'une méthode analytique se rapporte à la détermination de l'écart-type des résultats obtenus en répétant plusieurs fois les mesures.

#### 6.1.3. Contrôle de la justesse

Le contrôle de la justesse vérifie l'écart entre la valeur exacte et la valeur moyenne des résultats obtenus en plusieurs mesures d'un même échantillon.

Pour cela, le contrôle de qualité du système nécessite à préparer des solutions standards comprenant des éléments de concentration connue pour les raies K et pour les raies L.

Le tableau 6.3. montre les résultats obtenus pour les raies K et les raies

L .

**Tableau 6.3. Contrôle de qualité du système**

Elément	Unité	Concentration		Ecart-type	Ecart-type relatif	Ecart relatif
		Ajoutée (A)	Mesurée (M)			
K	µg/l	1300	<b>1443</b>	<b>50,72</b>	3,51	11,01
Ca	µg/l	10000	<b>9862</b>	<b>141,62</b>	1,44	1,38
Ti	µg/l	700	<b>668</b>	<b>5,01</b>	0,75	4,57
Mn	µg/l	200	<b>207</b>	<b>8,41</b>	4,05	3,83

Elément	Unité	Concentration		Ecart-type	Ecart-type relatif	Ecart relatif
		Ajoutée (A)	Mesurée (M)			
K	µg/l	3000	3845	67,67	1,76	28,18
Ca	µg/l	3000	3025	48,41	1,60	0,86
Mn	µg/l	50	59	1,46	2,45	19,71
Ni	µg/l	50	49	6,02	12,12	0,59
Se	µg/l	50	59	4,64	7,86	18,05
Sr	µg/l	600	650	10,16	1,56	8,33
Pb	µg/l	50	50	5,47	10,83	0,99

Elément	Unité	Concentration		Ecart-type	Ecart-type relatif	Ecart relatif
		Ajoutée (A)	Mesurée (M)			
Ba	µg/l	800	710	33,62	4,74	11,27
Pb	µg/l	200	214	21	9,54	7,37

$$\text{Avec Ecart-type relatif} = \frac{\sigma}{M} \times 100 \quad (6.2)$$

$$\text{Ecart relatif} = \frac{M - V_{ajoutée}}{V_{ajoutée}} \times 100 \quad (6.3)$$

Où  $V_{ajoutée}$  désigne la valeur ajoutée

## 6.2. Incertitude des mesures

La concentration d'un élément  $i$  est donnée par la formule

$$C_i = \frac{I_i}{I_{ST}} \frac{1}{S_i} C_{ST} \quad [15] \quad (6.4)$$

où  $I_i$  étant l'intensité de l'élément  $i$  exprimée en coups .s<sup>-1</sup>,

$S_i$  la sensibilité relative de l'élément  $i$ ,

$I_{si}$  l'intensité du standard interne exprimée en coups .s<sup>-1</sup>,

$C_{si}$  la concentration du standard interne en mg.l<sup>-1</sup>.

L'évaluation des erreurs  $\mu = \mu(x, y, z, \dots)$  est définie par la relation

$$\Delta^2 \mu = \left(\frac{\partial \mu}{\partial x}\right)^2 \Delta^2 x + \left(\frac{\partial \mu}{\partial y}\right)^2 \Delta^2 y + \left(\frac{\partial \mu}{\partial z}\right)^2 \Delta^2 z + \dots$$

alors, l'erreur absolue de la concentration sera

$$\frac{\Delta C_i}{C_i} = \frac{\Delta I_i}{I_i} + \frac{\Delta S_i}{S_i} + \frac{\Delta_{ST}}{I_{ST}} \quad (6.5)$$

or  $N_i = I_i \cdot t$  (6.6)

où  $N_i$  représente l'aire nette du pic d'un élément  $i$  exprimée en coups,  
 $t$  est le temps de comptage en s ,  
 $I_i$  étant l'intensité de l'élément  $i$ .

alors  $\Delta N_i = \Delta I_i \cdot t$  (6.7)

avec  $\Delta N_i$  est l'erreur absolu de  $N_i$

Pour le standard interne

$$N_{st} = I_{st} \cdot t \quad (6.8)$$

avec  $N_{ST}$  désigne l'aire nette du standard interne

$I_{ST}$  son intensité

alors  $\Delta N_{ST} = \Delta I_{ST} \cdot t$  l'erreur absolue de  $N_{ST}$  (6.9)

D'où l'erreur absolue de la concentration  $C_i$

$$\frac{\Delta C_i}{C_i} = \frac{\Delta N_i}{N_i} + \frac{\Delta S_i}{S_i} + \frac{\Delta N_{ST}}{N_{ST}} \quad (6.10)$$

Les résultats des mesures trouvés dans le chapitre 7. ne sont rendus possibles tant que nous n'avons pas effectué l'étalonnage et le contrôle du système.

## Chapitre 7. APPLICATION DE LA TXRF SUR LE CONTROLE DE QUALITE DES EAUX DE CONSOMMATION

### 7.1. Méthodologie

#### 7.1.1. Echantillonnage

La première série d'échantillonnages a eu lieu dans les régions d'Antsirabe ville et Vinaninkarena. Les prélèvements ont duré du 23 août au 03 septembre 2002. Pendant cette période, différents types d'échantillons ont été prélevés (eau de puits, source, pompe publique, rivière et pompe privée) dans les zones d'études. Le nombre d'échantillons prélevés est au total 68 dont 33 échantillons prélevés dans la région de Vinaninkarena, 35 prélevés à Antsirabe ville.

L'échantillonnage dans les autres régions d'Antananarivo s'est déroulé pendant la période de pluie de décembre 2002 jusqu'à février 2003. 21 échantillons ont été prélevés dans la région d'Ambatolampy jusqu'à Behenjy en suivant la route nationale 7, 14 échantillons prélevés dans la zone d'Antananarivo Atsimondrano entre Behenjy et Ambatofotsy. 38 échantillons ont été collectés dans les régions de Miarinarivo et Arivonimamo. 40 et 44 échantillons ont été prélevés à Manjakandriana et à Ambohidratrimo respectivement. Les types d'échantillons collectés proviennent des eaux de puits, des sources, des pompes publiques et privées, des lacs et rivières.

#### 7.1.2. Appareils de mesures

Les mesures ont été effectuées à l'aide des méthodes analytiques suivantes :

- La TXRF a été utilisée pour les analyses élémentales,
- Le Spectrophotomètre permet de mesurer le sulfate et le phosphate,
- Le nitrate, nitrite et l'alcalinité sont mesurés par la méthode colorimétrique,
- Le pH est mesuré au moyen du pH-mètre,
- Le Conductimètre a permis de déterminer la conductivité, le TDS, la salinité et la température de chaque échantillon.

## 7.2. Normes utilisées pour le contrôle

Trois Normes internationales ont été prises comme normes de références lors de cette étude. Les extraits de ces normes sont donnés dans les tableaux 7.1, 7.2, 7.3.

Tableau 7.1. Normes de potabilité de l'eau pour l'Union Européenne[3]

Paramètres physico-chimique	Unité	Valeur maximale admissible
pH	Unité pH	6.5<pH<9
Nitrates	mg/l	50
Nitrites	mg/l	0.1
Magnésium	mg/l	50
Sulfates	mg/l	250
Potassium	mg/l	12
Calcium	mg/l	-
Manganèse	µg/l	50
Fer	µg/l	200
Cuivre	µg/l	1000
Zinc	µg/l	5000
Arsenic	µg/l	50
Chrome	µg/l	50
Nickel	µg/l	50
Plomb	µg/l	50

Tableau 7.2. Normes de potabilité de l'eau pour le Canada Québec[15]

Paramètres physico-chimique	Unité	Valeur maximale admissible
Nitrates + Nitrites	mg/l	10,0
Sulfates	mg/l	500
Baryum	mg/l	1,0
Arsenic	µg/l	50
Chrome	µg/l	50
Mercure	µg/l	10
Plomb	µg/l	50

Sélénium	µg/l	10
----------	------	----

*Tableau 7. 3. Normes de potabilité de l'eau pour la France [16]*

<b>Paramètres physico-chimique</b>	<b>Unité</b>	<b>Valeur maximale admissible</b>
Température	°C	25
pH	Unité pH	6.5<pH<8.5
Nitrates	mg/l	50
Nitrites	mg/l	0.1
Magnésium	mg/l	50
Sulfates	mg/l	250
Potassium	mg/l	12
Calcium	mg/l	50
Manganèse	µg/l	50
Fer	µg/l	200
Cuivre	µg/l	1000
Zinc	µg/l	5000
Arsenic	µg/l	50
Chrome	µg/l	50
Nickel	µg/l	50
Plomb	µg/l	50
Sélénium	µg/l	10

### 7.3. Cartes et tableaux des résultats synthétiques expérimentaux

#### 7.3.1. Vinaninkarena

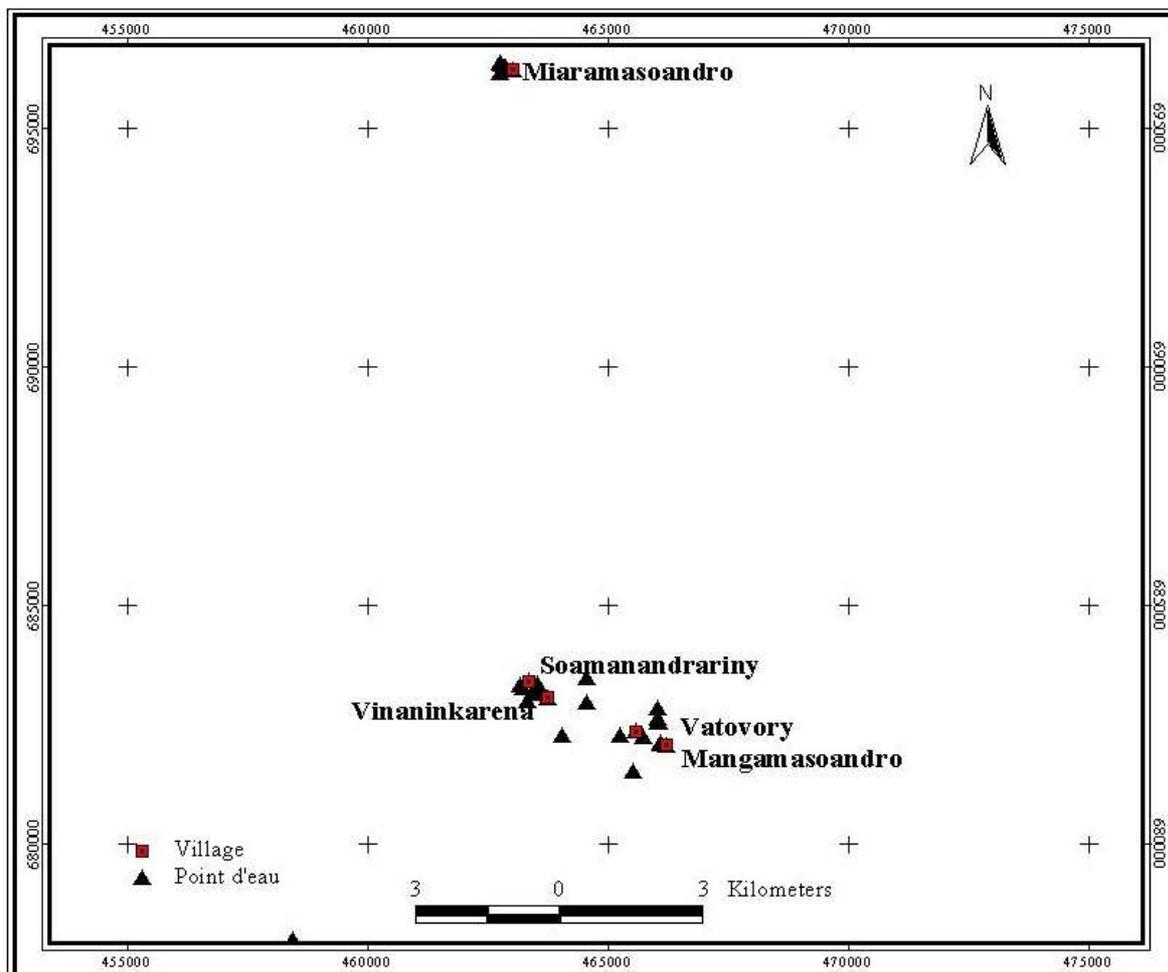


Figure 7.1. Positions et lieux de prélèvements des échantillons dans la région de Vinaninkarena

Tableau 7.4. Résultats synthétiques pour Vinaninkarena

Paramètres physico-chimiques	Unité	Concentration			Ecart-type	C.V	Taux d'échantillons dépassant les normes (%)
		Max	Min	Moyenne			
pH		6,8	6	6,4	0,56	8,84	0
Conductivité	µS/cm	246	15,4	130,7	163,06	124,75	-
TDS	mg/L	155,2	7,7	81,45	104,30	128,05	-
Salinité	o/oo	0,1	0	0,05	0,07	141,42	-
Température	°C	25,8	18,4	22,1	5,23	23,67	-
Nitrate	mg/L	1	0	0,5	0,71	141,42	0
Nitrite	mg/L	0,3	0	0,15	0,21	141,42	3
Sulfate	mg/L	<0,56	-	-	-	-	0
K	mg/L	22	0,960	11,517	14,93	129,63	12
Ca	mg/L	17	0,050	8,596	12,08	140,59	0
Cr	µg/L	<5	-	-	-	-	0
Mn	µg/L	48	6	27	29,70	110	0
Fe	µg/L	3002	10	1 506	2115,66	140,48	18
Cu	µg/L	24	7	16	12,02	77,55	0
Zn	µg/L	29	7	18	15,56	86,42	0
Br	µg/L	178	8	93	120,21	129,26	-
Rb	µg/L	63	LD	-	-	-	-
Sr	µg/L	627	14	321	433,46	135,24	-
Ba	µg/L	300	33	167	188,80	113,39	0
Pb	µg/L	36	14	25	15,56	62,23	0

Les résultats d'analyses obtenus dans la zone de Vinaninkarena sont rapportés dans le tableau 7.4

Le potassium présente une concentration variant entre 22 mg/L et 0,96 mg/L dans les échantillons analysés. Nous constatons que 12% des échantillons prélevés dans la région de Vinaninkarena dont 3 puits et une source ont une

quantité en potassium supérieure à la valeur maximale recommandée par les normes de potabilité (12 mg/L). En fait, le potassium est un élément chimique présent naturellement dans les sols. Sa présence est indispensable pour les êtres vivants. Il n'offre pas d'inconvénients pour la santé humaine. Ces taux élevés en potassium peuvent s'expliquer par le fait que la zone d'étude est une zone volcanique, fertile et riche en sels minéraux.

