

Evaluation préliminaire de la qualité de l'air ambiant à Mayotte :  
Mesure des concentrations particulières de métaux lourds et de  
HAP dans la fraction PM10 de l'air ambiant



Rapport de stage : du 09 janvier au 23 juin 2017

Écrit par Mlle Mouniya MBOIBOI

Étudiante en Master Ecotoxicologie et Chimie de l'Environnement - Université de Bordeaux

Encadré par Mr Bruno BROUARD-FOSTER

Directeur de Hawa Mayotte

Evaluation préliminaire de la qualité de l'air ambiant à Mayotte :  
Mesure des concentrations particulières de métaux lourds et HAP dans la  
fraction PM10 de l'air ambiant

# Remerciements

Je souhaite remercier chaleureusement Monsieur Mouslim ABDOURAHAMAN, Président du bureau de Hawa Mayotte (Maire de Bouéni), pour m'avoir accueillie et donnée la possibilité d'effectuer mon stage de fin d'études dans les locaux de Hawa Mayotte.

Je n'oublie pas les autres membres élus du bureau, sans qui la réalisation de ce stage n'aurait pas été possible, Monsieur Michel CHARPENTIER, Vice-Président de Hawa Mayotte (Président de l'association les naturalistes de Mayotte), Monsieur Yacine CHOUABIA, Trésorier (Directeur général d'EDM), et Monsieur Patrice PONCET, Secrétaire Général (Chef du service environnement et prévention des risques de la DEAL de Mayotte).

Je remercie particulièrement Monsieur Bruno BROUARD-FOSTER, Directeur de Hawa Mayotte, mon maître de stage, pour m'avoir accueillie dans son équipe et guidée tout au long de ce stage. Je le remercie pour sa présence, son aide, ses précieux conseils et pour m'avoir aiguillée dans ma mission.

Je tiens également à remercier Fassuhati ASSANI-ALI et Léo COPIN, les deux chargés d'études de l'AASQA, avec qui j'ai partagé mon bureau, qui m'ont rapidement intégré à l'équipe, qui ont été là lorsque j'en avais besoin et ont su m'apporter des conseils et de l'aide dans mon travail.

Mes remerciements s'adressent également à Madame Nathalie GENESTE et Madame Agnès FEURTET-MAZEL, co-responsables du Master Écotoxicologie et Chimie de l'Environnement, pour leur présence tout au long de ces deux années de Master, sans oublier toute l'équipe pédagogique.

# Résumé

Ce rapport porte sur une étude axée sur la mesure des concentrations d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des métaux lourds dans la fraction PM10 de l'air ambiant sur l'île de Mayotte. Cette étude entre dans le cadre de l'évaluation préliminaire de l'air ambiant sur Mayotte lancée en février 2016 avec les polluants suivants : NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> et benzène.

En raison de leurs toxicités, les HAP et les métaux lourds (arsenic, cadmium, mercure, nickel et plomb) contenus dans la phase particulaire de l'atmosphère font l'objet d'une surveillance régie par les directives n°2004/107/CE du 15 décembre 2004 et n°2008/50/CE du 21 mai 2008.

Cinq sites de mesure ont été choisis : Vahibé (site rural, niveau de fond), Pamandzi (site urbain), Hauts-Vallons (site périurbain), Kawéni nord (site trafic) et Port de Longoni (site en proximité d'installation industrielle).

Les concentrations mesurées en métaux lourds (arsenic, cadmium et plomb) sont inférieures aux limites de détection et ne présagent pas de dépassement des seuils d'évaluations annuelles. Les concentrations de nickel sont oscillantes sur la période de mesure (entre 5 et 22 ng.m<sup>-3</sup>) allant jusqu'à dépasser les seuils d'évaluations et même la valeur cible (12 et 22 ng.m<sup>-3</sup>).

En parallèle, des mesures d'autres métaux ont été réalisées pour le zinc, le manganèse, le cuivre et le chrome. En comparaison avec les valeurs de la littérature, les niveaux mesurés restent dans la normale.

Les niveaux de B(a)P (benzo(a)pyrène) mesurés sur les sites de Vahibé, Pamandzi, du Port de Longoni et des Hauts-Vallons sont très faibles et représentent les niveaux de fond. C'est au niveau du site trafic de Kawéni nord que les concentrations en B(a)P sont relativement élevées (0,19 ng.m<sup>-3</sup>). Ce site fera l'objet d'une évaluation plus approfondie.

# Abstract

This report focuses on a study to measure the concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heavy metals in the PM10 fraction of ambient air on the island of Mayotte. This study is part of the preliminary assessment of ambient air on Mayotte launched in February 2016 with the following pollutants: NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> and benzene.

Due to their toxicity, PAHs and heavy metals (arsenic, cadmium, mercury, nickel and lead) contained in the particulate atmospheric phase are monitored under directives n°2004/107/EC of 15 December 2004 and n°2008/50/EC of 21 May 2008.

Five measurement sites were selected: Vahibé (rural site: background level), Pamandzi (urban site), Hauts-Vallons (peri-urban site), Kawéni north (traffic site) and Port de Longoni (industrial site).

Measured concentrations of heavy metals (arsenic, cadmium and lead) are below detection limits and do not suggest exceeding annual assessment thresholds. Nickel concentrations were oscillating over the measurement period (between 1.81 and 21.60 ng.m<sup>-3</sup>), which exceeded the devaluation thresholds and even the target value (11.47 and 21.60 ng.m<sup>-3</sup>).

In parallel, measurements of other metals were made for zinc, manganese, copper and chromium. In comparison with the literature values, the measured levels remain in the normal range.

The B(a)P (benzo(a)pyrene) levels at Vahibé, Pamandzi, Port de Longoni and Hauts-Vallons sites are very low and represent background levels. The B(a)P concentrations are relatively high (0.19 ng.m<sup>-3</sup>) at the Kawéni north (traffic site). On this site, it is feared that the thresholds will be exceeded.

# Sommaire

Liste des abréviations.....	8
Introduction.....	10
I. Synthèse bibliographique.....	12
1 Les particules en suspension.....	13
1.1 Sources.....	13
1.2 Toxicité.....	13
2 Les hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP).....	13
2.1 Sources.....	14
2.2 Toxicité.....	14
3 Les métaux lourds.....	15
3.1 Substances réglementées.....	15
3.1.1 Arsenic.....	15
3.1.2 Cadmium.....	16
3.1.3 Nickel.....	17
3.1.4 Plomb.....	18
3.2 Substances non réglementées.....	19
3.2.1 Cuivre.....	19
3.2.2 Chrome.....	19
3.2.3 Manganèse.....	20
3.2.4 Zinc.....	21
4 Contexte réglementaire et normatif.....	21
4.1 Directive européenne cadre du 27 septembre 1996.....	21
4.1.1 Directive n°2004/107/CE du 15 décembre 2004.....	22
4.1.2 Directive n°2008/50/CE 21 mai 2008.....	22
4.2 Directives de la qualité de l'air.....	23

II. Analyse des résultats .....	25
1 Choix des zones d'étude .....	26
1.1 Sources de pollution .....	26
1.2 Sites de prélèvement.....	26
1.3 Stratégie d'échantillonnage .....	28
2 Résultats.....	28
2.1 Conditions météorologiques.....	29
2.2 Pollution particulaire .....	29
2.2.1 Niveau de pollution.....	29
2.2.2 Variation temporelle .....	30
2.2.3 Impact sanitaire .....	30
2.3 Pollution aux HAP.....	32
2.3.1 Niveaux mesurés .....	32
2.3.2 Comparaison .....	34
2.3.3 Impact sanitaire .....	34
2.4 Pollution aux métaux lourds.....	35
2.4.1 Substances réglementées.....	35
2.4.2 Substances non réglementées.....	41
Conclusion .....	48
Hygiène et Sécurité.....	49
Références bibliographiques .....	50
Annexes.....	51

## Liste des abréviations

AASQA : Association Agréée à la Surveillance de la Qualité de l'Air

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

ARS : Agence Régionale de Santé

As : Arsenic

B(a)P : Benzo(a)Pyrène

Cd : Cadmium

CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer

Cr : Chrome

Cu : Cuivre

DEAL : Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

DGEC : Direction Générale de l'Energie et du Climat

EDM : Electricité de Mayotte

EPA : Agence américaine pour la protection de l'environnement

ERU : Excès de Risque Unitaire

EXCE : Ecotoxicologie et Chimie de l'Environnement

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

Hg : Mercure

INERIS : Institut National de l'Environnement industriel et des RISques

INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

LAURE : Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie

LCSQA : Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

Mn : Manganèse

Ni : Nickel

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

Pb : Plomb

SEI : Seuil d'Evaluation Inférieur

SEMA : Seuil d'évaluation maximal

SEMI : Seuil d'évaluation minimal

SES : Seuil d'Evaluation Supérieur

UE : Union Européenne

VTR : Valeur Toxicologique de référence

Zn : Zinc

ZR : Zone Régionale

ZUR : Zone Urbaine Régionale

## Introduction

Mayotte, petite île de 376 km<sup>2</sup>, a longtemps été soumise à un statut juridique particulier, celui de Collectivité d'Outre-Mer (COM), régit par l'article 73 de la Constitution de la Cinquième République Française. Ce n'est qu'en 2011, que l'île accède à la départementalisation, suite à un référendum. Mayotte s'aligne donc progressivement sur le droit commun et trois ans plus tard le statut de région ultrapériphérique (RUP) lui est accordé. Cette départementalisation et cette « rupésation » entraînent avec elles une vague de privilèges mais également d'obligations relatifs à la réglementation française et européenne notamment en matière de surveillance de la qualité de l'air.

En France, la surveillance de la qualité de l'air est du ressort de l'État qui a délégué ses compétences aux AASQA (Association Agréée pour la Surveillance de la Qualité de l'Air). Au plan français, la loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (LAURE) du 30 décembre 1996 fait office de référence réglementaire dans la surveillance de la qualité de l'air. Elle reconnaît à tout individu le droit de respirer un air qui ne nuise pas à sa santé et le droit à l'information sur la qualité de l'air et sur ses effets sur la santé.

En Europe, la directive cadre n°96/62/CE du 27 septembre 1996 qui concerne l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air ambiant établit, dans son annexe I, une liste de polluants à prendre en considération dans l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air. Elle exige également que tout État membre réalise une évaluation préliminaire de la qualité de l'air sur toute zone ou agglomération n'ayant pas de mesures représentatives des niveaux de ces polluants.

À Mayotte, aucune donnée sur la pollution atmosphérique n'étaient disponibles avant la création d'Hawa Mayotte et comme le préconise la directive cadre n°96/62/CE du 27 septembre 1996, une évaluation préliminaire de la qualité de l'air ambiant a donc été nécessaire. Cette évaluation préliminaire a débuté en février 2016 avec une campagne de mesure des concentrations de quatre polluants réglementés dans la surveillance de la qualité de l'air : ozone (O<sub>3</sub>), dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), nitrite (NO<sub>2</sub>) et benzène. Elle a permis de déterminer les sites de mesures sensibles à ces pollutions afin d'y implanter des stations de mesures fixes.

Aujourd'hui, Hawa Mayotte souhaite continuer son évaluation préliminaire de la qualité de l'air en ciblant précisément les métaux lourds et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans l'air. Pour cela, l'association dispose d'un préleveur actif à débit réduit (Partisol 2025i) muni d'une tête PM10. Cet appareil homologué par la LCSQA (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air) est un préleveur de particules fines. Il permet l'étude des polluants organiques et inorganiques tels que les HAP, les pesticides et les métaux adsorbés à la phase particulaire de l'air.

Au niveau européen, deux directives filles relatives à la directive n°96/62/CE du 27 septembre 1996 font référence à la surveillance de ces composés dans l'atmosphère. Il s'agit des directives filles n°2004/107/CE du 15 décembre 2004 qui cible l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les HAP dans l'air ambiant et n°2008/50/CE du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe qui concerne entre autres le plomb. S'agissant des premières mesures concernant ces substances sur le territoire mahorais, en plus des polluants réglementés, 4 métaux (cuivre, chrome, manganèse et zinc) et 3 HAP (benzo(e)pyrène, benzo(g,h,i)pérylène, chrysène) ont été ajoutés à la liste pour évaluer leur prédominance dans l'atmosphère.

La mesure des concentrations d'As, de Cd, de Ni, de Pb et du B(a)P dans l'air ambiant est prioritaire. En effet, les HAP sont connus pour leur propriété cancérigène et leur caractère mutagène. Dans, l'atmosphère, ils se trouvent adsorber sur la phase particulaire et plus particulièrement « sur des particules de petite taille appartenant à la fraction inhalable de l'aérosol » [1]. Leur petite taille leur permet donc de pénétrer l'organisme via la voie pulmonaire. Il en est de même pour les métaux lourds qui sont largement adsorbés sur la phase particulaire, d'où l'intérêt de surveiller ces polluants sur la fraction inhalable de l'air (PM10).

Ce rapport traitera donc de la mise en œuvre de cette évaluation préliminaire de la qualité de l'air ambiant à Mayotte. Dans un premier temps, il sera question d'une étude bibliographique d'une part sur les sources d'émission et les effets des polluants étudiés et d'autre part d'une synthèse des textes réglementaires concernant ces polluants. Dans un deuxième temps, il sera question de la stratégie mise en œuvre pour mener la campagne de mesure et des résultats obtenus pour cette évaluation préliminaire.

# **I. Synthèse bibliographique**

## 1 Les particules en suspension

L'atmosphère est composée d'une phase gazeuse et d'une phase particulaire. La phase particulaire se compose d'aérosols dont la taille varie de quelques nanomètres à quelques micromètres. Par définition, les aérosols sont des particules solides ou liquides en suspension dans la masse d'air, à l'exclusion des gouttelettes de nuage et de pluie.

