

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b> .....	1
 <b>PREMIERE PARTIE : GENERALITES SUR LES METAUX LOURDS ET LES SEDIMENTS MARINS</b>	
<b>1. Généralité sur la pollution</b> .....	2
<b>2. Généralité sur les polluants en mer et dans le sédiment</b> .....	2
<b>3. Les métaux lourds</b> .....	3
3.1. Définition des métaux lourds.....	3
3.2. Etat de connaissance actuel sur les métaux lourds.....	3
3.3. Monographie des métaux.....	3
3.3.1. Cadmium.....	4
3.3.2. Plomb.....	4
3.3.3. Nickel.....	5
3.3.4. Cuivre.....	5
3.3.5. Zinc.....	6
3.3.6. Manganèse.....	6
3.3.7. Chrome.....	6
3.3.8. Fer.....	7
3.4. Sources des métaux lourds.....	7
3.5. Mode de transmission des métaux vers le milieu marin.....	9
3.5.1. Pollution par les cours d'eau et canalisation.....	9
3.5.2. Pollution par l'atmosphère.....	9
3.5.3. Pollution maritime directe.....	9
<b>4. Répartition et itinéraire des métaux lourds dans l'environnement aquatique</b> .....	9
4.1. Processus de distribution et de répartition des métaux lourds.....	10
4.2. L'adsorption des métaux lourds sur les sédiments.....	11
<b>5. Devenir et effets des métaux</b> .....	13
5.1. Conséquences des métaux lourds en mer.....	13
5.2. La bioaccumulation des métaux lourds.....	14
5.2.1. L'assimilation.....	14
5.2.2. La bioaccumulation par l'individu : la bioconcentration.....	14
5.2.3. La bioaccumulation entre individus : la bioamplification.....	15

5.3. Exemple sur la bioaccumulation dans les huîtres.....	15
<b>6. Exposition alimentaire des métaux.....</b>	<b>16</b>
6.1. Toxicité du cadmium.....	18
6.2. Toxicité du plomb.....	19
6.2.1. Voies d'exposition au plomb.....	19
6.2.2. Distribution du plomb dans l'organisme humain.....	19
6.2.3. Principaux effets toxiques du plomb pour l'homme.....	20
6.3. Toxicité du mercure.....	20
6.4. Cas de Madagascar sur les toxicités d'origine alimentaire.....	21
<b>7. Le recyclage des métaux lourds.....</b>	<b>21</b>
7.1. Problématique générale sur le recyclage.....	21
7.2. Recyclage des batteries au plomb.....	22
7.2.1. Eléments sur le recyclage annuel du plomb dans les automobiles.....	22
<b>8. Généralité sur les sédiments marins.....</b>	<b>23</b>
8.1. Difficulté sur l'analyse des sédiments.....	23
8.2. Classification des sédiments.....	24
8.3. Quelques données existantes sur les teneurs en métaux de sédiment en Afrique.....	25
<b>9. Survol des législations existantes en terme de pollution marine.....</b>	<b>26</b>
9.1. Lois et réglementations malagasy.....	26
9.2. Lois et réglementations internationales.....	27
<b>10. Actions déjà entreprises à Madagascar en rapport à la gestion de la pollution marine.....</b>	<b>28</b>

**DEUXIEME PARTIE : LOCALISATION ET DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE**

<b>1. Localisation de Nosy Be.....</b>	<b>29</b>
1.1. Description de la zone d'étude à NOSY BE.....	31
1.1.1. Relief.....	31
1.1.2. Géologie.....	31
1.1.3. Climat.....	31
1.1.4. Hydrographie et hydrogéologie.....	32
1.1.5. Population.....	32
1.1.6. Principales activités économiques de Nosy Be.....	32

1.2. Les principales activités potentiellement polluantes constatés.....	32
1.3. Quelques problèmes environnementaux soulevés dans le PCD de Nosy Be....	33
1.4. Site de prélèvements Nosy-Be.....	34
<b>2. Localisation de la ville de MAHAJANGA.....</b>	<b>36</b>
2.1. Présentation de la ville de Mahajanga.....	38
2.1.1. Population.....	39
2.1.2. Principales activités de la ville .....	39
2.2. Quelques problématiques environnementales de la ville de Mahajanga.....	39
2.3. Site de prélèvements à Mahajanga.....	40
<b>3. Données existantes sur les effluents types de Mahajanga et de Nosy Be.....</b>	<b>42</b>

### TROISIEME PARTIE : METHODES ET RESULTATS D'ANALYSE

<b>1. Techniques et méthodes d'analyses des métaux lourds dans les sédiments.....</b>	<b>43</b>
1.1. Prélèvement des échantillons .....	43
1.2. Stockage des échantillons de sédiments .....	43
1.3. Minéralisation ou digestion.....	44
1.4. Appareils de dosage des métaux.....	44
1.4.1. Spectromètre d'absorption atomique.....	44
1.4.2. Spectrophotométrie UV-VIS.....	46
1.4.3. Méthode voltamétrique.....	47
<b>2. Remarque générale sur les résultats .....</b>	<b>48</b>
<b>3. Distribution des métaux sur les six points de prélèvement de Nosy-Be.....</b>	<b>48</b>
<b>4. Commentaire sur les teneurs en Fe, Cr, Zn, Mn et le Cu des sédiments de Nosy Be.....</b>	<b>51</b>
<b>5. Distribution des métaux sur les six points de prélèvement de Mahajanga.....</b>	<b>51</b>
<b>6. Commentaire sur les teneurs en Fe, Cr, Zn, Mn et le Cu des sédiments de Mahajanga.....</b>	<b>54</b>
<b>7. Etude comparative des teneurs en métaux lourds entre Mahajanga et Nosy-Be.....</b>	<b>54</b>
<b>8. Conclusion partielle sur l'étude comparative entre Nosy Be et Mahajanga.....</b>	<b>55</b>
<b>9. Comparaison des résultats obtenus avec des données existantes ailleurs en Afrique.....</b>	<b>55</b>

<b>10. Résultats liés aux caractéristiques du sédiment de Mahajanga et de Nosy Be.....</b>	<b>56</b>
10.1. Humidité.....	56
10.2. Distribution des métaux dans le système sédiment/eau.....	57
10.2.1. Distribution des métaux dans le système sédiment/eau à Nosy Be.....	58
10.2.2. Distribution des métaux dans le système sédiment/eau à Mahajanga.....	59
10.3. Interprétation de la distribution des métaux dans le système sédiment/eau.....	60
<b>11. Suggestions pour l'amélioration de la situation.....</b>	<b>61</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>62</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>63</b>
<b>ANNEXES</b>	

## LISTE DES TABLEAUX

<u>Tableau N°1</u> : Caractères physico-chimiques des métaux.....	4
<u>Tableau N°2</u> : Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement	8
<u>Tableau N°3</u> : Comparaison des concentrations de métaux dans des poissons provenant d'Afrique et d'autres régions du globe ( $\mu\text{g/g}$ poids frais).....	17
<u>Tableau N°4</u> : Classification des sédiments marins.....	24
<u>Tableau N°5</u> : Concentrations moyennes de métaux dans les sédiments marins ( $\mu\text{g/g}$ poids sec) de quelques zones côtières d'Afrique .....	25
<u>Tableau N°6</u> : Problèmes environnementaux de Nosy Be.....	33
<u>Tableau N°7</u> : Caractéristiques des six points de prélèvement de Nosy Be.....	34
<u>Tableau N°8</u> : Caractéristiques des six points de prélèvement de Mahajanga.....	40
<u>Tableau N°9</u> : Caractéristiques de quelques effluents types de Mahajanga et de Nosy Be...	42
<u>Tableau N°10</u> : Comparaison du pourcentage d'humidité des sédiments de Nosy Be et de Mahajanga.....	57
<u>Tableau N°11</u> : Distribution verticale des métaux dans les sédiments de Nosy Be.....	58
<u>Tableau N°12</u> : Distribution verticale des métaux dans les sédiments de Mahajanga.....	59
<u>Tableau N°13</u> : Pourcentage des métaux diffusés pour les sédiments de Nosy Be et de Mahajanga.....	60

## LISTE DES FIGURES

<u>Figure N°1</u> : Système d'échange eau / sédiment.....	12
<u>Figure N°2</u> : Carte de localisation de la ville de Nosy Be.....	30
<u>Figure N°3</u> : Carte de localisation des six points de prélèvement de Nosy Be.....	35
<u>Figure N°4</u> : Carte de localisation de la ville de Mahajanga.....	37
<u>Figure N°5</u> : Carte de localisation des six points de prélèvement de Mahajanga.....	41
<u>Figure N°6</u> : Principe d'un spectromètre d'absorption atomique à flamme.....	44
<u>Figure N°7</u> : Principe d'une cellule d'absorption d'un SAAF.....	45
<u>Figure N°8</u> : Principe de Spectrophotométrie UV-VIS.....	46
<u>Figure N°9</u> : Principe d'un système voltamétrique.....	47
<u>Figure N°10</u> : Teneur en cuivre des sédiments de Nosy Be.....	48
<u>Figure N°11</u> : Teneur en manganèse des sédiments de Nosy Be.....	48
<u>Figure N°12</u> : Teneur en chrome des sédiments de Nosy Be.....	49
<u>Figure N°13</u> : Teneur en zinc des sédiments de Nosy Be.....	49
<u>Figure N°14</u> : Teneur en fer des sédiments de Nosy Be.....	49
<u>Figure N°15</u> : Teneur en nickel des sédiments de Nosy Be.....	50
<u>Figure N°16</u> : Teneur en plomb des sédiments de Nosy Be.....	50
<u>Figure N°17</u> : Teneur en cadmium des sédiments de Nosy Be.....	50
<u>Figure N°18</u> : Teneur en manganèse des sédiments de Mahajanga.....	51
<u>Figure N°19</u> : Teneur en zinc des sédiments de Mahajanga.....	51
<u>Figure N°20</u> : Teneur en chrome des sédiments de Mahajanga.....	52
<u>Figure N°21</u> : Teneur en cuivre des sédiments de Mahajanga.....	52
<u>Figure N°22</u> : Teneur en fer des sédiments de Mahajanga.....	52
<u>Figure N°23</u> : Teneur en nickel des sédiments de Mahajanga.....	53
<u>Figure N°24</u> : Teneur en cadmium des sédiments de Mahajanga.....	53
<u>Figure N°25</u> : Teneur en plomb des sédiments de Mahajanga.....	53
<u>Figure N°26</u> : Diagramme comparative de la teneur des métaux.....	54

## LISTE DES PHOTOGRAPHIES

<u>Photo N°1</u> : Préleveur de sédiment type Van Veen grab (CNRE).....	43
<u>Photo N°2</u> : Conservation des échantillons de sédiments.....	43
<u>Photo N°3</u> : Spectrophotomètre absorption atomique flamme SOLAR (CNRE).....	45
<u>Photo N°4</u> : Photomètre spectroquant NOVA 60 (CNRE).....	46
<u>Photo N°5</u> : « trace element analyser » pour l'analyse de métaux lourds (CNRE).....	47

Rapport-Gratuit.com

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

**AIEA** : Agence Internationale de l'Energie Atomique

**BFC** : Facteur de Bioconcentration

**CNRE** : Centre National de Recherche sur l'Environnement

**CNRO** : Centre National de Recherche Océanographique

**CRM** : Certified Reference Material

**CLB**: Communauté Locale de Base

**CLS**: Comité Locale de Sécurité

**FAO**: Food and Agriculture Organization

**GESAMP**: Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine environmental Protection

**MECIE**: Mise En Compatibilité de l'Investissement à l'Environnement

**PCD**: Plan Communal de Développement

**PNUE** : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

**UV** : Ultra Violet

**UV-VIS** : Ultra Violet-Visible

**WIO-LAB**: West Indian Ocean Land Activities Based



## INTRODUCTION

Les différentes études menées dans plusieurs régions du globe terrestre ont montré que c'est à partir de sources basées à terre que la plus grande partie de la pollution atteint la mer, et notamment du fait de l'évacuation des eaux usées provenant des villes, des effluents industriels et de l'écoulement des résidus de pesticides et d'herbicides agricoles (selon l'Organisation Maritime Internationale) [2]. La préoccupation sur l'état de l'environnement côtier et marin est un souci international. Ainsi, à travers le projet West Indian Océan –Land Activities Based (WIO-LAB) en partenariat avec le Programme des Nations Unies pour l'Environnement dans lequel le CNRE est l'institution leader, Madagascar se lance dans l'étude de la pollution de plusieurs villes côtières.

Certes, des travaux ont été réalisés sur différentes régions côtières de Madagascar. Et ces études ont montré l'ampleur qualitative du dégât avec des plans d'action qui s'en suivent. Aucune mesure scientifique quantitative n'est encore entreprise à part des valeurs estimatives. Notre travail se veut donc, être une suite logique des études déjà entreprises et un outil de départ pour le suivi de la pollution marine et côtière.

Ainsi, la ville de Nosy-Be et la ville de Mahajanga ont été choisies pour être les lieux d'étude. Et pour mieux cerner notre étude, nous nous limitons dans l'étude de sédiment qui constitue en quelque sorte la boîte noire du milieu. Et seuls les métaux lourds sont considérés pour ne pas encombrer l'étude. D'ailleurs, d'autre ouvrage traitera l'eau et les autres paramètres.

Pour gérer rationnellement et maîtriser la pollution des milieux, il faut arriver à étudier tout ce qui concerne les apports (charges), la distribution et le sort des contaminants, y compris les métaux lourds d'origine terrestre qui se déversent dans les écosystèmes aquatiques. Il faut en particulier en étudier les quantités et les caractéristiques qualitatives, ainsi que les itinéraires qu'ils empruntent quand ils se dispersent, leur destinée et leurs effets sur le biote et par conséquent sur l'homme.

La première partie de cette étude est donc constituée par des généralités sur les métaux lourds et les sédiments tandis que la deuxième partie nous localise et nous décrit les zones d'étude. Dans la troisième partie, on parle des méthodes d'analyse adoptées puis les résultats et diverses discussions.

**PREMIERE PARTIE : GENERALITES SUR LES METAUX LOURDS ET LES  
SEDIMENTS MARINS**

## **PREMIERE PARTIE : GENERALITES SUR LES METAUX LOURDS ET LES SEDIMENTS MARINS**

### **1. Généralité sur la pollution**

Par définition, il y a pollution lorsque l'environnement est altéré dans sa composition par la présence d'une substance polluante ayant comme origine une activité humaine qui lui fait subir des modifications quantitatives et qualitatives.

Les pollutions résultent des déchets, des rejets, des émanations et des nuisances de toutes sortes générées directement ou indirectement par des activités humaines. On entend donc, par polluant, toute substance ou toute cause susceptible d'altérer le milieu ambiant de telle sorte qu'il ne puisse plus convenir à (aux) l'utilisation(s) qui lui est (sont) normalement destinée(s).

(Extrait de loi cadre 99-021 du 19 Août 1999 sur la politique de gestion et contrôle des pollutions industrielles et artisanales à Madagascar)

### **2. Généralité sur les polluants en mer et dans le sédiment**

Dans les écosystèmes aquatiques naturels, les métaux se trouvent à des faibles concentrations, généralement de l'ordre du nano gramme ou du microgramme par litre. Ces derniers temps, cependant, la présence de métaux lourds contaminants, et spécialement de métaux lourds à des concentrations supérieures aux charges naturelles, est devenue un problème de plus en plus préoccupant. Il faut en imputer la rapide croissance démographique, une urbanisation accrue, l'expansion des activités industrielles, de la prospection et de l'exploitation des ressources naturelles, l'extension de l'irrigation et la propagation d'autres pratiques agricoles modernes, ainsi que l'absence de réglementations concernant l'environnement. La pollution du milieu aquatique est un phénomène reconnu depuis une quarantaine d'années. Le milieu marin n'échappe pas à cette agression tant par l'importance des apports chroniques (rivières, rejets urbains et industriels) que par les pollutions accidentelles, essentiellement d'origine pétrolière. Il en a résulté une intense activité de recherche et la mise en place de programmes nationaux et internationaux de surveillance de la qualité du milieu marin. Le développement de ces études est étroitement lié aux techniques de mesure utilisées et à leur amélioration [1].

### **3. Les métaux lourds**

#### **3.1. Définition des métaux lourds**

On désigne par le terme « métaux lourds » les métaux qui ont une masse volumique supérieure à 4,5g/cm<sup>3</sup> (protocole relatif aux métaux lourds de la convention de Genève). Sont donc qualifiés de métaux lourds, les métaux présentant un caractère toxique pour la santé et l'environnement : Plomb Pb, mercure Hg, arsenic As, cadmium Cd, nickel Ni, zinc Zn, manganèse Mn,... Il se trouve que ces métaux peuvent s'accumuler dans l'organisme et provoquent des effets toxiques à court et/ou à long terme. Ils peuvent affecter le système nerveux, les fonctions rénales, hépatiques, respiratoires [4], [7].

#### **3.2. Etat de connaissance actuel sur les métaux lourds**

Contrairement à d'autres polluants, comme les hydrocarbures dérivés du pétrole, et aux déchets qui envahissent l'environnement au vu de tout le monde, les métaux lourds s'accumulent subrepticement, pour finir par atteindre des seuils toxiques. Les problèmes associés à la contamination par les métaux lourds ont été tout d'abord mis en évidence dans les pays industriellement avancés en raison de leurs déversements industriels plus importants, et spécialement à la suite d'accidents dus à une pollution par le mercure et le cadmium en Suède et au Japon [8]. Bien que le niveau des activités industrielles soit relativement moins élevé dans des régions moins développées comme l'Afrique, on y observe néanmoins une prise de conscience croissante de la nécessité de gérer rationnellement les ressources aquatiques et notamment de maîtriser les déversements de déchets dans l'environnement. Comme il est à prévoir que les activités industrielles et urbaines s'intensifieront dans toutes les régions du continent, cette question revêt désormais une importance encore plus grande.

#### **3.3. Monographie des métaux [6]**

Pour mieux cerner notre étude des brefs rappels sur l'abondance des métaux, leurs formes habituelles, leurs réactivités et leurs caractères physico chimiques paraient utiles. Les effets engendrés par ces polluants sont variés et dépendent également de l'état chimique sous lequel on les rencontre (métal, oxyde, sel, organométallique). Ils contaminent également les sols et les aliments et s'accumulent dans les organismes vivants et perturbent les équilibres et mécanismes biologiques.

**Tableau n°1: Caractères physico-chimiques des métaux [6]**

Elément (métaux)	Numéro atomique	Masse atomique	Densité	Température Fusion / ébullition (°C)
<b>Chrome</b>	24	51,996	7,19	1903 / 2480
<b>Manganèse</b>	25	54,938	7,43	1247 / 2030
<b>Fer</b>	26	55,847	7,87	1536 / 3000
<b>Nickel</b>	28	58,71	8,89	1453 / 2800
<b>Cuivre</b>	29	63,54	8,93	1083 / 2300
<b>Zinc</b>	30	65,38	7,133	420 / 907
<b>Cadmium</b>	48	112,41	8,65	321 / 766
<b>Plomb</b>	82	207,2	11,341	328 / 1744

### 3.3.1. Cadmium

L'abondance du Cd dans la lithosphère est estimée à 0.15g/t. Il n'existe pas de minerais de cadmium métallurgiquement exploitable. Le plus connu est la greenobite (sulfure de cadmium à 77,8 p. de métal). Le cadmium est principalement extrait des minerais de zinc (blendes), mais comme ceux-ci sont associés généralement au plomb et souvent au cuivre, le cadmium provient également de quelques usines métallurgiques où la production du plomb et quelquefois du cuivre l'emporte sur celle du zinc. C'est en Allemagne, vers 1817 que le cadmium fut isolé. La production industrielle du cadmium commença en Haute Silésie, en 1852, mais elle ne prit réellement son essor dans les autres pays producteurs de zinc, et notamment aux Etats-Unis, qu'à partir de 1907.