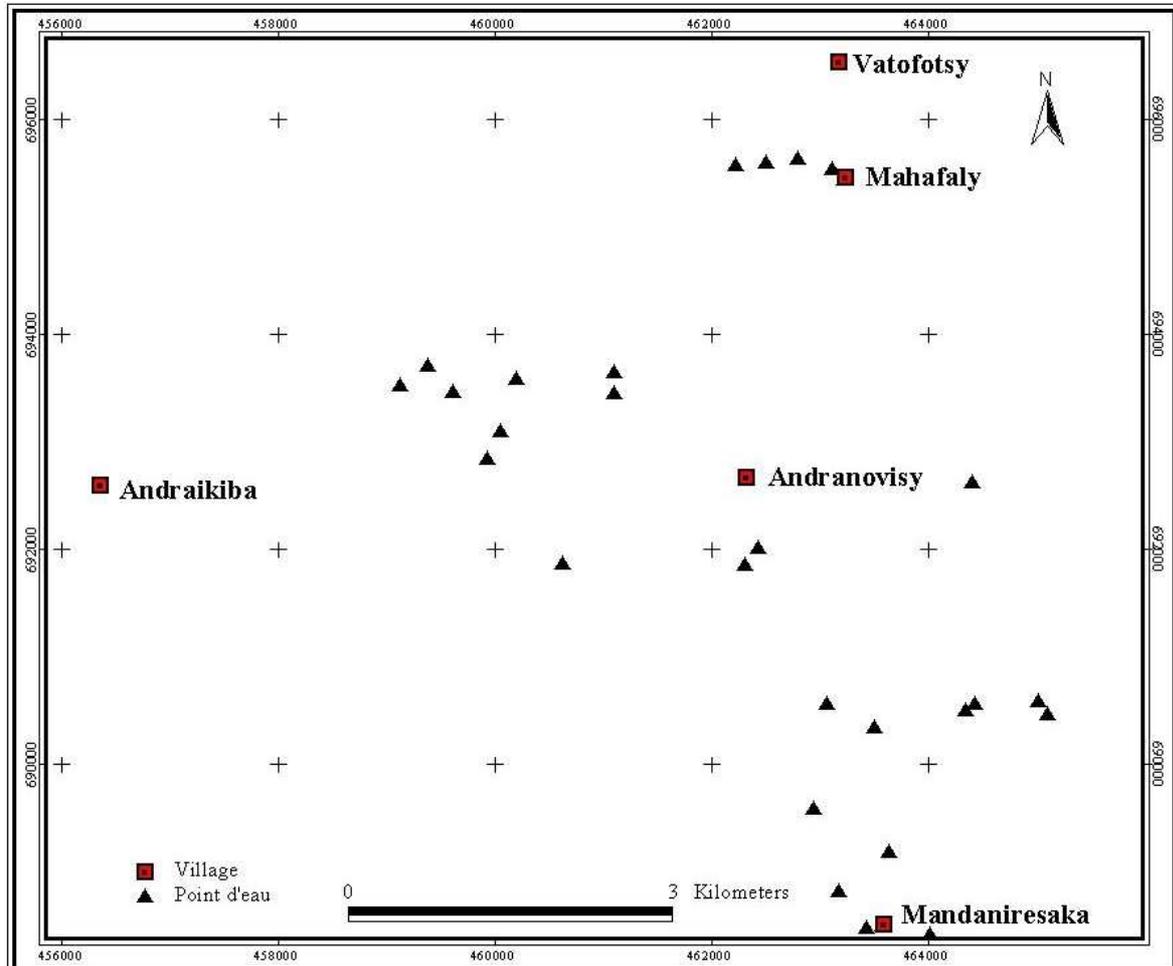
Pour le fer, il présente une valeur maximale de 3002 µg/L pour tous les échantillons analysés dans cette zone et une valeur minimale inférieure à la limite de détection de 10 µg/L. De plus, nous constatons que 5 échantillons dont 4 puits et une source soit 18% des échantillons prélevés ont des valeurs supérieures à la valeur maximale admissible (200 µg/L).

Concernant le manganèse, il n'y a aucun échantillon qui excède les normes (50 µg/L). La valeur maximale trouvée dans toute la zone de Vinaninkarena est de 48 µg/L tandis que la valeur minimale est inférieure à la limite de détection (6 µg/L).

Il en est de même pour le baryum, pour lequel toutes les concentrations des échantillons prélevés sont inférieures aux normes (1mg/L). La valeur maximale et minimale trouvées varient respectivement de 0,3mg/L à 33 µg/L.

Pour les autres éléments, nous observons l'absence du chrome et du plomb dans tous les échantillons analysés.

### 7.3.2. Antsirabe



*Figure 7.2. Positions et lieux de prélèvements des échantillons dans la région d'Antsirabe*

Tableau 7.5. Résultats synthétiques pour Antsirabe

Paramètres physico-chimiques	Unité	Concentration			Ecart-type	C.V	Taux d'échantillons dépassant les normes (%)
		Max	Min	Moyenne			
pH		6,4	6	6,20	0,28	4,56	0
Conductivité	µS/cm	583	23,2	303,10	395,84	130,60	-
TDS	mg/L	291	11,6	151,30	197,56	130,58	-
Salinité	o/oo	0,3	0	0,15	0,21	141,42	-
Température	°C	21,5	18,9	20,20	1,84	9,10	-
Nitrate	mg/L	10	0	5	7,07	141,42	0
Nitrite	mg/L	0	-	-	-	-	0
Sulfate	mg/L	1,08	0,56	0,82	0,37	44,84	0
K	mg/L	13	0,117	6,56	9,11	138,90	3
Ca	mg/L	25	0,123	12,56	17,59	140,04	0
Cr	µg/L	< 5	-	-	-	-	0
Mn	µg/L	47	15	31	22,63	72,99	0
Fe	µg/L	141	10	75,50	92,63	122,69	0
Cu	µg/L	< 7	-	-	-	-	0
Zn	µg/L	58	7	32,50	36,06	110,96	0
Br	µg/L	150	8	79	100,41	127,10	-
Rb	µg/L	32	< LD	-	-	-	-
Sr	µg/L	1070	14	542	746,70	137,77	-
Ba	µg/L	377	33	205	243,24	118,66	0
Pb	µg/L	< 15	-	-	-	-	0

Les résultats d'analyses des échantillons prélevés dans la zone d'Antsirabe sont classés dans le tableau 7.5.

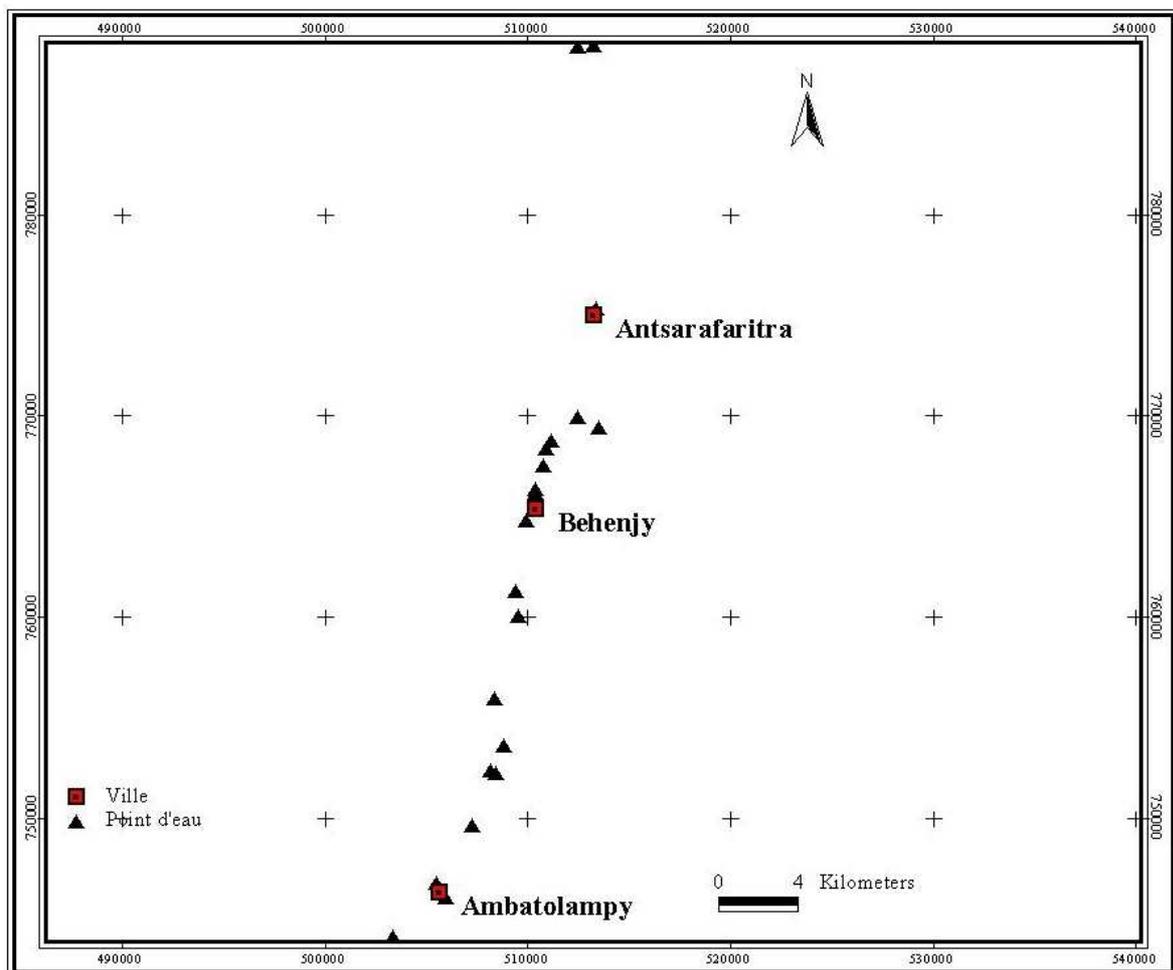
Les quantités en potassium varient entre 13mg/L et 0,117mg/L pour tous les échantillons analysés. Entre ces deux valeurs, la concentration d'un puits dépasse la valeur recommandée par les normes soit 3 % des échantillons prélevés.

Pour le fer, la concentration maximale observée est de 141  $\mu\text{g/L}$  inférieure à 200  $\mu\text{g/L}$  valeur maximale admissible recommandée par les normes.

Pour le manganèse, la concentration la plus élevée est de 47  $\mu\text{g/L}$  dans toute la zone qui est inférieure aux normes de potabilité (50  $\mu\text{g/L}$ ).

Pour les éléments toxiques, nous constatons leur présence dans quelques échantillons mais leurs valeurs, relativement faibles sont inférieures à la limite de détection. La valeur maximale trouvée est inférieure à 5  $\mu\text{g/L}$  pour le chrome, inférieure à 15  $\mu\text{g/L}$  pour le plomb. La norme recommandée est inférieure à 50  $\mu\text{g/L}$  pour ces deux éléments.

### 7.3.3. Ambatolampy



*Figure 7.3. Positions et lieux de prélèvements des échantillons dans la région d'Ambatolampy*

**Tableau 7.6. Résultats synthétiques pour Ambatolampy**

Paramètres physico-chimiques	Unité	Concentration			Ecart-type	C.V	Taux d'échantillons dépassant les normes (%)
		Max	Min	Moyenne			
pH		6,8	6,2	6,50	0,42	6,52	0
Conductivité	µS/cm	630	11,4	320,70	437,41	136,39	-
TDS	mg/L	308	5,7	156,85	213,75	136,28	-
Salinité	o/oo	0,3	-	-	-	-	-
Température	°C	23,8	19,4	21,60	3,11	14,40	-
Nitrate	mg/L	5	0	2,50	3,54	141,42	0
Nitrite	mg/L	-	-	-	-	-	0
Sulfate	mg/L	0,597	0,56	0,58	0,03	4,52	0
K	mg/L	42	0,48	21,33	29,48	138,23	5
Ca	mg/L	46	0,17	23,45	32,91	140,35	-
Cr	µg/L	-	-	-	-	-	0
Mn	µg/L	27	7	17	14,14	83,19	0
Fe	µg/L	682	10	346	475,18	137,33	14
Cu	µg/L	66	7	36,50	41,72	114,30	0
Zn	µg/L	97	7	52	63,64	122,38	0
Br	µg/L	170	8	89	114,55	128,71	-
Rb	µg/L	57	LD				-
Sr	µg/L	240	15	127,50	159,10	124,78	-
Ba	µg/L	224	34	129	134,35	104,15	0
Pb	µg/L	577	15	296	397,39	134,25	14

Le tableau 7.6 représente les résultats d'analyses effectuées dans la zone d'Ambatolampy.

Dans cette zone, le potassium varie entre 42 mg/l et 0,48 mg/L. Nous constatons que 5 % des échantillons analysés possède des concentrations largement supérieures aux normes.

En ce qui concerne le fer, sa valeur est comprise entre 682  $\mu\text{g/L}$  et 10  $\mu\text{g/L}$  dans toute la région d'Ambatolampy. 3 échantillons dont 2 puits et une source soit 14 % des échantillons prélevés dépassent les normes.

Pour le plomb, sa concentration varie de 577  $\mu\text{g/L}$  à 15  $\mu\text{g/L}$  dans tous les échantillons prélevés. 3 puits ont des valeurs largement supérieures aux normes soit 14 % des échantillons prélevés. Plusieurs causes peuvent être à l'origine de sa présence dans l'eau, soit par : la dissolution des roches et des minerais qui en contiennent

- la pollution chimique due aux effluents industriels ou agricoles (utilisation des pesticides)
- la pollution atmosphérique
- la pollution d'origine urbaine par l'utilisation permanente des accessoires automobile : batteries, peinture, soudure, carburants et lubrifiants.