### 1.1 Sources

Les particules atmosphériques peuvent être d'origine naturelle ou anthropique et primaire ou secondaire. Les particules primaires sont émises directement dans l'atmosphère et sont généralement d'origine naturelle. Les particules de sources naturelles proviennent principalement de l'embrun, des fumées volcaniques et de l'érosion des sols. La combustion, les processus industriels, les chantiers de construction, les véhicules à moteur diesel, par exemple, constituent des sources anthropiques d'émission de particules.

### 1.2 Toxicité

En matière de qualité de l'air, la surveillance des particules fines est très importante compte tenu de leur pouvoir allergisant et cancérigène mais également de leur capacité de pénétration des voies respiratoires. La fraction PM10 des particules dans l'air est d'ailleurs un paramètre réglementé, par la directive 1999/30/CE 22 avril 1999. La toxicité des particules fines réside essentiellement dans leur petite taille. En effet, les PM10, ont la capacité de pénétrer l'appareil respiratoire (fraction inhalable). En dessous de 2,5  $\mu\text{m}$  de diamètre (PM2,5), elles peuvent aller plus profondément dans l'appareil respiratoire jusqu'à atteindre les alvéoles (fraction alvéolaire).

La complexité des particules fines tient de leur composition. Ces dernières sont rarement composées d'une seule substance. Elles représentent donc un cocktail de polluants d'où la nécessité d'étudier la concentration de polluants, tels que les métaux et les HAP, adsorbés sur ces particules.

## 2 Les hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont des molécules composées de carbones et d'hydrogènes et se caractérisent par un minimum de deux noyaux benzéniques. Les HAP sont une famille qui regroupe plusieurs centaines de composés et sont classés dans la catégorie des polluants organiques persistants (POP) définis par le protocole d'Aarhus et la convention de Stockholm.

Dans l'atmosphère, les HAP sont simultanément retrouvés dans la phase gazeuse et particulaire, du fait de leur pression de vapeur saturante comprise entre  $10$  et  $10^{-10}$  Pa [2]. Les composés les plus légers, entre deux et quatre cycles benzéniques, comme le naphthalène vont être trouvés sous forme gazeuse. Les composés les plus lourds, notamment ceux avec plus de quatre noyaux benzéniques, vont être retrouvés adsorbés à la phase particulaire.

## 2.1 Sources

Les HAP sont des substances naturelles qui constituent le charbon et le pétrole. Néanmoins, leur émission est majoritairement due aux activités pyrolytiques anthropiques. En France, les émissions atmosphériques des HAP<sup>1</sup> s'élevaient à 72 tonnes en 2014 [3].

Les sources anthropiques représentent 90% des émissions atmosphériques de HAP [4]. Les rejets d'origines anthropiques sont généralement dus aux combustions incomplètes des matières organiques et plus particulièrement les matières fossiles. En France, en 2014, les sources anthropiques concernent principalement le secteur résidentiel et tertiaire avec 42 tonnes soit 58% des émissions, et les transports routiers avec 18 tonnes soit 25% des émissions [3].

Pour ce qui est des sources naturelles, tout comme les sources anthropiques, les HAP vont être issus de la combustion incomplète de la matière organique. Ils vont se retrouver dans l'atmosphère lors des feux de forêts d'origine naturelle ou encore suite aux éruptions volcaniques.

## 2.2 Toxicité

Les HAP sont des composés identifiés comme étant cancérigènes et mutagènes d'où l'intérêt d'une surveillance de ces composés. Nombreux sont ceux présumés ou avérés cancérigènes pour l'Homme par le CIRC et l'UE (Cf annexe 2).

Ce sont des mutagènes indirects, ils nécessitent une activation pour devenir mutagène. Ce sont donc des composés pro-mutagènes. Cette activation est réalisée grâce aux enzymes impliquées dans le processus de détoxification de l'organisme, lors des phases de conjugaison et de fonctionnalisation, qui permet la métabolisation des xénobiotiques afin de faciliter leur élimination de l'organisme.

---

<sup>1</sup> Les HAP pris en compte dans cette estimation sont ceux couverts par l'arrêté du 2 février 1998 modifié : benzo(a)pyrène, benzo(a)anthracène, benzo(b)fluoranthène, fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, l'indéno(1,2,3,c-d)pyrène, benzo(g,h,i)pérylène et dibenzo(a,h)anthracène.

## 3 Les métaux lourds

Les métaux lourds appelés également éléments traces métalliques (ETM) comprennent non seulement des métaux à l'état de trace comme le cadmium et le plomb mais aussi des éléments non métalliques tels que l'arsenic. Les ETM surveillés, en France, dans le cadre de la pollution atmosphérique sont l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le mercure (Hg), le nickel (Ni) et le plomb (Pb). Pour cette étude, la liste des métaux a été élargie avec le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le manganèse (Mn) et le zinc (Zn) connus pour avoir des risques sur la santé humaine.

### 3.1 Substances réglementées

#### 3.1.1 Arsenic

L'arsenic est un métalloïde retrouvé sous différentes spéciations, les formes inorganiques étant considérées comme les plus dangereuses [5]. L'arsenic est présent dans la partie superficielle de l'écorce terrestre avec une concentration moyenne de  $1,8 \text{ mg.kg}^{-1}$  [6].

Dans l'air, l'arsenic va principalement se retrouver adsorbé aux particules sous forme d'arsine ( $\text{AsH}_3$ ) et de trioxyde ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ). En Europe, les émissions totales d'arsenic sont estimées à 575 tonnes par an en 1990 [7]. Les concentrations vont de 1 à  $10 \text{ ng.m}^{-3}$  en zone rurale, de quelques nanogrammes à  $30 \text{ ng.m}^{-3}$  en zone urbaine et peuvent excéder  $1 \text{ } \mu\text{g.m}^{-3}$  à proximité des sources d'émission [8].

##### a) Sources

Les principales sources d'émission naturelles de l'arsenic dans l'air ambiant sont les feux de forêts et l'activité volcanique. Les émissions globales naturelles annuelles sont estimées approximativement à 8 000 tonnes par an [9].

Pour ce qui est des sources anthropiques, l'arsenic est majoritairement émis par les fumées industrielles. Notamment par les industries de production d'anhydride arsénieux ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ) et de la combustion de produits fossiles. Les émissions anthropiques d'arsenic sont estimées à 23 600 tonnes par an [9].

En France, les émissions d'arsenic sont principalement dues aux secteurs industriel, tertiaire et résidentiel. En 2014, les émissions d'arsenic s'élevaient à 5,4 tonnes [10] contre 25 tonnes en 1990 [11]. Avec deux tiers des émissions atmosphériques [11], en 2004, l'industrie manufacturière représente la source principale d'émission.

## b) Toxicité

L'arsenic est principalement absorbé par ingestion. D'ailleurs, l'Afssa<sup>2</sup> considère l'inhalation et la voie cutanée comme négligeable. En milieu professionnel, l'inhalation représente, cependant, la voie principale d'exposition.

L'arsenic a une forte affinité à l'hémoglobine et aux protéines plasmiqes grâce aux groupes sulfhydriles qui les composent. Après pénétration dans l'organisme, il se distribue de façon systémique et sera principalement retrouvé au niveau du foie, des reins, des muscles, dans les os ou encore les phanères.

L'exposition à de l'arsenic inorganique peut provoquer divers effets tels qu'une irritation de l'estomac, des intestins et des poumons, une diminution de la production des hématies et des leucocytes et des problèmes cutanés. Une exposition plus importante peut conduire à une altération de la reproduction (fausses couches, infertilité, ...). D'autres effets, comme l'altération de l'ADN et des dommages au cerveau, sont également recensés.

L'arsenic et ses composés organiques sont classés comme cancérogènes avérés pour l'homme par le CIRC. D'où l'intérêt de l'étudier dans le cadre d'une pollution atmosphérique.

### 3.1.2 Cadmium

Le cadmium est un métal présent naturellement dans l'écorce terrestre. La production mondiale a été évaluée à 24 500 tonnes en 2015 [12] et la production française à 85 tonnes en 1989 [13]. Utilisé dans la galvanoplastie, les pigments et les accumulateurs alcalins, le cadmium est un élément assez rare dans la croûte terrestre avec une concentration de 0,2 mg.kg<sup>-1</sup> [8].

Dans l'atmosphère, les niveaux de cadmium varient en fonction de la zone géographique. Les concentrations moyennes sont de l'ordre de 5 ng.m<sup>-3</sup> en zone rurale, entre 5 et 15 ng.m<sup>-3</sup> en zone urbaine et à plus de 60 ng.m<sup>-3</sup> en zone industrielle [14].

#### a) Sources

Les sources naturelles d'émission de cadmium dans l'atmosphère sont principalement liées à l'activité volcanique. Les activités industrielles métallurgiques (raffinage des métaux, production de zinc, ...) caractérisent les principales sources d'émission de cadmium dans l'atmosphère suivies des déchets d'incinérations, la combustion de combustibles fossiles et la formation de poussières par

---

<sup>2</sup> Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments

procédés industriels tel que la manufacture [15]. En France, l'industrie manufacturière représente le principal émetteur de cadmium dans l'atmosphère [11].

Dans le monde, les émissions moyennes de cadmium vers l'atmosphère sont de l'ordre de 3 100 à 12 040 tonnes par an [13]. Alors que les émissions françaises totales ne s'élèvent qu'à 2,9 tonnes en 2014 [10].

#### b) Toxicité

Le cadmium est un métal non essentiel et fortement toxique que certains classent parmi les vingt substances les plus dangereuses [16]. Il pénètre l'organisme par inhalation et/ou ingestion. Ces deux modes d'absorption représentent les voies majoritaires d'absorption du cadmium par les organismes

Après absorption, il va être dispersé dans l'organisme. Les concentrations les plus élevées seront retrouvées dans les os, les poumons et majoritairement les reins [8] où il est stocké sous forme divalente. Son affinité avec le rein en fait un organe cible de stockage pour ce dernier.

Le cadmium peut causer des dommages au niveau des tubules et entraîner par la suite une protéinurie et *in fine* une insuffisance rénale. Le cadmium produit également des effets embryotoxiques, tératogènes et cancérogènes. D'autres effets, tels que l'inflammation des poumons ou des dommages au niveau du foie sont également constatés [8].

### 3.1.3 Nickel

Le nickel est un métal présent sur la couche terrestre avec une concentration de  $84 \text{ mg.kg}^{-1}$  [6]. Il est retrouvé dans divers minerais tels que la garniérite<sup>3</sup> ou encore la pentlandite ((Fe,Ni)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>). Les émissions mondiales de nickel ont été évaluées entre 288 700 et 376 000 tonnes en 1988 [13] et  $2\,020.10^3$  tonnes en 2014 [17]. Dans l'air ambiant, les concentrations en nickel sont de 1 à  $10 \text{ ng.m}^{-3}$  en zone urbaine et de l'ordre de 110 à  $180 \text{ ng.m}^{-3}$  au niveau des sites industriels [8].

#### a) Sources

Les principales sources anthropiques de nickel sont la combustion de matières fossiles telles que le charbon et le fioul, l'incinération des déchets, le nickelage, l'extraction et la production de nickel.

---

<sup>3</sup> La garniérite, minerai retrouvé en Nouvelle-Calédonie, est un terme qui regroupe plusieurs espèces de nickélifères et de phyllosilicates.

En Europe, les émissions anthropogéniques ont été évaluées à 16 000 tonnes par an en 1978 avec 903 tonnes par an pour la France [18]. Ces émissions ont fortement diminué tant bien qu'en France, en 2014, les émissions totales sont de 40 tonnes [10].

L'industrie manufacturière et la transformation d'énergie sont les secteurs prédominants d'émission de nickel, en France. La transformation d'énergie représente plus de la moitié des émissions et caractérise donc le secteur le plus émetteur de nickel en 2004 [11].

#### b) Toxicité

Le nickel est faiblement absorbé par l'organisme. Dans l'organisme, il est transporté par le complexe albumine-nickel-histidine et éliminé majoritairement par les urines. Les études par voie respiratoire démontrent un effet inflammatoire sur les bronches et les muqueuses. Chez les personnes exposées professionnellement au nickel, des cas d'allergie, de rhinite, de sinusite, d'affection respiratoire et de cancer des cavités nasales ou des poumons ont été recensés.

Des tests sur animaux, spécialement des rats soumis à du nickel par inhalation, démontrent la mort des individus deux heures après exposition à  $36,5 \text{ mg.m}^{-3}$ . Par ailleurs un décès survenu par détresse respiratoire a été observé après exposition à une concentration de nickel estimée à  $382 \text{ mg.m}^{-3}$  [19].

### 3.1.4 Plomb

Le plomb est un métal retrouvé dans l'écorce terrestre avec une abondance de  $14 \text{ mg.kg}^{-1}$  [6]. Sa production mondiale est estimée à  $5\,050.10^3$  tonnes en 2014 [17]. Les concentrations naturelles de plomb sont de l'ordre de  $0,00005 \text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$  [14]. Dans les sites non urbains, les concentrations moyennes sont en générale en dessous de  $0,15 \text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$  et entre  $0,15$  et  $0,5 \text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$  dans les zones urbaines dans beaucoup de villes européennes [8].

#### a) Sources

Avant les années 2000, la pollution au plomb a longtemps été liée au transport routier. En effet, du fait de son pouvoir antidétonant, le plomb était utilisé en tant qu'additif dans les carburants. Ainsi de 1990 à 1999, le transport routier constituait 91,2% des émissions de plomb dans l'atmosphère. Depuis l'interdiction de l'essence plombée en 2000, les rejets de plomb ont considérablement diminué.

Aujourd'hui, les rejets de plomb dans l'atmosphère sont toujours d'origine anthropique et ont pour principale source émettrice l'industrie manufacturière qui représente 73,4% des émissions

totales (CITEPA) notamment avec les industries de première et deuxième fusion du plomb, la fabrication de batteries électriques et les fours électriques pour l'acier.