Le métal de cadmium est facilement oxydé à l'état II en donnant l'ion incolore  $\text{Cd}^{2+}$ . Les bases précipitent l'hydroxyde  $\text{Cd}(\text{OH})_2$ . Le Cadmium comme le mercure forme de nombreux complexe en solution aqueuse. [6]

### 3.3.2. Plomb

Le plomb constitue 0,014 % de la masse de la croûte terrestre, ce qui le place parmi les métaux industriels entre le cuivre et l'étain. On le trouve essentiellement sous forme de sulfure ( $\text{PbS}$ , galène), de carbonate ( $\text{PbCO}_3$ , Cérusite) ou de sulfate ( $\text{PbSO}_4$ , anglésite). Le plomb possède un éclat argenté qui ternit rapidement à l'air par suite de la formation d'une couche d'oxyde et de carbonate.

Le plomb est facilement attaqué par les acides mais l'attaque d'acide sulfurique est rapidement freinée par une rapide formation de sulfate. Le plomb + II est stable par rapport à + IV. Le Pb métallique et le PbO (solide) plongé dans une solution d'acide sulfurique constituent respectivement l'anode et la cathode de l'accumulateur ordinaire. [6]

### 3.3.3. Nickel

Le nickel est abondant dans les météorites, il se trouve au 24<sup>e</sup> rang par ordre d'abondance dans la croûte terrestre. Malgré cette relative abondance, les minerais de nickel (sulfures, oxydes et silicates) exploitables dans des conditions économiques sont localisés dans quelque régions seulement. Le NiS existe à l'état naturel.

Le nickel fut isolé en 1751 par le chimiste suédois Axel Fredrik Cronstedt, et son extraction industrielle ne commence qu'au XIX<sup>e</sup> siècle en Norvège. Et, il fut introduit comme élément d'alliage en 1890.

Les valences 0, 2, 3 et 4 existent, mais c'est la valence 2 qui est la plus stable. Le nickel s'oxyde facilement à l'air, il est protégé par une couche mince d'oxyde. Il résiste bien à la corrosion même à 260 °C.

C'est le Ni (OH)<sub>2</sub> qui est utilisé dans les accumulateurs alcalins tandis que le nitrate de nickel (Ni (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O) est souvent utilisé pour la préparation des différents catalyseurs industriels. [6]

### 3.3.4. Cuivre

Découvert en 9000 ans avant JC, le cuivre se trouve en deuxième rang après l'aluminium en terme d'importance des métaux non ferreux. (Al > Cu > Zn > Pb > Ni > Sn). Les principaux minerais de cuivre sont la chalcopirite CuFeS<sub>2</sub> et le bornite Cu<sub>3</sub>FeS<sub>3</sub>.

Le cuivre à valence 2 prédomine largement sur le cuivre à valence 1 (Cu<sup>2+</sup>/Cu<sup>+</sup>=10<sup>6</sup>).

Le cuivre est soluble dans les acides oxydant et également dans l'ammoniaque.

Il résiste bien à la corrosion atmosphérique et marine. Une longue exposition entraîne la formation d'une fine couche de carbonate basique d'un beau vert. Le Cuivre comme le fer est un élément indispensable à de nombreux processus vitaux, c'est le coenzyme de nombreuses métalloprotéines. Pour les organismes supérieurs le cuivre est très bénéfique.

Contrairement pour les organismes inférieures, c'est le métal bactéricide le plus actif (1g de Cu peut détruire jusqu'à 5000g de dangereux micro-organisme comme les colibacilles ou les staphylocoques dorés). [6]

### 3.3.5. Zinc

L'exploitation industrielle du zinc a commencé en Angleterre en 1740. Le zinc est principalement extrait de la blende. Le zinc se trouve toujours à l'état d'oxydation +2. Dans l'air humide, le zinc réagit plus facilement. Il se couvre généralement d'une couche de carbonate basique. La composition de la couche dépend du milieu environnant. Elle contient des oxychlorures dans le cas d'atmosphère marine, ou des sulfates et sulfites basiques dans le cas des atmosphères urbains et industrielles. En milieu non oxydant, les acides attaquent le zinc à une vitesse qui dépend de la pureté du zinc. Le zinc est principalement utilisé comme anticorrosif. [6]

### 3.3.6. Manganèse

La teneur moyenne du Manganèse dans la croûte terrestre est de 0,1%. Ce qui le place en douzième rang d'abondance parmi les autres éléments. Trop électropositif, il ne se rencontre jamais à l'état métallique dans la nature.

Le Mn (0) est très réducteur ; Mn (II) correspond aux composés manganoux qui sont les plus stables; le Mn (III) aux composés manganiques ; le Mn (IV) aux bioxydes ; le Mn (VI) correspond aux manganates ; et le Mn (VII) aux permanganates. A pH 8, le  $Mn^{2+}$  précipite en  $Mn(OH)_2$  peu soluble.

Les complexes manganoux sont moins stables que ceux de  $Fe^{2+}$  et  $Cr^{2+}$ . Et,  $Mn^{2+}$  est plus difficile à oxyder que  $Fe^{2+}$  et  $Cr^{2+}$ . [6]

### 3.3.7. Chrome

L'élément Chrome a été isolé par Vauquelin dès 1798, puis, les chromates et bichromates prenaient une importance industrielle croissante. C'est vers le XX<sup>e</sup> s. que le chrome tient un rôle important dans la métallurgie des aciers spéciaux. Généralement, on extrait le chrome à partir du minerai de chromite ( $FeCrO_4$ ). A la température ordinaire, le chrome résiste à l'air sec ou humide, à l'eau de pluie ou à l'eau de mer et à divers agents chimiques. Le métal lui-même n'est pas toxique, mais les sels de Cr (III) et surtout l'acide chromique et ses sels sont des poisons.

Le chrome possède trois degrés d'oxydation principaux : +2 correspondant aux sels chromeux, réducteurs énergiques ; +3 que l'on rencontre dans de nombreux sels et complexes chromiques et les chromites. ; Et le Cr (+6) qui est représenté par les oxydants, les chromates et les polychromates. [6]

### 3.3.8. Fer

Le fer occupe la quatrième place en abondance d'élément dans l'écorce terrestre. En 1500 av JC l'homme dominait déjà la technique du fer. Le degré d'oxydation maximal. Le stade primaire de corrosion du fer est la destruction de l'édifice cristallin :  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 e^{-}$ , puis la formation des hydroxyde et des oxydes. Le  $\text{Fe}^{2+}$  est facilement oxydé en  $\text{Fe}^{3+}$ . Tous deux forment respectivement de nombreux complexes dans lesquels le nombre de coordination est 6. [6]

### 3.4. Sources des métaux lourds

Les métaux lourds qui entrent dans l'environnement aquatique proviennent de sources naturelles et de sources anthropogènes. Leur entrée peut être le résultat soit de déversements effectués directement dans les écosystèmes marins et dans les eaux douces, soit d'un cheminement indirect comme dans le cas des décharges sèches et humides et du ruissellement agricole. Parmi les importantes sources naturelles, citons l'activité volcanique, l'altération des continents et les incendies de forêts. La contribution des volcans peut se présenter sous forme d'émissions volumineuses mais sporadiques dues à une activité explosive, ou d'émissions continues de faible volume, résultant notamment de l'activité géothermique et du dégazage du magma [8].

Les principales sources de mercure atmosphérique, par exemple, proviennent du dégazage des terres et des océans.

Compte tenu de la toxicité des métaux lourds, il importe d'en connaître la source et de savoir ce qu'ils deviennent dans l'environnement.

Les sources anthropogènes sont les suivantes:

- Effluents d'extractions minières
- Effluents industriels
- Effluents domestiques et ruissellements orageux urbains
- Lessivage de métaux provenant de décharges d'ordures ménagères et de résidus solides



- Apports de métaux provenant de zones rurales, par exemple métaux contenus dans les pesticides
- Sources atmosphériques, par exemple combustion de carburants fossiles, incinération des déchets et émissions industrielles
- Activités pétrochimiques

Le tableau n°2 présente quelques exemples de sources industrielles et agricoles d'où peuvent provenir les métaux présents dans l'environnement.

**Tableau n°2: Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement [8]**

Utilisations	Métaux
Batteries et autres appareils électriques	Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Ni,
Pigments et peintures	Ti, Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Sn, Cr, Al, As, Cu, Fe
Alliages et soudures	Cd, As, Pb, Zn, Mn, Sn, Ni, Cu
Biocides (pesticides, herbicides, conservateurs)	As, Hg, Pb, Cu, Sn, Zn, Mn
Agents de catalyse	Ni, Hg, Pb, Cu, Sn
Verre	As, Sn, Mn
Engrais	Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn
Matières plastiques	Cd, Sn, Pb
Produits dentaires et cosmétiques	Sn, Hg
Textiles	Cr, Fe, Al
Raffineries	Ni, V, Pb, Fe, Mn, Zn
Carburants	Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd

Pour la plupart des métaux lourds, les émissions anthropogènes sont égales ou supérieures aux émissions naturelles. La combustion d'essence au plomb dans les automobiles, par exemple, est responsable de la vaste diffusion du plomb dans le monde. Pour le mercure, par contre, plusieurs rapports [8], semblent indiquer que les émissions naturelles sont quantitativement plus importantes que les apports d'origine anthropogène.

### **3.5. Mode de transmission des métaux lourds vers le milieu marin**

Les voies de transmission des métaux lourds vers le milieu marin peuvent être distinguée en trois :

- pollution par les cours d'eau et canalisation
- pollution par l'atmosphère
- pollution maritime directe

#### **3.5.1. Pollution par les cours d'eau et canalisation**

La plupart des pollutions marines sont d'origine terrestre et anthropique (produites par les activités humaines). Toutes les substances produites dans un bassin versant ont ainsi vocation à rejoindre à terme le milieu marin par les fleuves et cours d'eau : elles peuvent être d'origine industrielle (hydrocarbures, métaux lourds, substances chimiques, radionucléides..) , agricole (nutriments, engrais, pesticides...), ou tout simplement être produites par la population vivant dans le bassin versant (déchet solides ou liquides, résidus d'installations de traitement des eaux usées, polluants contenus dans les eaux de ruissellement...).

#### **3.5.2. Pollution par l'atmosphère**

L'air en contact avec la surface de la mer peut lui céder ses pollutions (particules en suspension, vapeurs et autres substances gazeuses, aérosols...), essentiellement du fait des précipitations atmosphériques.

Une grande partie des substances polluantes ainsi introduites dans le milieu marin provient de l'activité humaine (gaz d'échappement, ammoniac, hydrocarbures non brûlés...), mais il existe aussi des sources naturelles de pollution (volcans, incendies de forêt...).

#### **3.5.3. Pollution maritime directe**

Toutes les activités humaines en mer (activités maritimes) sont susceptibles de générer des pollutions ; c'est notamment le cas de l'utilisation d'un navire par l'homme, mais il en est de même pour les plates-formes de recherche ou d'exploitation pétrolière, ou les dragages.

## **4. Répartition et itinéraire des métaux lourds dans l'environnement aquatique**

Une fois arrivés dans l'environnement aquatique, les métaux se répartissent entre les différents compartiments de l'environnement aquatique (l'eau, les solides en suspension, les sédiments et le biote). Les métaux présents dans l'environnement aquatique peuvent exister sous forme de complexes, de particules ou en solutions.

#### 4.1. Processus de distribution et de répartition des métaux lourds

Les principaux processus qui gouvernent la distribution et la répartition des métaux lourds sont la dilution, l'advection, la dispersion, la sédimentation et l'adsorption/désorption. Certains processus chimiques peuvent néanmoins intervenir également. C'est ainsi que la spéciation selon les diverses formes solubles est régie par les constantes d'instabilité des différents complexes, et par les propriétés physico-chimiques de l'eau (pH, ions dissous, Eh et température).

L'adsorption pourrait être la première étape du processus d'élimination définitive des métaux de l'eau. Au cours de leur distribution dans le milieu, le stockage permanent ou temporaire des métaux se fait dans les sédiments, aussi bien dans les environnements marins que dans les eaux douces. L'activité microbienne et les processus de réduction par oxydation peuvent modifier les propriétés des sédiments et influencer sur la composition de l'eau interstitielle. Après quoi, les oxydes de fer et de manganèse peuvent être transformés en carbonates ou en sulfures, ce qui entraîne une diminution de la capacité d'adsorption des sédiments. Le retravaillage des sédiments par des organismes ramènera aussi des sédiments en surface, où une fraction appréciable du métal sera libérée.

Dans l'environnement aquatique, les métaux lourds subissent de nombreuses transformations: réduction par processus biochimique interposé, méthylation, déméthylation et oxydation d'espèces de métaux isolées. Des réactions redox peuvent aussi faciliter certaines transformations. Les processus biochimiques sont effectués par des micro-organismes et par des algues.

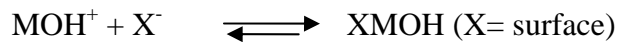
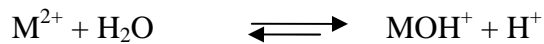
D'après Jernelöv (1975) cité dans la revue des sciences de l'eau [5], la méthylation du mercure se produit quand des micro-organismes arrivent en contact avec des ions mercure alors qu'ils consomment des substances organiques. Cela vaut peut-être aussi pour As, Sn et Pb.

Les métaux lourds sont absorbés tant par la faune que par la flore. Cette absorption pourrait provoquer une augmentation de la concentration du métal dans l'organisme. Si la phase d'excrétion est lente, il peut en résulter un phénomène d'accumulation biologique. Il a été démontré que quelques métaux, comme le mercure, subissent une amplification biologique au cours de leur progression dans la chaîne alimentaire [8].

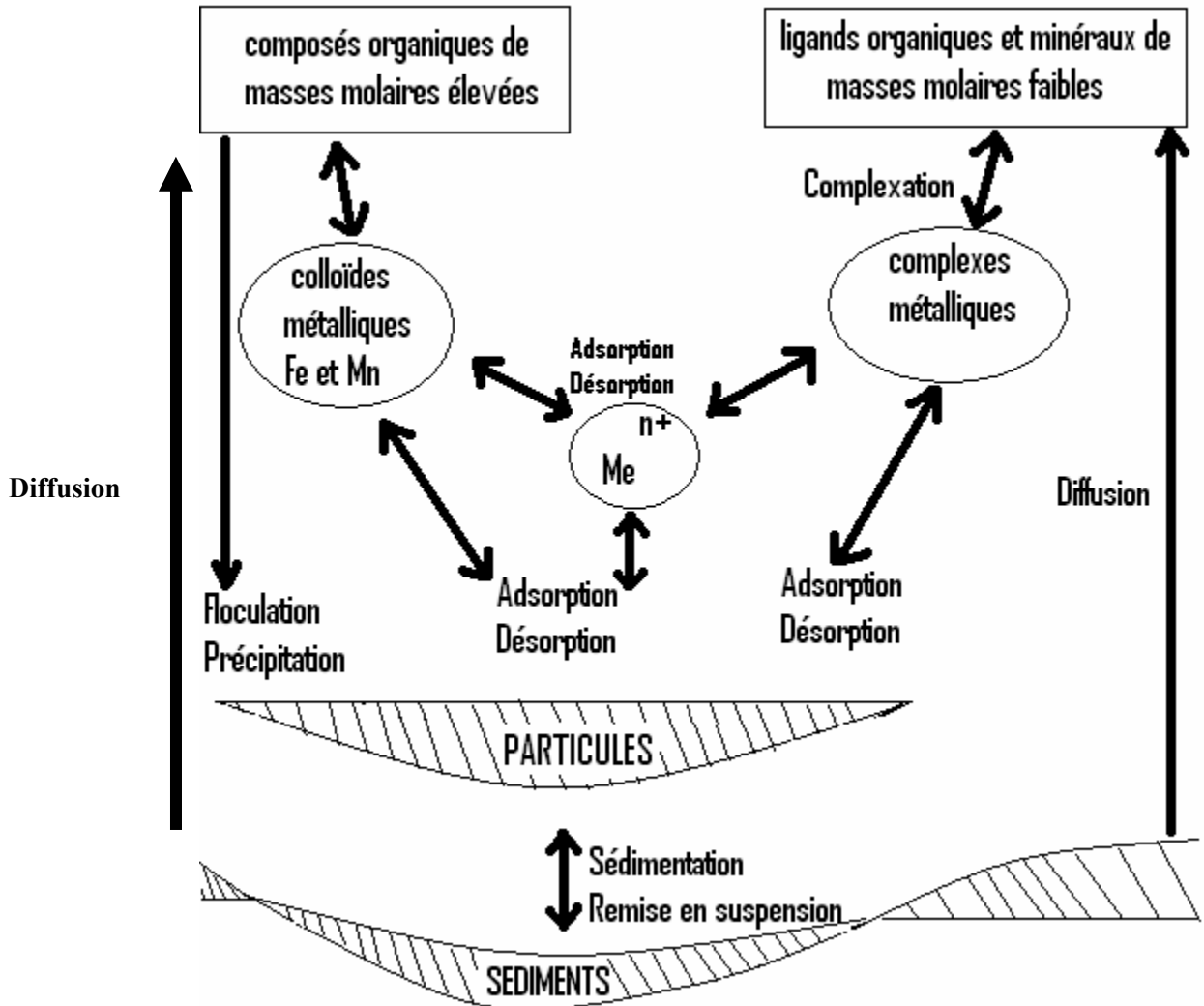
#### 4.2. L'adsorption des métaux lourds sur les sédiments [5]

Des essais pour l'observation de l'adsorption des métaux lourds (Cu, Zn, Cd et Pb) sur des sédiments de cours d'eau ont été faits tout en variant certains paramètres (pH, température). Les résultats suivants ont été évoqués :

- La fixation des métaux sur les sédiments se déroule en quelques heures.
- L'augmentation du pH favorise l'adsorption des métaux sur la fraction réductible.
- De 10°C à 30°C, l'effet de la température sur la capacité d'adsorption des sédiments n'est pas très significatif. De 30°C à 40°C la diminution de l'adsorption est plus importante surtout pour le Cu, Zn et le Cd.
- Rappelons que selon la méthode de minéralisation et l'extraction de référence [5], aboutit à cinq fractions suivant les formes des métaux : F1 Fraction échangeable ; F2 Fraction carbonatée ; F3 Fraction réductible ; F4 Fraction oxydable ; F5 Fraction résiduelle.
- le classement des métaux suivant leur potentiel d'adsorption est confirmé :  $Pb > Zn > Cd > Cu$ .
- Le modèle ci-après peut résumer le mécanisme réactionnel d'adsorption :



Le phénomène d'adsorption des métaux se résume par le schéma montré la figure N°1



**Figure N°1 : Système d'échange eau / sédiment [5]**

## **5. Devenir et effets des métaux**

Quelques métaux lourds, comme le Zn, Cu, Mn et le Fe, sont indispensables à la croissance et au bien-être des organismes vivants, y compris de l'homme. On peut néanmoins s'attendre à ce qu'ils aient des effets toxiques quand les organismes sont exposés à des niveaux de concentration supérieurs à ceux qu'ils requièrent normalement. D'autres éléments, comme Pb, Hg et Cd, ne sont pas indispensables aux activités métaboliques et manifestent des propriétés toxiques.

### **5.1. Conséquences des métaux lourds en mer**

La contamination de l'environnement aquatique par des métaux de provenance localisée, peut avoir des effets délétères, c'est-à-dire des effets toxiques aigus ou chroniques, sur la vie aquatique à l'intérieur de la zone concernée. La plupart des données publiées jusqu'ici concernant les effets des métaux sur les organismes aquatiques indiquent cependant que ces effets nocifs se produisent à des concentrations supérieures à celles que l'on trouve généralement dans l'environnement [8].