#### 7.3.4. Atsimondrano

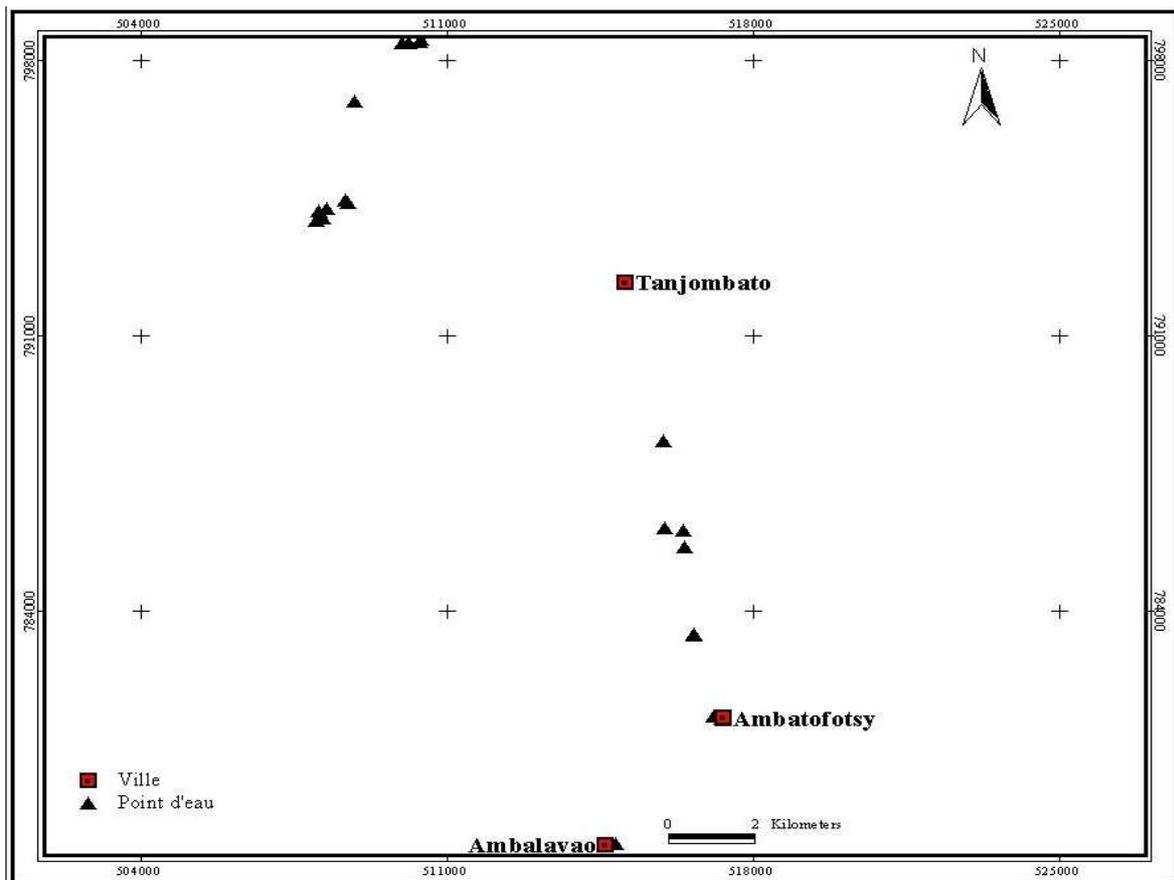


Figure 7.4. Positions et lieux de prélèvements des échantillons dans la région d'Atsimondrano

Tableau 7.7. Résultats synthétiques pour Atsimondrano

Paramètres physico-chimiques	Unité	Concentration			Ecart-type	C.V	Taux d'échantillons dépassant les normes (%)
		Max	Min	Moyenne			
pH		6,4	6	6,2	0,28	4,56	0
Conductivité	µS/cm	925	12,2	468,6	645,44	137,74	-
TDS	mg/L	463	6,1	234,55	323,08	137,74	-
Salinité	o/oo	0,3	-	0,15	0,21	141,42	-
Température	°C	23,6	20,1	21,85	2,47	11,32	-
Nitrate	mg/L	1	0	0,50	0,71	141,42	0
Nitrite	mg/L	0,3	0	0,15	0,21	141,42	7
Sulfate	mg/L	1,090	0,56	0,83	0,37	45,43	0
K	mg/L	62	0,64	31,22	43,24	138,51	36
Ca	mg/L	14	0,50	7,23	9,53	131,68	-
Cr	µg/L	-	-	-	-	-	0
Mn	µg/L	458	6	232	319,61	137,76	28
Fe	µg/L	351	10	180,50	241,12	133,59	14
Cu	µg/L	7	-	-	-	-	0
Zn	µg/L	50	7	28,50	30,41	106,69	0
Br	µg/L	412	8	210	285,67	136,03	-
Rb	µg/L	118	31	74,50	61,52	82,57	-
Sr	µg/L	368	15	191,50	249,61	130,34	-
Ba	µg/L	2852	34	1 443	1992,63	138,09	7
Pb	µg/L	49	-	-	-	-	0

Le tableau 7.7 représente les résultats d'analyses effectuées dans la région de Behenja jusqu'à Ambatofotsy (zone d'Atsimondrano).

Les résultats d'analyses montrent l'existence de Nitrite dans cette zone. Nous constatons une valeur maximale de 0,3 mg/L dans tous les échantillons analysés. 7 % des échantillons prélevés dépasse la valeur maximale recommandée par les normes (0,1 µg/L). Nous faisons remarquer que pour les 14 échantillons prélevés dans cette zone, un échantillon seulement dépasse les normes. Deux cas peuvent être à l'origine de la contamination : la fiente et les rejets d'effluents domestiques à côté du puits.

La quantité en potassium observée dans toute la zone d'Atsimondrano varie de 62 mg/L à 0,64 mg/L . 5 échantillons dont 4 puits et une source sont supérieurs aux normes soit 36 % des échantillons prélevés.

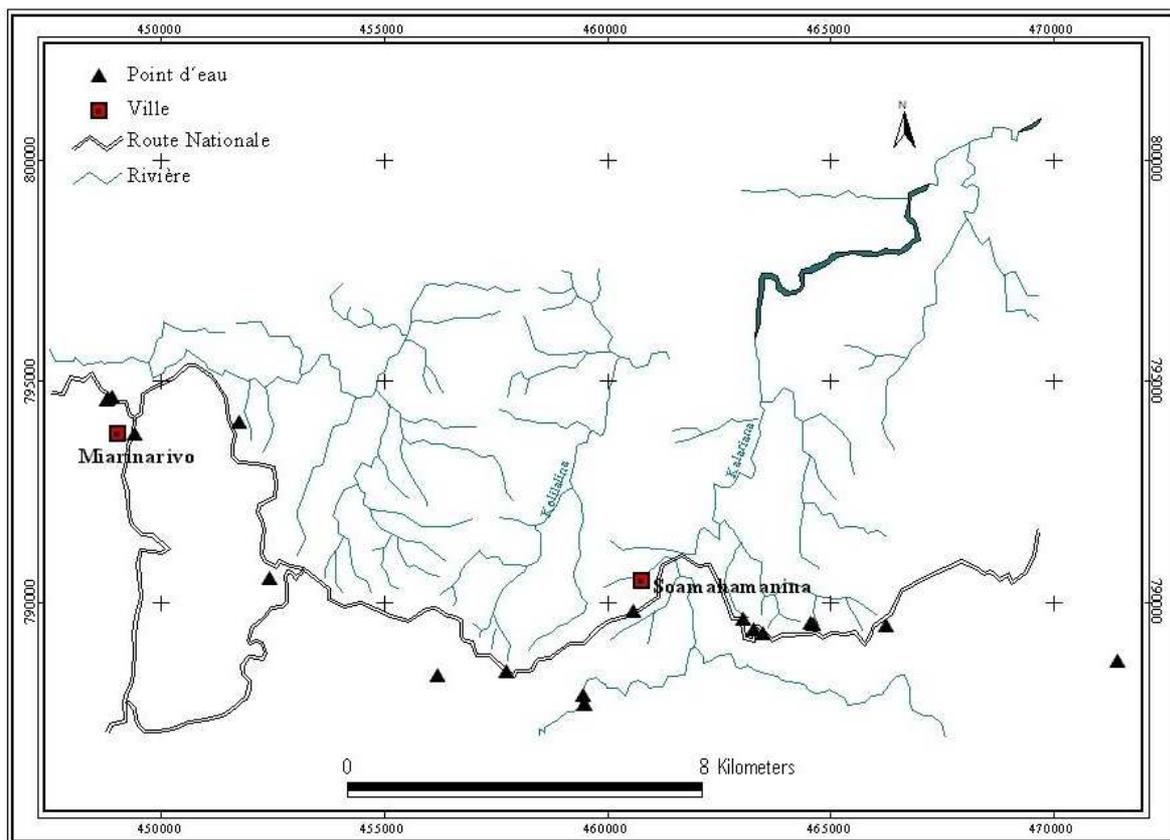
Pour le manganèse, nous constatons une valeur maximale de 458 µg/L, et une valeur minimale de 6 µg/L. 4 échantillons dont une source et 3 puits dépassent la valeur maximale admissible.

Pour le fer, sa valeur allant de 351 µg/L à 10 µg/L dans tous les échantillons analysés. 2 échantillons (sources) dépassent les normes.

En ce qui concerne le baryum, un échantillon excède la valeur maximale admissible (1 mg/L), soit 7 % des échantillons analysés. Sa valeur est 2,8 mg/L.

Les autres éléments ne présentent aucune valeur qui dépasse les normes.

### 7.3.5. Miarinarivo



*Figure 7.5. Positions et lieux de prélèvements des échantillons dans la région de Miarinarivo*

**Tableau 7.8. Résultats synthétiques pour Miarinarivo**

Paramètres physico-chimiques	Unité	Concentration			Ecart-type	C.V	Taux d'échantillons dépassant les normes (%)
		Max	Min	Moyenne			
pH		6,8	6	6,40	0,56	8,84	0
Conductivité	µS/cm	153	11,1	82,20	100,55	122,32	-
TDS	mg/L	76	5,5	41	50,20	122,45	-
Salinité	o/oo	0,1	-	0,05	0,07	141,42	-
Température	°C	26,4	21	23,70	3,82	16,11	-
Nitrate	mg/L	1	0	0,50	0,71	141,42	0
Nitrite	mg/L	-	-				0
Sulfate	mg/L	1,240	0,56	0,90	0,48	53,43	0
K	mg/L	4	0,03	2,02	2,81	139,32	0
Ca	mg/L	10	0,21	5,11	6,92	135,60	0
Cr	µg/L	< 5					0
Mn	µg/L	36	12	24	16,97	70,71	0
Fe	µg/L	991	10	500,50	693,67	138,60	29
Cu	µg/L	32	7	19,50	17,68	90,65	0
Zn	µg/L	16	7	11,50	6,36	55,34	0
Br	µg/L	78	8	43	49,50	115,11	-
Rb	µg/L	45	LD				-
Sr	µg/L	273	15	144	182,43	126,69	-
Ba	µg/L	600	34	317	400,22	126,25	0
<b>Pb</b>	µg/L	49	15	32	24,04	75,13	0

Le tableau 7.8 représente les résultats des analyses synthétiques dans la région de Miarinarivo.

La concentration maximale observée dans cette zone pour le potassium est 4 mg/L. Cette valeur est inférieure aux normes, ce qui nous permet de conclure qu'aucun échantillon ne dépasse les normes.

La quantité en manganèse est représentée par l'intervalle 36  $\mu\text{g/L}$  et 12  $\mu\text{g/L}$  pour la valeur maximale et minimale respectivement. Ce qui fait que, les teneurs de tous les échantillons analysés sont inférieures à la valeur maximale admissible.

Pour le fer, sa concentration est comprise entre 991  $\mu\text{g/L}$  et 10  $\mu\text{g/L}$ . 3 échantillons dont 2 puits et une source dépassent les normes, soit 29 % des échantillons analysés.

Pour les éléments toxiques, nous constatons leurs présences dans quelques échantillons mais leurs valeurs sont tolérables car inférieures à la valeur maximale admissible recommandée par les normes. 5  $\mu\text{g/L}$  est la concentration maximale observée pour le chrome, 49  $\mu\text{g/L}$  pour le plomb.