Les émissions mondiales de plomb ont été estimées entre 1 480 et 5 540 tonnes en 1988 [13]. En France, elles sont estimées à 117 tonnes en 2014 contre 4 296 tonnes en 1990 [10].

#### b) Toxicité

Le plomb est un métal toxique. Les principales voies de pénétration de l'organisme sont par inhalation (de 20 à 30%) et par ingestion (entre 5 et 10%), l'adsorption cutanée est négligeable par rapport aux deux voies précédentes [20]. Une fois dans l'organisme, le plomb inorganique atteint rapidement le sang et se stocke dans les os. Le saturnisme caractérise l'intoxication au plomb.

L'intoxication aiguë au plomb entraîne des troubles digestifs, des atteintes hépatiques et rénales et affecte le système nerveux [20]. Lors d'une intoxication chronique des effets systémiques sont également observés au niveau du système nerveux. Elle provoque également des effets sur la thyroïde et la croissance des os [20]. Le plomb est probablement cancérigène selon la classification du CIRC.

### 3.2 Substances non réglementées

#### 3.2.1 Cuivre

##### a) Sources

Le cuivre est un métal naturellement présent dans la croûte terrestre avec une abondance de 60 mg.kg<sup>-1</sup> [6]. Il provient essentiellement de l'usure des caténaires induit par le trafic ferroviaire et des plaquettes de frein des véhicules.

En France, les émissions du cuivre vers l'atmosphère sont estimées à 208 tonnes en 2014 et sont majoritairement dues au transport routier avec une part de 141 tonnes [21] alors que les émissions mondiales sont de l'ordre de 35 370 tonnes par an [13].

##### b) Toxicité

Le cuivre est un métal essentiel pour le développement des organismes. Bien qu'essentiel, à forte dose le cuivre devient toxique pour les organismes. Dans l'atmosphère la présence de cuivre et de ses dérivés peut entraîner une irritation des voies aériennes et des troubles gastro-intestinaux.

#### 3.2.2 Chrome

Le chrome n'est pas volatil. Il est donc essentiellement retrouvé adsorbé aux particules aériennes avec une concentration ubiquitaire inférieure à 10 ng.m<sup>-3</sup> [22]. Dans l'Union Européenne, les

concentrations sont de l'ordre de 0 à 3  $\text{ng.m}^{-3}$  dans les zones éloignées, de 4 à 70  $\text{ng.m}^{-3}$  dans les zones urbaines et de 5 à 200  $\text{ng.m}^{-3}$  dans les zones industrielles [8].

#### a) Sources

Avec une abondance de 102  $\text{mg.kg}^{-1}$  [6], le chrome est un métal retrouvé principalement sous forme de minerai dont le plus important est la chromite ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ). Les sources d'émission du chrome dans l'atmosphère sont nombreuses, l'industrie chimique, la combustion de gaz naturel, d'huile et de charbon et les usines de production de ciment en sont des exemples.

En France, les émissions de chrome dans l'atmosphère ont largement diminué depuis les années 1990 à aujourd'hui. Elles sont passées de 392 tonnes (1992) à 19 tonnes (2014) [21]. La source principale d'émission est l'industrie manufacturière avec 9 tonnes (2014) suivi du secteur résidentiel et tertiaire avec 6,5 tonnes (2014) [21].

#### b) Toxicité

Le chrome hexavalent est celui qui représente le plus de risque pour la santé. Lors d'une exposition aiguë il entraîne des irritations des muqueuses respiratoires et des atteintes respiratoires. A long terme, il peut être la cause de développement de cancers de type pulmonaires [21].

### 3.2.3 Manganèse

Le manganèse est présent sur la croûte terrestre avec une abondance de 950  $\text{mg.kg}^{-1}$  [6]. En 2013, la production mondiale s'élève à 16 000 tonnes. C'est un élément pas ou peu volatil [23]. Sa présence dans l'atmosphère est essentiellement particulaire [23] avec des concentrations variant de 10 à 30  $\text{ng.m}^{-3}$  dans les zones éloignées des sources de pollutions et de 10 à 70  $\text{ng.m}^{-3}$  dans les zones urbaines [8].

#### a) Sources

Les principales sources d'émission dans l'atmosphère sont de types industriels tels que la production de ferro-alliages, les fonderies de fer et d'acier mais également la combustion de matière fossiles (centrales électriques et four à coke) [23].

#### b) Toxicité

Une exposition aiguë au manganèse entraîne divers syndromes pulmonaires tels que la pneumonie au manganèse caractérisée par une fièvre, une dyspnée et une hémorragie au niveau des poumons, la fièvre des métaux. De façon chronique, elle est responsable de céphalées, de nausées, et

d'irritations oropharyngées [23]. L'Organisation Mondiale de la Santé et l'Agence américaine pour la protection de l'environnement fixent des valeurs toxicologiques de références<sup>4</sup> à 150 ng.m<sup>-3</sup> et 50 ng.m<sup>-3</sup> [23].

### 3.2.4 Zinc

Le zinc est un métal essentiel présent de façon non négligeable dans la couche terrestre. Il représente le 24<sup>ème</sup> élément le plus abondant avec 70 mg.kg<sup>-1</sup> [6].

#### a) Sources

Le zinc est principalement issu de la combustion du charbon, du fioul lourd et des procédés métallurgiques. En France, en 2014, les émissions atmosphériques de zinc sont estimées à 467 tonnes dont plus de la moitié sont dues au transport routier soit 280 tonnes [21].

#### b) Toxicité

Le zinc fait partie des oligoéléments les plus abondants chez l'homme. La forme métallique du zinc présente une faible toxicité par inhalation. Cependant des cas de mortalité ont déjà été recensés après inhalation de vapeur de composés de zinc pour des concentrations estimées à 33 000 mg de zinc.m<sup>-3</sup> [24]. Des volontaires exposés à 5 mg.m<sup>-3</sup> de zinc ont développé des symptômes similaires à ceux de la fièvre du soudeur qui se caractérise par une gorge sèche et douloureuse, de la toux, dyspnée, céphalée, fièvre et un goût métallique dans la bouche [24].

## 4 Contexte réglementaire et normatif

### 4.1 Directive européenne cadre du 27 septembre 1996

La directive européenne cadre du 27 septembre 1996, qui concerne l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air ambiant, est la base de la stratégie communautaire de surveillance de la qualité de l'air. Elle établit les grands principes à mettre en œuvre pour fixer les objectifs concernant la qualité de l'air.

Ses principes permettent d'évaluer la qualité de l'air d'une manière uniforme, informer le public sur les niveaux rencontrés (seuils d'alerte) et préserver ou améliorer la qualité de l'air ambiant. Elle définit également les éléments concernant les zones à surveiller et les méthodes servant à évaluer la

---

<sup>4</sup> La VTR (Valeur Toxicologique de Référence) est établie à partir de la relation entre la dose d'exposition à une substance et l'apparition d'effets néfastes pour la santé.

qualité de l'air ambiant (modélisation, mesures, ...). Cette directive fait référence à différents polluants qui font l'objet de directives filles :

- Directive n°2004/107/CE du 15 décembre 2004
- Directive n°2008/50/CE du 21 mai 2008

#### 4.1.1 Directive n°2004/107/CE du 15 décembre 2004

La directive européenne fille du 15 décembre 2004 traite de la stratégie de surveillance de la qualité de l'air au regard des composés suivants : arsenic, cadmium, mercure, nickel et HAP. Elle fixe des valeurs cibles et des seuils d'évaluation pour l'arsenic, le cadmium, le nickel et le benzo(a)pyrène. Le Tableau 1 illustre les valeurs cibles et seuils d'évaluation définis par cette directive.

	Arsenic	Cadmium	Nickel	B(a)P
Valeur cible (*)	6 ng.m <sup>-3</sup>	5 ng.m <sup>-3</sup>	20 ng.m <sup>-3</sup>	1 ng.m <sup>-3</sup>
Seuil d'évaluation maximal en pourcent de la valeur cible	60% (3,6 ng.m <sup>-3</sup> )	60% (3 ng.m <sup>-3</sup> )	70% (14 ng.m <sup>-3</sup> )	60% (0,6 ng.m <sup>-3</sup> )
Seuil d'évaluation minimal en pourcent de la valeur cible	40% (2,4 ng.m <sup>-3</sup> )	40% (2 ng.m <sup>-3</sup> )	50% (10 ng.m <sup>-3</sup> )	40% (0,4 ng.m <sup>-3</sup> )
(*) Moyenne calculée sur l'année civile du contenu total de la fraction PM10				

*Tableau 1 : Valeurs cibles et seuils d'évaluation minimaux et maximaux pour l'arsenic, le cadmium, le nickel et le benzo(a)pyrène (annexe I et II)*

Cette directive demande aux états membres de déterminer les zones dans lesquelles les concentrations en As, Cd, Ni et B(a)P dépassent les valeurs cibles ou bien sont justes élevées sans pour autant dépasser ses valeurs. L'évaluation préliminaire permettra de définir une stratégie de surveillance de la qualité de l'air.

#### 4.1.2 Directive n°2008/50/CE 21 mai 2008

La directive n°2008/50/CE 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe fixe une valeur limite et des seuils d'évaluation supérieur et inférieur pour le plomb qui entre dans le champ de notre étude.

	<b>Plomb</b>
Valeur limite	0,5 µg.m <sup>-3</sup>
Seuil d'évaluation supérieur (*)	70% (0,35 µg.m <sup>-3</sup> )
Seuil d'évaluation inférieur (*)	50% (0,25 µg.m <sup>-3</sup> )
(*) Moyenne annuelle	

*Tableau 2 : Valeur limite et seuils d'évaluation pour le plomb*

## 4.2 Directives de la qualité de l'air

Les directives de la qualité de l'air de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) sont des supports aux pays pour leur permettre d'établir leurs propres normes sur la qualité de l'air dans le but de protéger la population des effets nocifs d'une pollution atmosphérique. Les directives de la qualité de l'air ont été éditées pour la première fois en 1987 et 1999 et ont été depuis mises à jour grâce au développement méthodologique et à la veille scientifique.

L'OMS fixe des valeurs guides pour 35 polluants (22 composés non cancérigènes et 13 cancérigènes). Les valeurs guides de l'OMS résultent « de données épidémiologiques et toxicologiques et constituent des objectifs à long terme ». Ces valeurs sont indicatives et elles n'ont pas de portée réglementaire. Dans l'idéal, ces valeurs guides représentent des concentrations de polluants ne présentant pas de danger pour la population humaine.

Dans le cas des composés cancérigènes, il n'existe pas de seuil en dessous duquel le composé n'a pas de risque sanitaire. D'où l'intérêt d'exprimer les directives en termes de risque additionnel lié à la présence de ces composés dans l'air. Un risque additionnel pouvant être assimilé à un excès de risque unitaire (ERU).

Un excès de risque unitaire (ERU) est la « probabilité supplémentaire, par rapport à un sujet non exposé, qu'un individu développe un effet associé à une exposition pendant sa vie entière à une unité de dose (ou de concentration) d'un agent dangereux. »

Polluant	Valeur guide	Durée d'exposition
Cadmium (Cd)	5 ng.m <sup>-3</sup>	1 an
Manganèse (Mn)	1 µg.m <sup>-3</sup>	1 an
Mercuré (Hg)	1 µg.m <sup>-3</sup>	1 an
Plomb (Pb)	0,5 µg.m <sup>-3</sup>	1 an

Tableau 3 : Valeurs guides de l'OMS pour les polluants de la qualité de l'air extérieur non cancérigènes (source : OMS, 1999 et 2005)

<b>Polluant</b>	<b>Concentration</b>	<b>ERU</b>
HAP	1 $\mu\text{g.m}^{-3}$	9 / 100
Arsenic	1 $\mu\text{g.m}^{-3}$	1,5 / 1 000
Chrome (IV)	1 $\mu\text{g.m}^{-3}$	4 / 100
Nickel	1 $\mu\text{g.m}^{-3}$	4 / 10 000

*Tableau 4 : Valeurs guides de l'OMS pour les polluants cancérogènes de la qualité de l'air extérieur  
(source : OMS, 1999 et 2005)*

## **II. Analyse des résultats**

Contrairement aux autres compartiments environnementaux, la surveillance de la qualité de l'air est une problématique récente à Mayotte. Compte tenu des exigences de la directive cadre européenne n°96/62/CE du 27 septembre 1996, une évaluation préliminaire de la qualité de l'air ambiant doit être effectuée sur l'île afin de réaliser un état des lieux sur la pollution atmosphérique. Cette partie traitera donc de la stratégie mise en œuvre pour mener à bien cette évaluation préliminaire et des résultats obtenus lors de cette étude.

## 1 Choix des zones d'étude

Dans l'air les concentrations en polluants varient fortement selon différents paramètres tels que l'espace, le temps, les sources d'émission ou encore les conditions météorologiques. Le choix du site d'implantation est donc une décision importante dans la surveillance de la qualité de l'air qui doit prendre en compte tous ces paramètres.

### 1.1 Sources de pollution

À Mayotte, il n'existe pas encore de chiffres officiels sur les sources et l'inventaire des émissions de polluants dans l'atmosphère. Cependant, au vu des conditions actuelles sur l'île, quatre types de sources d'émission peuvent être répertoriées :

- Le trafic routier, en effet, Mayotte connaît un parc automobile important qui contient notamment des voitures assez vétustes fonctionnant au diesel. De plus, vient s'ajouter la voirie qui empêche la fluidité de circulation des automobiles et créant de surcroît des embouteillages.
- Les centrales thermiques au gasoil de Longoni (Grande-Terre) et des Badamiers (Petite-Terre) qui alimentent l'île en électricité.
- La combustion des végétaux avec la culture sur brûlis, la cuisine au feu de bois et le brûlage des déchets verts et des détritrus.
- Le trafic aérien qui ne concerne que la Petite-Terre avec des émissions localisées ce qui est également le cas avec le trafic maritime au niveau du port de Longoni.