Les métaux peuvent être absorbés sous la forme inorganique ou sous la forme organique par les organismes végétales ou animales marins. Pour certains éléments, comme l'arsenic et le cuivre, la forme inorganique est la plus toxique. Pour d'autres, comme Hg, Sn et Pb, les formes organiques sont les plus toxiques. A des faibles concentrations, beaucoup de métaux lourds, dont Hg, Cd, Pb, As et Cu inhibent la photosynthèse et la croissance du phytoplancton. Les effets observés à des niveaux trophiques supérieurs se manifestent notamment par un retard du développement des embryons, des malformations et une moins bonne croissance des adultes chez les poissons, les mollusques et les crustacés. [7]

Les fruits de mer accumulent surtout le cadmium et dans une moindre mesure le plomb, mais peu le mercure. Les capacités à concentrer les métaux lourds varient selon les espèces (avec, par ordre décroissant, les mollusques, les crustacés, les échinodermes, oursins) et les métaux : la moule concentre deux fois plus de plomb que l'huître, l'huître concentre quatre fois plus de cadmium que la moule. [8]

## **5.2. La bioaccumulation des métaux lourds, [8], [7]**

La bioaccumulation est le processus d'assimilation et de concentration des métaux lourds dans l'organisme. Le processus se déroule en trois temps :

- l'assimilation,
- la bioaccumulation par l'individu, ou bioconcentration,
- la bioaccumulation entre individus, ou bioamplification.

### **5.2.1. L'assimilation**

Il existe deux voies principales d'exposition aux polluants : la voie externe, par contact (par l'air ou l'eau...) qui provoque un phénomène d'adsorption (la substance toxique reste à la surface), et la voie interne par assimilation ou absorption.

Toute absorption a fortiori tout contact avec un polluant n'est pas nécessairement dangereuse. D'une part, tout dépend évidemment des concentrations du polluant. D'autre part, il faut s'intéresser à la seule fraction soluble biodisponible à 95 % du métal ; l'autre fraction, insoluble, peu biodisponible étant éliminée par différentes voies : voie solide (fèces), voie liquide (urine), voie cutanée (sueur ...). La partie soluble biodisponible, assimilable, se concentre dans certains organes. C'est ce qu'on appelle l'organotropisme. Cette « réceptivité » est due, soit à une fonction particulière (exemples : le foie, principal siège de la métabolisation c'est-à-dire de la transformation des matières, ou le rein, siège de l'excrétion), soit à la composition physicochimique de l'organe, favorisant le stockage du contaminant (exemple : calcium/plomb dans les os) ou permettant les accumulations (exemples : les organes riches en lipides accumuleront fortement les polluants organiques).

Il existe aussi des différences selon les métaux. Le cadmium se concentre presque exclusivement dans le tube digestif, le foie et les reins. Le plomb diffuse également dans la peau, les muscles, la colonne vertébrale. Le mercure, dans sa forme organique, diffuse dans le système nerveux et le fœtus.

### **5.2.2. La bioaccumulation par l'individu : la bioconcentration**

La bioaccumulation concerne tous les métaux lourds en général, mais plus particulièrement le mercure, lorsqu'il est présent sous forme organique (méthylmercure) qui est sa forme la plus toxique pour l'homme.

Ce processus d'accumulation s'exprime par un ratio entre la concentration du composé étudié (plomb/mercure) dans le milieu (eau/sol) et la concentration dans l'organisme.

Ce ratio porte le nom de « facteur de bioconcentration » BCF.

Il existe d'importantes différences selon les espèces et les métaux. Les organismes vivants concentrent les métaux beaucoup plus que l'eau et l'air. Mais l'analyse des transferts met en évidence une hiérarchie entre les espèces, classées selon leur propension à concentrer les métaux lourds. Les fruits de mer, mollusques et crustacés, et dans une moindre mesure, certains poissons sont d'excellents « capteurs de polluants ». Tandis que le BCF dans les plantes varie de 0,01 à 1 pour le mercure (une plante concentre de 1 à 100 % de mercure contenu dans le sol), le BCF dans les poissons est de plusieurs milliers, voire de plusieurs dizaines de milliers pour les mollusques et les invertébrés.

Les concentrations de cadmium et de plomb chez les poissons sont de deux à dix fois inférieures à celles des mollusques et crustacés mais concentrent beaucoup le mercure, notamment le méthylmercure. Certains métaux dans certaines espèces induisent des protéines : les métallothionéines dont l'un des rôles est de « détoxifier » les métaux toxiques...

L'annexe n°1 donne une indication schématique de l'importance de la bioconcentration de quelques espèces marines.

### **5.2.3. La bioaccumulation entre individus : la bioamplification**

Les transferts de métaux entre individus suivent un processus classique (dits « transferts trophiques ») comparable à l'empilement des poupées gigognes. Le polluant, présent dans les algues et les microorganismes est ingéré par un herbivore, lui-même proie pour un carnivore, lui-même proie d'un super carnivore, animal ou homme. En bout de chaîne, on se trouve donc avec un consommateur final ayant bioaccumulé les formes solubles des métaux.

Il peut arriver, pour certains prédateurs et certains métaux, que les concentrations augmentent au fur et à mesure que l'on progresse dans la chaîne trophique. C'est le cas du plomb et surtout du mercure sous la forme méthylée. Le mercure s'accumule à chaque étape et se retrouve concentré en bout de chaîne alimentaire, notamment dans les gros poissons piscivores. On appelle ce phénomène la « bioamplification » ou la « biomagnification ».

### **5.3. Exemple sur la bioaccumulation dans les huîtres**

L'huître est une espèce qui bioaccumule, c'est-à-dire absorbe et concentre très fortement la plupart des métaux.



Les transferts des métaux à l'huître, comme pour tous les organismes marins, se font selon trois voies : l'eau, la nourriture, les sédiments.

Le cadmium dans l'huître se présente sous deux formes. Une moitié est soluble et peu disponible. Une moitié est soluble, et donc aisément biodisponible pour le prédateur, en l'occurrence l'homme mangeur d'huîtres.

Les concentrations de métaux varient selon les saisons (faibles en été, au moment de la maturité annuelle où les huîtres sont laiteuses, fortes en hiver quand elles sont le plus consommées).

Les concentrations de cadmium dans les huîtres testées dans l'estuaire peuvent atteindre 20 milligrammes de cadmium par kilo de poids sec soit dix fois la limite de comestibilité.

## **6. Exposition alimentaire des métaux**

Les métaux lourds sont des éléments naturels. Ils se retrouvent dans l'air, l'eau, les sols, les sédiments, et par conséquent les plantes, les animaux et les poissons, tous éléments de l'alimentation humaine. Le risque alimentaire combine deux éléments [7] :

- le danger qui tient compte de la voie d'exposition, de la relation dose absorbée/effet sur l'homme, et d'une marge de sécurité,

- l'exposition, qui tient compte de la quantité de produit assimilé. L'exposition est très dépendante des habitudes alimentaires.

Le tableau n°3 ci-après nous montre la teneur en métaux des poissons de quelques sous région du globe.

**Tableau n°3: Comparaison des concentrations de métaux dans des poissons provenant d'Afrique et d'autres régions du globe ( $\mu\text{g/g}$  poids frais) (Valeur moyenne et fourchette de valeur) [8]**

Emplacement	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	Référence
Eaux intérieures africaines	0,035 (0,01–0,053)	0,053 (0,004–0,19)	0,31 (ND*–0,67)	0,85 (0,18–2,0)	7,16 (3,0–11,8)	Auteur
Eaux côtières africaines	0,095 (0,06–0,17)	0,069 (ND–0,26)	0,69 (0,07–1,83)	0,80 (0,40–1,65)	4,76 (4,23–5,55)	Auteur
Cours d'eau britanniques	0,17 (0,023–0,32)	0,15 (ND–0,35)	0,87 (ND–4,30)			Mason, 1987
Nord de la mer Tyrrhénienne	1,21 (0,11–2,81)	<0,02	<0,20	0,37 (0,24–0,44)	3,92 (2,92–5,19)	Leonzi <i>et al.</i> , 1981
Lacs finlandais	0,77 (0,50–4,06)					Surma-Aho <i>et al.</i> , 1986
Nord de l'océan Indien	0,01	0,90	0,62	0,81		Sen Gupta <i>et al.</i> , 1990
Bahreïn	0,004–1,07	0,00003–0,071		0,10–0,47		Linden <i>et al.</i> , 1990
Détroit de Malacca	0,01–0,58	ND–0,10	ND–1,20	0,05–0,75	1,70–10,8	Gomez <i>et al.</i> , 1990
Indonésie	0,02–0,20	0,02–0,03	0,09–0,68	0,33–0,68	0,30–9,96	Gomez <i>et al.</i> , 1990
Golfe de Thaïlande	0,01–0,10	0,01–0,06	0,01–0,09	0,50–1,25	6,20–11,8	Gomez <i>et al.</i> , 1990
Philippines	0,01–1,10	ND–0,36	0,01–0,08	ND–4,43	0,20–58-4	Gomez <i>et al.</i> , 1990
Hong Kong	ND–0,40	ND	ND–0,30	ND–1,10	0,80–25,4	Gomez <i>et al.</i> , 1990
Nouvelle-Zélande	0,02–1,10	0,01–0,03	0,03–0,18	0,12–0,75	0,80–5,1	Brodie <i>et al.</i> , 1990
Papouasie-Nouvelle-Guinée	0,03–0,40	ND–0,10	ND–0,30	0,30–0,70	3,0–5,0	Brodie <i>et al.</i> , 1990

\* ND - Non détecté

### 6.1. Toxicité du cadmium [7]

Les divers composés du cadmium présentent des effets toxiques variables selon leur solubilité, et donc leur facilité d'assimilation par l'organisme. Ainsi, le chlorure de cadmium, soluble, apparaît plus toxique que le sulfure de cadmium très insoluble.

Les principales causes d'exposition au cadmium sont l'alimentation et le tabagisme. 12 milligrammes de cadmium sont ingérés annuellement en moyenne par nos concitoyens. L'essentiel du cadmium ingéré provient de végétaux à feuillage vert, salades, choux, épinards et dans une moindre mesure des céréales.

La principale voie d'élimination du cadmium est l'urine, mais cette élimination est très lente. L'accumulation du cadmium s'effectuant principalement dans les reins, cet organe est considérée, de ce fait, comme un organe « cible ».

Le Comité mis en place par la Commission des Communautés européennes a décidé de classer le sulfate et l'oxyde de cadmium comme cancérigènes « probables » par inhalation pour l'homme et le sulfure de cadmium comme cancérigène « possible » pour l'homme. La préoccupation essentielle concerne, pour le futur, les effets sur le rein d'une accumulation dans l'organisme du cadmium absorbé via les aliments et le tabac.

Parmi les expositions professionnelles aux sels de cadmium, on peut noter la métallurgie du zinc, la production de pigments et la fabrication d'accumulateurs, le décapage de peintures...

Des accidents peuvent cependant survenir lors de la production ou de la mise en oeuvre du cadmium ou de ses composés :

- par voie digestive : l'absorption d'une faible quantité de ces substances est suivie de troubles gastro-intestinaux (nausées, vomissements, diarrhée). Ces troubles peuvent, dans les cas sévères, se compliquer d'une déshydratation grave de l'organisme ;
- par voie respiratoire : l'inhalation de fumées ou de poussières respirables (d'un diamètre inférieur à 5 microns) à des concentrations supérieures à 200 microgrammes par m<sup>3</sup> et de façon plus ou moins prolongée peut provoquer rapidement un trouble pulmonaire grave.

## 6.2. Toxicité du plomb [7]

### 6.2.1. Voies d'exposition au plomb

Le plomb peut pénétrer dans l'organisme humain par deux voies :

- Par inhalation de vapeur de plomb ou de poussières (oxyde de plomb)
- Par ingestion, qu'il s'agisse du plomb d'abord inhalé et ingéré à la suite des processus d'épuration pulmonaire, ou du plomb ingéré directement avec les aliments ou avec les poussières se trouvant sur les mains ou les objets portés à la bouche notamment chez le jeune enfant.

Chez le jeune enfant, le tube digestif est la principale voie d'entrée du plomb dans l'organisme. L'absorption des dérivés inorganiques du plomb est d'autant plus élevée que le composé considéré est plus hydrosoluble et que les particules ingérées sont de plus petites tailles. L'absorption digestive du plomb est augmentée par la vitamine D, les régimes riches en graisses ou carencés en calcium et en fer.

Dans le cas particulier du fœtus, le plomb, au travers de la barrière placentaire, passe de la mère à l'enfant. Le plomb passe également après la naissance à l'enfant au travers du lait maternel.

### 6.2.2. Distribution du plomb dans l'organisme humain

Le plomb absorbé par l'organisme par inhalation ou par ingestion est distribué par le sang à différents organes : le foie, les reins, la rate, la moelle osseuse et surtout les os. Le plomb sanguin ne représente que 1 à 2 % de la quantité totale de plomb présent dans l'organisme ; les tissus mous (reins, foie, rate...) en contiennent 5 à 10 % et plus de 90 % est fixée sur les os. Le plomb est principalement (75 %) éliminé dans les urines. 15 à 20 % du plomb sont éliminés dans les fèces. Le plomb est également excrété dans la salive, dans la sueur, dans les ongles, dans les cheveux...

### 6.2.3. Principaux effets toxiques du plomb pour l'homme

#### a) Effets du plomb chez l'adulte

Le saturnisme désigne l'ensemble des manifestations de l'intoxication par le plomb. Les coliques de plomb sont les effets toxiques les plus connus du métal mais ses principaux organes cibles sont : le système nerveux, les reins et le sang.

#### b) Effets du plomb sur le système nerveux

Le plomb est responsable d'atteintes neurologiques. En cas d'intoxications massives, l'effet neurotoxique du plomb peut se traduire par une encéphalopathie convulsivante pouvant aller jusqu'au décès. En cas d'intoxication moins sévère, on a observé des troubles neuro-comportementaux et une détérioration intellectuelle.

#### c) Effets du plomb sur la moelle osseuse et le sang

Le plomb bloque plusieurs enzymes nécessaires à la synthèse de l'hémoglobine. Ces effets sanguins aboutissent à une diminution du nombre des globules rouges et à une anémie.

#### d) Cancer par le plomb

L'administration de fortes doses de plomb a induit des cancers du rein chez de petits rongeurs. En revanche, il n'a pas été mis en évidence de surmortalité par cancer dans les populations exposées au plomb.

L'intoxication aiguë est rare. L'intoxication habituelle est liée à une exposition chronique.

### 6.3. Toxicité du mercure

Puis que le mercure est l'un des principaux métaux toxique, il est indispensable d'en parler même s'il ne figure pas parmi les métaux étudiés antérieurement. Ainsi, en dehors du milieu professionnel, le mercure est repéré comme un élément toxique, et plus particulièrement néphrotoxique, c'est-à-dire agissant sur les reins, et neurologique, c'est-à-dire agissant sur le système nerveux. Les symptômes sont des troubles mentaux plus ou moins graves, une salivation excessive (ptyalisme), des douleurs abdominales, des vomissements, de l'urémie (accumulation d'urée liée à une insuffisance de la fonction rénale). Les troubles peuvent hélas être décuplés en cas d'intoxication grave comme ce fut le cas au Japon, il y a un demi-siècle.

#### **6.4. Cas de Madagascar sur les toxicités d'origine alimentaire**

A Madagascar, des cas d'intoxication alimentaire imputés aux contaminations seuls par les métaux lourds ne sont pas encore signalés. Par contre, épisodiquement des cas d'intoxication alimentaire parfois mortels sont enregistrés sur la côte Est malagasy. L'origine en est la consommation de chair de requin. Les causes de cette toxicité mortelle de la chair de requin seraient liées à la prolifération d'algues toxiques dans les régions touchées. Le requin étant l'un des derniers maillons de la chaîne trophique dans le milieu marin, la toxicité y serait concentrée.

La prolifération d'algues toxiques serait consécutive à la contamination du milieu en fertilisants et sels nutritifs apportés par les résidus d'engrais et autres produits chimiques selon Josephine RANAIVOSON en 1997 [16].

### **7. Le recyclage des métaux lourds**

#### **7.1. Problématique générale sur le recyclage**

Il n'y a pas de recyclage des métaux lourds en général, mais un recyclage par filière. Les filières les mieux organisées sont évidemment celles où les masses à traiter sont les plus importantes. Ces filières sont cependant fragiles : baisse des cours de matières premières, flux d'approvisionnement inférieurs aux prévisions, organisation difficile, menace d'interdiction des produits... Beaucoup d'éléments contribuent à fragiliser les filières de recyclage de métaux lourds.

Les principales filières sont passées en revue. Chacune présente quelques unes des difficultés particulières du recyclage des métaux lourds. L'une de ces difficultés concerne l'incertitude sur l'avenir des filières.

En effet, pour lutter contre les effets des métaux lourds, la solution radicale et la plus simple est d'en interdire l'usage, c'est à dire d'empêcher un usage à la source. Cette initiative a pour effet de stopper le recyclage, puisqu'il ne peut y avoir recyclage que sur une matière qui est encore utilisée. La seule annonce d'une possible interdiction suffit à bloquer tout projet de tout investissement dans le domaine du recyclage puisque l'industriel n'est pas sûr de conserver la ressource.

Cette problématique se pose tout spécialement dans le cas du cadmium. La menace d'interdiction des accumulateurs de nickel cadmium entrave l'ébauche d'une filière de recyclage.

## **7.2. Recyclage des batteries au plomb [8]**

Les batteries représentent 70 % de l'utilisation du plomb aujourd'hui. Cela donne une idée de l'importance de l'enjeu du recyclage tant du point de vue de la ressource, que du point de vue des emplois, ou du réemploi.

En effet, contrairement aux autres principaux métaux lourds (mercure et cadmium), le plomb n'est pas menacé dans ses usages. Sur une longue période, la baisse de consommation en plomb est certes considérable.

Les principaux secteurs utilisateurs ont renoncé totalement (plomb dans l'essence) ou presque totalement (plomb dans les peintures). Ce mouvement baissier se poursuivra encore, mais seulement à la marge : les professionnels des peintures se sont engagés à supprimer totalement le plomb dans les peintures en 2002. Le plomb devrait être éliminé de quelques petits créneaux (réservoirs d'essence, soudures, petites pièces moulées, alliages, cristal...). Une interrogation demeure sur les plombs de chasse... Mais malgré cette tendance baissière incontestable, l'utilisation du plomb n'est pas compromise, au moins dans les deux principaux secteurs actuels : les batteries de plomb, et les verres techniques (écrans de TV ou d'ordinateurs) pour lesquels il n'y a pas de possibilité de substitution à l'horizon de dix ans. Techniquement, le plomb récupéré peut être recyclé. La demande existe. 80 % du plomb recyclé provient des automobiles qui représentent un gisement considérable.

### **7.2.1. Eléments sur le recyclage annuel du plomb dans les automobiles**

- 1,5 millions de véhicules hors d'usage  $\Rightarrow$  1,5 millions batteries  $\Rightarrow$  15 000 tonnes de plombs récupérables et 25 000t de plombs hors batterie.
- 6 millions de batteries remplacées  $\Rightarrow$  60 000 tonnes de plombs
- $\Rightarrow$  Soit : 100.000 tonnes de plombs récupérables par an

Compte tenu des masses disponibles, des besoins, et des prix de l'époque, la filière de récupération des vieilles batteries s'est mise en place et s'est structurée de façon efficace dans les années 80 : 90 à 95 % des batteries sont aujourd'hui récupérées et recyclées.

L'industriel procède aux opérations suivantes : tri des batteries, élimination de l'acide, stockage, démontage, broyage des batteries, récupération des plastiques, des parties métalliques, des sels et oxydes de plomb, fusion et affinage. Le plomb est dirigé par la suite vers l'affineur et l'utilisateur final. [8]

## 8. Généralité sur les sédiments marins

### 8.1. Difficulté sur l'analyse des sédiments

Les problèmes essentiels que pose l'étude du sédiment ont pour origine son caractère fondamentalement hétérogène :

- hétérogénéité spatiale aussi bien dans le sens horizontal (géographique) que vertical (historique).
- hétérogénéité interne par sa constitution en particules de taille et de nature diverses, environnées d'une quantité variable d'eau plus ou moins liée.