### 7.3.6. Arivonimamo

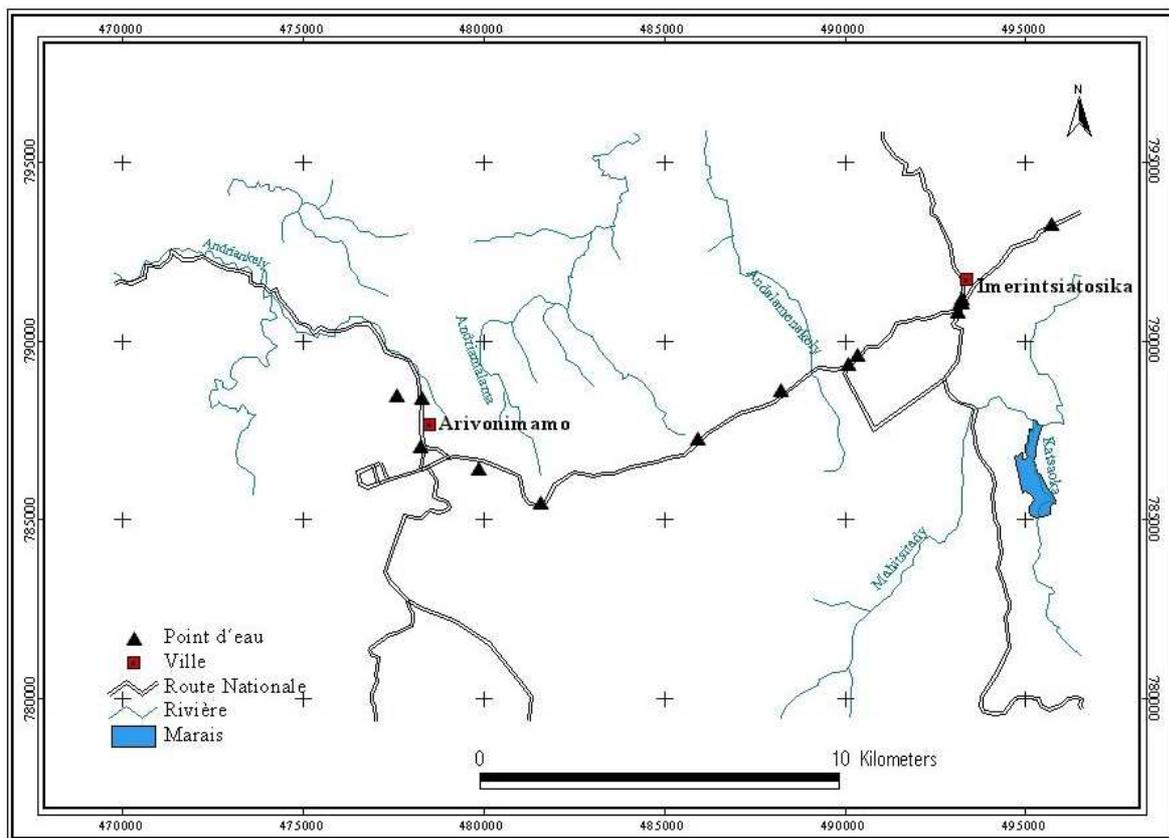


Figure 7.6. Positions et lieux de prélèvements des échantillons dans la région d'Arivonimamo

Tableau 7.9. Résultats synthétiques pour Arivonimamo

Paramètres physico-chimiques	Unité	Concentration			Ecart-type	C.V	Taux d'échantillons dépassant les normes (%)
		Max	Min	Moyenne			
pH		6	-	-	-	-	0
Conductivité	µS/cm	346	7,7	176,85	239,21	135,26	-
TDS	mg/L	173	4,4	89,00	119,64	134,43	-
Salinité	o/oo	0,2	-	0,10	0,14	141,42	-
Température	°C	27,4	21	24,2	4,52	18,70	-
Nitrate	mg/L	10	0	5	7,07	141,42	0
Nitrite	mg/L	-	-	-	-	-	0
Sulfate	mg/L	<0,56	-	-	-	-	0
K	mg/L	15	0,25	7,63	10,43	136,78	12
Ca	mg/L	12	0,05	6,03	8,45	140,25	0
Cr	µg/L	-	-	-	-	-	0
Mn	µg/L	482	7	244,50	335,88	137,37	8
Fe	µg/L	322	10	166	220,62	132,90	8
Cu	µg/L	7	-	-	-	-	0
Zn	µg/L	255	7	131	175,36	133,86	0
Br	µg/L	110	8	59	72,12	122,25	-
Rb	µg/L	41	LD	-	-	-	-
Sr	µg/L	98	15	56,50	58,69	103,88	-
Ba	µg/L	620	34	327	414,36	126,72	0
<b>Pb</b>	µg/L	54	15	34,50	27,58	79,93	4

Les résultats synthétiques pour Arivonimamo sont représentés dans le tableau 7.9

Les concentrations en potassium varie de 15 mg/L à 0,25 mg/L. 3 puits dépassent les normes soit 12 % des échantillons prélevés.

Pour le manganèse, la concentration maximale trouvée dans cette région est de 482 µg/L. Contrairement à la valeur minimale de 7 µg/L. 2 puits ont des valeurs supérieures aux normes soit 8 % des échantillons analysés.

Pour le fer, la concentration maximale et minimale obtenues varie de 322  $\mu\text{g/L}$  à 10  $\mu\text{g/L}$ . 2 puits dépassent la valeur maximale admissible, soit 8 % des échantillons prélevés.

Pour les autres éléments, remarquons l'absence du chrome dans tous les échantillons analysés. Cependant, nous constatons la présence du plomb dans un puits. Sa concentration observée est de 54  $\mu\text{g/L}$  qui est supérieure à la valeur maximale admissible.

### 7.3.7. Manjakandriana

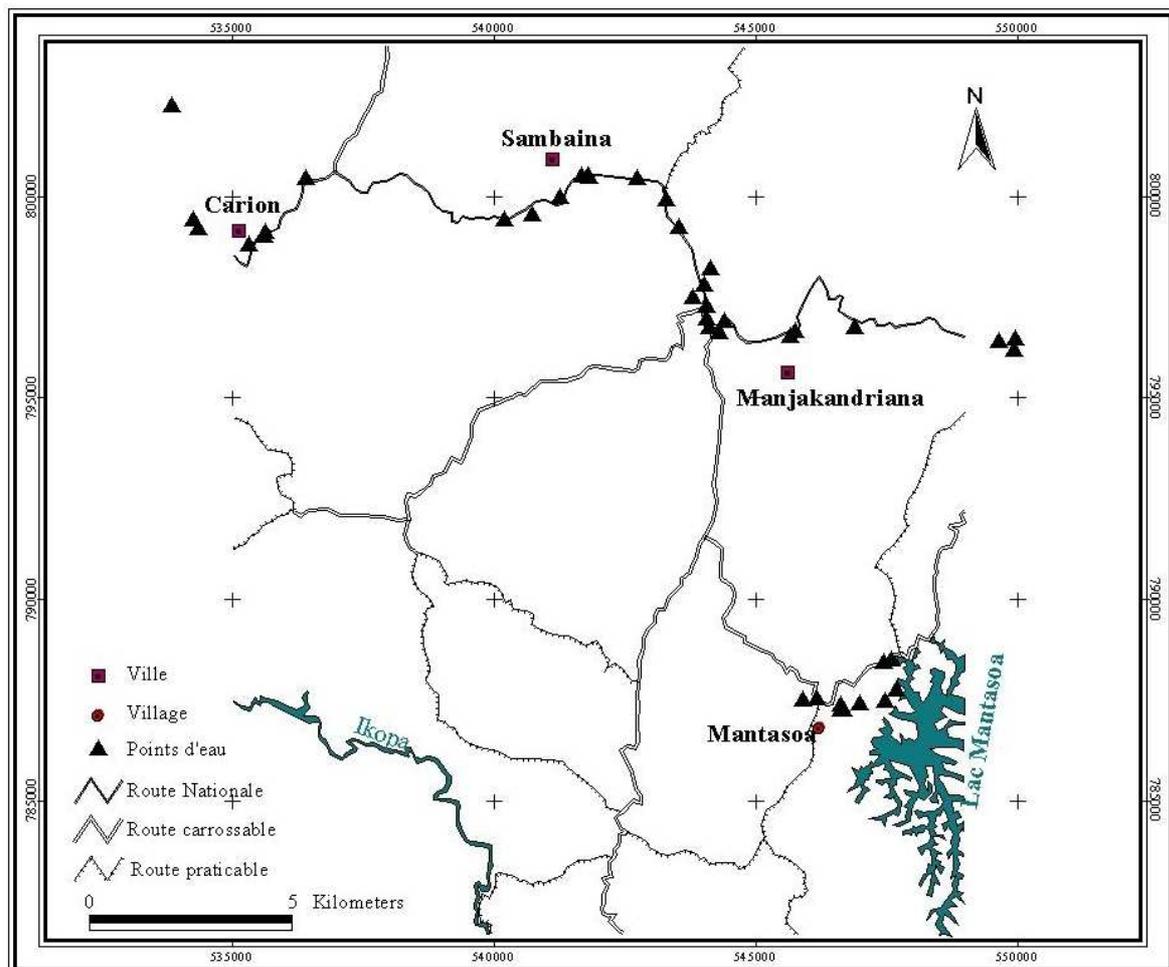


Figure 7.7. Positions et lieux de prélèvements des échantillons dans la région de Manjakandriana

Tableau 7.10. Résultats synthétiques pour Manjakandriana

Paramètres physico-chimiques	Unité	Concentration			Ecart-type	C.V	Taux d'échantillons dépassant les normes (%)
		Max	Min	Moyenne			
pH		6,4	6	6,20	0,28	4,56	0
Conductivité	µS/cm	440	6	223	306,88	137,62	-
TDS	mg/L	220	3,3	111,65	153,23	137,24	-
Salinité	o/oo	0,2	-	-	-	-	-
Température	°C	26,6	19,2	22,90	5,23	22,85	-
Nitrate	mg/L	2	0	1,00	1,41	141,42	0
Nitrite	mg/L	-	-	-	-	-	0
Sulfate	mg/L	1,60	0,56	1,08	0,74	68,09	0
K	mg/L	13	0,03	6,52	9,17	140,77	5
Ca	mg/L	11	0,03	5,52	7,76	140,65	0
Cr	µg/L	244	6	125	168,29	134,63	2
Mn	µg/L	94	7	50,50	61,52	121,82	10
Fe	µg/L	626	10	318	435,58	136,97	7
Cu	µg/L	49	7	28	29,70	106,07	0
Zn	µg/L	24913	7	12460	17611,20	141,34	2
Br	µg/L	345	18	181,50	231,22	127,40	-
Rb	µg/L	LD	-	-	-	-	-
Sr	µg/L	640	15	327,50	441,94	134,94	-
Ba	µg/L	596	34	315	397,39	126,16	0
Pb	µg/L	-	-	-	-	-	0

Les résultats synthétiques dans la région de Manjakandriana sont représentés dans le tableau 7.10.

La quantité en potassium est comprise entre 13mg/L la valeur maximale observée et 0,03 mg/l la valeur minimale après les analyses effectuées. 2 échantillons dont un puits et une

source dépassent la valeur maximale admissible, soit 5 % des échantillons prélevés dans cette zone.

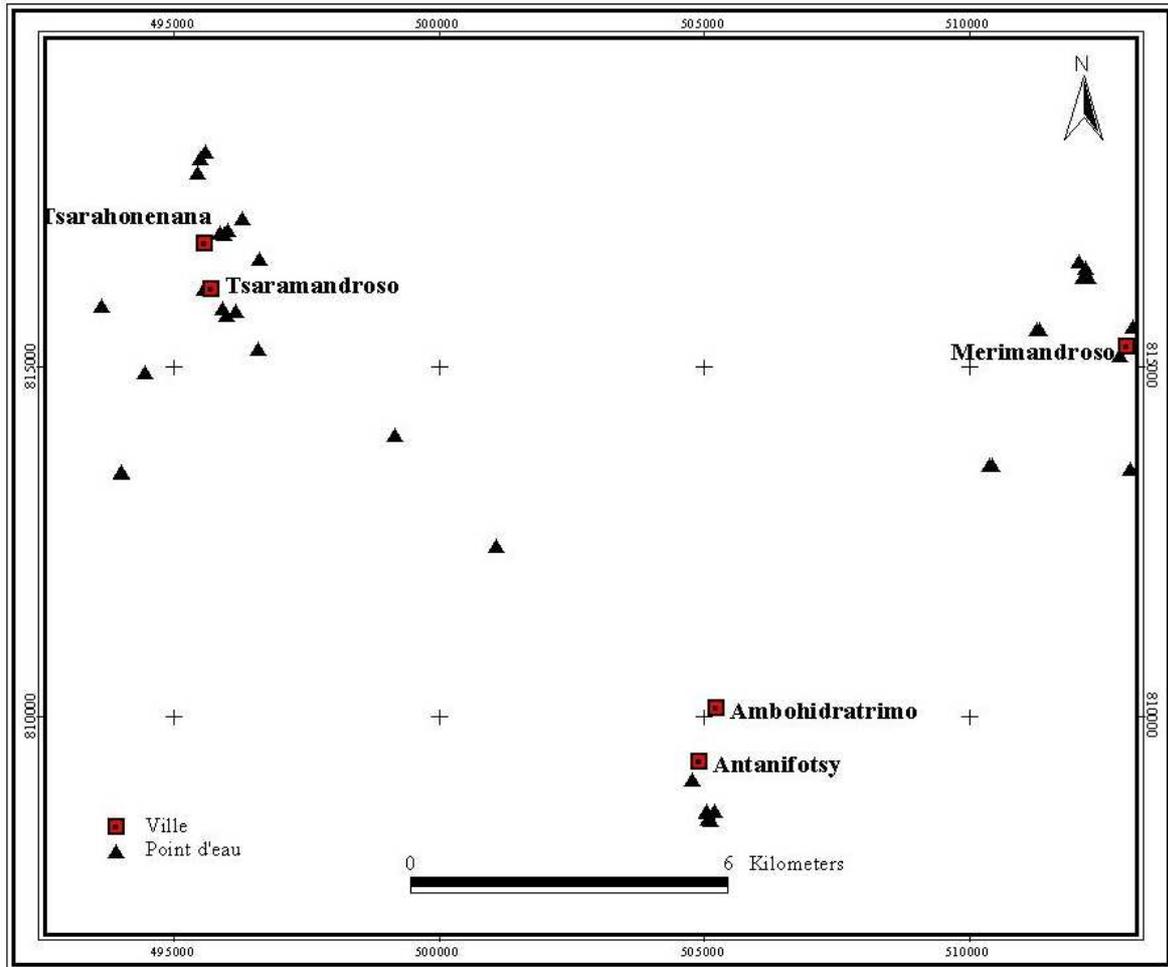
Par contre, la concentration du manganèse est comprise entre 94 µg/L et 7 µg/L 4 échantillons dont 3 puits et une source sont classés supérieurs aux normes soit 10 % des échantillons analysés.

Pour le fer, sa concentration varie entre 626 mg/L et 10 mg/L dans toute la région. 3 puits dépassent la valeur maximale admissible recommandée par les normes.

Exceptionnellement aux autres régions, nous constatons une quantité importante de zinc dans un puits. Sa valeur est de 24913 µg/L qui est 5 fois plus grande que la valeur maximale admissible (5000 µg/L). La valeur minimale observée est inférieure à la limite de détection ( 7 µg/L) dans toute la région.

En outre, nous constatons l'absence du plomb et la présence du chrome dans cette zone. La concentration en chrome varie de 244 µg/L et de 6 µg/L dans l'ensemble des échantillons analysés. Cette valeur très élevée a été trouvée dans un puits, alors que la valeur maximale admissible recommandée par les normes est inférieure à 50 µg/L .