### 1.2 Sites de prélèvement

Pour cette campagne, 5 sites ont été choisis dont 4 sur Grande-Terre et 1 sur Petite-Terre (Figure 1). Ces sites correspondent aux sites de mesures utilisés lors du premier volet de l'évaluation préliminaire concernant l'O<sub>3</sub>, le benzène, le NO<sub>2</sub> et le SO<sub>2</sub>. Ils ont été choisis afin de refléter au mieux les niveaux de pollution sur l'île et de prendre en compte les potentielles sources de pollution citées précédemment.

### Site en proximité industrielle

- Situé à la capitainerie du Port de Longoni, non loin de la centrale thermique d'EDM et du dépôt d'hydrocarbures de Total
- Permet de surveiller la qualité de l'air à proximité d'une zone industrielle



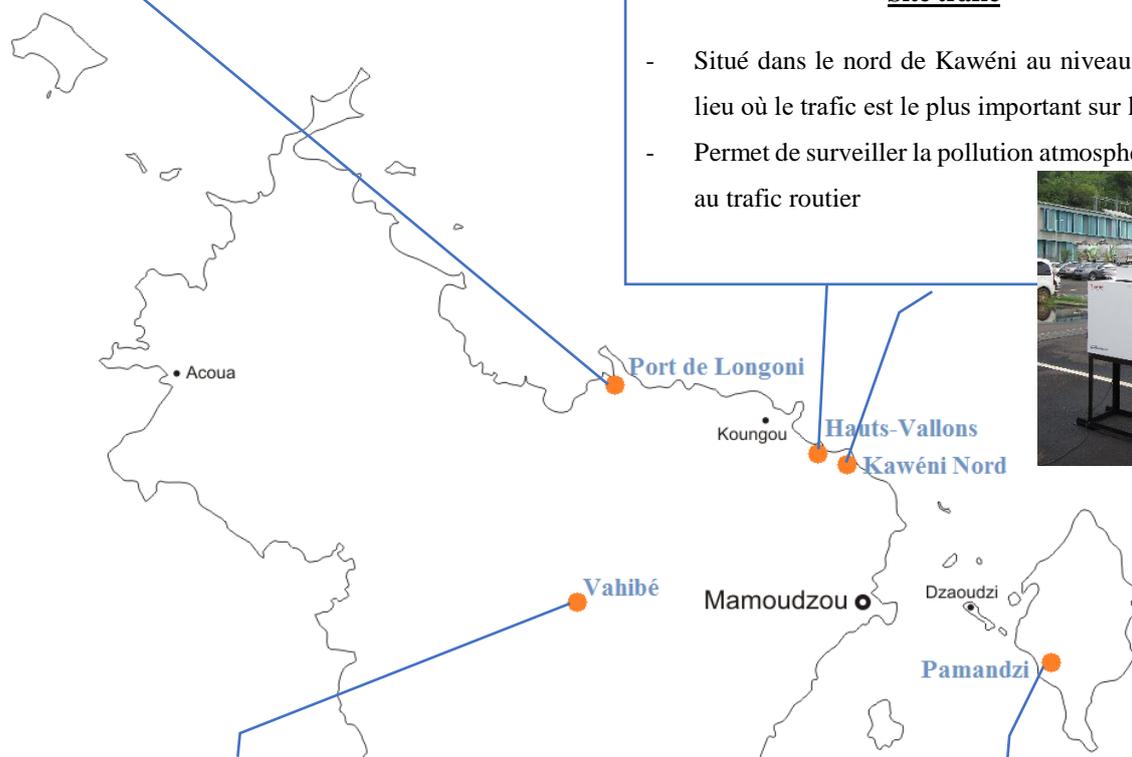
### Site périurbain

- Situé dans le quartier des Haut-Vallons à la limite de la ZAS de Mamoudzou
- Permet de surveiller la qualité de l'air en périphérie du centre-ville de Mamoudzou



### Site trafic

- Situé dans le nord de Kawéni au niveau de la N1, lieu où le trafic est le plus important sur l'île
- Permet de surveiller la pollution atmosphérique due au trafic routier



### Site rural

- Situé en dehors de la ZAS de Mamoudzou, le site se trouve à proximité de Vahibé
- Permet de déterminer la pollution de fond et de surveiller l'exposition des écosystèmes et de la population



### Site urbain

- Situé dans la caserne de la Gendarmerie de Pamandzi
- Permet de surveiller la qualité de l'air de fond des communes urbaines



Figure 1 : Localisation des sites de mesures

### 1.3 Stratégie d'échantillonnage

Une évaluation préliminaire sert à donner des mesures indicatives du taux de pollution sur zone donnée. Afin que les mesures soit le plus représentatives possibles, les directives exigent de couvrir 14% de l'année, soit un total 52 jours.

Cependant, compte tenu du nombre de site, de la durée du stage et ayant à disposition qu'un seul appareil, réaliser 52 jours de prélèvement par sites était impossible sur une durée de 6 mois. Les prélèvements ont donc été effectués par des séries de 5 mesures par site, à raison d'un filtre par jour pour des prélèvements de 24h. En plus des 5 prélèvements, des filtres témoins, appelés « blancs terrains » (exposés aux conditions du terrain) et « blancs laboratoires » (exposé aux conditions du laboratoire de l'association) ont permis de contrôler la qualité des résultats de mesure.

	<b>Métaux</b>	<b>HAP</b>	<b>PM10</b>
<b>Site périurbain</b>	4 (31/01/17 – 04/02/17)	6 (05/02/17 – 09/02/17)	-
<b>Site trafic</b>	4 (17/02/17 – 20/02/17)	6 (23/02/17 – 27/02/17)	7 (17/02/17 – 23/02/17)
<b>Site industriel</b>	6 (02/03/17 – 07/03/17)	6 (10/03/17 – 19/03/17)	-
<b>Site rural</b>	5 (31/03/17 – 04/04/17)	5 (06/04/17 – 10/04/17)	5 (31/03/17 – 04/04/17)
<b>Site urbain</b>	6 (11/04/17 – 23/04/17)	7 (24/04/17 – 30/04/17)	6 (11/04/17 – 23/04/17)

*Tableau 5 : Nombre de prélèvements réalisés par site et période de prélèvement correspondante*

Le Tableau 5 montre le nombre de prélèvements réalisé sur chaque site et la période pendant laquelle les prélèvements ont été réalisés. Les prélèvements durent 24h et l'appareil est réglé pour avoir un débit de  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Cependant sur les trois derniers sites d'échantillonnage, le préleveur s'est plusieurs fois arrêté entraînant la suspension des prélèvements pendant quelques jours.

De plus suite à des problèmes de logistique, les mesures journalières gravimétriques en PM10 n'ont pu être réalisées que sur trois sites : rural (Partisol 2025i), urbain (Partisol 2025i) et trafic (TEOM). Néanmoins, des mesures horaires en PM10 (analyseur en continu) ont pu être réalisé sur les deux autres sites (périurbain et industriel).

## 2 Résultats

En ce qui concerne les mesures indicatives, pour toute comparaison à des valeurs cibles annuelles, la directive recommande une période de mesure minimum équivalente à 14 % de l'année

soit 52 jours. Dans notre cas, étant en dessous des 14% préconisés, la référence à ces valeurs est donc mentionnée uniquement à titre indicatif.

## 2.1 Conditions météorologiques

La dispersion et le transport des polluants s'effectuent principalement sur les premiers kilomètres (1-2 km) de la troposphère également appelé couche limite. Dans cette couche, la concentration des polluants dépend de la température, de l'ensoleillement et des précipitations.

Dans cette étude, les paramètres météorologiques ont été relevés à l'aide de la station météo de l'association pour les sites de Kawéni et des Hauts-Vallons et à la station Météo France de Pamandzi pour le site de Pamandzi, Vahibé et au Port de Longoni.

	Période	Température	Précipitation	Ensoleillement	Vitesse du vent
Hauts-Vallons	31/01/2017 09/02/2017	26 à 28°C	0,21 mm	-	1,4 m.s <sup>-1</sup>
Kawéni nord	17/02/2017 27/02/2017	26 à 27,8°C	0,16 mm	-	0,9 m.s <sup>-1</sup>
Vahibé	27/03/2017 09/04/2017	25,6 à 32,3°C	5,21 mm	4 – 10 h	-
Port de Longoni	02/03/2017 20/03/2017	25 à 31,7°C	7,4 mm	1,1 – 9,2 h	-
Pamandzi	11/04/2017 30/04/2017	25,4 à 31,3°C	3,59 mm	2,2 – 10,2 h	-

*Tableau 6 : Conditions météorologiques pendant les périodes de prélèvement*

Sur l'ensemble des sites, les températures étaient assez élevées avec une moyenne globale de 28°C, les précipitations ont été faibles. En effet, cette année Mayotte a connu une sécheresse se caractérisant par l'absence de pluies durant la période allant de décembre 2016 à avril 2017. De plus, les vents ont également été faibles. Ces conditions sont défavorables à la qualité de l'air.

## 2.2 Pollution particulaire

### 2.2.1 Niveau de pollution

Globalement, la concentration en PM10, sur les trois sites est inférieure à la valeur limite journalière (50 µg.m<sup>-3</sup>) fixée par la directive n°2008/50/CE et en deçà du seuil d'évaluation inférieure

( $25 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) hormis pour le site trafic où la concentration en PM10 peut par moment dépasser le seuil d'évaluation inférieur et supérieur (Figure 2).

Le niveau de PM10 moyen le plus bas est retrouvé sur le site rural avec une moyenne de  $10,04 \mu\text{g.m}^{-3}$  ( $\delta = 4,1 \mu\text{g.m}^{-3}$ ), suivi du site urbain avec  $2,1 \mu\text{g.m}^{-3}$  ( $\delta = 3,9 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) puis du site trafic avec  $22,8 \mu\text{g.m}^{-3}$  ( $\delta = 13,6 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) et où le niveau de PM10 est deux fois plus important que sur le site rural.

### 2.2.2 Variation temporelle

Les niveaux de PM10 retrouvés à Kawéni nord (site trafic) laissent supposer que les concentrations en PM10 dans ce secteur sont sous l'influence du trafic. Ils seraient issus de la remise en suspension des poussières dues au roulement des véhicules mais aussi du dégagement de particules par les pots d'échappement des automobiles. En effet, les concentrations en PM10 sont relativement élevées en semaine (entre  $18$  et  $45 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) lorsque le trafic routier est important alors que durant le weekend (18/03/2017 et du 19/03/2017) elles sont plutôt basses avec des concentrations inférieures à  $14 \mu\text{g.m}^{-3}$  (Figure 2.C). Ceci est également illustré par les figures 2.E et 2.F qui représente les profils de PM10 durant une journée type en semaine (Figure 2.F) et une journée type du weekend (Figure 2.E). Durant le weekend, le niveau de PM10 semble être régulier avec un maximum de  $60 \mu\text{g.m}^{-3}$ . Alors que lors d'une journée en semaine, les concentrations fluctuent énormément avec des pics de PM10 à des heures précises (6h-8h ; 11h-13h30 et 15h-18h) qui correspondent aux heures où la circulation est importante puis vers un retour au niveau de fond entre 18 h et 5 h du matin.

### 2.2.3 Impact sanitaire

Ces valeurs ne dépassent pas la valeur limite journalière fixée par la directive n°2008/50/CE du 21 mai 2008. Cependant, sur certains sites, d'importantes concentrations horaires en PM10 ont été observées (Figure 2.D) : industriel :  $200 \mu\text{g.m}^{-3}$  ( $\delta = 73 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) ; trafic :  $161 \mu\text{g.m}^{-3}$  ( $\delta = 29 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) ; périurbain :  $85 \mu\text{g.m}^{-3}$  ( $\delta = 17 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) ; rural :  $21 \mu\text{g.m}^{-3}$  ( $\delta = 5 \mu\text{g.m}^{-3}$ ).

Bien qu'il n'y ait pas de valeur réglementaire horaire pour réaliser des comparaisons, les niveaux de concentrations rencontrées semblent assez significatifs pour causer des effets nocifs sur la santé. D'autant plus qu'actuellement il n'a pas été défini de seuil au-dessous duquel la pollution particulaire n'affecte en rien la santé. L'exposition chronique à ces niveaux de PM10 pourrait donc à long terme avoir des répercussions sur la santé.