Un sédiment de 3cm d'épaisseur peut représenter par exemple une période de moins de trois ans dans les zones estuariennes. . [1]

De plus, les être vivants apportent leur parts tant sur le façonnage que sur la composition des sédiments. En effet, les êtres vivant sur le fond forment le benthos; on parle d'épifaune pour les animaux vivant à la surface du sédiment, d'endofaune pour ceux vivant à l'intérieur. L'activité des organismes laisse des traces sur et dans le sédiment qui peuvent être conservées après lithification: ce sont les traces fossiles ou ichnofossiles.

Les organismes du benthos produisent souvent des sécrétions qui agglomèrent les grains du sédiment (tube des annelides fouisseurs, byssus des moules...) Lorsqu'ils sont nombreux, ils peuvent former un véritable feutrage qui induit la surface du sédiment.



## 8.2. Classification des sédiments

Selon le manuel pour l'analyse de sédiments marins, J. P. Villeneuve [9] préconise la classification des sédiments selon le tableau ci après :

**Tableau n°4: Classification des sédiments marins [9]**

	classe	Dimension $\mu\text{m}$
<b>Sable</b>		2000
	Très grossier	1000
	Grossier	500
	Moyen	250
	Fin	125
	Très fin	62
<b>Vase</b>	Très grossier	31
	Grossier	16
	moyen	8
	Fin	4
	Très fin	2
<b>Argile</b>		<2

Généralement, l'analyse des sédiments s'effectue sur des fractions inférieures à 63  $\mu\text{m}$  (élimination des sables) mais, cela dépend de l'interprétation à laquelle on veut en venir.

En ce qui nous concerne, on a opté pour l'analyse du sédiment entier vu que c'est la première étude dans son type.

### 8.3. Quelques données existantes sur les teneurs en métaux de sédiment en Afrique

**Tableau n°5: Concentrations moyennes de métaux dans les sédiments marins ( $\mu\text{g/g}$  poids sec) de quelques zones côtières d'Afrique**

Emplacement	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	As	Fe( $\times 10^3$ )	Référence
MEDITERRANEE								
Baie d'Abu-Kir, Egypte		2,02		12	102		4,5	Saad <i>et al.</i> , 1981b
Port Saïd, Egypte		3,2		14	50		2,5	Saad <i>et al.</i> , 1981b
Port oriental, Alexandrie, Egypte		2,89		14	51		1,1	Saad <i>et al.</i> , 1981b
El Mex, Egypte	0,12	2,18		24,1	35,4		1,47	Saad <i>et al.</i> , 1981
Méditerranée Sud-Ouest								Bernhard, 1988
GOLFE DE GUINEE	0,35							
Lagune d'Ebrié, Côte d'Ivoire			57,6	37,0	187		52,40	Kouadio <i>et Trefry</i> , 1987
Lagune de Lagos, Nigéria	0,10	4,10	178,9	15,0	147		36,38	Okoye <i>et al.</i> , 1991
Côte atlantique, Nigéria*		2,30	67,5		72,5	6,2		Ndiokwere, 1984
OCEAN INDIEN	0,019							
Lagune de Knysna, Afrique du Sud		0,23	48,4	6,7	40,6			Watling <i>et Watling</i> , 1982a
SEDIMENTS NON POLLUES	0,01–0,08	0,2–5,0	8–60				14	GESAMP, 1985, 1988

Source : [8]

## **9. Survol des législations existantes en terme de pollution marine**

### **9.1. Lois et réglementations malagasy**

Puisque la mer constitue un grand réceptacle des eaux du continent. Il est nécessaire de rappeler certaines lois régissant l'utilisation de l'eau car elle contribuera beaucoup à la qualité de la mer et par suite à la qualité des ressources marines.

#### **Loi N° 98 029 Code de l'Eau [12]**

*Article 12* : toute personne physique ou morale, publique ou privée exerçant une activité source de pollution ou pouvant présenter des dangers pour la ressource en eau et l'hygiène du milieu doit envisager toute mesure propre à enrayer ou prévenir le danger constaté ou présumé.

En cas de non-respect des prescriptions du paragraphe précédent, l'auteur de la pollution est astreint au paiement, conformément au principe du pollueur payeur, d'une somme dont le montant est déterminé par voie réglementaire, en rapport avec le degré de pollution causée.

*Article 21* : Tout déversement d'eaux usées, autres que domestiques, dans les égouts publics doit être préalablement autorisé par la collectivité à laquelle appartiennent les ouvrages qui seront empruntés par ces eaux usées avant de rejoindre le milieu naturel.

#### **Charte de l'environnement : loi 90-033 du 21 décembre 1999 [13]**

*Article 4* : La protection et le respect de l'environnement sont d'intérêt général. Il est du devoir de chacun de veiller à la sauvegarde du cadre dans lequel il vit.

#### **Décret N°92-954 du 15 Décembre 1999 sur la Mise en Compatibilité des Investissements avec l'Environnement (MECIE)**

*Article 3* : ...les projets d'investissements publics ou privés, qu'ils soient soumis ou non à autorisation ou à approbation d'une autorité doivent faire l'objet d'une étude d'impact.

#### **Loi cadre 99-021 du 19 Août 1999 sur la politique de gestion et contrôle des pollutions industrielles et artisanales**

*Article 9* : Tout exploitant industriel a l'obligation de sauvegarder l'environnement par une production plus propre et une réduction, valorisation, traitement et élimination de ses déchets.

## **Arrêté N° 1186 du 26 Mars 1971 relatif aux fumés produits par les véhicules automobiles**

**Article 1 :** les moteurs des véhicules doivent être conçus, construits, réglés, entretenus, alimentés et conduits de façon à ne pas provoquer d'émission de fumés nuisibles ou incommodants....

## **9.2. Lois et réglementations internationales**

### **Convention MARPOL 73/78**

La prévention de la pollution depuis les navires est basée sur la Convention MARPOL 73/78 dont les dispositions réglementaires sont présentées dans différentes annexes qui touchent à la nature de la cargaison transportée (évoquée précédemment) et à la vie du navire :

- ▶ annexe I : transport des hydrocarbures
- ▶ annexe II : transport des produits chimiques en vrac
- ▶ annexe III : transport des produits chimiques en colis
- ▶ annexe IV : les eaux usées du navire
- ▶ annexe V : les déchets et ordures du navire
- ▶ annexe VI : les fumées et émissions de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>

### **Conférence de Stockholm sur l'environnement en Juillet 1972**

« Les états devront prendre toutes les mesures possibles pour empêcher la pollution des mers par des substances qui risquent de mettre en danger la santé de l'homme, de nuire aux ressources biologiques et à la vie des organismes marins, de porter atteinte aux agréments naturels ou de nuire à d'autres utilisations légitimes de la mer. »

### **Code international de conduite sur la distribution et l'utilisation des pesticides**

Un cadre institutionnel et des mécanismes réglementaires relatifs à l'importation, au transport, à l'entreposage, à la vente et à l'application de ces produits chimiques devrait être mis en place dans tous les pays. On mentionnera pour référence le Code international de conduite sur la distribution et l'utilisation des pesticides, adopté par la Conférence de la FAO en 1985 et amendé en 1989 (FAO, 1990).

Ce Code a pour objectif de préciser les responsabilités et d'établir des normes de conduite volontaires destinées à toutes les entités publiques et privées qui s'occupent ou traitent de la

distribution et de l'utilisation des pesticides, en particulier là où leur réglementation n'est pas ou est insuffisamment couverte par la législation nationale.

**Convention de Bâle :** mouvements transfrontaliers de déchets dangereux (signée le 1 juin 1992, ratifiée le 20 Janvier 1999)

**Convention de Bamako** sur l'interdiction d'importer en Afrique des déchets dangereux et sur le contrôle des mouvements transfrontières et la gestion des déchets dangereux produits en Afrique.

**Convention de Nairobi :** pour la protection, la gestion et la mise en valeur du milieu marin et des zones côtières de la région de l'Afrique orientale.

## **10. Actions déjà entreprises à Madagascar en rapport à la gestion de la pollution marine**

Les pratiques de gestion courante de la pollution marine à Madagascar par des actions et des initiatives principalement axées sur la gestion des déchets et des eaux usés en amont.

- Elaborations des lois et réglementations sur la préservation de l'environnement.
- Prise de décision de l'Etat Malagasy sur la Ratification des différentes conventions internationales.
- Mise en place de l'OLEP (Organe de Lutte contre l'Evènement de Pollution marine par les hydrocarbures) comme organe opérationnelle en cas de déversement d'hydrocarbures en mer ;
- Reboisement des bassins versants pour éviter les transports de solides et des sols ;
- Mise en conformité des nouvelles entreprises par rapport à l'environnement en matière de gestion des effluents et des déchets ;
- Mise en compatibilité des anciennes entreprises par rapport à l'environnement en matière de gestion des effluents et des déchets ;
- Recyclage des sachets plastiques (Polyéthylène basse densité) par la société SMTP ;
- Récupération et recyclage des huiles usagées effectués par la société ECOLUBE ;
- Récupération et recyclage des huiles usagées par la société ADONIS ;
- Récupération/réutilisation des bouteilles en plastique.

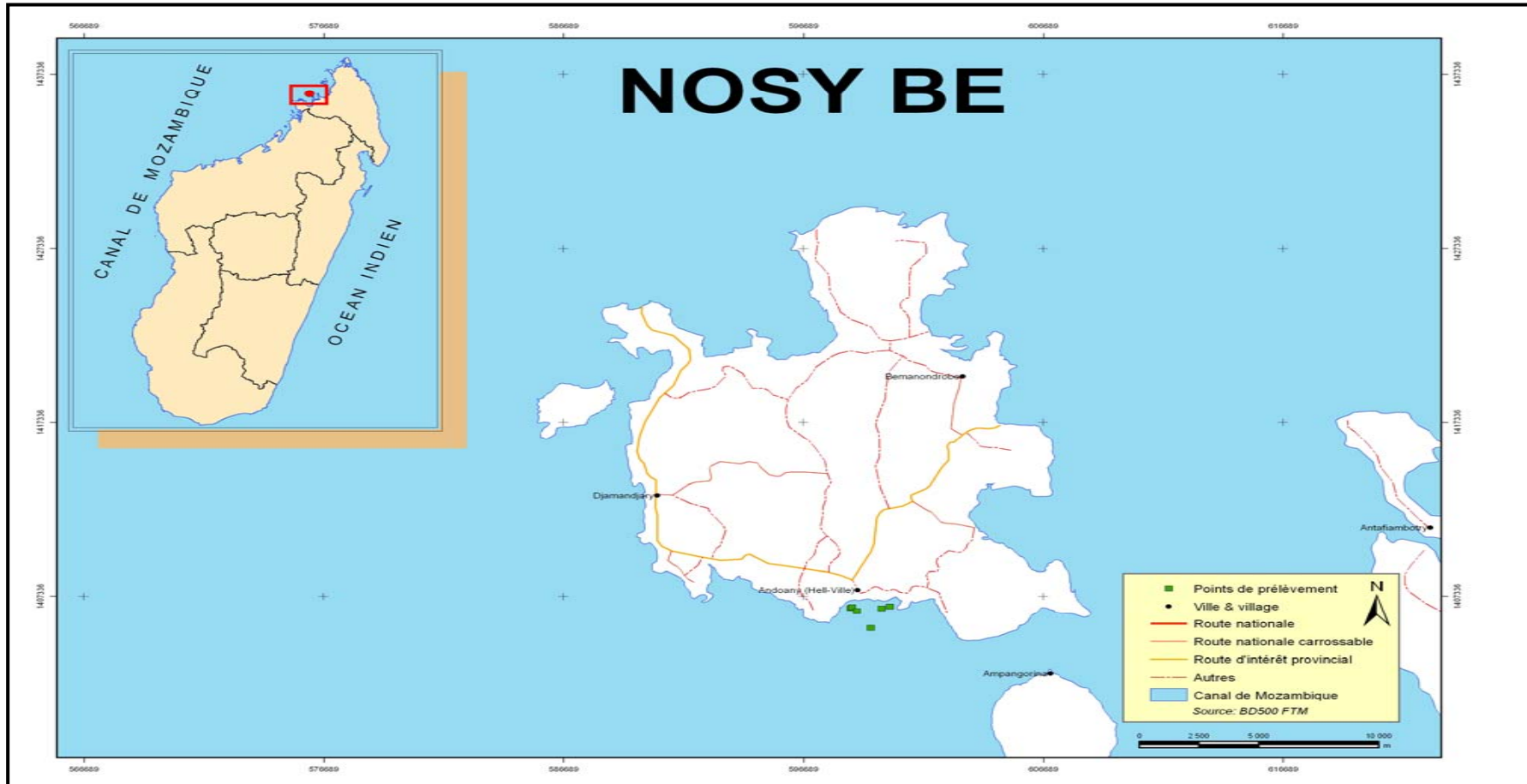
**DEUXIEME PARTIE :**  
**LOCALISATION ET DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE**

## DEUXIEME PARTIE : LOCALISATION ET DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

### **1. Localisation de Nosy Be**

La ville de Nosy Be se trouve au Nord Ouest de Madagascar, vers 680 km d'Antananarivo en empruntant la RN4 jusqu'à Ambondromamy, puis la RN6 jusqu'à Ambanja où l'on transite par voie maritime de 20 km.

L'île de Nosy Be appartient au District d'Ambanja qui constitue la partie septentrionale de la Région de Diana. Nosy Be est la première destination touristique de Madagascar. Nosy Be est en fait la plus grande des petites îles dont Nosy Sakatia et Nosy Komba.



**Figure N°2:** Carte de localisation de la ville de Nosy Be



## **1. Description de la zone d'étude à NOSY BE [14]**

Notre lieu de travail se situe le long de la côte de la ville d'Andoany (environ 2 km) y compris le port vers une distance moyenne de 100m de la rive.

Puisque le relief, la géologie et le climat influencent beaucoup notre étude, alors on en donne les quelques points clés qui concernent directement notre site.

### **1.1.1. Relief**

Morphologiquement, Nosy-Be est l'un des quatre grands ensembles volcaniques de l'extrême nord de Madagascar auxquels on peut rattacher le volcan de la presqu'île d'Ambato. L'île est d'origine volcanique dans son ensemble. Cependant, il existe différents caractères morphologiques propres à la région de Nosy Be.

Dans les zones des marais maritimes, la forêt cède la place à des mangroves qui ce sont établies aux embouchures des cours d'eaux.

### **1.1.2. Géologie**

Avec les différents phénomènes volcaniques qui affectent la région, on observe à Nosy Be une diversité de sols. Au Sud Est, les complexes intrusifs de granite et de syénite recourent les couches liasiques.

La côte Sud où se trouve notre site de travail, est formée par un large cratère avec des parois pouvant atteindre 100mètres de hauteur.

### **1.1.3. Climat**

Le total pluviométrique est considérable dans l'île de Nosy Be. Ces conditions exceptionnelles ont pour origine l'influence du relief massif de Tsaratanàna, situé plus à l'Est. En été austral, l'ascendance orographique de la mousson, au contact des fortes pentes Nord-Ouest des montagnes de Tsaratanàna intensifie la pluviométrie affectant toute la région de Sambirano et de Nosy Be.

Cette situation climatique est bien tranchée. De Novembre à Avril, on assiste à six mois de pluies abondantes (2335 mm correspondant à 85% de la totalité annuelle) répartis sur 111 jours de pluies. Les Sakalava appelle cette saison de pluie abondante « asara » ou « asarabe ».

De Mai à Octobre, on assiste à six mois de précipitations de moyenne importance (306 mm) répartis sur 29 jours de pluie. Durant cette période, la convergence des alizés sous l'effet des

vents du massif de Tsaratanàna provoque des pluies fines assez fréquentes. Les Sakalava appellent cette période « maintany ».

#### **1.1.4. Hydrographie et hydrogéologie**

Les réseaux hydrographiques de l'île sont constitués par les rivières et les lacs. Les rivières de Nosy Be peuvent être subdivisées en deux suivant la pérennité de leur débit :

- Celles avec débit satisfaisant en saison sèche : Andranobe, Fascène et Dzabala ;
- Celles à faible débit en saison sèche : Dzamadzary, Ambaribongo, Ambalamanga et Antsahahely

L'exploitation de ces rivières est de trois types : l'irrigation pour la culture des cannes à sucre (Dzamadzar,...), la distillerie pour l'extraction d'huiles essentielles (Dzabala) et la source d'approvisionnement en eau de certaines localités (Lokobe).

#### **1.1.5 Population**

La commune urbaine de Nosy Be compte 64 988 habitants (recensement de l'année 2003) répartis dans les cinq arrondissements. La densité moyenne de la population est évaluée à 202 habitants par km<sup>2</sup>. Le taux d'accroissement annuel est de 3,5 % et celui de l'immigration avoisine 12% de la population par an. La taille moyenne du ménage est de six.

#### **1.1.6. Principales activités économiques de Nosy Be**

- La canne à sucre qui assure environ 1200emplois saisonniers et fixes
- La pêche industrielle axée surtout sur la crevette qui assure environ 2500 emplois fixes et saisonniers
- Le tourisme qui fournit environ 1200 emplois directs
- L'extraction d'ylang ylang en huile essentiel qui emploi 11 agents fixes.

### **1.2. Les principales activités potentiellement polluantes constatés**

- Activités portuaires
- Déversement direct des eaux usées en mer
- Rejet direct de déchet solide en mer
- Les résidus de fuel du central thermique JIRAMA.
- On assiste à un encombrement du port de par son rôle multifonctionnel : port de voyageurs, de marchandises, de pêche et de plaisance. (Cf. ANNEXE N°2)

### 1.3. Problèmes environnementaux soulevés dans le PCD de Nosy Be

**Tableau N°6 : Quelques problèmes environnementaux de Nosy Be**

Problèmes	Causes
- la zone est caractérisée par l'absence de contrôle de l'exploitation des ressources naturelles (marines et terrestres)	- l'absence de contrôle des CLB et des CLS sur les exploitations des ressources naturelles par faute de moyens.
- l'absence des latrines	- le manque de latrines pour respect de coutume et tradition
- l'éparpillement des décharges publiques	- la non performance des techniques de distillation
- les distilleries d'ylang ylang sont de grandes consommatrices de bois de chauffage	- le manque de civisme
- l'insalubrité de toute la plage par des polluants biologiques.	- l'absence de décharge publique structurée
- érosion marine et terrestre	- l'insuffisance des moyens de ramassage des ordures
- pollution marine	- recrudescence des feux de brousse, de défrichement.
- pollution tellurique	- déversement des hydrocarbures en mer

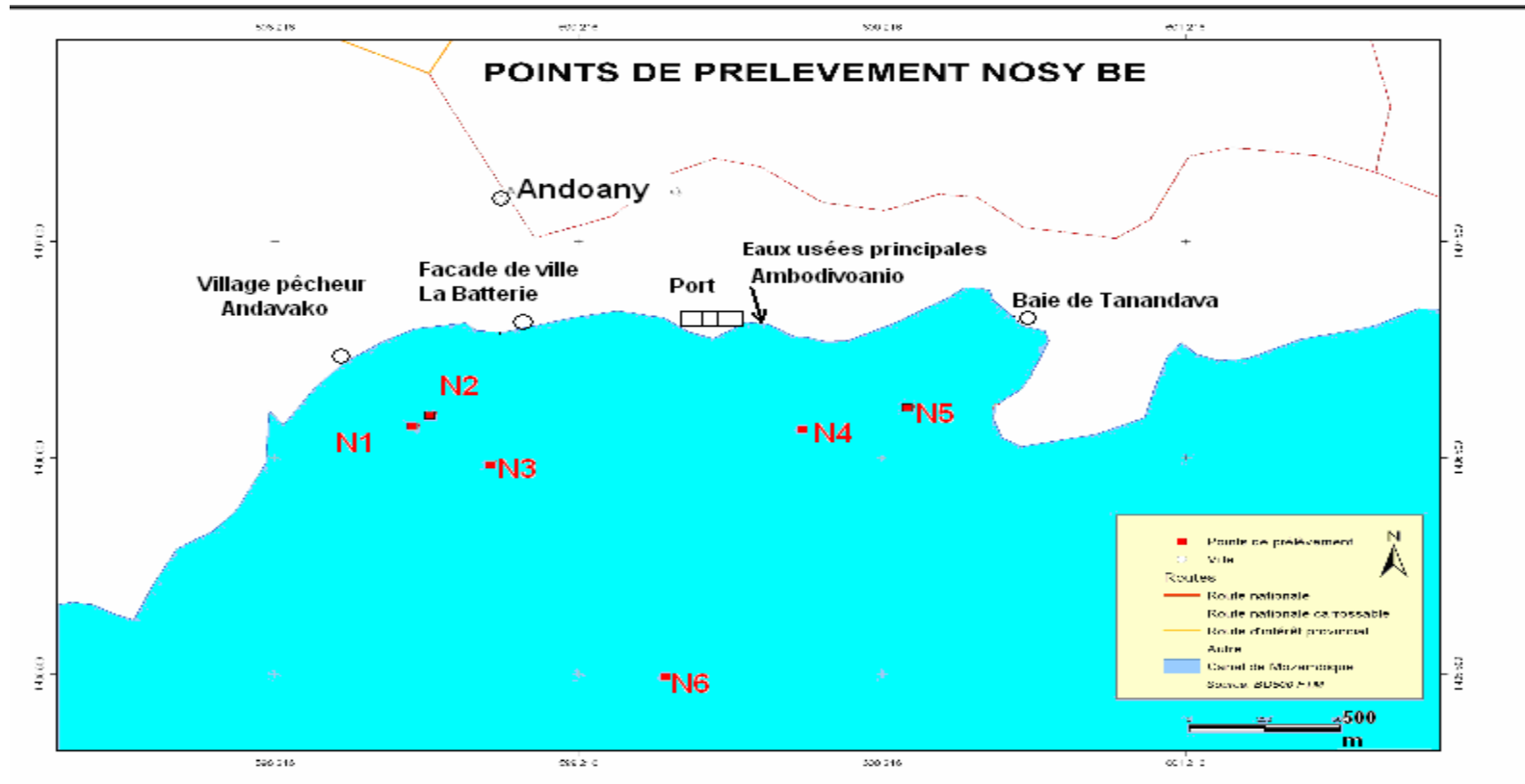
**Source : Commune Urbaine de Nosy Be**

Ce tableau tiré du PCD nous a montré l'esquisse de l'état environnemental actuel dans la ville de Nosy Be.