#### **7.3.8. Ambohitrarimo**



*Figure 7.8. Positions et lieux de prélèvements des échantillons dans la région d'Ambohidratrimo*

Tableau 7.11. Résultats synthétiques pour Ambohidratrimo

Paramètres physico-chimiques	Unité	Concentration			Ecart-type	C.V	Taux d'échantillons dépassant les normes (%)
		Max	Min	Moyenne			
pH		6,2	6	6,10	0,14	2,32	0
Conductivité	µS/cm	1 560	12,6	786,30	1094,18	139,16	-
TDS	mg/L	826	6,3	416,15	579,62	139,28	-
Salinité	o/oo	0,8	-	-	-	-	-
Température	°C	26,6	20,9	23,75	4,03	16,97	-
Nitrate	mg/L	50	0	25	35,36	141,42	2
Nitrite	mg/L	-	-	-	-	-	0
Sulfate	mg/L	0,607	0,56	0,58	0,03	5,70	0
K	mg/L	140	0,97	70,49	98,31	139,48	18
Ca	mg/L	28	0,35	14,18	19,55	137,93	0
Cr	µg/L	435	6	220,50	303,35	137,57	2
Mn	µg/L	1906	7	956,50	1342,80	140,39	45
Fe	µg/L	529	10	269,50	366,99	136,17	4
Cu	µg/L	< 7	-	-	-	-	0
Zn	µg/L	187	7	97	127,28	131,22	0
Br	µg/L	513	8	260,50	357,09	137,08	-
Rb	µg/L	401	LD	-	-	-	-
Sr	µg/L	1139	15	577	794,79	137,74	-
Ba	µg/L	7518	34	3776	5291,99	140,15	13
Pb	µg/L	-	-	-	-	-	0

Le tableau 7.11 représente les résultats synthétiques obtenus dans la région d'Ambohidratrimo.

Nous remarquons la présence de Nitrate dans cette zone. Un échantillon dépasse la valeur maximale admissible dans tous les échantillons prélevés. La concentration maximale constatée pour cet échantillon est de 50 mg/L, qui est exactement égale à la valeur limite

recommandée par les normes (50 mg/L). Cette valeur a été trouvée dans un puits qui se trouve dans la commune du Mahitsy.

De plus, nous observons une forte concentration de potassium dans la zone d'Ambohidratrimo, elle varie de 140 mg/l à 0,97 mg/L. 8 puits ont des valeurs supérieures aux normes soit 18 % des échantillons analysés.

En outre, il est noté que pour le manganèse, la concentration maximale trouvée dans cette zone est de 1906  $\mu\text{g/L}$ . Contrairement, la valeur minimale constatée est relativement faible, inférieure à la limite de détection (7  $\mu\text{g/L}$ ). 20 puits ont été jugés non conformes aux normes de potabilité pour le manganèse d'après les analyses effectuées, soit 45 % des échantillons prélevés.

Pour le fer, sa concentration est comprise entre les deux intervalles 529  $\mu\text{g/L}$  et 10  $\mu\text{g/L}$  dans tous les échantillons analysés. 2 puits ont des concentrations supérieures aux normes, soit 4 % des échantillons prélevés.

En ce qui concerne le baryum, sa concentration présente des différences notables, elle varie entre 7518  $\mu\text{g/L}$  et 34  $\mu\text{g/L}$ . 6 échantillons (puits) ont des valeurs en excès par rapport à la valeur maximale admissible soit 13 % des échantillons prélevés.

Pour les éléments toxiques, nous remarquons la présence du chrome dans les résultats d'analyses. Sa concentration variant de 435  $\mu\text{g/L}$  à 6  $\mu\text{g/L}$  dans tous les échantillons. Un échantillon (puits) excède la valeur maximale admissible soit 2 % des échantillons analysés. Pour le plomb, tous les échantillons ne présentent aucune valeur .

#### **7.4. Comparaison des résultats obtenus dans toutes les zones d'études**

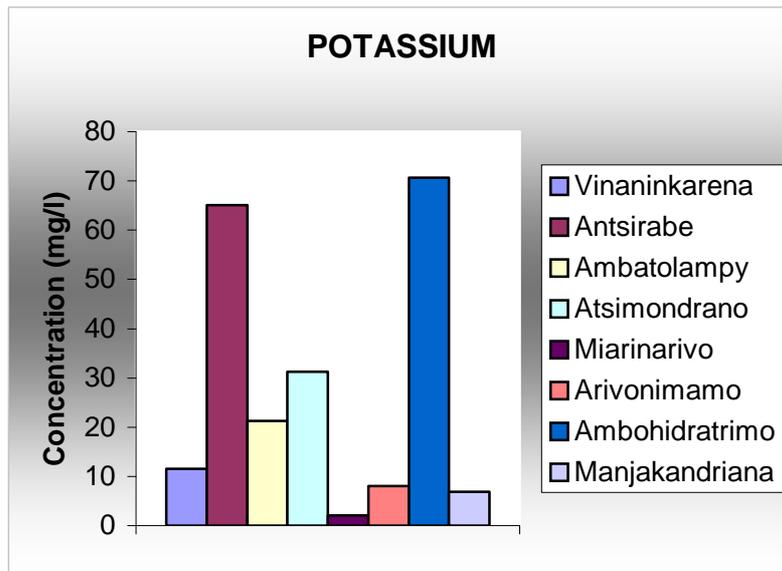


Figure 7.9. Concentrations du potassium mesurées dans les zones d'études.

D'après cette figure 7.9, le potassium se rencontre dans toutes les zones d'études. Les échantillons prélevés dans la zone d'Ambohidratrimo représentent la teneur en potassium la plus élevée. Par contre, celui de Miarinarivo représente la quantité en potassium la plus faible.

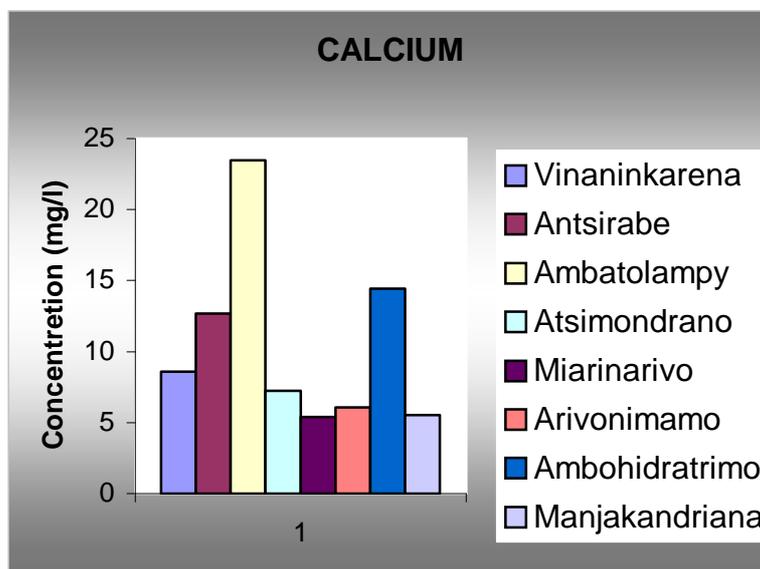


Figure 7.10. Concentrations du Calcium mesurées dans les zones d'études.

La figure ci-dessus montre que le calcium se retrouve dans toutes les zones d'études. Sa concentration est très forte à Ambatolampy, et relativement faible à Miarinarivo.

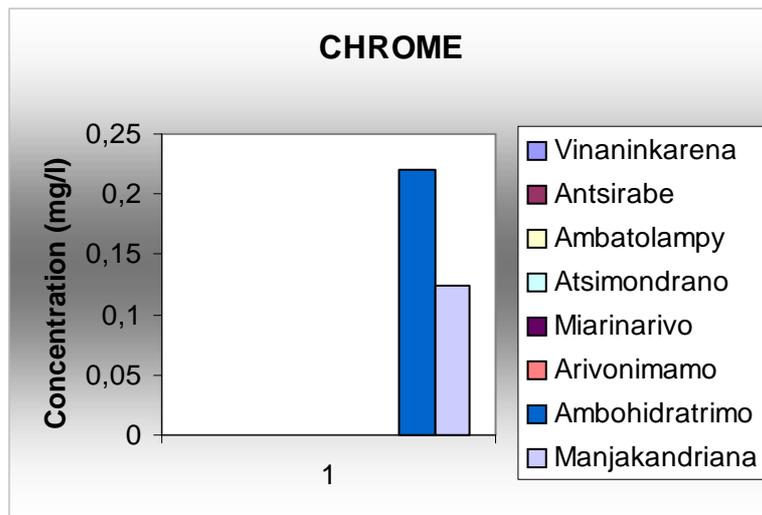


Figure 7.11. Concentrations du chrome dans toutes les zones d'études.

Ce graphe montre que dans toutes les zones d'études, le chrome est observé seulement dans deux régions : Ambohidratrimo et Manjakandriana .

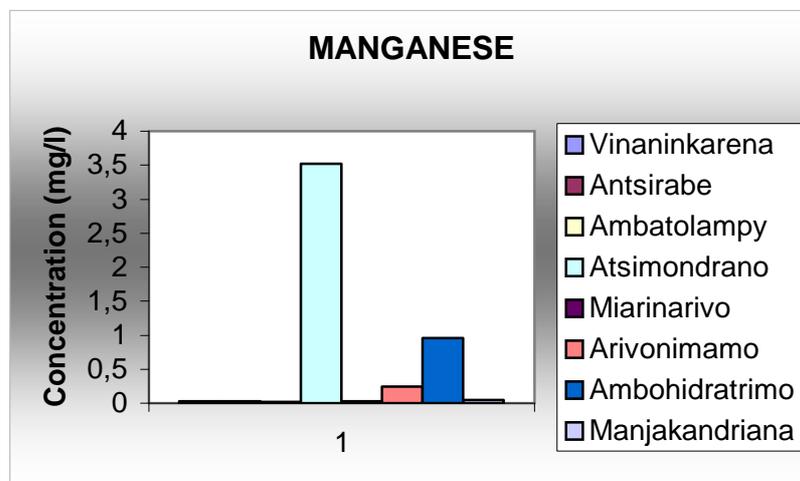


Figure 7.12. Concentrations du manganèse dans toutes les zones d'études

D'après cette figure, le manganèse est présent dans toutes les régions. Sa proportion est très élevée dans la zone d'Atsimondrano, et est inférieure à la limite de détection dans la zone de Vinaninkarena, Antsirabe, Ambatolampy, Miarinarivo, et Manjakandriana.

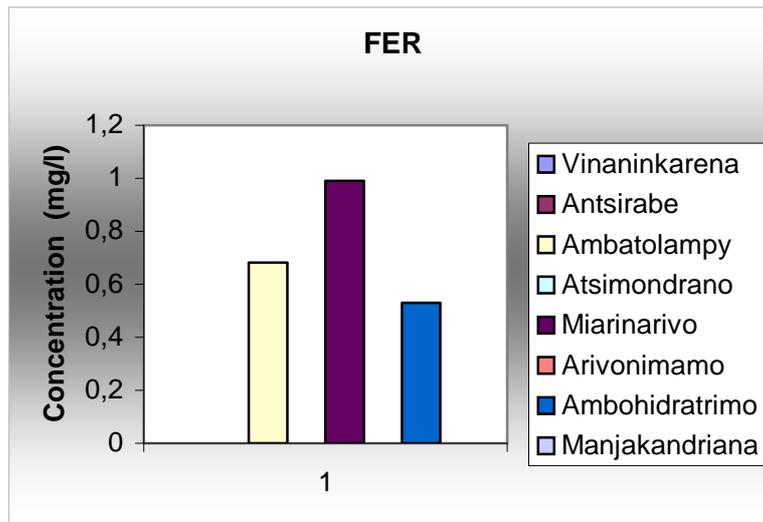


Figure 7.13. Concentrations du fer dans toutes les zones d'études

La figure 7.13 montre que la concentration la plus élevée du fer a été trouvée dans la région de Miarinarivo, la valeur la plus faible se trouve dans la région d'Ambohidratrimo. Dans les autres régions, sa valeur est inférieure à la limite de détection.

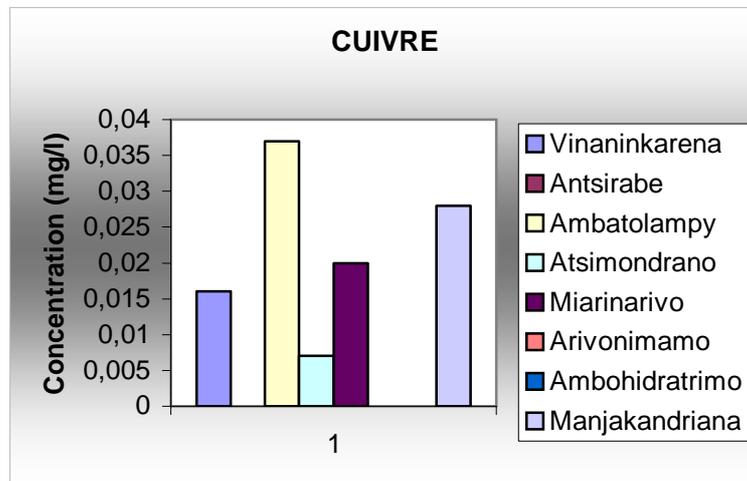


Figure 7.14. Concentrations du cuivre dans toutes les zones d'études

Le cuivre est en forte proportion dans la région d'Ambatolampy et relativement faible dans la région d'Atsimondrano. Les concentrations trouvées dans les régions d'Antsirabe, Arivonimamo, Ambohidratrimo sont inférieures à la limite de détection.