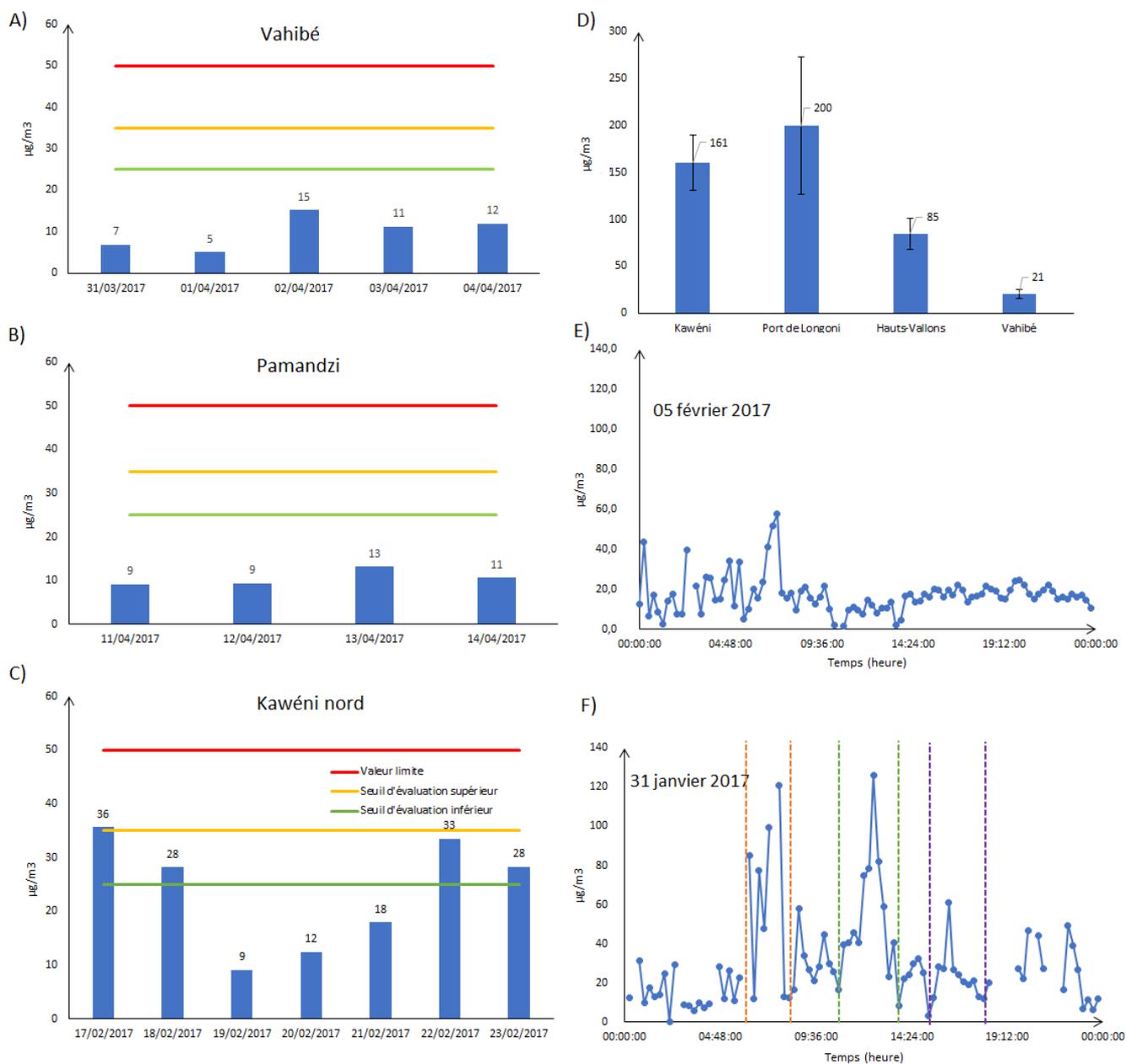


Figure 2 : A, B et C) Niveaux journaliers de PM10 ; D) Niveaux horaire de PM10 ; E) Variations de PM10 en weekend ; F) Variation des PM10 en semaine

## 2.3 Pollution aux HAP

### 2.3.1 Niveaux mesurés

#### a) Benzo(a)pyrène

Les niveaux de B(a)P mesurés sur les différents sites sont très hétérogènes. Les niveaux les plus bas sont retrouvés sur les sites rural, urbain et industriel avec des concentrations inférieures à la limite de détection de  $0,05 \text{ ng.m}^{-3}$ . Les sites périurbain et trafic se démarquent avec des concentrations supérieures à cette limite de détection. Sur le site périurbain, par exemple, les concentrations mesurées sont de  $0,05 \text{ ng.m}^{-3}$  (Cf annexe 3).

- Niveaux moyens

Globalement, les niveaux moyens<sup>5</sup> de B(a)P sont établis à  $0,025 \text{ ng.m}^{-3}$  en zone rurale et industrielle,  $0,029 \text{ ng.m}^{-3}$  en zone urbaine,  $0,05 \text{ ng.m}^{-3}$  en zone périurbaine et  $0,19 \text{ ng.m}^{-3}$  en zone trafic (Figure 3).

Néanmoins, la concentration moyenne retrouvée en milieu périurbain n'est pas significativement différente du site de Vahibé et des autres sites. Les niveaux mesurés au niveau de ces quatre sites représentent donc le niveau de fond en B(a)P.

Le site trafic se distingue des autres sites par une concentration moyenne en B(a)P très élevée, 4 fois plus élevée qu'en zone périurbaine et environ 7 fois plus élevée qu'au niveau des quatre autres sites.

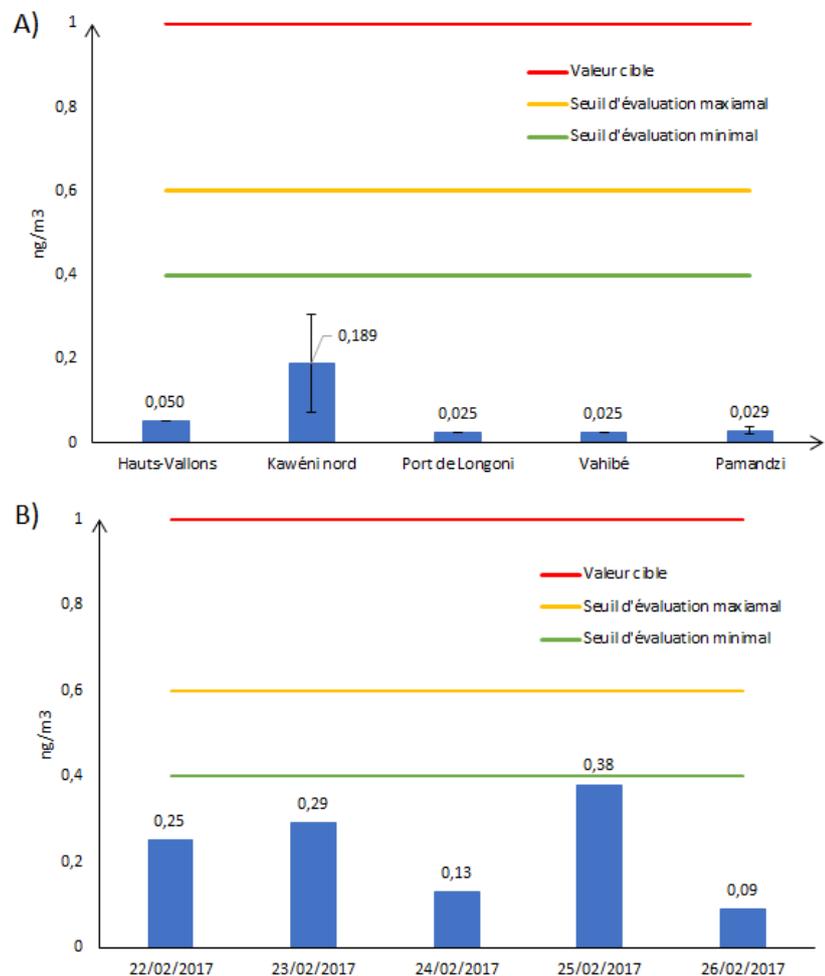


Figure 3 : A) Niveaux moyens de B(a)P sur les sites de mesures ; B) Concentration journalière de B(a)P à Kawéni nord

<sup>5</sup> Pour le calcul de la moyenne, les valeurs inférieures à la limite de détection (LD) sont prises égales à LD/2 comme le préconise le guide méthodologique pour le calcul des statistiques relatives à la qualité de l'air (juin 2016).

- Niveaux journaliers

La concentration journalière maximale de B(a)P relevée sur le site périurbain s'élève à  $0,05 \text{ ng.m}^{-3}$  (Cf annexe 3). Cette concentration est très en dessous de la valeur cible fixée de  $1 \text{ ng.m}^{-3}$  et 8 à 12 fois plus basse que les seuils d'évaluations (SES =  $0,60 \text{ ng.m}^{-3}$  ; SEI =  $0,40 \text{ ng.m}^{-3}$ ).

À Kawéni nord (site trafic), la concentration journalière maximale mesurée est de  $0,33 \text{ ng.m}^{-3}$ . Bien qu'en dessous de la valeur cible et des seuils d'évaluation, cette concentration reste relativement élevée et se situe à la limite du seuil d'évaluation inférieure fixée à  $0,40 \text{ ng.m}^{-3}$  (Figure 3.B).

b) Autres HAP

- Niveaux moyens et journaliers

Comme pour le B(a)P, les niveaux de concentrations mesurées des 9 autres HAP sont inférieurs à la limite de détection de  $0,09 \text{ ng.m}^{-3}$  sur les sites de Vahibé (rural), de Pamandzi (périurbain) et du Port de Longoni (industriel). Aux Hauts-Vallons (site périurbain), les concentrations sont légèrement plus élevées : entre  $0,09$  et  $0,17 \text{ ng.m}^{-3}$  (Cf annexe 3). Sur le site de Kawéni nord (trafic), les concentrations journalières de HAP sont significativement plus élevées (entre  $0,09$  et  $0,58 \text{ ng.m}^{-3}$ ) que sur les autres sites (Cf annexe 3).

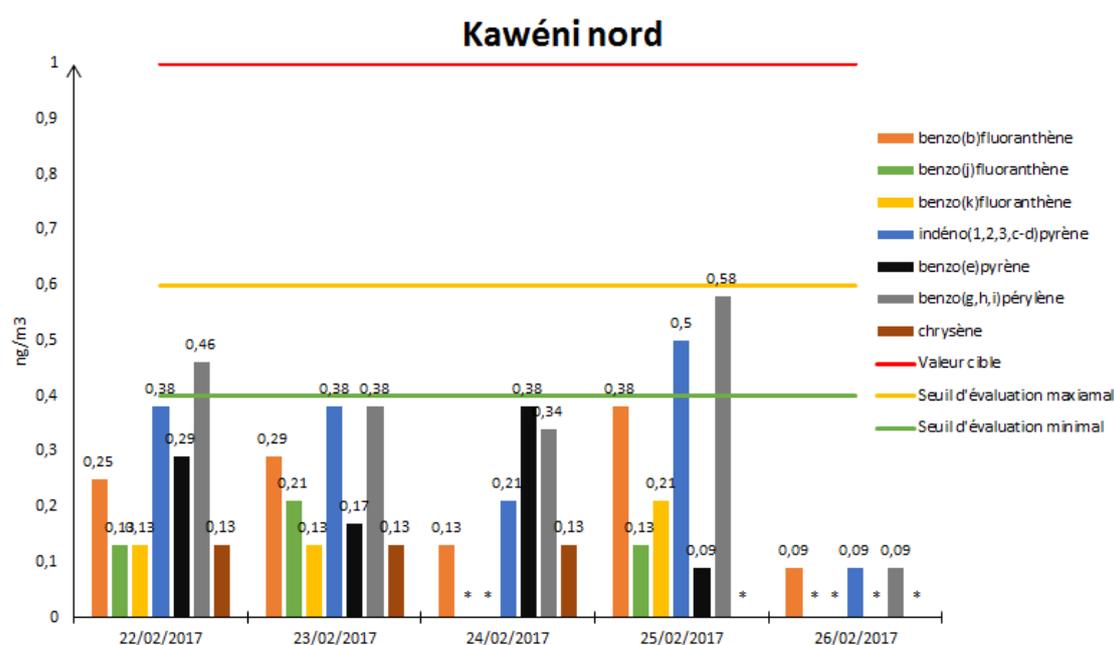


Figure 4 : Concentrations journalières des HAP au niveau du site trafic

De plus, notons que pour certains HAP (IND, B(ghi)P, B(b)F et B(e)P), les concentrations journalières mesurées s’approchent ou dépassent le seuil d’évaluation inférieur de  $0,4 \text{ ng.m}^{-3}$  (Figure 4).

- **Variation temporelle**

Par ailleurs, les concentrations de HAP mesurées à Kawéni nord (site trafic) sont plus faibles le 26/02/2017 que le reste de la semaine (Figure 3.B et Figure 4). Cette date correspond à un dimanche, jour durant lequel la circulation est peu importante sur la zone de Kawéni nord. Ces concentrations se rapprochent de celles mesurées sur le site de Vahibé qui caractérise le niveau de fond. Cela laisse donc supposer que la pollution aux HAP dans cette zone est essentiellement due au trafic routier qui prédomine durant la semaine lors de forte affluence sur la route.

### 2.3.2 Comparaison

En 2015, en France, seuls trois sites sur une soixantaine présentent des concentrations en B(a)P supérieures à la valeur cible fixée à  $1 \text{ ng.m}^{-3}$  par la directive 2004/107/CE du 15 décembre 2004. Les concentrations annuelles de B(a)P sont en majorité inférieures ou égales à  $0,5 \text{ ng.m}^{-3}$  sur 86% des sites et entre  $0,51$  et  $1 \text{ ng.m}^{-3}$  sur 9,5% des sites. Les concentrations relevées sur Mayotte, durant cette étude, entrent dans la tendance nationale avec des valeurs inférieures à  $0,5 \text{ ng.m}^{-3}$ .

Par ailleurs, en comparaison avec d’autres DOM (Tableau 7), les concentrations moyennes observées sur les différents sites sont du même ordre de grandeur sauf pour le site trafic de Kawéni nord.

	Guyane	Martinique	Guadeloupe	La Réunion	Mayotte
<b>B(a)P</b>	< $0,02 \text{ ng.m}^{-3}$ (2016)	$0,01 \text{ ng.m}^{-3}$ (2016)	$0,05 \text{ ng.m}^{-3}$ (2013)	$0,05 - 0,06 \text{ ng.m}^{-3}$ (2016)	$0,05 - 0,19$ $\text{ng.m}^{-3}$

Tableau 7 : Concentrations moyennes des HAP dans les DOM (sources : gwadair.fr, madininair.fr, oraguyane.org)

### 2.3.3 Impact sanitaire

Les HAP sont connus pour leur pouvoir cancérigène et mutagène. Dans la surveillance de la qualité de l’air, le B(a)P est suivi comme marqueur du risque cancérigène des HAP.