#### 1.4. Site de prélèvements Nosy-Be

**Tableau N°7 : Caractéristiques des six points de prélèvement de Nosy Be**

Réf. éch	Description	Profondeur (m)	Latitude	Longitude
N1	Andavako (sortie pple des eaux usées)	1.15	S13°24.406'	E048°16.171'
N2	Andavako	0.32	S13°24.378'	E048°16.203'
N3	La batterie	4,9	S13°24.501'	E048°16.315'
N4	Port (sortie eaux usées, Activités du port, Jirama)	2	S13°24.408'	E048°16.884'
N5	Baie de Tanandava	4,90	S13°24.351'	E048°17.075'
N6	Référence	11,3	S13°25.030'	E048°16.640'



**Figure N°3:** Carte de localisation des six points de prélèvement de Nosy Be

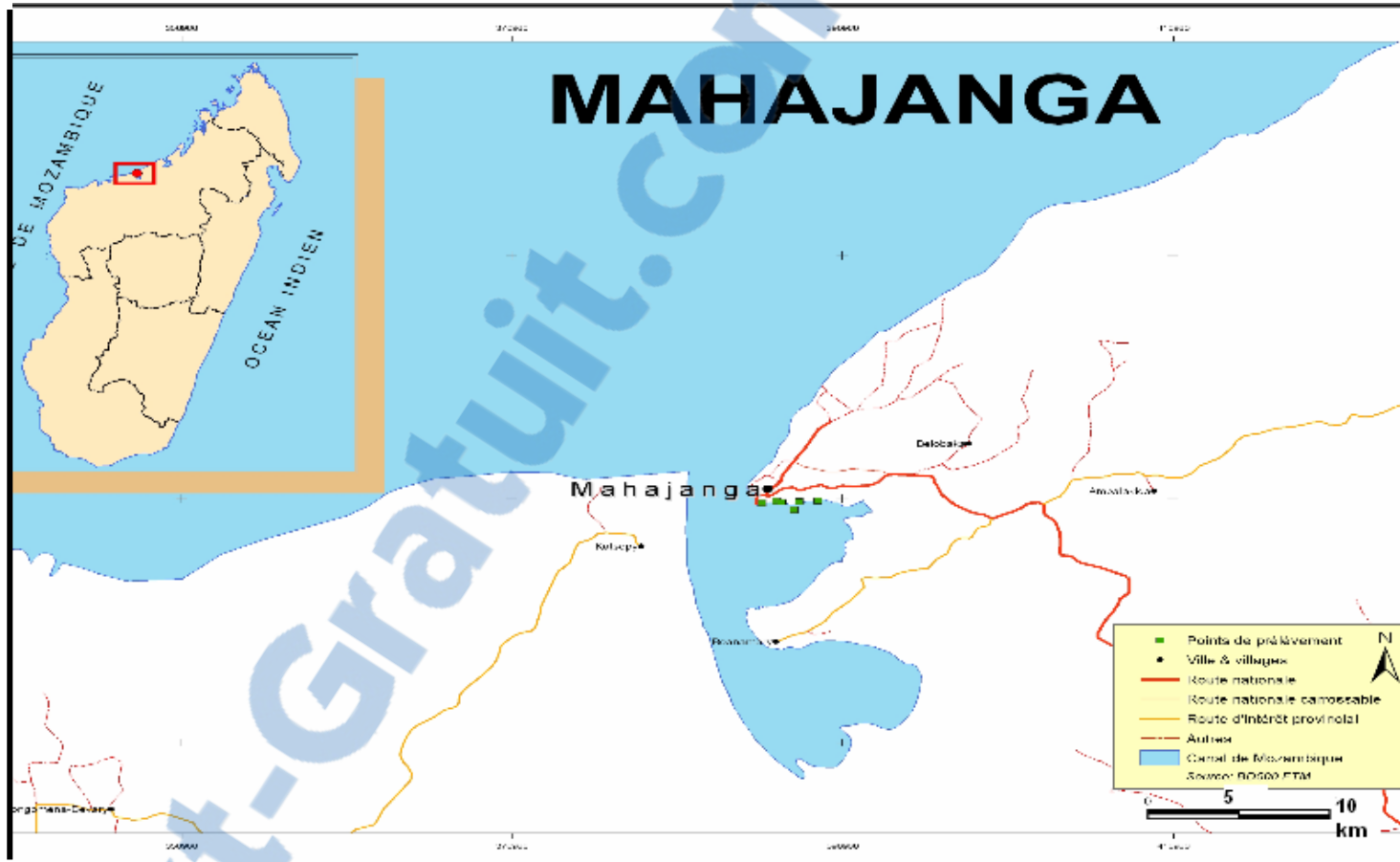
## **2. Localisation de la ville de MAHAJANGA**

La ville de Mahajanga se situe sur la côte Ouest de Madagascar sur l'embochure de la rivière Betsiboka et bordant le Canal de Mozambique.

Elle se trouve dans la Région de Boeny et appartient au district de Mahajanga. Elle se situe à 460 km d'Antananarivo en suivant la route nationale n°4.

La ville s'étale au bord de l'estuaire de Betsiboka, et s'étend sur une superficie de 53 km<sup>2</sup>. Elle est constituée d'une partie basse à sol sablo-argileux et d'une partie plus élevée, rocailleuse (Mangarivotra) et argileuse (Plateaux de Tombes-Ampisikina).

Le positionnement de la ville peut être repéré sur la carte de la figure n°8.



**Figure N°4:** Carte de localisation de la ville de Mahajanga

## **2.1. Présentation de la ville de Mahajanga [15]**

La ville se découpe en deux parties bien distinctes (le site interne et le site externe) séparées par une zone inondable très basse, constituées par le Vallon Metzinger et la mangrove d'Antsahabingo.

Le Site interne, partie ouest de la ville, limité à l'Est par le Vallon Metzinger, est essentiellement urbain et suit un schéma de développement organisé s'étendant sur Majunga Be et Mangarivotra.

Le site externe, zone d'extension de l'agglomération vers l'Est et le Nord-Est à partir de la rive gauche du Vallon Metzinger, se caractérise par un sous-développement très prononcé avec des quartiers désorganisés sans plan d'urbanisme, créés dans les années 70 alors que la ville connaît un important flux migratoire.

Globalement, on peut distinguer cinq types de quartiers :

- Quartiers modernes : Mahajanga Be et Mangarivotra constituent les quartiers aisés de la ville de Mahajanga. Ils sont dotés d'équipements collectifs et de réseaux d'assainissement et sont séparés des quartiers populaires par de grandes avenues
- Les quartiers populaires : qui se trouvent à l'Est du centre ville, bordant la rive droite du Vallon de Metzinger. Ces quartiers, de 5m d'altitude sont inondés périodiquement en saison de pluie. Les quartiers Mahabibo et Abattoir sont dominés par des cases en tôle. Les habitations sont très précaires et insalubres.
- Les quartiers populaires, souvent à haute densité, ne bénéficient que de quelques éléments socio-économiques de proximité (marchés, écoles, mosquées)
- Les quartiers spontanés : les habitats sont implantés sur la rive gauche du Vallon Metzinger, en périphérie des quartiers populaires et en zone inondable. Ces quartiers présentent des grandes caractéristiques : la prédominance des migrants, l'absence de lotissements, d'infrastructures et d'équipements collectifs adéquats.
- Les quartiers mixtes : Ce secteur s'étend de la partie Nord du quartier de Mahajanga Be au quartier de Mahavoky Avaratra. Les habitants sont spontanés à plus de 50%, mais on y trouve également des zones résidentielles sur les hauteurs ainsi que les équipements administratifs.
- Les quartiers ruraux : qui sont situés dans la zone Nord Est de la Ville. Les densités y sont très faibles. C'est ici que se concentrent les activités rurales de la ville.

Mahajanga Be, situé au port, occupe la façade occidentale de la ville. L'ensemble des activités et des fonctions urbaines y est concentré (quartier des affaires, commercial et résidentiel). C'est dans ces quartiers que l'on trouve l'architecture et l'urbanisation type de la



ville. On y trouve une concentration des équipements administratifs, scolaires, sanitaires et sportifs.

### **2.1.1. Population**

- nombre d'habitant est estimé à 250 000
- taille moyenne des ménages et de 5 à 6
- les 2/3 de la population Majungaise vivent en dessous du seuil de la pauvreté avec un salaire moyen de 42 €/mois.

### **2.1.2. Principales activités de la ville**

- L'activité portuaire : le port fait vivre non seulement plus de 1000 familles avec ses 1250 employés permanents ou temporaires (dockers), mais autour de lui gravitent également plusieurs activités
- La pêche
- Le tourisme
- Les industries textiles et savonneries
- Les industries agroalimentaires

## **2.2. Quelques problématiques environnementales de la ville de Mahajanga**

Certaines ouvrages de recherche sur l'assainissement de la ville et le PCD relèvent les points suivants :

- Presque toutes les eaux usées des entreprises et industries de Mahajanga, sont rejetées dans la mer, à part une partie qui s'infiltré dans le sous-sol environnant leur point d'implantation.
- La plupart de ces entreprises effectuent une analyse préalable dans leur laboratoire privé avant toute utilisation. Par contre, aucune entreprise n'effectue l'analyse et le traitement de ses eaux usées avant de les rejeter dans ses environs.
- La non application du Décret de 1968 sur la délimitation de la Zone Industrielle, située sur l'axe SOTEMA RN4. Après le cyclone Kamisy en 1984, une urbanisation sur les périphériques de la zone par des occupations illicites a été constatée. Les eaux usées des quartiers aux alentours du vallon Metzinger collectées par les canaux d'évacuation sont rejetées dans la mer.
- Le port a une faible profondeur due à l'ensablement de la baie provoqué par le fleuve Betsiboka.

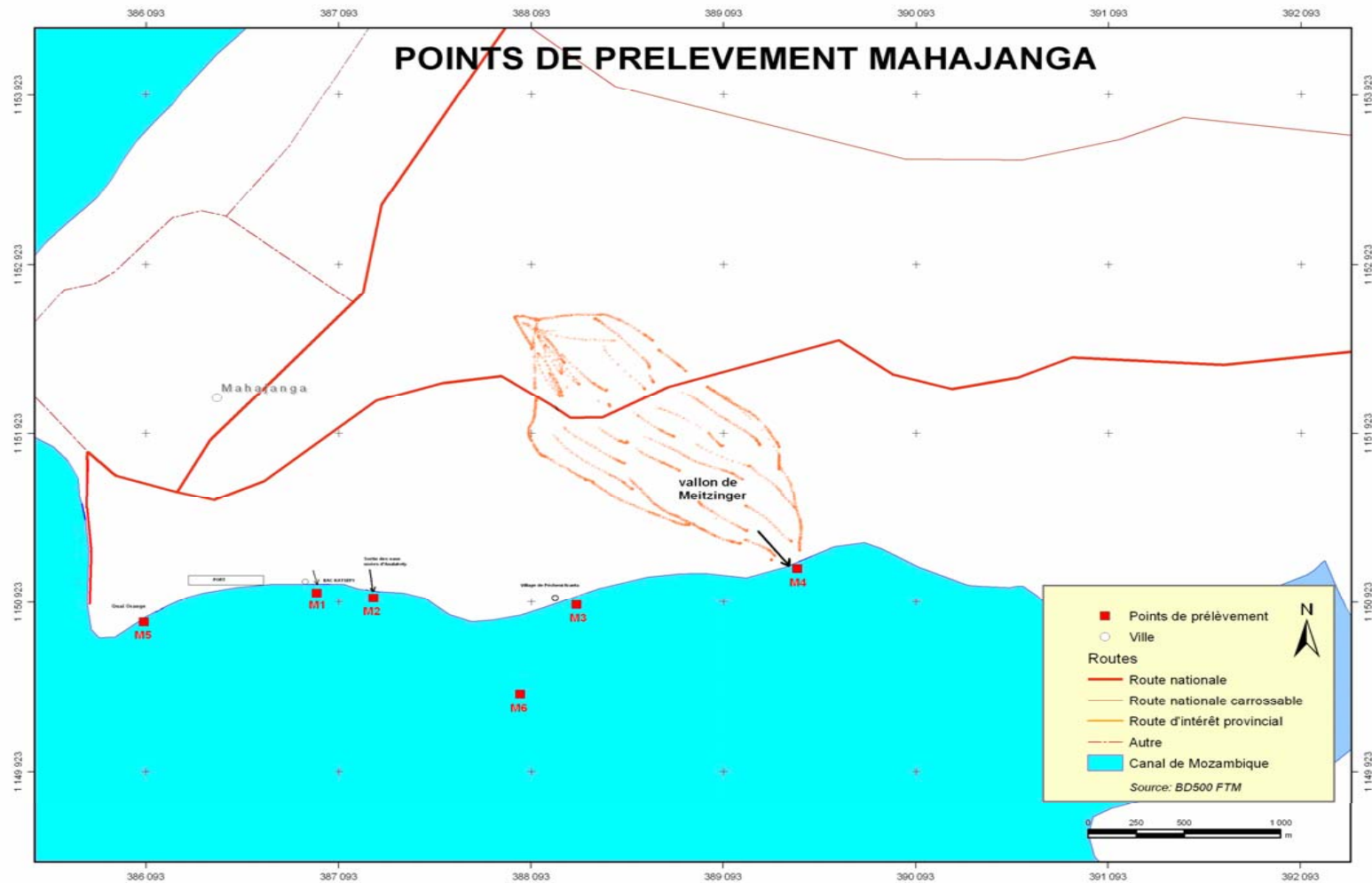
- Mahajanga connaît donc actuellement de gros problèmes de pollution, surtout au niveau de la mer environnante. Cette situation s'explique facilement par l'inexistence de points de traitement des eaux usées et des ordures ménagères.

Face à ces problématiques, actuellement, la Commune Urbaine de Mahajanga adopte une politique d'assainissement de la ville. Parmi ses objectifs, il y a non seulement la collecte et le traitement des déchets solides, mais également, l'évacuation des eaux usées et la recherche des alternatives pour leur traitement, afin de réduire la pollution urbaine provoquée par ces rejets. A l'exemple du traitement par compostage des ordures ménagères grâce à la coopération avec la Faculté des Sciences Université de Mahajanga.

### 2.3. Site de prélèvements à Mahajanga

**Tableau N°8 : Caractéristiques des six points de prélèvement de Mahajanga**

Ref. ech.	Description	Profondeur (m)	Latitude	Longitude
M1	Bac Katsepy	2	S15°43.570'	E46°18.913'
M2	Sortie d'eau usée venant du marché d'Analakely	1,4	S15°43.606'	E46°19.081'
M3	Village Aranta	1	S15°43.593'	E46°19.671'
M4	Sortie Vallon de Meitzinger FTIM/SIB	0,8	S15°43.563'	E46°23.311'
M5	Quai Orange	2	S15°43.644'	E46°18.411'
M6	Zone de référence	2,4	S15°43.963'	E46°18.913'



**Figure N°5:** Carte de localisation des six points de prélèvement de Mahajanga

### 3. Données existantes sur les effluents types de Mahajanga et de Nosy Be

Généralement, à Madagascar aucun port, même celui de Toamasina (port long courrier principal) ne dispose de récepteur d'eaux usées ou de déchets. Comme les eaux de ballaste ou de lavage de cale, tout est rejeté en mer. [16]

Des travaux ont été faits parallèlement à cette étude pour caractériser les eaux marines côtières des deux villes. Ainsi, NIRILALAINA Andriamandimbisoa [17] avait publié la teneur en métaux lourds d'effluent principaux de Mahajanga et de Nosy Be.

**Tableau N°9 : Caractéristiques de quelques effluents types de Mahajanga et de Nosy Be**

<b>Paramètres</b>	<b>Ambodivoanio (Nosy Be)</b>	<b>Vallée de Meitzinger (Mahajanga)</b>	<b>Pont Blanc (Mahajanga)</b>
Cadmium (ppb)	<i>1,08</i>	<i>1,41</i>	<i>1,07</i>
Chromate (mg/l)	<i>0,05</i>	<i>0,37</i>	<i>0,29</i>
Cuivre (mg/l)	<i>0,02</i>	<i>trace</i>	<i>trace</i>
Plomb (ppb)	<i>1,26</i>	<i>5,22</i>	<i>4,71</i>
Nickel (mg/l)	<i>2,42</i>	<i>2,03</i>	<i>1,18</i>
Fer (mg/l)	<i>0,57</i>	<i>0,97</i>	<i>0,99</i>
Manganèse (mg/l)	<i>0,12</i>	<i>0,09</i>	<i>0,08</i>
Zinc (mg/l)	<i>0,06</i>	<i>0,04</i>	<i>0,02</i>
Aluminium (mg/l)	<i>trace</i>	<i>0,20</i>	<i>0,14</i>
Phénol (mg/l)	<i>0,86</i>	<i>1,26</i>	<i>1,00</i>
Chlorure (mg/l)	<i>15620</i>	<i>234,30</i>	<i>127,80</i>

Source : A. NIRILALAINA [16]

**TROISIEME PARTIE :**  
**METHODES ET RESULTATS D'ANALYSE**

## TROISIEME PARTIE : METHODES ET RESULTATS D'ANALYSE

### **1. Techniques et méthodes d'analyse des métaux lourds dans les sédiments**

#### **1.1. Prélèvement des échantillons**

Les échantillons ont été prélevés de telle manière qu'elles peuvent représenter la zone d'étude tout entière. En effet, les points ont été choisis le long de la façade principale des villes et alignés aux repères des sorties d'effluents. Pour Nosy Be les six points longent une distance moyenne de 2km à 100m (distance moyenne) des rives. Tandis que pour Mahajanga, on compte 3,5 km entre le M5 à l'Ouest et le point M4 à l'Est.