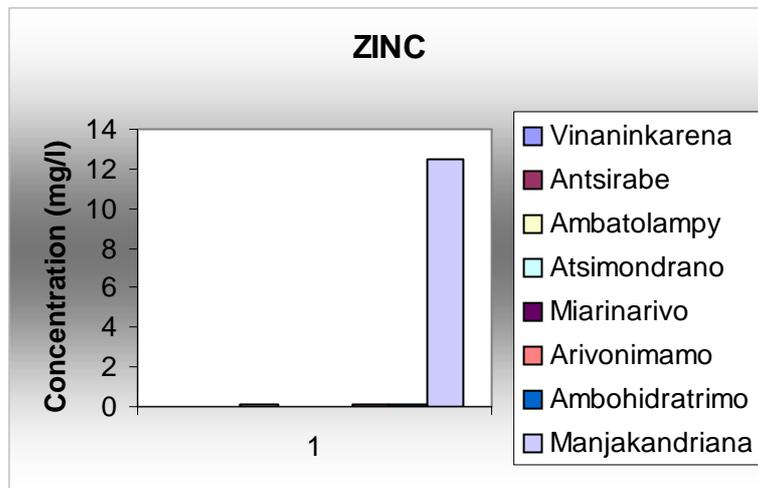


Figure 7.15. Concentrations du zinc dans toutes les zones d'études

La figure 7.7 montre que pour tous les échantillons analysés, la concentration la plus élevée était trouvée dans la région de Manjakandriana. Les concentrations dans les autres régions sont inférieures à la limite de détection.

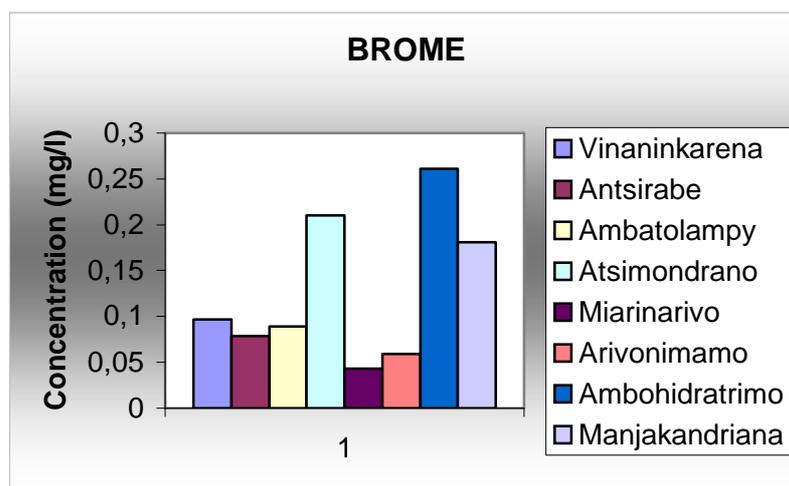


Figure 7.16. Concentrations du brome dans toutes les zones d'études

D'après la figure ci-dessus le brome se retrouve dans toutes les zones d'études. Nous constatons que la concentration la plus abondante est représentée par Ambohidratrimo. Par contre, la plus faible est représentée par Miarinarivo.

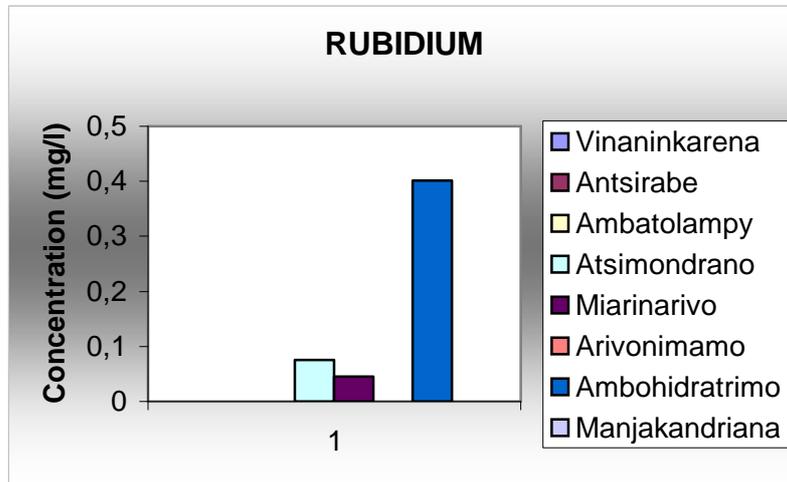


Figure 7.17. Concentrations du rubidium dans toutes les zones d'études

Le rubidium se retrouve en grande quantité dans la région d'Ambohidratrimo. Par contre, la concentration du rubidium à Miarinarivo est très faible. Les autres zones ne présentent aucune valeur puisque inférieure à la limite de détection.

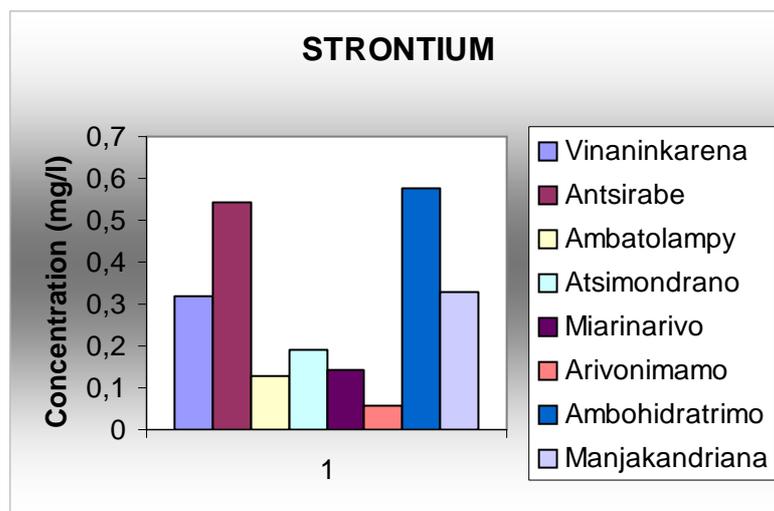


Figure 7.18. Concentrations du strontium dans toutes les zones d'études

La figure 7.18 montre que le strontium est présent dans toutes les zones d'études. Sa concentration est très élevée à Ambohidratrimo, tandis qu'à Arivonimamo elle est très faible

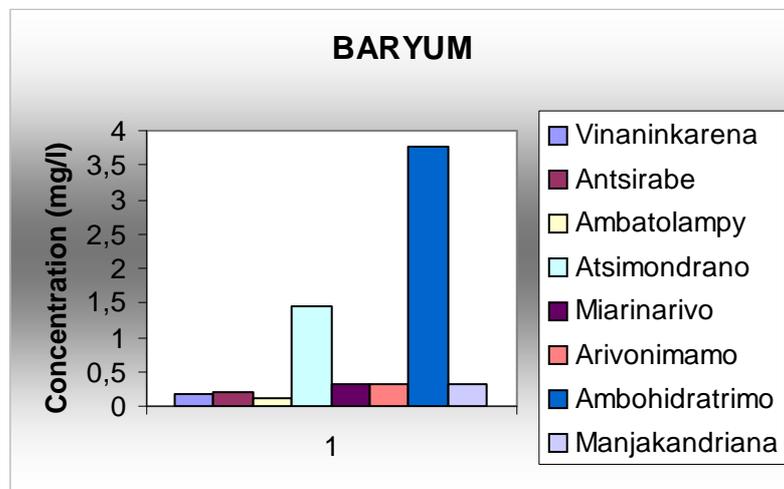


Figure 7.19. Concentrations du baryum dans toutes les zones d'études

D'après la figure 7.19, le baryum est en forte concentration dans la région d'Ambohidratrimo. Par contre, sa concentration est très faible à Ambatolampy.

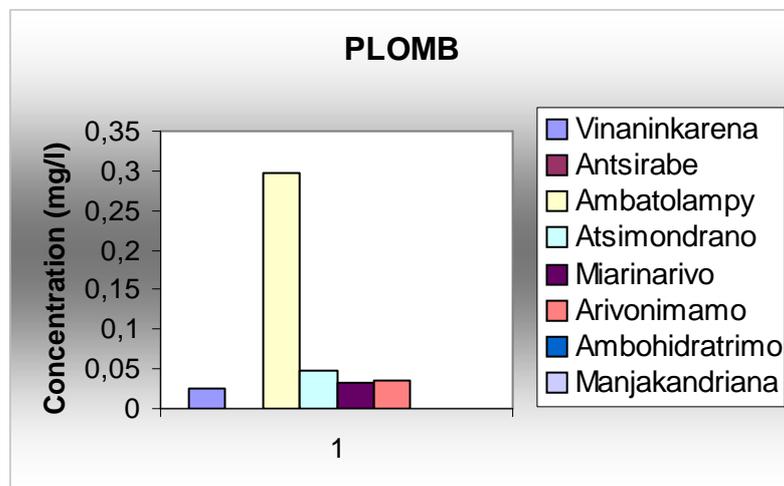


Figure 7.20. Concentrations du plomb dans toutes les zones d'études

Nous observons d'après la figure ci-dessus que la concentration du plomb est très élevée dans la zone d'Ambatolampy. La concentration la plus faible se retrouve dans la région de Vinaninkarena. La teneur en plomb dans les autres régions telles que Antsirabe, Manjakandriana, et Ambohidratrimo est inférieure à la limite de détection.

## CONCLUSION

L'analyse par fluorescence X est une des applications pacifiques du nucléaire. Ce travail est le fruit de la méthode d'analyse par fluorescence X à réflexion totale. C'est grâce à cette technique que nous avons pu mesurer avec précision la qualité élémentaire de l'eau.

Quant aux résultats des analyses effectuées dans ces zones d'études, malgré que l'eau puisse quelquefois avoir une apparence claire et limpide et n'avoir aucune odeur ou saveur particulière, elle peut contenir des substances pouvant avoir des effets nocifs à la santé humaine tels que les métaux lourds, les substances chimiques. Plusieurs échantillons ont été jugés non conformes, dépassant la valeur maximale admissible recommandée par les normes de potabilité de l'eau.

Dans toutes les zones d'études les concentrations des éléments présents dans les échantillons analysés varient en fonction des lieux de prélèvements. En particulier, nous observons la présence des métaux lourds tels que le Cr et le Pb dans quelques régions. La concentration la plus élevée en chrome ( $435\mu\text{g/l}$ ) se trouve dans la région d' Ambohidratrimo., et celle du Pb ( $577\mu\text{g/L}$ ) à Ambatolampy .

Dans la nature, trouver une eau potable est rare, la quantité des éléments présents dans l'eau de consommation est tolérée quand elle est inférieure au seuil défini par les normes internationales.

Pour améliorer la qualité des eaux de consommation nous proposons les points suivants :

Les eaux souterraines et superficielles captées pour l'alimentation doivent être protégées par des périmètres de protection définis réglementairement autour des points de prélèvement. Ces périmètres de protection sont définis sur proposition d'hydrogéologues agréés en matière d'hygiène publique.

L'eau souterraine, qui est généralement de meilleure qualité que l'eau de surface (lac, rivière, ruisseau) grâce à la capacité filtrante du sol, peut être vulnérable à la contamination et des précautions doivent être prises pour assurer en tout temps un approvisionnement en eau de bonne qualité.

Il est important d'identifier la source de la contamination et d'apporter les correctifs appropriés

Ainsi, le Ministère de l'Environnement recommande l'analyse de l'eau au moins deux fois par année, soit en hiver et à l'été. Il est pertinent de faire cette analyse après une pluie abondante et lorsque des changements surviennent en ce qui concerne les paramètres de l'eau, le puits ou le sol environnant. L'analyse de l'eau ne suffit pas à garantir la qualité de l'eau de consommation. En effet, outre les analyses annuelles de l'eau, il faut vérifier l'état de l'ouvrage de captage et de l'installation septique, examiner les sources possibles de contamination dans l'environnement du puits et apporter les correctifs appropriés. L'analyse régulière de l'eau de puits fait donc partie de l'ensemble des actions que devrait entreprendre le propriétaire.

Enfin, cette étude n'est que le commencement des travaux à faire. Notre échantillonnage n'a été fait que dans quelques régions seulement et pour une seule saison. Ainsi, on se propose dans la suite d'élargir l'étude dans l'espace et dans le temps et de déterminer les anions et les cations qui sont effectivement présents dans l'eau à l'aide de l'appareil de chromatographie ionique pour compléter et améliorer les résultats des analyses. Cet appareil est actuellement présent au sein du département de l'analyse par Fluorescence X à Madagascar-INSTN.

## ANNEXE

Lieu d'échantillonnage	Type de puits	Date du prélèvement	Heure du prélèvement	Position géographique	Altitude (m)	Pression (mmHg)
Mangamasoandro	Source	25/08/02		047 03 48		
Mangamasoandro	Source	26/08/02	11:20	19 58 11 S	E	1270 / 867
Mangamasoandro	Source	26/08/02	12:15	19 57 51 S	E	1300 / 864
Mangamasoandro	Source	26/08/02	12:35	19 57 52 S	E	1280 / 868
Mangamasoandro	Source	26/08/02	12:45	19 57 52 S	E	1280 / 868
Andohomandry	Source	26/08/02	13:00	19 57 53 S	E	1280 / 866
Miramamasoandro 1/Vatofotsy	Publique	27/08/02	08:45	19 59 13 S	E	1370 / 853
Miramamasoandro 2	Puits	23/08/02	17:20	19 57 18 S	E	1280 / 868
Avarabohitra / Ecole Orchidé	Puits	27/08/02	09:00	19 50 15 S	E	1360 / 857
Miramamasoandro 3	Puits	23/08/02	17:30	19 57 17 S	E	1280 / 868
Miramamasoandro 3	Puits	27/08/02	09:31	19 50 08 S	E	1375 / 856
Miramamasoandro 4	Puits	23/08/02	17:40	19 57 14 S	E	1466 / 868
Miramamasoandro 4	Puits	27/08/02	09:50	19 50 09 S	E	1360 / 857
Miramamasoandro 5	Source	23/08/02	19:05	19 59 13 S	E	1370 / 856
Miramamasoandro 6	Source	23/08/02	19:08	19 59 17 S	E	1370 / 866
Avara-bohitra 1	Puits	24/08/02	09:48	19 57 17 S	E	1280 / 866
Avara-bohitra 2	Puits	24/08/02	10:03	19 57 17 S	E	1300 / 864
Soamanandrariny	Source	24/08/02	10:24	19 57 10 S	E	1300 / 860
Ambohimanatrika	Puits	24/08/02	10:35	19 57 23 S	E	1300 / 864
Anjanamanjaka	Source	24/08/02	12:35	19 57 07 S	E	
Ambany/Villa. Jeunesse	Source	24/08/02	13:05	20 00 06 S	46 59 45 S	
Ampilomandroso	Rivière	25/08/02		20 00 06 S	E	
Vill. Jeunesse	Pompe	25/08/02		19 57 24 S	E	
Vatovory 1	Source	25/08/02	12:05	19 57 47 S	E	1260 / 869
Vatovory 2	Source	25/08/02	12:30	19 57 44 S	E	1280 / 866
Avara-bohitra 3	Puits	25/08/02	13:06	19 57 35 S	E	1310 / 862
Ambohitraivo /Kalazanany	Source	25/08/02	13:23	19 57 28 S	E	1300 / 864
Andoharano 1	Source	25/08/02	13:32	19 57 38 S	E	1300 / 864
Andoharano 2	Source	25/08/02	13:30	19 57 38 S	E	1300 / 864