Les niveaux de B(a)P mesurés étant en dessous de la limite de détection sur les sites de Vahibé (rural), Pamandzi (urbain), des Hauts-Vallons (périurbain) et du Port de Longoni (industriel) n’ont potentiellement pas d’effet sur la population à court et long terme. Ce qui n’est pas le cas à Kawéni nord (trafic) où les concentrations observées sont relativement plus élevées (Cf annexe 3).

Bien qu'en dessous des valeurs réglementaires, les niveaux mesurés sur ce dernier site peuvent néanmoins avoir un impact sur la santé des personnes exposées. En effet, dans le cas de substances cancérigènes, il n'existe pas de seuil en dessous duquel il n'y a pas de risque sur la santé.

## 2.4 Pollution aux métaux lourds

### 2.4.1 Substances réglementées

#### a) Arsenic

- Niveaux journaliers

Les concentrations journalières mesurées pour l'arsenic sont inférieures à la limite de détection de  $0,33 \text{ ng.m}^{-3}$  et à la limite de quantification de  $1 \text{ ng.m}^{-3}$  sur l'ensemble des sites (Cf annexe 4). Ces concentrations sont en dessous des valeurs réglementaires fixées par la directive 2004/107/CE du 15 décembre 2004 (Tableau 1).

- Niveaux moyens

Les niveaux moyens<sup>6</sup> d'arsenic sur les cinq sites sont significativement similaires (Figure 5). La moyenne la plus basse est retrouvée au niveau du site industriel avec  $0,3 \text{ ng.m}^{-3}$  ( $\delta = 0,2 \text{ ng.m}^{-3}$ ) d'arsenic dans l'air ambiant et la moyenne la plus haute sur le site trafic avec  $0,7 \text{ ng.m}^{-3}$  ( $\delta = 0,4 \text{ ng.m}^{-3}$ ) d'arsenic (Cf annexe 4).

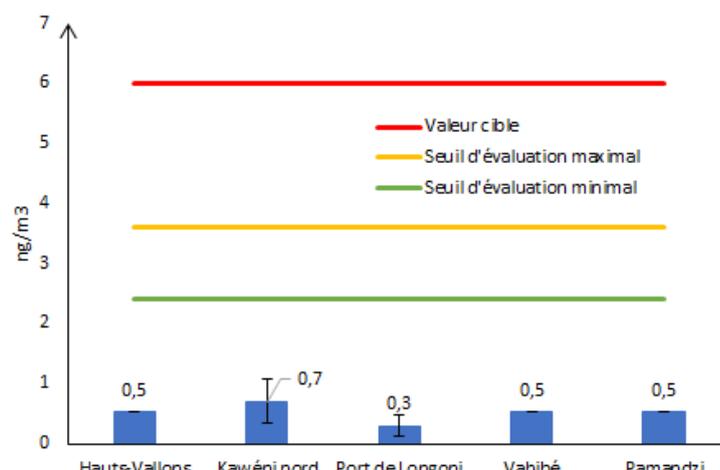


Figure 5 : Concentrations moyennes en arsenic

- Comparaison

Les concentrations d'arsenic mesurées sont toutes inférieures à quelques exceptions près aux limites de détection et de quantification. Elles ne diffèrent pas du niveau de Vahibé qui caractérise le niveau de fond d'arsenic sur l'île.

En comparaison avec la moyenne nationale qui est inférieure à  $6 \text{ ng.m}^{-3}$ , les concentrations mesurées à Mayotte sont incluses dans cet intervalle.

<sup>6</sup> Pour le calcul de la moyenne, les valeurs inférieures à la limite de détection (LD) et la limite de quantification sont prises égales à LD/2 ou LQ/2 comme le préconise le guide méthodologique pour le calcul des statistiques relatives à la qualité de l'air (juin 2016).

En parallèle avec les concentrations d'arsenic dans d'autres DOM, les concentrations observées sur Mayotte sont du même ordre de grandeur que celles mesurées en Martinique et en Guadeloupe par exemple (Tableau 8). En Guyane, elles sont 10 à 20 fois moins importantes que sur l'ensemble des DOM.

	France	Guyane	Martinique	Guadeloupe	La Réunion	Mayotte
<b>Arsenic</b>	< 6 ng.m <sup>-3</sup> (2012)	0,02 ng.m <sup>-3</sup> (2016)	0,2 -0,4 ng.m <sup>-3</sup> (2013-2016)	0,4 ng.m <sup>-3</sup> (2013)	0,7- 2,3 ng.m <sup>-3</sup> (2014)	0,1 - 0,5 ng.m <sup>-3</sup> (2017)

Tableau 8 : Concentrations d'arsenic dans les DOM et la France métropolitaine (sources : gwadair.fr, madinainair.fr, ora-guyane.org)

- Impact sanitaire

D'un point de vue sanitaire et environnemental, ces concentrations ne devraient pas avoir d'impact à court et long terme. En effet, les niveaux mesurés sont en deçà du seuil d'évaluation inférieur (3,6 ng.m<sup>-3</sup>) et donc de la valeur cible (6 ng.m<sup>-3</sup>) qui lorsqu'elle est franchie représente un risque pour la santé humaine.

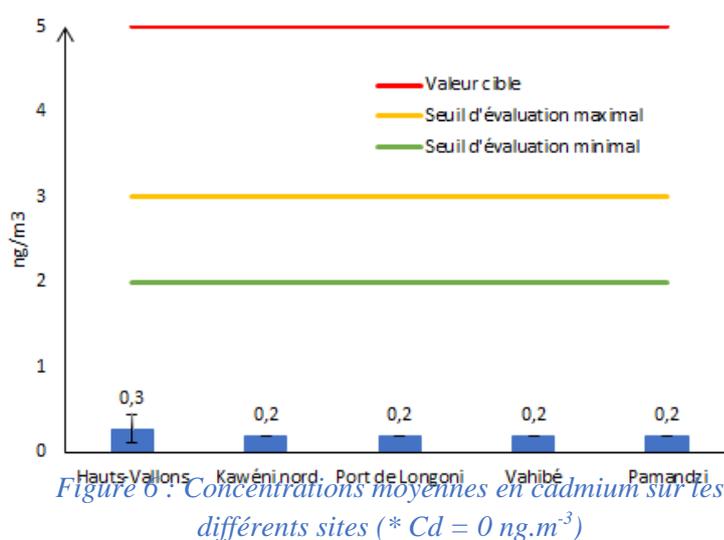
#### b) Cadmium

- Niveaux journaliers

Les concentrations journalières de cadmium (*C<sub>f</sub>* annexe 4) sont inférieures aux limites de détection et de quantification qui sont respectivement de 0,33 ng.m<sup>-3</sup> et 1 ng.m<sup>-3</sup>. Ces concentrations sont en dessous de la valeur cible de 5 ng.m<sup>-3</sup>.

- Niveaux moyens

Néanmoins le niveau moyen maximal est retrouvé aux Hauts-Vallons (périurbain) avec 0,3 ng.m<sup>-3</sup> ( $\delta = 0,2 \text{ ng.m}^{-3}$ ). Une valeur qui reste tout de même en dessous des valeurs réglementaires (Figure 6). Les concentrations mesurées sur l'ensemble des sites sont semblables aux niveaux mesurés à Vahibé (rural). Ils caractérisent donc les niveaux de fond de cadmium sur l'île.



- Comparaison

Le niveau national de cadmium dans l'air ambiant est inférieur à 5 ng.m<sup>-3</sup>, les niveaux mesurés à Mayotte sont compris dans cette intervalle. De plus, les niveaux de cadmium sont du même ordre de grandeur que ceux retrouvés en Martinique, La Réunion et en Guadeloupe (Tableau 9).

	France	Nouvelle-Calédonie	Martinique	Guadeloupe	La Réunion	Mayotte
<b>Cadmium</b>	<5 ng.m <sup>-3</sup> (2012)	0,09 - 0,14 ng.m <sup>-3</sup> (2011)	0,04 - 0,4 ng.m <sup>-3</sup> (2013-2016)	0,4 ng.m <sup>-3</sup> (2016)	0,14 - 0,22 ng.m <sup>-3</sup> (2014)	0,09 ng.m <sup>-3</sup> (2017)

*Tableau 9 : Concentrations de cadmium dans les DOM et en France métropolitaine (sources : gwadair.fr, madinair.fr, ora-guyane.org, bilan de la qualité de l'air de 2012)*

- Impact sanitaire

Les concentrations observées ne suggèrent pas qu'il y ait un risque pour la santé ou l'environnement. En effet, elles sont toutes inférieures à la valeur cible.

### c) Nickel

- Niveaux journaliers

Globalement, les concentrations sont en dessous de la limite de détection ( $1,6 \text{ ng.m}^{-3}$ ) et de quantification ( $5,2 \text{ ng.m}^{-3}$ ) hormis quelques exceptions sur chaque site.

La concentration journalière maximale est retrouvée sur le site industriel avec  $21,6 \text{ ng.m}^{-3}$ . Les concentrations journalières maximales mesurées sur les autres sites sont de  $10,5 \text{ ng.m}^{-3}$  sur le site trafic Kawéni nord,  $1,8 \text{ ng.m}^{-3}$  aux Hauts-Vallons et  $4,4 \text{ ng.m}^{-3}$  à Pamandzi (Cf annexe 4).

- Niveaux moyens

Les niveaux moyens mesurés sont très hétérogènes (Figure 7). Ainsi, la moyenne la plus élevée est retrouvée au Port de Longoni (industriel) avec  $8,2 \text{ ng.m}^{-3}$  ( $\delta = 7,9 \text{ ng.m}^{-3}$ ), suivi de Kawéni nord (trafic) avec  $6,2 \text{ ng.m}^{-3}$  ( $\delta = 4,9 \text{ ng.m}^{-3}$ ) puis par Vahibé (rural) et Pamandzi (urbain) avec respectivement  $2,6 \text{ ng.m}^{-3}$  et  $2,4 \text{ ng.m}^{-3}$  ( $\delta = 1,6 \text{ ng.m}^{-3}$ ). Cependant d'un point de vue statistique, ces concentrations ne sont significativement pas différentes les unes des autres.

- Comparaison

Les concentrations mesurées étant inférieures à la valeur cible de  $20 \text{ ng.m}^{-3}$ , elles entrent donc dans la gamme nationale et diffèrent légèrement d'un DOM à un autre (Tableau 10). Les concentrations mesurées au Port de Longoni s'accordent avec celles observées en Martinique et en Nouvelle-Calédonie (Tableau 10). De plus, ces concentrations correspondent plutôt à des concentrations de type urbaines [8].

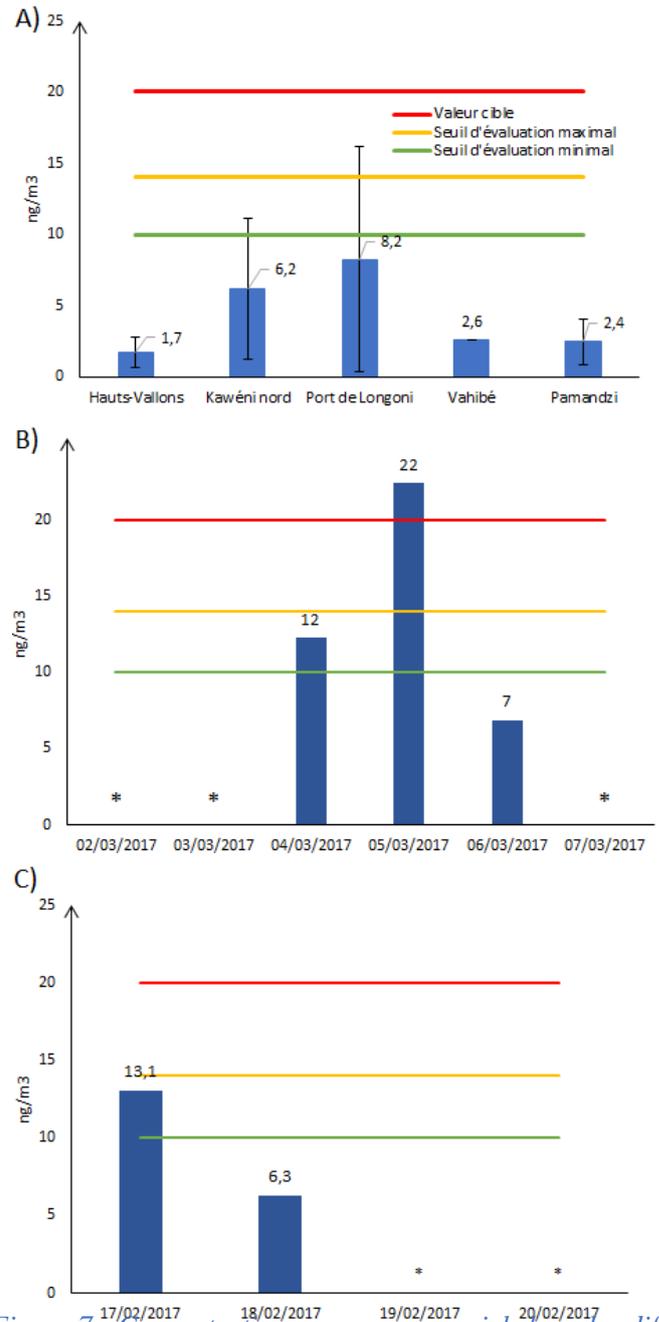


Figure 7 : Concentrations moyennées en nickel sur les différents sites et concentration journalière (\* :  $Ni < 1,6 \text{ ng.m}^{-3}$ )

	Nouvelle-Calédonie	Guyane	Martinique	Guadeloupe	France <sup>7</sup>	Mayotte
<b>Nickel</b>	6,91 – 15,23 ng.m <sup>-3</sup> (2011)	0,2 ng.m <sup>-3</sup> (2016)	1,1 - 21 ng.m <sup>-3</sup> (2016)	0,6 - 1 ng.m <sup>-3</sup> (2013-2016)	< 20 ng.m <sup>-3</sup> (2012)	0,9 - 7,4 ng.m <sup>-3</sup> (2017)

*Tableau 10 : Concentrations de nickel dans les DOM et en France métropolitaine (sources : scalair.fr, gwadair.fr, madininair.fr, ora-guyane.org, bilan de la qualité de l'air de 2012)*

- **Impact sanitaire**

Bien que les niveaux moyens soient inférieurs à la valeur cible de 6 ng.m<sup>-3</sup>, les concentrations journalières mesurées sur certains sites dépassent la valeur cible et le seuil d'évaluation inférieure de 10 ng.m<sup>-3</sup> (Cf annexe 4).