Nous avons utilisé le préleveur en crabe montré par la photo N°1 ci après.



**Photo N°1 : Préleveur de sédiment type Van Veen grab**

#### **1.2. Stockage des échantillons de sédiments**

Les échantillons de sédiments sont pris dans des sachets hermétiques et étiquetés comme la montre la figure N°2. Ensuite, on le met en congélation pour le stockage.



**Photo N°2 : Conservation des échantillons de sédiments**

### 1.3. Minéralisation ou digestion

Nous avons procédé à la minéralisation totale des sédiments qui est une méthode simple (cf. ANNEXE N°3) dont l'efficacité suit la méthode des analyses de sédiment de référence certifié ou CRM provenant de l'AIEA.

Remarquons que pour se rassurer de l'efficacité de notre méthode nous avons procédé à des analyses de sédiment de référence certifiée ou CRM provenant l'AIEA.

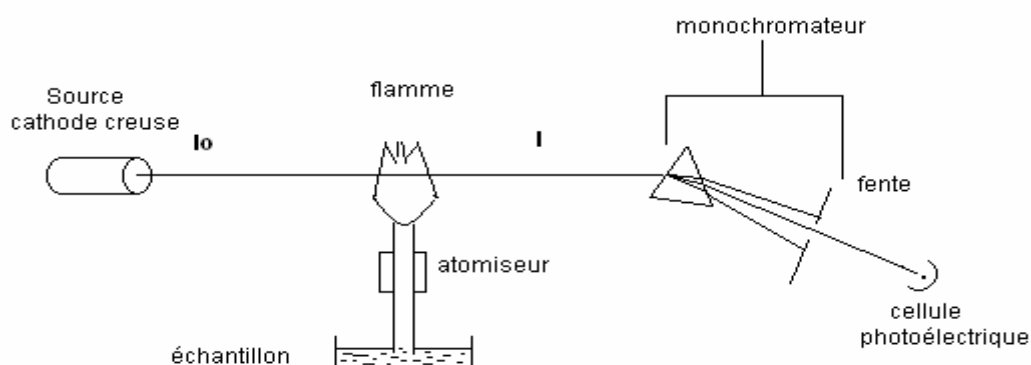
### 1.4. Appareils de dosage des métaux [10]

Après la minéralisation totale des sédiments, on procède à la filtration et à l'analyse du filtrat. Nous avons utilisé trois méthodes différentes pour la quantification des métaux selon la disponibilité technique des appareils vis-à-vis des éléments :

- spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme (SAAF) : Fe, Cu, Mn, Cr, Zn
- spectrophotomètre NOVA 60 : Ni (mode opératoire cf. ANNEXE N°4)
- kit voltamétrique : Pb, Cd

#### 1.4.1. Principe de la spectrométrie d'absorption atomique

Un spectrophotomètre d'absorption atomique comprend : une source lumineuse, une cellule d'absorption, un monochromateur pour isoler la raie de résonance et un détecteur de photons suivi d'un amplificateur pour transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique.



**Figure N°6 : Principe d'un spectromètre d'absorption atomique à flamme [10]**



**Photo N°3 : Spectrophotomètre absorption atomique flamme SOLAR (CNRE)**

Source lumineuse : Cette source doit émettre le spectre de l'élément dosé, voir une stabilité d'émission dans le temps. Le métal dont on veut obtenir le spectre est contenu dans un enceinte close qu'on soumet à un champ électrique (cathode creuse) ou magnétique (lampes à décharge ou EDL) pour obtenir une vapeur puis une excitation des électrons.

Cellule d'absorption : Elle est constituée généralement par un atomiseur et un brûleur dont l'objectif est de transformer la solution en gaz selon le processus suivant :

<b>Processus</b>	<b>Etat</b>	<b>Phase</b>
	$M^+ + A^-$	solution
Nébulisation	↓	
	$M^+ + A^-$	aérosol
Désolvatation	↓	
	MA	Solide
Liquéfaction	↓	
	MA	liquide
Vaporisation	↓	
	MA	gaz
Atomisation	↓	
	$M^0 + A^0$	gaz
Excitation	↓	
	$M^*$	gaz
Ionisation	↓	
	$M^+ + e^-$	Gaz

**Figure N°7 : Principe d'une cellule d'absorption d'un SAAF**

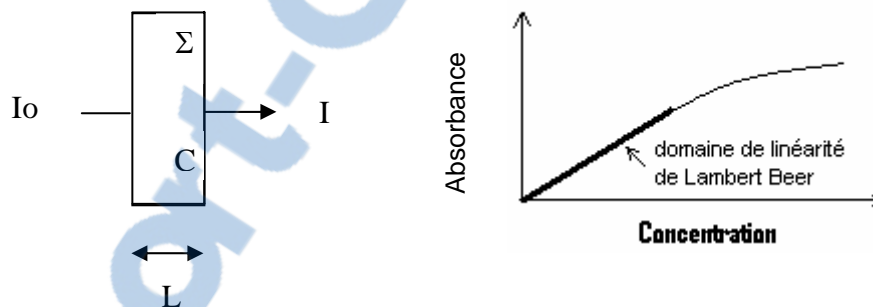


Flammes : Les flammes acétylène/air ( $\sim 2300^{\circ}\text{C}$ ), acétylène/protoxyde d'azote ( $\sim 2800^{\circ}\text{C}$ ) ; Elles sont faciles d'emploi mais ne permettent pas de grandes limites de détection (environ  $100\mu\text{g/l}$ )

#### 1.4.2. Principe de la spectrophotométrie UV-VIS

La spectrophotométrie UV-VIS est basée sur la propriété des éléments d'absorber un rayon lumineux. Elle est utilisable sur toute la longueur du spectre : de l'UV (220 nm) au proche IR ( $1\mu\text{m}$ ). Lorsque le corps à mesurer est peu absorbant, on lui ajoute un réactif spécifique pour former un nouveau produit absorbant. Le rapport entre l'intensité du rayon incident et celle du rayon transmis (Transmittance) est en relation directe avec la concentration de l'élément à mesurer selon la loi de Lambert et Beer.

Absorbance =  $\log I_0 / I = \Sigma . C . L$  (Loi de Lambert et Beer)



**Figure N°8 : Principe de Spectrophotométrie UV-VIS [10]**

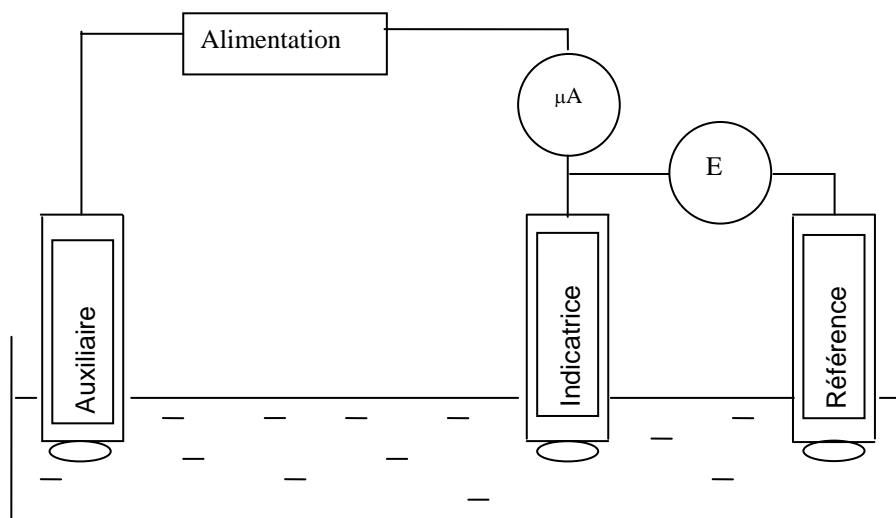


**Photo N°4 : Photomètre spectroquant NOVA 60 (CNRE)**

### 1.4.3. Méthode voltamétrique

Un voltamètre fonction comme suit : on applique dans une cellule de mesure contenant la solution à analyser, une tension  $E$  variable au cours du temps. On mesure le courant  $i$  engendré.

- L'électrode indicatrice, sur laquelle se produit l'oxydation ou la réduction des substances analysées
- L'électrode auxiliaire assure le passage du courant ; sa nature a peu d'importance.
- L'électrode de référence, de potentiel constant, permet d'imposer à l'électrode indicatrice un potentiel connu  $E$  en faisant varier la valeur de  $V$ .



**Figure N°9** : Principe d'un système voltamétrique [10]



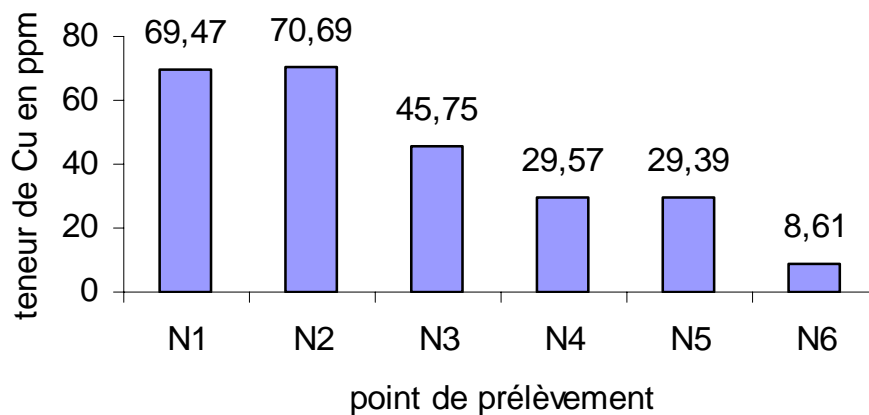
**Photo N°5** : « trace element analyser » pour l'analyse de métaux lourds (CNRE)

## 2. Remarque générale sur les résultats

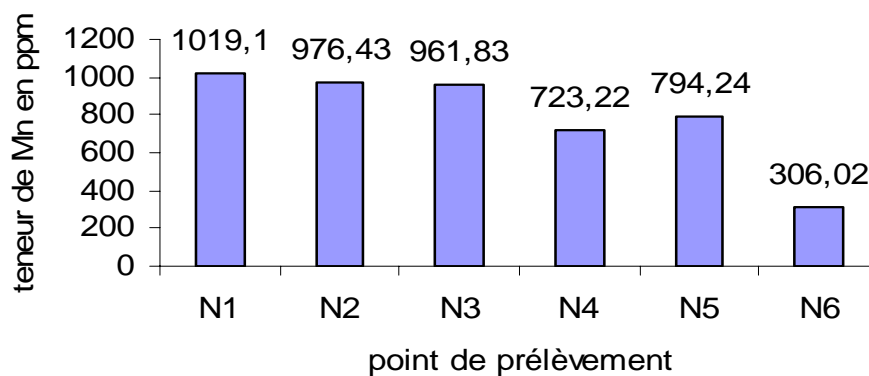
Les résultats affichés ci-dessous sont les moyennes de nos essais sur chaque point que ce soit pour Mahajanga ou pour Nosy Be. Les résultats sont exprimés par rapport aux sédiments secs.

## 3. Distribution des métaux sur les six points de prélèvement de Nosy-Be

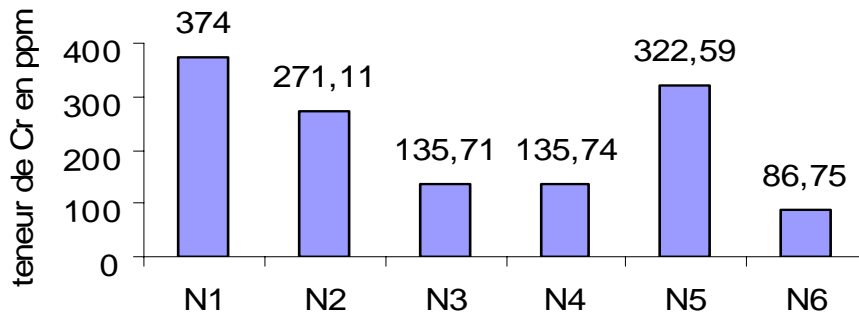
Les résultats des teneurs en métaux pour Nosy Be sont configurés dans les diagrammes qui se succèdent ci-après :



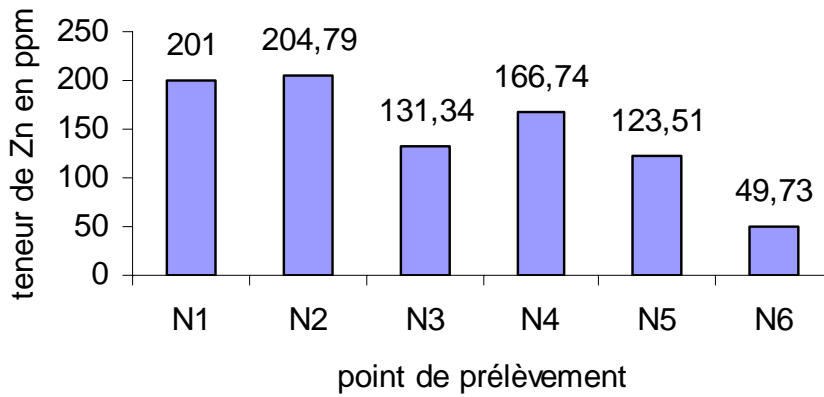
**Figure N°10 : Teneur en cuivre des sédiments de Nosy Be**



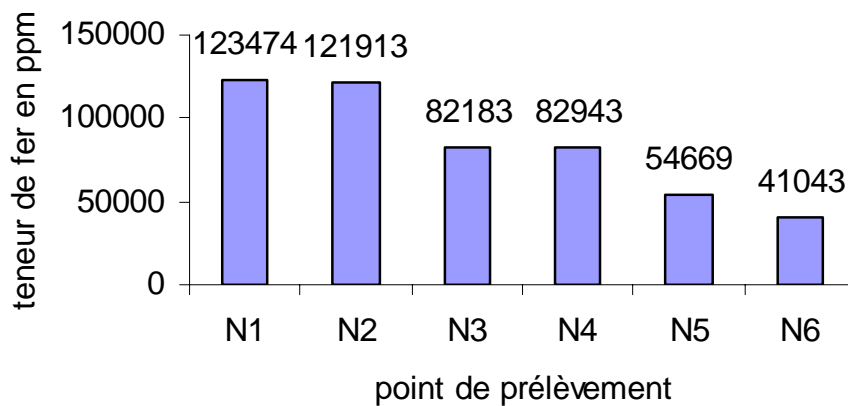
**Figure N°11 : Teneur en manganèse des sédiments de Nosy Be**



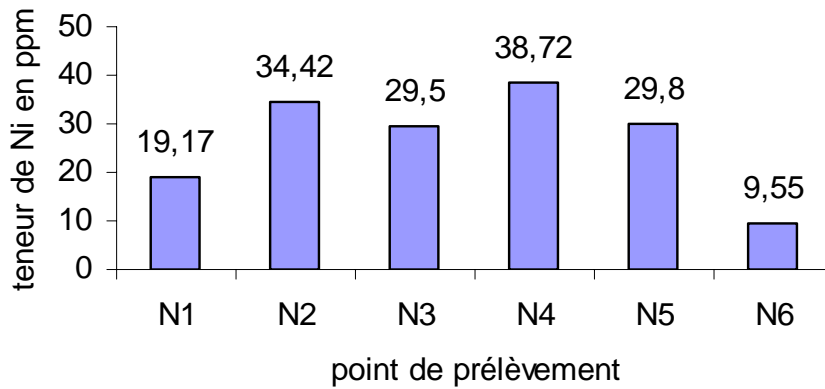
**Figure N°12 : Teneur en chrome des sédiments de Nosy Be**



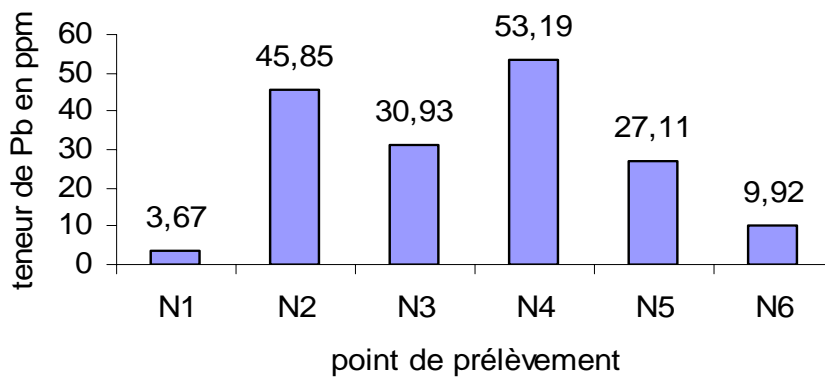
**Figure N°13 : Teneur en zinc des sédiments de Nosy Be**



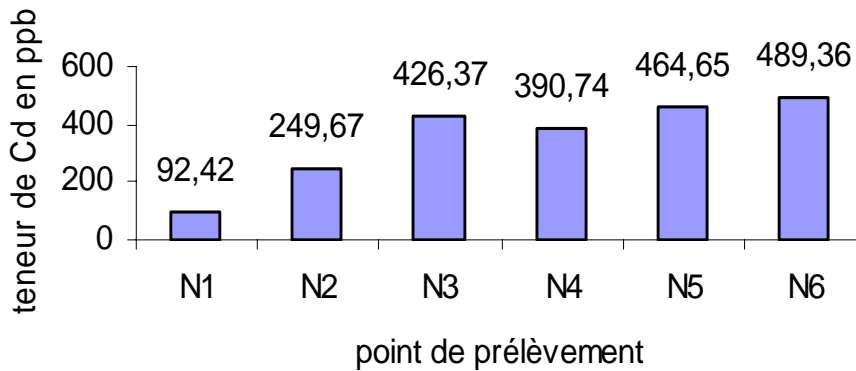
**Figure N°14 : Teneur en fer des sédiments de Nosy Be**



**Figure N°15 : Teneur en nickel des sédiments de Nosy Be**



**Figure N°16 : Teneur en plomb des sédiments de Nosy Be**



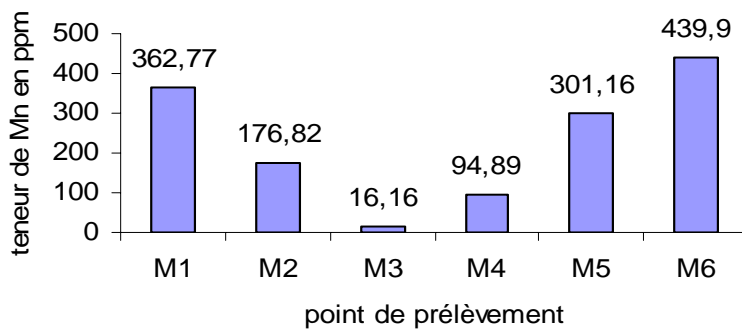
**Figure N°17 : Teneur en cadmium des sédiments de Nosy Be**

#### 4. Commentaire sur les teneurs en Fe, Cr, Zn, Mn et le Cu des sédiments de Nosy Be

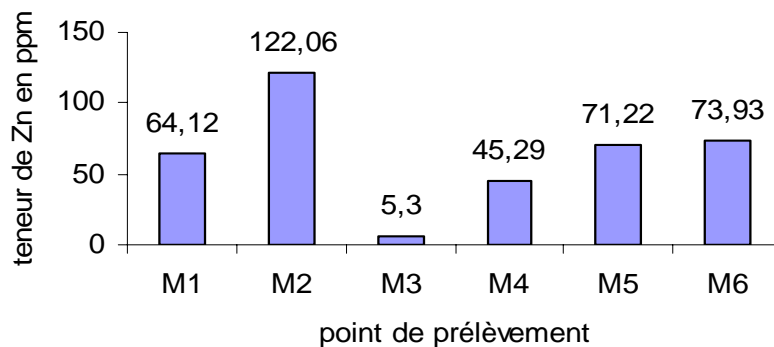
Le Fe, Cr, Zn, Mn et le Cu ont une allure décroissante de distribution de N1 à N6. Les valeurs maximales sont attribuées au point N1 tandis que les minima sont attribués au point N4 (pour le Cr, Mn) et au point N5 (pour Cu, Zn, Fe). Ce qui signifie que les sédiments du N1, N2, N3 seraient les plus chargés. Cela nous semble évident, puisque ces points sont les plus proches des rejets directs urbains et des bords, donc plus sensibles aux érosions et aux apports telluriques. Pour le Ni et le Pb les valeurs maximales respectives de 38 ppm et 53 ppm sont attribuées au point N4. La valeur minimale est 9 ppm pour le Ni et 3 ppm pour le plomb.