DESCRIPTION DU SITE D'ECHANTILLONAGE

**Vinaninkarena**

**Antsirabe**

Lieu	Type	Date	Heure	Latitude	Longitude	Elévation/Pression (mmHg)
Vatofotsy	Puits	27/08/02	11:00	19 50 03 S	047 02 26 E	1380 / 866
Vatofotsy/ Jamba	Source	27/08/02	11:00	19 50 03 S	047 02 26 E	1380 / 855
Masoandro 1	Source	27/08/02	11:30	19 50 34 S	047 01 57 E	1360 / 856
Masoandro 2	Puits	27/08/02	11:45	19 50 33 S	047 02 03 E	1370 / 861
Mahafaly Piste 1	Puits	27/08/02		19 50 35 S	047 02 24 E	
Mahafaly Piste 2	Puits	27/08/02	12:05	19 50 38 S	047 02 28 E	1380 / 855
Piste Cité	Puits	27/08/02	12:00	19 50 32 S	047 02 13 E	
Verezambola	Puits	28/08/02	09:10	19 54 25 S	047 02 36 E	1300 / 863
Mandaniresaka	Puits	28/08/02	09:30	19 54 24 S	047 02 41 E	1310 / 863
Ankerana	Source	28/08/02	10:00	19 54 27 S	047 02 56 E	1300 / 864
Bemasoandro	Puits	28/08/02	10:30	19 54 14 S	047 02 27 E	1320 / 862
Beapombo 1	Puits	28/08/02	10:45	19 54 02 S	047 02 43 E	1330 / 860
Beapombo 2	Puits	28/08/02	10:55	19 53 49 S	047 02 19 E	1330 / 860
Ambohimena Est	Puits	28/08/02	11:10	19 53 24 S	047 02 38 E	1330 / 860
Ambohimena	Puits	28/08/02	11:35	19 53 17 S	047 02 23 E	1330 / 860
Ambohitrinibe	Source	29/08/02	09:50	19 51 41 S	047 00 07 E	1320 / 861
Ambalavato 1	Source	29/08/02	10:05	19 51 35 S	047 00 16 E	1320 / 862
Ambalavato 2	Source (Visy)	29/08/02	10:13	19 51 43 S	047 00 24 E	1330 / 861
Tsivatrnikamo 1	Puits	29/08/02	10:45	19 52 03 S	047 00 35 E	1345 / 859
Tsivatrnikamo 2	Puits	29/08/02	11:00	19 51 55 S	047 00 39 E	
Andoharano	Source	29/08/02	11:30	19 51 39 S	047 00 44 E	1350 / 859
Andafy Atsimo Star	Source	29/08/02	11:50	19 51 37 S	047 01 15 E	1340 / 858
Ambalakisoa						
Atsimo Star	Source	29/08/02	11:55	19 51 43 S	047 01 15 E	1350 / 859
Tsarazaza 1/ Androvakely	Source Pompe Publique N°4	30/08/02	09:45	19 53 20 S	047 03 33 E	1320 / 860
Tsarazaza 2	Source	30/08/02	10:02	19 53 16 S	047 03 30 E	1320 / 865
Fiherenana	Puits	30/08/02	10:25	19 53 17 S	047 03 10 E	1330 / 860
Soarahavita	Source	30/08/02	10:40	19 53 19 S	047 03 07 E	1310 / 864
Carrière Sahatsiho	Source	30/08/02	10:50	19 52 10 S	047 03 09 E	1320 / 862
Andoharano / Tanambao Sud	Source	31/08/02	09:50	19 52 35 S	047 00 59 E	1350 / 860
Ampatana	Source (Visy)	31/08/02	10:25	19 52 35 S	047 01 57 E	1380 / 860
Andranovisy	Source	31/08/02	11:15	19 52 09 S	047 01 57 E	1330 / 860

		(Visy Mafana)				
Ampatana Est 1	Source	09/03/200	2	11:15	19 52 30 S	047 02 01 E
Ampatana Est 2	Source	09/03/200	2	11:20	19 52 30 S	047 02 01 E
Andraikiba	Lac	09/03/200	2	11:40	19 52 12 S	46 58 32 E
Cercle Messe		09/03/200				
Andranomadio	Pompe		2	14:10		

### Ambatolampy

Lieu	Type	Date	Heure	Latitude	Longitude	Elévation
Malamamaina	Source	19/12/02	11:50	19 24 12 S	047 25 17 E	1580
Tsarazaza Avaratra	Puits	19/12/02	12:30	19 23 08 S	047 26 45 E	1582
Cité Gare	Pompe privée	19/12/02	12:45	19 22 59 S	047 26 34 E	1593
Andafy Atsinanana	Pompe JIRAMA	19/12/02	13:00	19 22 45 S	047 26 30 E	1593
Talakimaso Ambany	Source	19/12/02	13:10	19 21 11 S	047 27 30 E	1506
Amboniarina 1	Source	19/12/02	13:30	19 19 42 S	047 28 00 E	1507
Amboniriana 2	Puits	19/12/02	13:45	19 19 45 S	047 28 10 E	1478
Antsahafiraisana	Source	19/12/02	14:00	19 19 02 S	047 28 22 E	1457
Ankadilalana				19 17 45		
Andriambilany 1	Puits	19/12/02	14:15	S	047 28 07 E	1457
Ankadilalana				19 15 32		
Andriambilany 2	Puits	19/12/02	14:25	S	047 28 46 E	1442
Ambalavao Kianja				19 14 50		
Avaratra	Puits	19/12/02	14:35	S	047 28 42 E	1430
Antsarafara 1	Puits	19/12/02	14:45	19 12 57 S	047 28 59 E	1414
Antsarafara 2	Puits	19/12/02	15:00	19 12 57 S	047 28 58 E	1407
Behenjy	Pompe Publique	19/12/02	11:55	19 12 37 S	047 29 13 E	1404
Ambohidrano 1	Puits	20/12/02	10:00	19 12 12 S	047 29 13 E	1400
Ambohidrano 2	Puits	20/12/02	10:10	19 12 05	047 29 14 E	1400

					S		
					19 11 28		
Ambohimiadana Behenjy	Puits	20/12/02			S	047 29 27 E	1400
					19 11 00		
Ambohikambana	Source	20/12/02	10:45		S	047 29 30 E	1395
Ambohikambana					19 10 47		
Avaratra	Puits	20/12/02	11:05		S	047 29 40 E	1399
					19 10 26		
Morarano 1	Puits	20/12/02	11:20		S	047 30 60 E	1420
					19 10 09		
Morarano 2	Source	20/12/02	11:35		S	047 30 24 E	1410

### Atsimondrano

Lieu	Type	Date	Heure	Latitude	Longitude	Elévation
					047 30 20	
Ankadivorisarotra	Source	20/12/02	11:45	19 09 50 S	E	1430
					047 30 47	
Tsinjony	Puits	20/12/02	12:20	19 08 05 S	E	1360
					047 30 50	
Ampangabe 1	Puits	20/12/02	12:45	19 07 22 S	E	1360
					047 30 49	
Ampangabe 2	Puits	20/12/02	13:00	19 07 24 S	E	1345
					047 30 49	
Antsarafaritra	Source	20/12/02	13:10	19 07 24 S	E	1340
Fkt Ampangabe	Puits	20/12/02	13:20	19 07 13 S	47 30 54 E	1335
Atsimondrano					047 31 37	
Ambalavao 1	Source	20/12/02	13:32	19 05 43 S	E	1335
Atsimondrano					047 31 45	
Ambalavao 2	Puits	20/12/02	13:50	19 05 42 S	E	1335
					047 33 01	
Ambatofotsy 1	Source	20/12/02	15:30	19 03 56 S	E	1335
					047 33 08	
Ambatofotsy 2	Puits	20/12/02	15:36	19 03 57 S	E	1335
					047 33 08	
Ambatofotsy 3	Puits	20/12/02	15:50	19 03 59 S	E	1280
					047 33 07	
Ambatofotsy 4	Puits	20/12/02	16:05	19 03 58 S	E	1295
					047 32 45	
Andranonanahary	Puits	20/12/02	16:20	19 02 49 S	E	1295
Andranonanahary					047 32 45	
2	Puits	20/12/02	16:35	19 02 48 S	E	1295

## Miarinarivo

Lieu	Type	Date	Heure	Latitude	Longitude	Elévation
Miarinarivo						
Andrefan'ny						
Hopital	PompeJIRAMA	21/01/03	11:30	18 57 20 S	046 54 24 E	1410
Andohavary 1	Puits	21/01/03	11:50	18 56 53 S	046 54 06 E	1310
Andohavary 2	Puits	21/01/03	12:00	18 56 55 S	046 54 02 E	1310
Andohavary 3	Puits	21/01/03	12:10	18 56 54 S	046 54 03 E	1285
Ambohimitarona	Source	21/01/03	13:15	18 57 11 S	046 55 44 E	1320
Ambodiamontana	Pompe Caritas	21/01/03	13:45	18 59 06 S	046 56 07 E	1321
Antsahalava	Puits	21/01/03	14:20	19 00 17 S	046 58 17 E	1320
Carrière	Source	21/01/03	14:40	19 00 14 S	046 59 09 E	1500
Soamahamanina	Puits	21/01/03	15:05	18 59 29 S	047 00 47 E	1390
Soamanandrany	Source	21/01/03	15:25	18 59 35 S	047 02 11 E	1389
Ambolomanjakarivo						
1	Puits	21/01/03	15:40	18 59 42 S	047 02 19 E	1440
Ambolomanjakarivo						
2						
(Ambany Est)	Source	21/01/03	16:20	18 59 45 S	047 02 26 E	1410
Ambatomainty 1	Puits	21/01/03	16:50	18 59 38 S	047 03 05 E	1410
Ambatomainty 2	Puits	21/01/03	17:00	18 59 37 S	047 03 03 E	1410

## Arivonimamo

Lieu	Type	Date	Heure	Latitude	Longitude	Elévation
					047 04 01	
Tranovy	Puits	22/01/03	10:45	18 59 39 S	E	1410
					047 06 58	
Ankalalahana	Source	22/01/03	11:10	19 00 05 S	E	1390
					047 07 41	
Antanetikely 1	Puits	22/01/03	11:30	19 00 26 S	E	1360
					047 07 42	
Antanetikely 2	Puits	22/01/03	11:50	19 00 28 S	E	1360
					047 07 30	
Antanetikely 3	Source	22/01/03	12:00	19 00 28 S	E	1360
					047 07 35	
Anonibe	Puits	22/01/03	12:15	19 00 06 S	E	1328
					047 08 59	
Andrangaranga	Puits	22/01/03	12:35	19 00 31 S	E	1400
					047 09 44	
Ambohipeno 1	Puits	22/01/03	12:50	19 00 38 S	E	1420
					047 09 46	
Ambohipeno 2	Puits	22/01/03	13:00	19 00 38 S	E	1430

						047 10 29	
Morarano	Puits	22/01/03	13:20	19 00 10 S	E		1430
	Pompe					047 10 52	
Arivonimamo 1	Publique	22/01/03	13:40	19 00 13 S	E		1390
	Pompe					047 10 51	
Arivonimamo 2	Publique	22/01/03	14:45	19 00 57 S	E		1440
						047 11 47	
Maharefo	Source	22/01/03	15:05	19 01 07 S	E		1400
						047 12 45	
Mangatany	Puits	22/01/03	15:20	19 01 47 S	E		1395
						047 15 14	
Imerimandroso	Source	22/01/03	15:50	19 00 48 S	E		1380
						047 16 33	
Ambatomanga	Puits	22/01/03	16:10	19 00 04 S	E		1375
						047 17 36	
Fonenana	Puits	22/01/03	16:30	18 59 40 S	E		1350
						047 17 45	
Tsiandaingana	Puits	22/01/03	16:35	18 59 31 S	E		1360
						047 08 23	
Antsorokahitra	Puits	22/01/03	16:55	18 59 04 S	E		1360
						047 19 20	
Labrousse	Puits	22/01/03	17:10	18 58 52 S	E		1360
						047 19 23	
Tsenakely	Puits	22/01/03	17:30	18 58 43 S	E		1360
						047 19 24	
Faritra faha V	Puits	22/01/03	17:50	18 58 43 S	E		1360
						047 19 24	
Miakadaza	Puits	22/01/03	18:00	18 58 40 S	E		1360
						047 20 48	
Beronono	Puits	22/01/03	18:25	18 57 32 S	E		1270

### Manjakandriana

Lieu	Type	Date	Heure	Latitude	Longitude	Élévation
Manjakandriana 1	Source	23/01/03	10:10	18 55 20 S	047 48 40 E	1360
Manjakandriana 2	Source	23/01/03	10:30	18 55 27 S	047 48 43 E	1380
	Pompe					
Manjakandriana 3	Publique	23/01/03	10:50	18 55 10 S	047 48 40 E	1400
Volavy	Source	23/01/03	11:05	18 55 31 S	047 48 51 E	1400
Mantasoa 1	Source	23/01/03	12:40	19 00 26 S	047 50 15 E	1430
Mantasoa 2 / Tsena	Source	23/01/03	12:50	19 00 27 S	047 50 16 E	1390
Ampiasanomby 1	Source	23/01/03	13:00	19 00 35 S	047 50 36 E	1390
Ampasianomby 2	Rivière	23/01/03	13:10	19 00 31 S	047 50 36 E	1390
Ampasianomby 3	Puits	23/01/03	13:20	19 00 35 S	047 50 38 E	1410
Ampasianomby 4	Puits	23/01/03	13:40	19 00 30 S	047 50 52 E	1410
Ambihidrahazo 1	Puits	23/01/03	14:00	19 00 28 S	047 51 13 E	1400
Ambohidrahazo 2	Puits	23/01/03	14:10	19 00 19 S	047 51 22 E	1385
Mpanazava	Puits	23/01/03	14:20	18 59 57 S	047 51 12 E	1400