De plus, en parallèle avec les valeurs bibliographiques [19], ces concentrations sont beaucoup trop faibles pour causer une toxicité aiguë chez les individus exposés. Cependant de façon chronique, l'exposition à des concentration supérieure à la valeur cible peut avoir des effets nocifs à long terme sur la santé.

#### d) Plomb

- **Niveaux mesurés**

Les concentrations mesurées en plomb sont globalement inférieures à la valeur limite fixée par la directive 2008/50/CE du 21 mai 2008 (Tableau 2) hormis sur le site des Hauts-Vallons et de Kawéni nord et une exception sur les sites de Pamandzi et Vahibé (Cf annexe 4).

La Figure 8 illustre les concentrations moyennes en plomb sur les cinq sites de mesures. A première vue, il en ressort que les concentrations mesurées aux Hauts-Vallons sont 15 à 9 fois plus élevées qu'au Port de Longoni, Pamandzi et Vahibé. A Kawéni nord, elles sont 5 fois plus basses qu'aux Hauts-Vallons.

Néanmoins, les concentrations mesurées à Pamandzi, Kawéni nord et au Port de Longoni ne sont pas significativement différentes de celles mesurées à Vahibé qui caractérise le niveau de fond.

Seul, le site des Hauts-Vallons montre une différence avec les autres sites. Il est probable qu'il y ait une source de pollution au plomb dans cette zone. Le plomb est un métal très lourd et retombe à proximité des sources de pollution. Dans ce cas, la présence teneurs plus élevées en plomb pourrait provenir de la remise en suspension des poussières. On notera qu'à proximité du site, il existe trois

<sup>7</sup> Un seul site dépasse cette valeur cible. Il s'agit d'un site dans la commune d'Isbergues dans le département du Nord-Pas-de-Calais avec une concentration de 46 ng.m<sup>-3</sup>.

terre-pleins susceptibles d'être vecteur de poussières où des travaux de BTP sont réalisés (Figure 9).

Ceci expliquerait cette différence de concentration avec les autres sites de mesures.

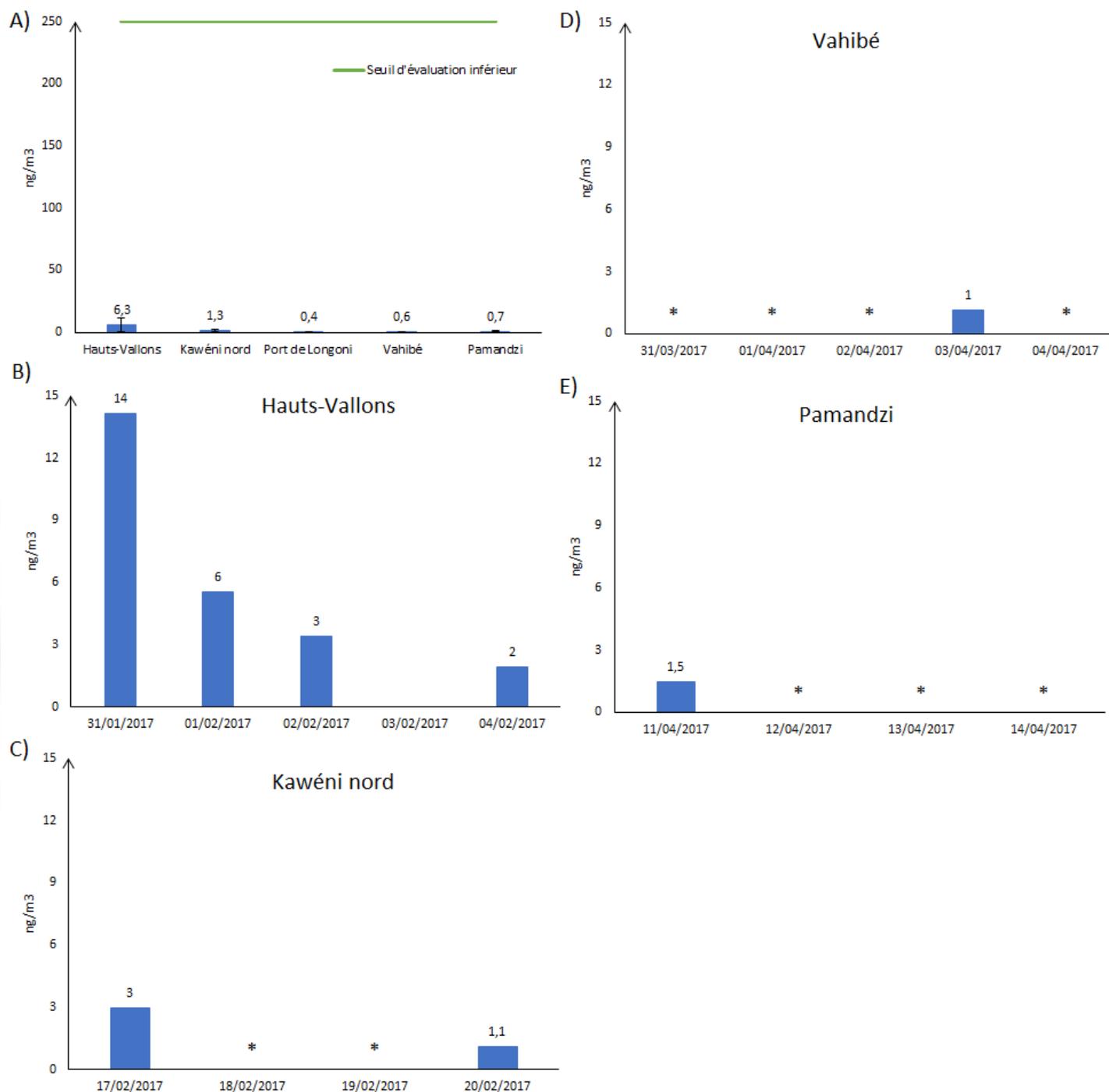


Figure 8 : A) Niveaux moyens de plomb sur les sites de mesures ; B, C, D et E) Concentration journalière de plomb sur les différents sites (\* : concentration inférieure à la limite de détection ou de quantification)



Figure 9 : Cartographie du site des Hauts-Vallons (étoile rouge : site de mesure ; rond orange : terre-pleins)

- Comparaison

Par comparaison à la métropole et aux autres DOM (Tableau 11), les concentrations mesurées à Mayotte sont plus faibles que pour la France mais reste dans les mêmes ordres de grandeurs des valeurs observées dans les DOM.

	France	Guyane	Martinique	Guadeloupe	La Réunion	Mayotte
<b>Plomb</b>	30 ng.m <sup>-3</sup> (2012)	0,5 ng.m <sup>-3</sup> (2016)	0,9 - 1 ng.m <sup>-3</sup> (2016)	2 ng.m <sup>-3</sup> (2016)	0,7 - 1,3 ng.m <sup>-3</sup> (2014)	0,2 - 6,5 ng.m <sup>-3</sup> (2017)

Tableau 11 : Concentrations de plomb dans les DOM et la France métropolitaine (sources : gwadair.fr, madinair.fr, ora-guyane.org, Atmo Réunion)

- Impact sanitaire

Compte tenu des concentrations mesurées sur l'ensemble des sites, les risques d'effets nocifs sur la santé ou l'environnement sont faibles

## 2.4.2 Substances non réglementées

Étant la première évaluation concernant les polluants particuliers métalliques sur l'île, Hawa Mayotte a décidé d'investiguer d'autres métaux non concernés par la réglementation : chrome, cuivre, manganèse et zinc.

a) Niveaux mesurés

- Cuivre

Les concentrations mesurées pour le cuivre sont toutes inférieures aux limites de détection ( $1,6 \text{ ng.m}^{-3}$ ) et de quantification ( $5,2 \text{ ng.m}^{-3}$ ) hormis aux Hauts-Vallons et à Kawéni nord où les seules concentrations journalières dépassent la limite de quantification et atteignent respectivement  $14 \text{ ng.m}^{-3}$  et  $34 \text{ ng.m}^{-3}$ . (Figure 10)

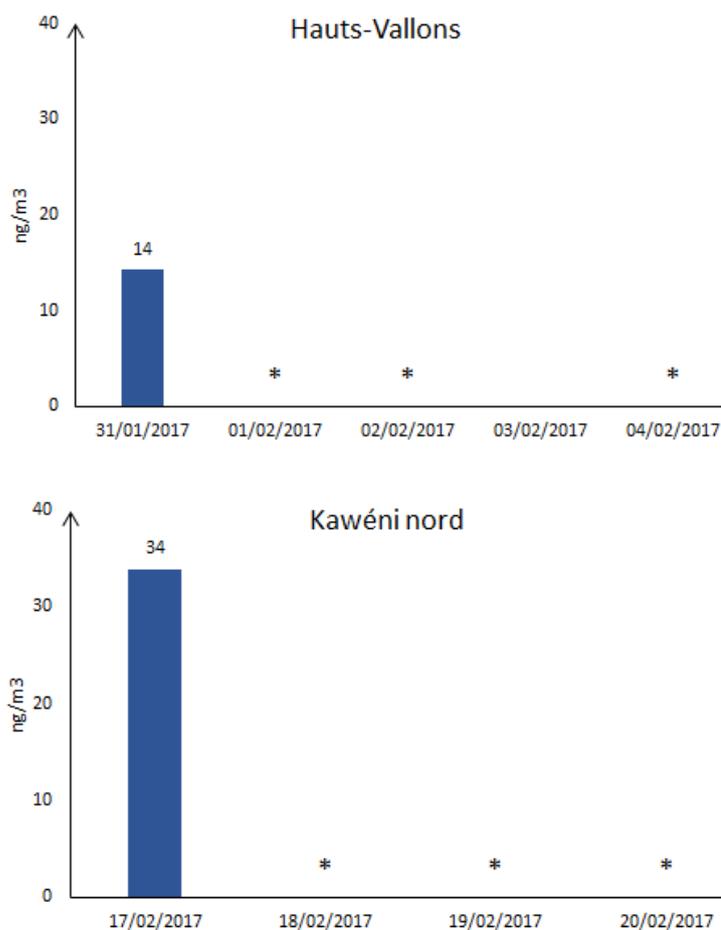


Figure 10 : Concentration journalière en cuivre sur les sites des Hauts-Vallons et Kawéni nord

- Chrome

Les niveaux mesurés pour le chrome sont bas. La concentration moyenne la plus basse est retrouvée à Pamandzi ( $0,9 \text{ ng.m}^{-3}$ ,  $\delta = 2 \text{ ng.m}^{-3}$ ) suivi du Port de Longoni ( $1,8 \text{ ng.m}^{-3}$ ,  $\delta = 2,8 \text{ ng.m}^{-3}$ ). La concentration moyenne la plus forte est relevée aux Hauts-Vallons avec  $6,7 \text{ ng.m}^{-3}$  ( $\delta = 0,8 \text{ ng.m}^{-3}$ ) (Figure 11).

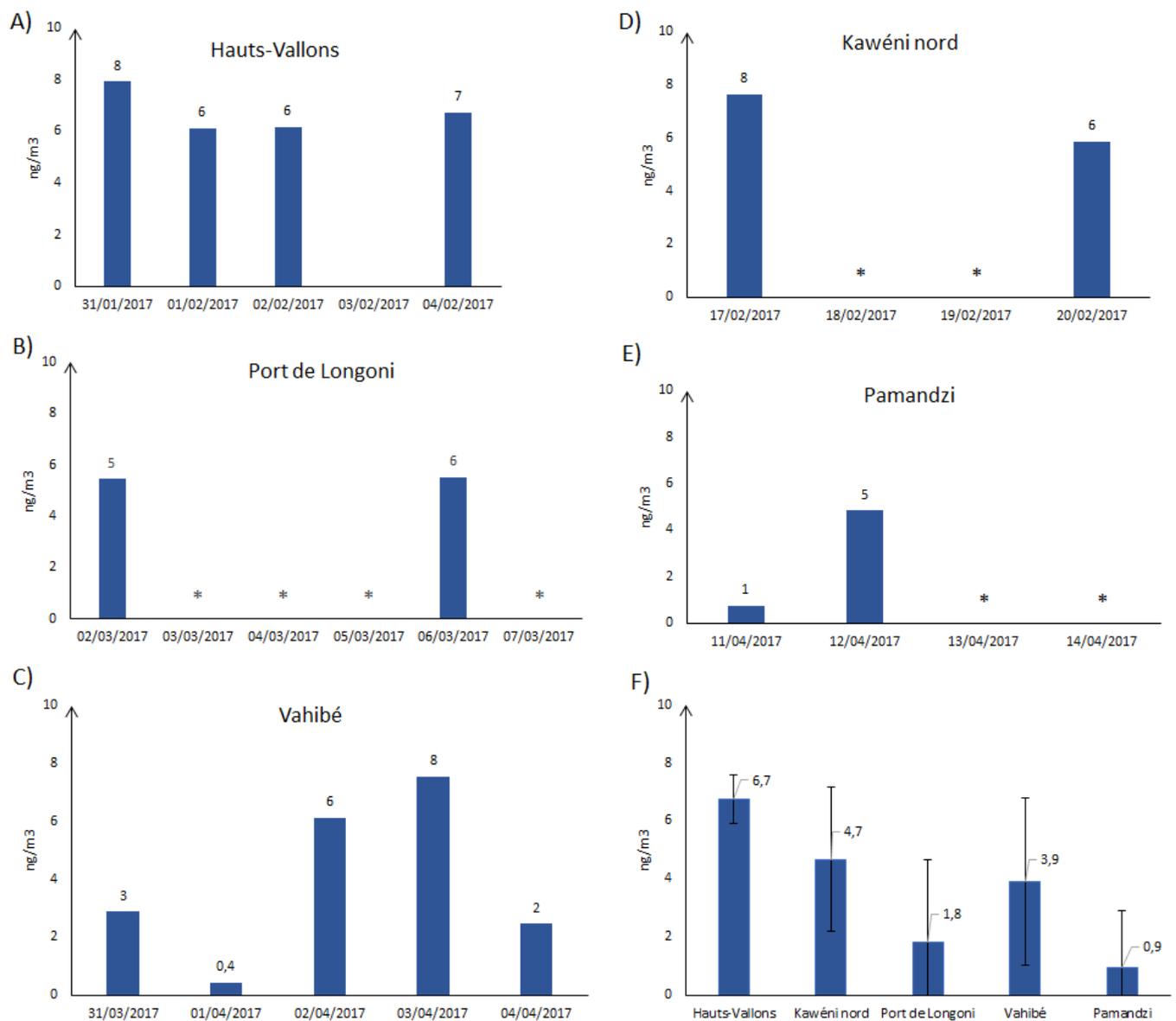


Figure 11 : Concentration journalière de chrome sur les sites de mesures

- Manganèse

Pour le manganèse, les concentrations sont en dessous des limites de détection ( $LD = 1,6 \text{ ng.m}^{-3}$ ) et de quantification ( $LQ = 5,2 \text{ ng.m}^{-3}$ ) sur le site de Vahibé (rural) et du Port de Longoni (industriel). Le niveau de fond de manganèse dans l'atmosphère est donc très faible.