#### 5. Distribution des métaux sur les six points de prélèvement de Mahajanga

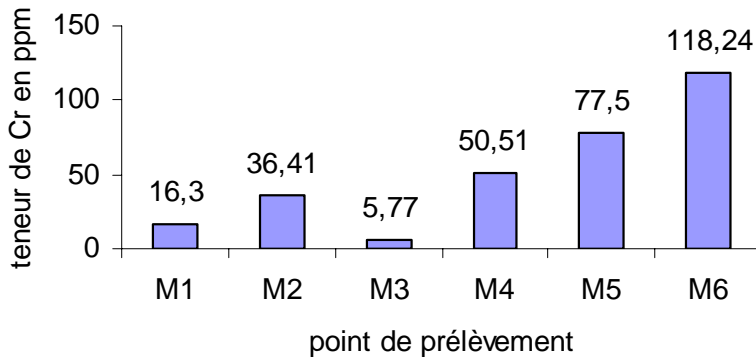
Les teneurs en différents métaux des sédiments de Mahajanga peuvent être visionné à partir des diagrammes qui se suivent :



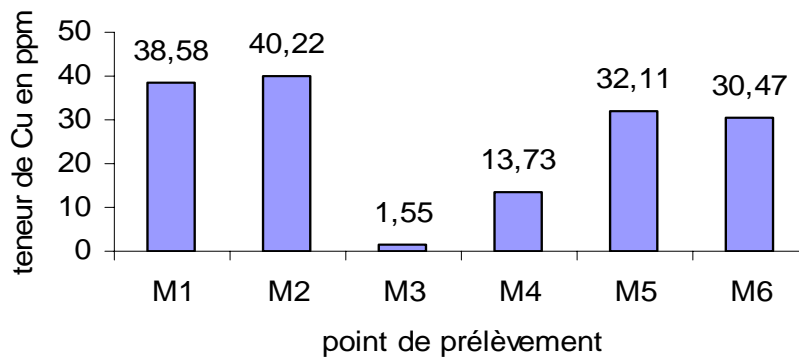
**Figure N°18: Teneur en manganèse des sédiments de Mahajanga**



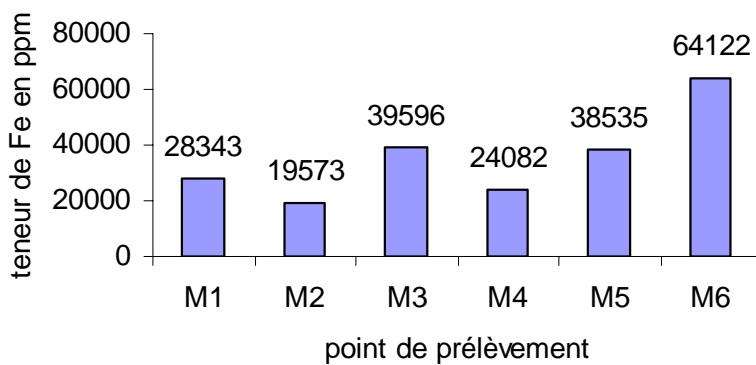
**Figure N°19: Teneur en zinc des sédiments de Mahajanga**



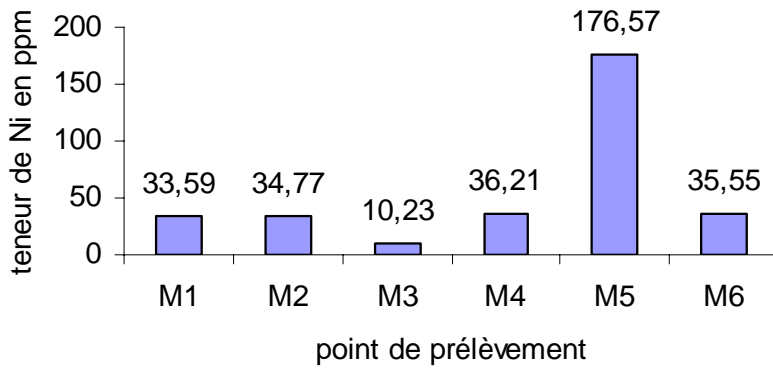
**Figure N°20: Teneur en chrome des sédiments de Mahajanga**



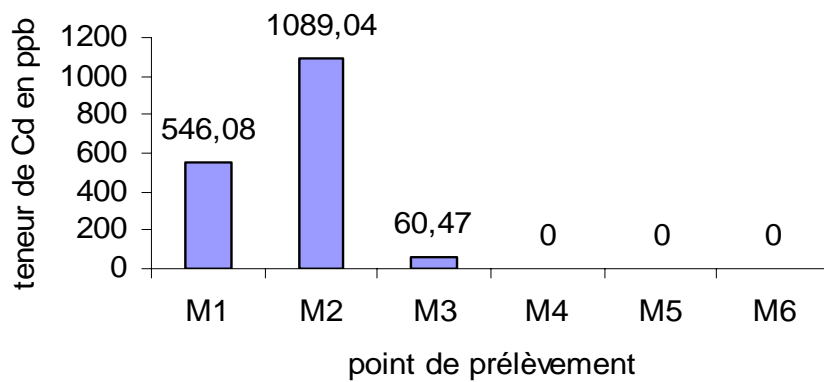
**Figure N°21 : Teneur en cuivre des sédiments de Mahajanga**



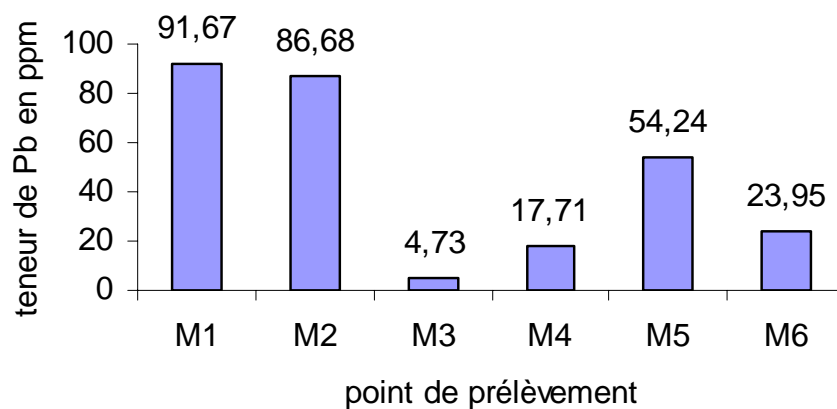
**Figure N°22 : Teneur en fer des sédiments de Mahajanga**



**Figure N°23 : Teneur en nickel des sédiments de Mahajanga**



**Figure N°24 : Teneur en cadmium des sédiments de Mahajanga**



**Figure N°25 Teneur en plomb des sédiments de Mahajanga**



## 6. Commentaire sur les teneurs en Fe, Cr, Zn, Mn et le Cu des sédiments de Mahajanga

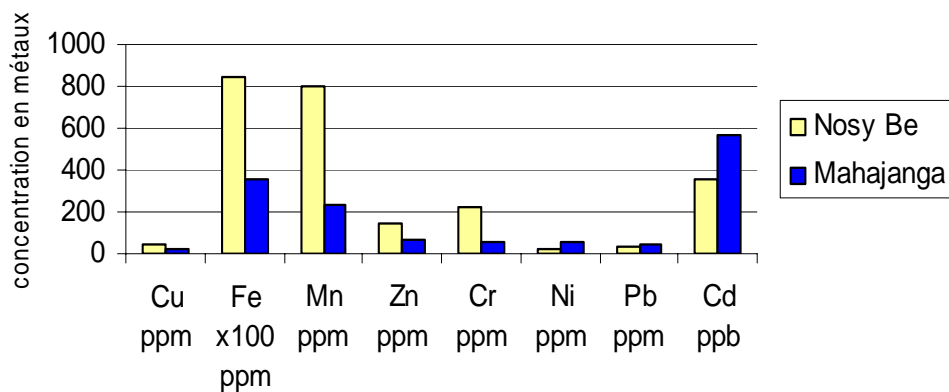
La variation de la distribution sur les six points du Fe, Mn, Zn, Cu et du Cr est à peu près la même, à la différence que les deux points M1 et M2 n'ont pas d'allure constante. Cette différence peut s'expliquer par le fait que ces deux points sont perturbés directement par l'activité portuaire.

A part les anomalies constatées aux points M1 et M2, on remarque aussi une certaine ressemblance entre la distribution du Plomb et celle du nickel. Le maximum du plomb (91 ppm) se situe au point M1 tandis que ceux du nickel au point au point M5 (170 ppm).

Sur les points M4, M5 et M6, on ne détecte aucun teneur en Cd. Par contre, les valeurs trouvées sur les points M1 et M2 sont relativement élevées et atteignent 1000ppb en cadmium.

## 7. Etude comparative des teneurs en métaux lourds entre Mahajanga et Nosy-Be

Il nous est paru important de comparer les résultats obtenus sur les deux sites d'étude puisque les deux villes sont des « hot spots » et elles constituent deux modèles d'étude : un îlot de 300 km<sup>2</sup> et une ville estuarienne moyennement industrialisée. Ainsi, la figure N°26 nous montre cette comparaison.



**Figure N°26 : Diagramme comparative de la teneur des métaux**

## 8. Conclusion partielle sur l'étude comparative entre Nosy Be et Mahajanga

La figure N°26 nous indique une comparaison des teneurs moyennes des métaux dans le sédiment entre Mahajanga et Nosy-Be. Les valeurs moyennes sont obtenues sur les six points de prélèvement de chaque site.

Pour les cinq éléments « non toxiques » : Cu, Mn, Fe, Zn, Cr, Nosy-Be affiche des teneurs deux fois plus grandes que Mahajanga contrairement au cas des Pb, Cd et Ni. Cela peut s'expliquer par la géologie latéritique des sols de Nosy Be ainsi que les fortes pentes des rives. Et que Mahajanga enregistre plus de population et d'industrie que Nosy Be, donc plus de Pb, de Cd et de Ni.

Notons que, quelque soit le site de travail, des groupes d'élément ont la même allure de distribution.

Le Fe, Cr, Zn, Mn et le Cu ont généralement la même allure de distribution du point n°1 au point de référence n°6. Il en est de même pour le Ni et le Cd. Seule le Pb a une distribution unique sur les six points. Cela s'explique par la ressemblance des caractères physico-chimique des éléments.

Généralement, la faible valeur des métaux au site de Mahajanga par rapport à celle de NosyBe peut s'expliquer d'une part par le phénomène de dilution qu'engendre Betsiboka et d'autre part par le caractère peut adsorbant des sédiments (sédiments sableux) dû au lessivage par les courants fluviaux, d'autant plus que les profondeur sont relativement faible (profondeur moyenne : 1,6m pour Mahajanga contre 4,1 m pour Nosy Be).

## 9. Comparaison des résultats obtenus avec des données existantes ailleurs en Afrique

Le tableau n°5 nous a montré les teneurs de certain métaux en mg / kg dans quelque région d'Afrique. Comparées à ces valeurs, les déterminations faites à Nosy Be et à Mahajanga peuvent s'interpréter comme suit :

- Les valeurs maximums de 1,089ppm de cadmium pour Mahajanga et de 0,489 ppm pour Nosy Be semblent être des valeurs normaux comparées à ceux des sédiments non pollués (entre 0,2-5 ppm de Cd).

- Si les sédiments non pollués ont des valeurs comprises entre 8-60 ppm de plomb, les résultats trouvés à Mahajanga sur deux points de prélèvement (M1 et M2) ont des valeurs supérieures à 60ppm et un autre point (M5) à 54 ppm. Ce qui indique que la côte Majungaise est subit une pollution en plomb. Par contre, pour Nosy Be seuls deux points affichent des valeurs proches de 60ppm (N2 : 45ppm et N4 : 53ppm). La situation s'avère donc critique pour Nosy Be.

- En ce qui concerne les autres métaux, les constats suivants sont faits :

- 201 ppm de Zn pour Nosy Be contre 147 ppm de Zn pour la Côte Atlantique au Nigéria ;
- 38 ppm et 70 ppm sont respectivement les valeurs maximums de Cu pour Mahajanga et pour Nosy Be contre 15 ppm à Lagos ;
- le fer est de 123474 ppm pour Nosy Be (N1) contre 36380 ppm pour la Lagune de Lagos. Il faut remarquer les points N1 et N2 se troublent en rouge (érosion).

Ces comparaisons nous permettent de dire que les teneurs en métaux non toxiques dont le Fe, Cu, Zn et le Mn sont élevées pour Mahajanga et plus particulièrement pour Nosy Be, par rapport à celles d'autre région d'Afrique. Ce qui serait dû à la forte érosion des côtes (sol latéritique à pente élevée).

Par rapport aux zones industrialisées comme Liverpool en Angleterre et au Baie de Djakarta en Indonésie (ANNEXE N°5) les valeurs des teneurs en métaux lourds des sédiments d'Afrique, donc de Mahajanga et de Nosy Be sont relativement faibles.

## **10. Résultats liés aux caractéristiques du sédiment de Mahajanga et de Nosy Be**

### **10.1. Humidité**

Le tableau ci-après nous montre la teneur en humidité des sédiments sur les deux sites de Nosy Be et de mahajanga.

La teneur moyenne des sédiments en humidité est de 42% pour Nosy- Be contre 33% pour Mahajanga. Cela nous laisse penser qu'il y a une différence entre les caractéristiques des sédiments car les conditions de prélèvement, de traitement et de stockage sont les mêmes. Betsiboka pourrait être la cause de cette différence vu que les courants du fleuve pourraient emporter les fines particules plus absorbantes d'eau.

**Tableau N°10 : Comparaison du pourcentage d'humidité des sédiments de Nosy Be et de Mahajanga**

Point n°	Humidité %	
	Nosy-Be	Mahajanga
<b>1</b>	38,17	34,52
<b>2</b>	44,05	30,68
<b>3</b>	44,45	15,43
<b>4</b>	40,18	31,61
<b>5</b>	40,56	41,32
<b>6</b>	44,11	47,97
<b>Moy %</b>	41,92	33,59

### 10.2. Distribution des métaux dans le système sédiment/eau

Tout en considérant les résultats de l'étude antérieure [17] faite par NIRILALAINA sur la qualité des eaux marines côtières de Mahajanga et de Nosy-BE (travaux parallèle à la présente étude), combinés avec les données obtenues sur les sédiments, nous pouvons tirer la distribution des métaux dans le milieu eau/sédiment.

Il faut noter que les eaux prélevées au fond ont été filtrées sur papier filtre 0.45 µm afin de bien distinguer les métaux diffusés par rapport à ceux adsorbés sur les particules flottantes.

## 10.2.1. Distribution des métaux dans le système sédiment/eau à Nosy Be

**Tableau N°11 : Distribution verticale des métaux dans les sédiments de Nosy Be**

Métaux		Unité	Points de prélèvement					
			N1	N2	N3	N4	N5	N6
<b>Cadmium</b>	Surf	ppb	1,053	1,693	1,152	1,77	1,688	0,907
	Fond	ppb	1,196	0,907	0,733	1,482	1,719	0,771
	Séd	ppb	92,42	249,67	426,37	390,74	464,65	489,36
<b>Cuivre</b>	Surf	mg/l	0,012	0,015	0,015	0,014	0,016	0,015
	Fond	mg/l	0,017	0,01	0,01	0,013	0,01	0,018
	Séd	ppm	69,47	70,69	45,75	29,57	29,39	8,61
<b>Plomb</b>	Surf	ppb	3,081	1,381	1,336	1,341	0,956	0,636
	Fond	ppb	9,065	3,705	3,557	6,08	3,115	2,052
	Séd	ppb	3671	45857	30929	53193	27114	9917
<b>Nickel</b>	Surf	mg/l	1,41	1,43	1,67	1,51	2,24	1,56
	Fond	mg/l	2,22	2,57	2,49	2,61	2,63	2,16
	Séd	ppm	19,17	34,42	29,5	38,72	29,8	9,55
<b>Fer</b>	Surf	mg/l	0	0	0	0	0	0
	Fond	mg/l	0,089	0,134	0,22	0,517	0,258	0,057
	Séd	ppm	123474	121913	82183	82943	54669	41043
<b>Manganèse</b>	Surf	mg/l	0,019	0,006	0,012	0,011	0,018	0,011
	Fond	mg/l	0,039	0,025	0,023	0,04	0,022	0,011
	Séd	ppm	1019,1	976,43	961,83	723,22	794,24	306,02
<b>Zinc</b>	Surf	mg/l	0,055	0,053	0,059	0,06	0,055	0,059
	Fond	mg/l	0,071	0,096	0,084	0,063	0,097	0
	Séd	ppm	201	204,79	131,34	166,74	123,51	49,73

## 10.2.2. Distribution des métaux dans le système sédiment/eau à Mahajanga

**Tableau N°12 : Distribution verticale des métaux dans les sédiments de Mahajanga**

Métaux		Unité	Points de prélèvement					
			M1	M2	M3	M4	M5	M6
<b>Cadmium</b>	Surf	ppb	0,922	1,414	1,391	1,257	1,225	1,306
	Fond	ppb	1,185	1,093	1,245	0,872	1,273	1,803
	Séd	ppb	546,08	1089,04	60,47	0	0	0
<b>Cuivre</b>	Surf	mg/l	trace	trace	trace	trace	trace	trace
	Fond	mg/l	trace	trace	trace	trace	trace	trace
	Séd	ppm	38,58	40,22	1,55	13,73	32,11	30,47
<b>Plomb</b>	Surf	ppb	4,074	2,692	2,76	2,56	2,122	3,137
	Fond	ppb	1,596	2,474	1,724	1,958	1,91	2,05
	Séd	ppb	91677	86681	4725	17709	54239	23945
<b>Nickel</b>	Surf	mg/l	0,29	0,28	0,61	0,56	0,26	0,23
	Fond	mg/l	0,4	0,44	0,17	0,66	0,17	1,2
	Séd	ppm	33,59	34,77	10,23	36,21	176,57	35,55
<b>Fer</b>	Surf	mg/l	0,043	0,049	0,053	0,293	0,05	0,061
	Fond	mg/l	0,012	0,014	0,017	0,004	0,012	0,009
	Séd	ppm	28343	19573	39596	24082	38535	64122
<b>Manganèse</b>	Surf	mg/l	0,01	0,012	0,009	0,034	0,012	0,014
	Fond	mg/l	0,012	0,02	0,007	0,009	0,007	0,001
	Séd	ppm	362,77	176,82	16,16	94,89	301,16	439,9
<b>Zinc</b>	Surf	mg/l	trace	trace	trace	0,001	trace	trace
	Fond	mg/l	trace	trace	trace	trace	0,014	trace
	Séd	ppm	64,12	122,06	5,3	45,29	71,22	73,93

### 10.3. Interprétations de la distribution des métaux dans le système sédiment/eau

A l'exception du plomb et du cadmium dont les résultats sont exprimés en ppb. Les teneurs en métaux des eaux en surface (surf) et du fond sont exprimées en mg/l, tandis que celles des sédiments (séd) sont exprimées en ppm (mg/Kg). Malgré cette différence d'expression, on peut à première approximation, dire que 1mg/l d'eau de mer correspond à 1ppm = 1mg/kg (car la densité de l'eau de mer est de 1,037). Cette hypothèse nous permet d'établir la distribution des métaux sur le système eau/sédiment.