Barazy	Lac	23/01/03	14:30	18 59 55 S	047 51 18 E	1400
Ambatolaona	Rivière	23/01/03	16:00	18 55 44 S	047 52 59 E	1380
Ambatolaona Gara	Pompe Publique	23/01/03	16:10	18 55 35 S	047 53 00 E	1395
Ambatolaona Andrefana	Ruisseau	23/01/03	16:20	18 55 37 S	047 52 46 E	1400
Ambatomivaha	Source	23/01/03	16:40	18 55 26 S	047 50 45 E	1395
Ambohimanjaka 1	Source	24/01/03	09:30	18 55 34 S	047 49 51 E	1400
Ambohimanjaka 2	Puits	24/01/03	09:40	18 55 30 S	047 49 55 E	1400
Volavy Avaratra	Puits	24/01/03	10:00	18 55 22 S	047 48 55 E	1400
Ampiadianombalaha	Source	24/01/03	10:30	18 55 03 S	047 48 28 E	1385
Ampiadanana	Puits	24/01/03	11:00	18 54 53 S	047 48 38 E	1395
Amboarakely	Source	24/01/03	11:15	18 54 40 S	047 48 43 E	1390
Antsakambahiny	Puits	24/01/03	11:35	18 54 06 S	047 48 16 E	1390
Ambohimahandry	Source	24/01/03	12:00	18 53 44 S	047 48 06 E	1385
Sambaina 1	Pompe Publique	24/01/03	12:50	18 53 26 S	047 46 59 E	1445
Sambaina 2	Puits	24/01/03	13:10	18 53 27 S	047 47 00 E	1450
Manganehana	Pompe Publique	24/01/03	13:15	18 53 27 S	047 47 41 E	1460
Sambaina	Pompe Publique	24/01/03	13:30	18 53 26 S	047 46 54 E	1450
Ambihimanjaka	Pompe Publique	24/01/03	13:50	18 53 43 S	047 46 36 E	1410
Ambohitsivalana	Source	24/01/03	14:05	18 53 57 S	047 46 13 E	1410
Atetokely	Source	24/01/03	14:20	18 54 02 S	047 45 49 E	1425
Maharidaza	Source	24/01/03	15:05	18 53 29 S	047 43 02 E	1420
Carion 1	Pompe Publique	24/01/03	15:15	18 54 16 S	047 42 27 E	1450
Carion 2	Puits	24/01/03	15:30	18 54 13 S	047 42 28 E	11450
Carion 3 /						
Ikelimalaza	Source	24/01/03	15:55	18 54 23 S	047 42 15 E	1450
Nandihizanakely 1	Source	24/01/03	16:20	18 54 10 S	047 41 32 E	1450
Nandihizanakely	Puits	24/01/03	16:35	18 54 03 S	047 41 28 E	1345
Ambanitsena	Pompe Publique	24/01/03	16:45	18 52 31 S	047 41 09 E	1345

## Ambohidratrimo

Lieu	Type	Date	Heure	Latitude	Longitude	Elévation
Ambohidray /Fkt Antandrokomby	Source	02/06/2003	10:35	18 43 13 S	047 20 38 E	1275
Fidasiana	Puits	02/06/2003	10:55	18 43 17 S	047 20 35 E	1275
Tandrokomby	Puits	02/06/2003	11:00	18 43 26 S	047 20 33 E	1270
Antanetibe Mananjara	Pompe Publique	02/06/2003	12:00	18 44 49 S	047 19 32 E	1280
Antanivao 1	Puits	02/06/2003	12:30	18 44 04 S	047 20 50 E	1270
Antanivao 2	Puits	02/06/2003	12:45	18 44 03 S	047 20 48 E	1280
Miadamponina	Source	02/06/2003	12:50	18 44 02 S	047 20 53 E	1280
Ambohijatovo	Puits	02/06/2003	13:05	18 43 54 S	047 21 02 E	1270
Antoboka	Source	02/06/2003	13:35	18 44 19 S	047 21 13 E	1290
Tsarahonenana	Puits	02/06/2003	14:05	18 44 10 S	047 20 38 E	1270
Ambohimahavelona 1	Puits	02/06/2003	15:10	18 46 32 S	047 19 45 E	1270
Ambohimahavelona 2	Puits	02/06/2003	15:15	18 46 31 S	047 19 45 E	1270
Fiadanankely 1	Puits	02/06/2003	15:30	18 45 30 S	047 20 00 E	1270
Fiadanankely 2	Puits	02/06/2003	15:40	18 45 30 S	047 20 00 E	1265
Mangarivotra 1	Source	02/06/2003	16:10	18 44 52 S	047 20 58 E	1270
Mangarivotra 2	Puits	02/06/2003	16:25	18 44 54 S	047 20 52 E	1270
Mangarivotra 3	Puits	02/06/2003	16:40	18 44 50 S	047 20 50 E	1270
Antongombato	Puits	02/06/2003	17:55	18 45 15 S	047 21 13 E	1255
Tsaramandroso 1	Puits	02/06/2003	17:15	18 44 38 S	047 20 42 E	1270
Tsaramasoandro 2	Puits	02/06/2003	17:30	18 44 38 S	047 20 40 E	1255
Ampovoatanana	Puits	02/06/2003	17:35	18 44 38 S	047 20 38 E	1255
Manakambahiny	Puits	02/06/2003	18:10	18 46 08 S	047 22 41	1310

---

						E	
						047 30 28	
Merimandroso 1	Source	02/07/2003	10:20	18 45 16 S		E	1275
Anjaridaina /						047 23 47	
Andakana	Puits	02/06/2003	18:30	18 47 16 S		E	1310
						047 30 32	
Merimandroso 2	Puits	02/07/2003	10:35	18 45 11 S		E	1275
						047 30 34	
Ambolotarakely	Source	02/07/2003	10:55	18 44 49 S		E	1290
						047 30 36	
Ankaditapaka	Puits	02/07/2003	11:05	18 44 58 S		E	1290
AlatsinainyMerimandr						047 30 04	
oso 1	Puits	02/07/2003	11:30	18 44 28 S		E	1290
Alatsinainy						047 30 07	
Merimandroso2	Puits	02/07/2003	11:40	18 44 28 S		E	1290
Alatsinainy						047 30 05	
Merimandroso3	Puits	02/07/2003	12:00	18 44 22 S		E	1290
Alatsinainy						047 30 01	
Merimandroso4	Source	02/07/2003	12:20	18 44 18 S		E	1280
						047 29 34	
Belanitra 1	Puits	02/07/2003	12:50	18 45 00 S		E	1295
						047 29 34	
Belanitra 2	Puits	02/07/2003	13:00	18 45 00 S		E	1295
						047 29 36	
Belanitra 3	Puits	02/07/2003	13:05	18 45 00 S		E	1295
						047 29 04	
Aambohinome 1	Puits	02/07/2003	13:30	18 46 24 S		E	1295
						047 29 06	
Aambohinome 2	Puits	02/07/2003	13:45	18 46 24 S		E	1295
	Pompe					047 26 09	
Aambohidratrimo	Publiqu					E	1280
	e	02/07/2003	15:10	18 48 56 S		047 26 08	
Aambovo 1	Source	02/07/2003	15:30	18 49 59 S		E	1280
						047 26 03	
Aambovo 2	Source	02/07/2003	15:45	18 49 59 S		E	1265
						047 26 03	
Aambovo 3	Puits	02/07/2003	15:50	18 50 00 S		E	1265
						047 26 06	
Aambovo 4	Puits	02/07/2003	16:05	18 50 00 S		E	1270
						047 26 06	
Aambovo 5	Puits	02/07/2003	16:15	18 50 05 S		E	1275
						047 26 04	
Aambovo 6	Puits	02/07/2003	16:20	18 50 04 S		E	1265
						047 25 54	
Aambohitraivo	Source	02/07/2003	16:45	18 49 40 S		E	1270

---

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

**C.V** : Coefficient de Variation

**INSTN** : Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires

**LD** : Limite de détection

**MCA** : **Analyseur Multi Canal**

**OMS** : Organisation Mondiale de la Santé

**TXRF** : Fluorescence X à Réflexion Totale

## REFERENCES

- [1]: Cycle de l'eau.  
<http://www.cieau.com>
- [2]: Définition et origine des polluants de l'eau  
<http://www.Emse.fr/brodhag/profelev/php.htm>
- [3]: RAJAONA TSIRINJARA A. S. , Thèse de Doctorat de Troisième Cycle, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, 2003.
- [4]: Le plomb et la santé  
<http://www.water.nunc.com>
- [5]: MAHARAVO J. P. , Mémoire de D.E.A , Faculté des Sciences Université d'Antananarivo Madagascar 2001.
- [6]: La fluorescence X.  
<http://www.chez.com/deuns/sciences/>
- [7]: RAMANDIMBIMANANA J. E. , Mémoire de D.E.A , Faculté des Sciences Université d'Antananarivo Madagascar, 1998.
- [8] : RANDRIAMANIVO RAKOTOZAFY L. , Thèse de Doctorat de Troisième Cycle, Faculté des Sciences- Université d'Antananarivo, Madagascar 1996.
- [9] : RANDRIANARIVONY E. , Thèse de Doctorat Troisième Cycle, Université d'Antananarivo Madagascar 1985.
- [10] : RAOELINA ANDRIAMBOLOLONA, Mécanique Quantique cours A.E.A 2000-2001
- [11]: MANOELA F. P. , Mémoire de D.E.A, Faculté des Sciences - Université d'Antananarivo Madagascar 2000.
- [12]: RASOAZANANY E. O. , Mémoire de D.E.A, Faculté des Sciences - Université d'Antananarivo Madagascar 1996.
- [13]: QXSA (Quantitative X-Ray Analysis System) AIEA, Draft. Documentation 1.2 (1995-1996)
- [14]: RASOLOFONIRINA M. , Mémoire de D.E.A, Faculté des Sciences - Université d'Antananarivo Madagascar, 1997.
- [15]: Normes et qualité des eaux  
[http://ecoroute.uqcn.qc.ca/envir/santé/1\\_m3.htm](http://ecoroute.uqcn.qc.ca/envir/santé/1_m3.htm)
- [16 ]: Les normes de l'eau en France  
Source: <http://membres.lycos.fr/Leduc125/defalcalinité.htm>

## RESUME

L'objectif de ce travail est de porter une contribution à l'étude de la qualité des eaux de consommation dans quelques régions de la Province Antananarivo en utilisant la technique d'analyse par Fluorescence X à Réflexion Totale (T.X.R.F).

Les échantillons sont prélevés dans huit régions de la province d'Antananarivo :  
Vinankarena, Antsirabe, Ambatolampy, Atsimondrano, Miarinarivo, Arivonimamo, Manjakandriana, et Ambohidratrimo.

En ce qui concerne les résultats des analyses obtenus dans chacun des échantillons prélevés, plusieurs échantillons sont jugés non conformes aux normes.

La teneur en potassium varie entre 140 mg/L et 0,03 mg/L dans toute la zone d'étude. Plusieurs échantillons dépassent la valeur maximale admissible recommandée par les normes (12 mg/L).

Pour le manganèse, les concentrations maximale et minimale obtenues pour tous les échantillons analysés sont 1906 µg/L et 6µg/L respectivement, alors que la norme recommandée est inférieure à 50µg/L.

Les échantillons d'eau analysés présentent du fer à des concentrations allant du 10µg/L au 3002µg/L. Pourtant, la valeur maximale admissible est de 200µg/L.

Pour le chrome, on constate que la concentration la plus élevée est de 435µg/l tandis que la concentration minimale est inférieure à la limite de détection (5µg/L). La valeur maximale recommandée est de 50µg/L.

Enfin, pour le plomb, les résultats des analyses montrent que ses concentrations varient entre 577µg/L et 15µg/L pour tous les échantillons prélevés. La valeur maximale mesurée est largement supérieure à la valeur maximale admissible (50µg/L).

En bref, la qualité de l'eau des puits et des sources, qui sont les principales sources d'approvisionnement en eau de la population rurale varie surtout selon les régions et les périodes de l'année.

**Mots-clés** : TXRF ; qualité des eaux ; eaux de consommation ; région d'Antananarivo

## **ABSTRACT**

The present work contributes to the study of drinking water quality in some regions of the Province of Antananarivo, by the use of Total X-Ray Fluorescence (TXRF) technique. Water samples are collected from eight selected sites: Vinaninkarena, Antsirabe, Ambatolampy, Atsimondrano, Miarinarivo, Arivonimamo, Manjakandriana, and Ambohidratrimo.

The analytical results showed that the concentration values of several water samples are outside the international regulation.

Potassium concentration in water samples ranges from 140 mg/L and 0.03 mg/L in the whole study area. Several water samples show higher concentrations than the permissible value of 12 mg/L.

For manganese, the highest and lowest concentration values are 1906  $\mu\text{g/L}$  and 6  $\mu\text{g/L}$ , respectively. The corresponding permissible value is 50 $\mu\text{g/L}$ .

Iron is present with concentration ranging from 10 $\mu\text{g/L}$  to 3002  $\mu\text{g/L}$ , while the maximum permissible value is 200 $\mu\text{g/L}$ .

For chromium, the highest concentration value is 435 $\mu\text{g/l}$  whereas the lowest is below the detection limit, which is 5 $\mu\text{g/L}$ . The recommended value is 50 $\mu\text{g/L}$ .

At last, the analytical results showed that lead concentration varies from 577 $\mu\text{g/L}$  to 15 $\mu\text{g/L}$  for all water samples. The highest measured concentration is largely higher than the maximum permissible value of 50 $\mu\text{g/L}$ .

In general, the quality of well and spring waters, which are the main water supplies for rural population, is region and season dependent.

**Key-words:** TXRF; water quality; drinking water, region of Antananarivo

***Encadreur : Madame RAKOTOZAFY RANDRIAMANIVO Lucienne***