Tout en éliminant les valeurs qui nous paraissent aberrantes, on arrive à dresser le tableau n°11 qui nous donne le pourcentage des métaux diffusés dans l'eau par rapports à ceux fixés aux sédiments. Ces valeurs nous indiquent l'affinité des métaux à se fixer sur les particules des sédiments. Ainsi, le fer et le manganèse sont les moins diffusés, ils forment donc une partie intégrante du sédiment.

**Tableau N°13 : Pourcentage des métaux diffusés pour les sédiments de Nosy Be et de Mahajanga**

Métaux	Nosy Be	Mahajanga
<b>Fer</b>	28 x10 <sup>-5</sup>	4 x10 <sup>-5</sup>
<b>Manganèse</b>	344 x10 <sup>-5</sup>	1165 x10 <sup>-5</sup>
<b>Plomb</b>	0,013	0,011
<b>Zinc</b>	0,044	0,020
<b>Cadmium</b>	0,452	0,778
<b>Cuivre</b>	0,058	-
<b>Nickel</b>	7,907	1,516

Ce tableau nous montre que le plomb reste le métal le plus facilement adsorbé sur les sédiments. Les valeurs affichées confirment la littérature sur le classement des potentiels adsorbants des métaux sur les sédiments cité dans § 3.2. de la première partie.

A l'exception du manganèse et du cadmium les sédiments de Mahajanga fixent plus fortement les métaux que ceux de Nosy Be. Cela semble dire que les sédiments de Mahajanga s'incrusteront de métaux immobilisés (inertes par effet de vieillesse) et que ces métaux subsistent malgré la forte dilution et le courant de Betsiboka.

## **11. Suggestions pour l'amélioration de la situation**

Les apports en métaux des effluents ne sont pas négligeables d'après les données obtenues sur quelques effluents types. Pourtant, la mise en place d'une station de traitement des eaux municipales serait utopique vu que les grandes villes comme Antananarivo n'en possède même pas. D'autant plus que, la basse altitude et la disposition des villes côtières rendent difficile cette option. Le plus intéressant pour la ville de Mahajanga et de Nosy Be serait de préserver les mangroves de bas fond pour en faire des zones de rétentions pour lagunage et pour décantation naturelles. A Nosy Be, le quartier d'Ambodivoanio semble répondre à cette nécessité ; Et Pour Mahajanga, Le Vallon de Metzinger pourrait être le lieu idéal.

A part le traitement des eaux municipales, les entreprises devraient songer à traiter leur propre rejet et renforcer la mise en œuvre du Décret MECIE.

En ce qui concerne les déchets solides une mode de collecte régulière et une bonne disposition des bacs de collecte d'ordures réduiraient pertinemment les rejets directs en mer. Et vient ensuite le bon contrôle de la mise en décharge et de l'incinération.

Les efforts de récupération et de valorisation des déchets doivent être encourager, comme le cas de petite station de compostage des ordures à Mahajanga [20]. Il en est de même pour les efforts de triage en amont des ordures.

Pour des industries encore à l'état de projets, la protection de l'environnement est possible si l'on commence par évaluer les effets potentiels de leurs activités sur l'environnement par les études d'impacts environnementaux et si l'on adopte des procédés de fabrication propres dès le stade de la conception.

Le gros du travail passe toujours par l'Information, l'Education et la Communication (IEC) de la population et les acteurs de développements tel que les transporteurs maritimes et les industriels, tous bénéficiaires d'un environnement sain. Puis, la mise en œuvre des lois et réglementations en vigueur. Et, la "comptabilité" de l'environnement, qui suppose l'auto réglementation, doit être aussi encouragée dans le milieu des affaires et s'insérer dans une politique générale de gestion de l'environnement. Puisque l'avantage est que l'auto réglementation est souvent plus efficace que l'observance de règles officielles, qui ne peuvent pas prendre en compte tous les cas particuliers.



## CONCLUSION

La pollution tellurique existe belle et bien dans les côtes de la ville de Mahajanga et de Nosy Be. En effet, les éléments non toxiques d'origine terrestre tels que le fer, le manganèse, le zinc et le cuivre se trouvent en quantité relativement élevée dans les sédiments de ces deux villes (sauf le fer pour Mahajanga) par rapport à d'autre région d'Afrique. A concentration élevée, ces éléments peuvent présenter des dangers pour les organismes marins. La teneur en plomb et celle en cadmium, reconnus pour leur propriété toxique, accusent des valeurs supérieures à la normale sur des points proches du port de Mahajanga. Tandis qu'à Nosy Be, certains points de prélèvement affichent des valeurs proches mais encore en dessous de la limite normale en plomb et en cadmium.

Ces teneurs en métaux ne sont pas les seuls faits des rejets non traités dont l'apport n'est pas négligeable, mais aussi de la combinaison de différentes sources plus complexes (industrielles, activités portuaires, atmosphériques,...). A part les résultats sur la teneur en métaux des sédiments de ces deux zones, il en découle de cette étude des confirmations scientifiques. Ainsi, le fer et le manganèse font partie des composants entiers des sédiments. Le plomb, le zinc, le cadmium, le cuivre et puis le nickel s'adsorbent respectivement d'une force décroissante sur les particules sédimentaires.

Il est vrai que la détermination de la teneur en métaux lourds de certain biote donnerait un aspect plus concluant à cette étude, mais nous pensons que ce serait plus explicite de le développer dans un autre ouvrage.

Certes, des efforts ont été faits, d'autres travaux commencent et doivent être encouragés sur l'amélioration de la qualité de notre environnement. Mais, avec l'intensification probable de l'urbanisation et des activités socio-économiques, il va falloir identifier les sources et quantifier les déversements de métaux lourds dans les environnements aquatiques. Il importe aussi d'élaborer, au niveau national, des mesures de lutte contre la pollution, mesures qui devraient inclure la législation, les normes et critères, la minimisation de la production de déchets, le traitement des effluents, le suivi permanent, la formation, l'éducation et la sensibilisation du public.

Cette étude ne constitue donc, qu'une infime partie de tous les travaux qui doivent être réalisés. Des contrôles périodiques doivent être effectués pour mieux conclure les résultats. De plus, le nouveau mode de gestion intégrée de zone côtière qui commence à prendre le dessus, doit beaucoup aider à l'aboutissement de ce genre de travaux.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. AMINOT et M. CHAUSSEPIED, 1983. Manuel des analyses chimiques en milieu marin ; Centre National pour l'Exploitation des Océans ; 395p
- [2] Organisation Maritime Internationale (OMI), 1988. Stratégie pour la protection du milieu marin.
- [3] J. MORILLO, J. USERO, I. GRACIA, 2004. Heavy metal distribution in marine sediments from the southwest coast of Spain. Department of Chemical and Environmental Engineering, University of Seville Spain. Chemosphere 55 (2004) 431–442
- [4] M. MORLOT (coordonnateur de l'Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux), 1990. Aspect analytique du plomb dans l'environnement ; Lavoisier TEC DOC
- [5] SERPAUD, R. AL-SHUKRY, M. CASTEICNAU et G. MATEJKA, Octobre 1994. Revue des sciences de l'eau ; Adsorption des métaux lourds (Cu, Zn, Cd, et Pb) par les sédiments superficiels d'un cours d'eau : rôle du pH, de la température et de la composition du sédiment 7 (1994) p 343 - p 365
- [6] R. LACROIX - Encyclopaedia universalis, 1985. Editeur à Paris.
- [7] Conseil Supérieur d'Hygiène publique de France (section de l'alimentation et de la nutrition), 1990. Plomb, cadmium et mercure dans l'alimentation : évaluation et gestion du risque.
- [8] C. BINEY, A.T. AMUZU, D. CALAMARI, N. KABA, I.L. MBOME, H. NAEVE, O. OCHUMBA, O. OSIBANJO, V. RADEGONDE et M.A.H. SAAD, 1995 ; Revue de la pollution dans l'environnement aquatique africain : étude des métaux lourds ; FAO Département des pêches.
- [9] J. P. VILLENEUVE, July 2004. Training manual on the measurement of organochlorine and petroleum hydrocarbons in environmental samples ; International Atomic Energy Agency; Marine Environment Laboratory Monaco.
- [10] : J.P. DUBOIS, Novembre 1999. Technique d'analyse des éléments traces dans les sols : Modules « Monitoring des polluants » -Session 1999/2001; Lausanne Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne-Institut d'Aménagement des Terres et des eaux – Pédologie
- [11] J. RODIER, 1984. L'analyses de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer ; 7<sup>e</sup> édition ; Dunod ; Paris.
- [12] Loi n° 98-029 du 20 janvier 1999 portant Code de l'Eau (J.O. n° 2557 E.S. du 27.01.99, p. 735)

- [13] Loi n° 90-033 du 21 décembre 1990 ; portant Charte de l'Environnement malagasy (J.O. n° 2035 du 24.12.90, p. 2540) modifiée par la loi n° 97-012 du 6 juin 1997 (J.O. du 09.06.97, p. 1171, Edition spéciale et n° 2584 du 12.07.99, p. 1479)
- [14] Plan Communal de développement Commune Urbaine NOSY –BE, Juin 2006.
- [15] Plan Communal de développement Commune Urbaine Mahajanga, 2005.
- [16] J. RANAIVOSON, 1997. Strategic Action Plan for Land-Based Sources and Activities Affecting the Marine, Coastal and Associated Fresh Water Environment in the Eastern African Region
- [17] A. NIRILALAINA, 2007. Evaluation de la qualité de l'eau sur l'environnement marin et côtier de la ville de Nosy-Be et de Mahajanga ; Université d'Antananarivo ; Faculté des sciences ; option chimie minérale.
- [18] Secrétariat Convention de Bâle. Novembre 1997. Directives techniques sur les déchets ménagers collectés ; Genève.
- [19] FAO, 1995. Effects of riverine inputs on costal ecosystems and fisheries resources
- [20] E. RASOANANDRASANA, 2006. Contribution à l'étude des déchets domestiques et industriels de Mahajanga: Application à la gestion et méthanisation simultanés des effluents de distillerie de l'industrie sucrière et d'abattoir ; Thèse de Doctorat de troisième Cycle, option Energétique.
- [21] S. RAMBININTSAOTRA, 2006. Ombres et lumières sur la gestion intégrée des zones côtières à Madagascar ; Communication tirée de la Thèse de Doctorat en Droit de l'Environnement.

## **ANNEXES**

## ANNEXE N°1

## Capacités de bioconcentration de quelques espèces marines

métal	cadmium	plomb	mercure
espèces			
Plantes aquatiques	faible	faible	faible
Invertébrés	moyenne à forte	moyenne	moyenne à forte
- Vers	moyenne	moyenne	moyenne à forte
- Mollusques	moyenne	moyenne	moyenne à forte
- Crustacés	forte	moyenne	moyenne à très forte
(Moules)	forte	forte	moyenne
(Huîtres)	très forte	moyenne	faible
Poissons	faible	faible	moyenne à forte
- Hareng/sardine	faible	faible	faible
- Plie/sole	faible	faible	moyenne
- Bar/roussette	moyenne	moyenne	moyenne
- Espadon/thon	moyenne	moyenne	forte

INERIS / AFSSA / CNRS - Synthèse OPECST

**ANNEXE N°2**

Activité portuaire de Nosy Be :

<b>Moyen de transport</b>	<b>Nombre</b>	<b>Trajet effectué par jour</b>
Coques	28	4
Vedettes	11	2
Bac	5	1
Bateau de croisière	45	-

Source : Transport maritime année 2005

### ANNEXE N°3

#### Mode opératoire sur la digestion des sédiments

- peser exactement une masse M de sédiment dans un becher de 100ml
  - ajouter 10 ml d'acide chlorhydrique concentré et 5ml d'acide nitrique concentré
  - couvrir le becher avec un verre de montre pour éviter les contaminations et pour obtenir des reflux
  - mettre le becher sur une plaque chauffante et chauffer à ébullition pendant 48heures en ajoutant de temps en temps de l'acide nitrique pour éviter la mise à sec du mélange.
  - laisser refroidir, et verser le gâteau de minéralisation sur un entonnoir muni d'un filtre wattman 42.
  - rincer le becher avec une solution 1 mol.l<sup>-1</sup> d'acide chlorhydrique ; récupérer cette solution de rinçage en le versant sur le filtre ; récupérer le filtrat dans une fiole de 100 ml. Opérer ainsi jusqu'au remplissage de la fiole.
  - analyser cette solution sur l'absorption atomique
  - Cette même solution est utilisée pour la détermination sur d'autre appareil tel que le spectrophotomètre UV et le voltamètre. Des blancs de réactifs (sans masse d'échantillons) sont préparés avec la même manière.
- Des acides de pureté spécifique à l'analyse de traces de métaux sont utilisés.

## ANNEXE N°4

### **Mode opératoire pour la détermination du Ni sur le photomètre « Spectroquant NOVA 60 »**

Domaine de mesure : 0,10 – 5 mg/l de nickel

- Vérifier le pH de l'échantillon. Domaine théorique pH 3- 8 ;
- Si nécessaire ajuster le pH en ajoutant goutte à goutte du NaOH en solution ou H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluer ;
- Pipeter 5ml d'échantillon dans une éprouvette ;
- Ajouter une goutte de Ni-1 et mélanger. Si la solution se décolore augmente la dose de réactif goutte à goutte jusqu'à obtenir une légère coloration brune constante ;
- Temps de réaction une minute ;
- Ajouter deux gouttes de Ni-2 et mélanger ;
- Vérifier le pH de l'échantillon. Domaine théorique pH 10-12 ;
- Si nécessaire ajuster le pH en ajoutant goutte à goutte du NaOH en solution ou H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluer ;
- Ajouter deux gouttes de Ni-3 et mélanger ;
- Temps de réaction 2minutes ;
- Transvaser la solution dans la cuve souhaitée ;
- Sélectionner la méthode avec l'autoselecteur ;
- Placer la cuve dans le compartiment.
- lire le résultat



## ANNEXE N °5

Comparaison des concentrations de métaux dans les sédiments provenant d'Afrique et d'autres régions du globe ( $\mu\text{g/g}$  poids sec)

Emplacement	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	Référence
Eaux intérieures africaines	0,24 (0,02–0,60)	0,37 (0,10–1,0)	23,2 (7,3–63)	26,3 (0,96–41)	82,5 (2,54–140)	Auteur
Eaux côtières africaines	0,19 (0,1–0,35)	2,78 (2,0–4,1)	57,8 (48–68)	19,4 (12–37)	92 (35–102)	Auteur
Nord-est du lac Ontario				10,5–2900	130–448	Bradley et Morris, 1986
Baie de Narragansett, Etats-Unis		0,06–2,45	17–81	36–98	53–168	Eisler <i>et al.</i> , 1977
Rivière Tawe, Pays de Galles		39	862	326	5107	Vivian et Massie, 1977
Dock de Liverpool, Royaume-Uni			109–613	90–1592	734–2087	Bellinger et Benham, 1987
Port de Portsmouth, Royaume-Uni		0,5–3,3	49–114	26–72	61–210	Soulsby <i>et al.</i> , 1978
Golfe d'Evoikos, Grèce	0,4–1,1				52–147	Angelidis <i>et al.</i> , 1981
Détroit de Malacca		ND* - 125	6,5–35-3	1,0–26,3		Sen Gupta <i>et al.</i> , 1990
Bahreïn	13–106	0,02–0,05	1,70–15,1	5,60–10,0		Sen Gupta <i>et al.</i> , 1990
Koweït	50–170	0,09–0,23	3,3–68	20,1–21,9		Sen Gupta <i>et al.</i> , 1990
Arabie saoudite	3–37	2,5–5,0	0,6–4,2	5,4–16,6	4,0–23	Linden <i>et al.</i> , 1990
Hong Kong				22	96	Gomez <i>et al.</i> , 1990
Mer de Chine du Sud		0,41–2,39		1,94–9,21	12,5–49,9	Gomez <i>et al.</i> , 1990
Baie de Djakarta	0,05–4000	5,0–400		10–780	60–7140	Gomez <i>et al.</i> , 1990
Port de Wellington, Nouv.-Zélande			22–6740	15–216	55–2270	Brodie <i>et al.</i> , 1990
Fidji	<0,2	1,1–2,2	6,8–10	85–150	54–220	Brodie <i>et al.</i> , 1990

- ND - Non détecté

Auteur [8]

Auteur : **RAJOELISOA Andriamalala**

Titre : **EVALUATION DE LA POLLUTION EN METAUX LOURDS DES COTES DE MAHAJANGA ET DE NOSY BE PAR L'ETUDE DES SEDIMENTS MARINS**

Nombre de pages : **64**

Nombre de tableaux : **13**

Nombre de figures : **26**

Nombre de photographies : **5**

### **RESUME**

Cette étude est axée sur l'évaluation de la pollution en métaux lourds, en particulier l'analyse du cuivre, du zinc, du manganèse, du fer, du chrome, du nickel, du plomb et du cadmium dans six sédiments côtiers respectifs de Mahajanga et de Nosy Be.

Des rappels sur les propriétés physico-chimiques des huit métaux ont été indiqués tout en mentionnant leurs sources, leurs itinéraires et leurs dangers de toxicité tant pour l'écosystème que pour l'homme. Nous avons aussi mentionné les caractéristiques géographiques, climatiques et sociales spécifiques de chaque zone.

Nous avons utilisé les techniques de la spectroscopie d'absorption atomique, de la spectrométrie UV et de la voltamétrie pour réaliser notre travail.

Nous avons constaté que certains points de Mahajanga enregistrent des valeurs élevées de 1 ppm en cadmium et de 91 ppm en plomb par rapport aux sédiments non pollués cités dans d'autre littérature. Par contre, pour le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre et le chrome, les sédiments de Nosy Be affichent des valeurs deux fois plus élevées que ceux de Mahajanga et ces valeurs sont aussi légèrement supérieures par rapport à ceux des sédiments les plus contaminés d'autre zone d'Afrique.

Compilée avec des données existantes sur la teneur en métaux des colonnes d'eau des même points de prélèvement, cette étude nous amène à redécouvrir la propriété d'adsorption croissante des métaux sur les sédiments respectivement le nickel, le cuivre, le cadmium, le zinc et le plomb.

Compte tenu des déterminations réalisées, des suggestions sont données pour entraver aux dégradations latentes et progressives de notre zone côtière.

**Mots clés :** Pollution marine - Métaux lourds – Sédiments côtiers – Toxicité - Ecosystème marin – Nosy Be - Mahajanga.

### **ABSTRACT**

This study was undertaken to evaluate the heavy metals contamination of copper, zinc, manganese, iron, chromium, nickel, lead and cadmium in six stations of Nosy Be, northern Madagascar and the coastal sediments of Mahajanga, north-western Madagascar, in February 2007. Three kinds of analytical method were used for metals determination and quantification: flame spectrophotometer atomic absorption, UV spectrophotometer, and voltammeter method. Our data suggested that Mahajanga's stations have higher values of cadmium (1ppm) and lead (91 mg/kg) than the non-contaminated sediments. However, the concentrations of other metals such as copper, zinc, manganese, iron and chromium in Nosy Be sediments, were twice as higher than in those of Mahajanga. These five metals have higher values than in the most contaminated sediments in Africa. In compiling our data obtained at the same stations in the vertical water column, we would like to confirm the growing order of potential absorption between metals and sediments, nickel, copper, cadmium and lead. According to the results of determinations, we suggested that coast and marine degradations of Madagascar should be stopped.

**Keywords:** Marine pollution - Heavy metals – Coastal sediments - Toxicity – Nosy Be – Mahajanga-Madagascar.

Nom de l'encadreur : **Pierre Hervé RAVELONANDRO, Directeur du C.N.R.E.**

Tél. auteur : **(+261) 032 40 542 50**

Mail auteur : **rajoelisoaa@yahoo.fr**