Sur les autres sites, les concentrations journalières varient de 6 à  $8 \text{ ng.m}^{-3}$  sur Pamandzi (urbain), de 7 à  $28 \text{ ng.m}^{-3}$  sur le site de Kawéni nord (trafic) et de 10 à  $15 \text{ ng.m}^{-3}$  aux Hauts-Vallons (périurbain).

Les concentrations mesurées à Kawéni nord fluctuent énormément du simple au triple (Figure 12.C). Ce n'est pas le cas sur les deux autres sites où la concentration journalière reste dans les mêmes ordres de grandeur (Figure 12.A et Figure 12.B). Ces concentrations se rapprochent des concentrations moyennes données par l'OMS [8] pour les zones éloignées des sources de pollution.

La Figure 12.D illustre la moyenne journalière de manganèse mesurée dans l'air ambiant sur les sites périurbain, trafic et urbain. Les niveaux le plus bas est retrouvé à Pamandzi  $5,3 \text{ ng.m}^{-3}$  ( $\delta = 2,2 \text{ ng.m}^{-3}$ ) suivi des Hauts-Vallons  $11,8 \text{ ng.m}^{-3}$  ( $\delta = 2,2 \text{ ng.m}^{-3}$ ) puis de Kawéni nord  $11,4 \text{ ng.m}^{-3}$  ( $\delta = 11,1 \text{ ng.m}^{-3}$ ). Cependant, il n'y a pas de différence significative entre les concentrations moyennes à Kawéni nord et les deux autres sites. Cette similarité est due à la variation des concentrations à Kawéni nord qui fluctuent du simple au triple.

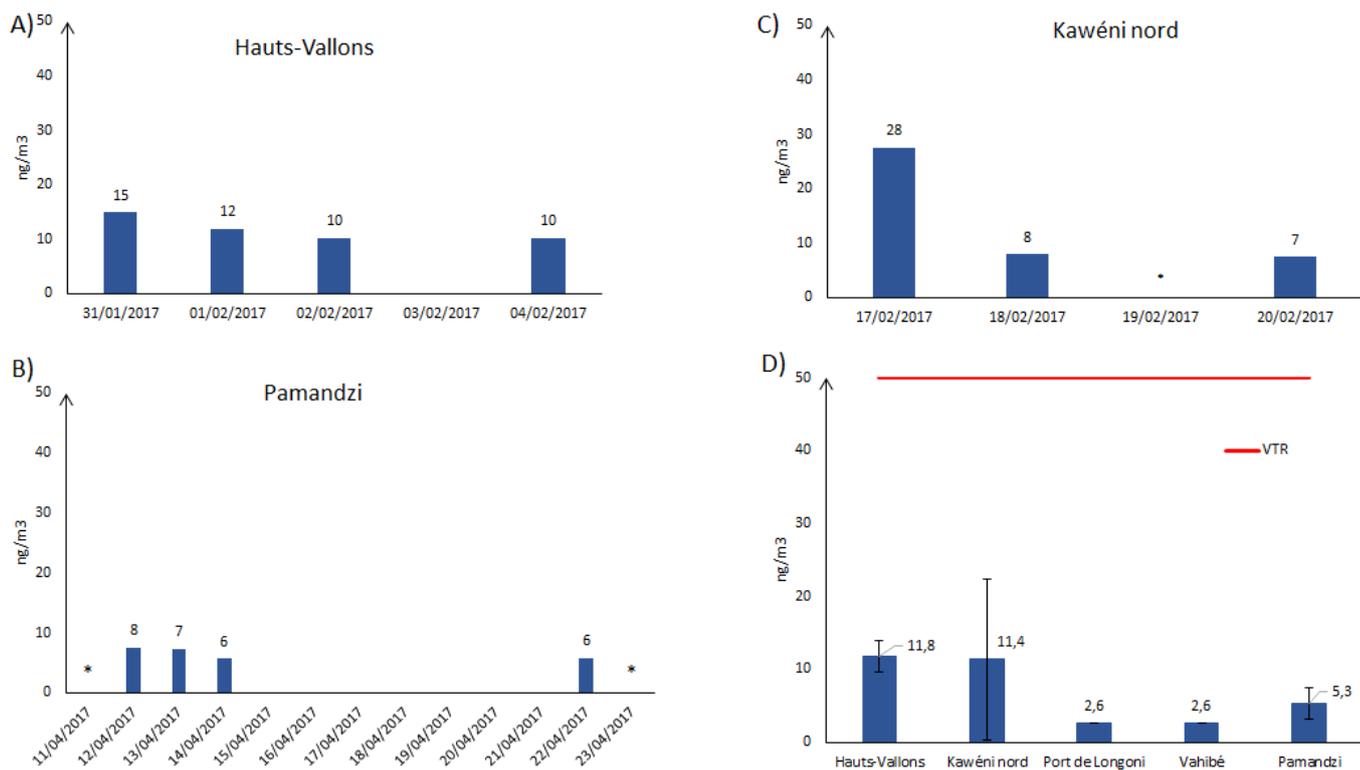


Figure 12 : Concentration journalière de manganèse sur les sites urbain (A), périurbain (B) et trafic (C) et niveaux moyens mesurés (D)

- Zinc

Le niveau de fond moyen mesuré sur le site rural de Vahibé pour le zinc est de  $122 \text{ ng.m}^{-3}$  ( $\delta = 52 \text{ ng.m}^{-3}$ ). Les concentrations moyennes mesurées au Port de Longoni ( $116 \text{ ng.m}^{-3}$ ,  $\delta = 71 \text{ ng.m}^{-3}$ ) et Pamandzi ( $120 \text{ ng.m}^{-3}$ ,  $\delta = 46 \text{ ng.m}^{-3}$ ) sont légèrement plus basses avec et ne diffèrent pas significativement du niveau observé sur le site rural de Vahibé. Kawéni nord montre une concentration 2 fois moins importante que sur le site de Vahibé (Figure 13). Néanmoins il n'y a pas de différence significative entre les deux sites.

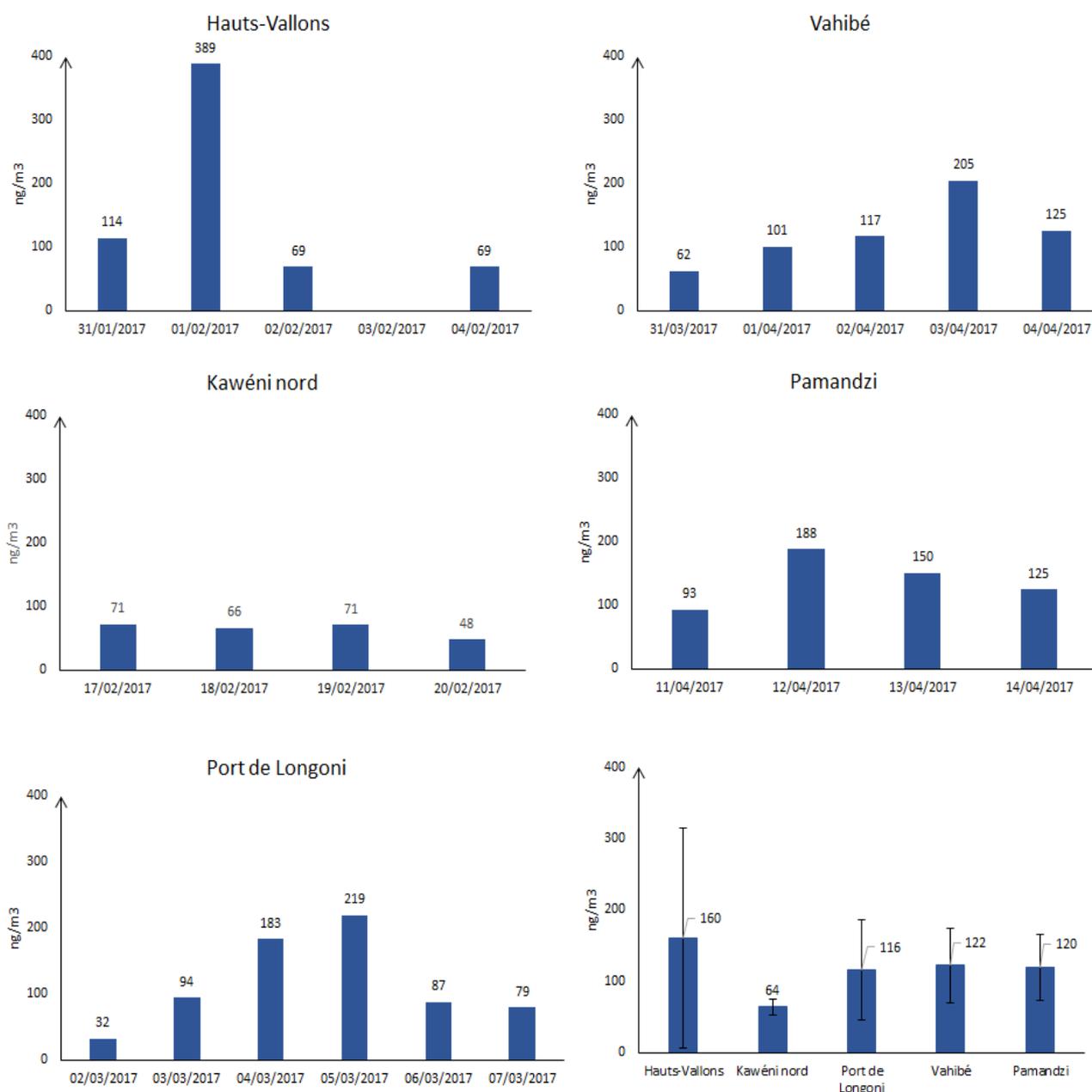


Figure 13 : Concentration journalière et moyenne de zinc dans l'air ambiant à Mayotte

### b) Impact sanitaire

D'après les niveaux de polluants, un risque sanitaire lors de l'exposition à ces différentes substances est faible.

En effet, les concentrations de manganèse, par exemple, sont inférieures aux valeurs toxicologiques de référence (Figure 12.D) définies par l'OMS (150 ng.m<sup>-3</sup>) et l'US EPA (50 ng.m<sup>-3</sup>). Les concentrations en cuivre sont faibles (< 0,33 ng.m<sup>-3</sup>) et celles du zinc sont très peu importantes voir quasi-négligeable par rapport aux concentrations répertoriées dans la littérature [24].

Néanmoins, même si les concentrations mesurées pour le chrome sont largement inférieures à la valeur guide préconisée par l’OMS (Tableau 4), il est bon de rester vigilant vis-à-vis du chrome qui est une substance cancérigène.

# Conclusion

## Conclusion

Conformément aux exigences réglementaires, Hawa Mayotte a initiée son évaluation préliminaire concernant la mesure des concentrations de HAP (benzo(a)pyrène) et des métaux lourds (arsenic, cadmium, nickel et plomb) sur les sites de Vahibé, des Hauts-Vallons, du Port de Longoni, de Kawéni nord et de Pamandzi, en février 2017.

Les niveaux de métaux lourds mesurés sont très faibles et pour la plupart en dessous des limites de détection. Les niveaux sont plus ou moins similaires à ceux mesurés sur Vahibé qui caractérise le niveau de fond de l'île. Le risque de dépasser les seuils d'évaluation en moyenne annuelle paraît minime hormis pour le site du Port de Longoni où certaines concentrations mesurées ont dépassé les seuils d'évaluation.

Concernant les HAP, les niveaux mesurés sont en dessous de la limite de détection pour trois des sites d'étude (Vahibé, Pamandzi et Port de Longoni). Seuls les Hauts-Vallons et Kawéni nord ont des concentrations moyennes plus ou moins élevées en B(a)P : 0,05 et 0,19 ng.m<sup>-3</sup>. Les concentrations mesurées sur le site trafic de Kawéni nord sont plus fortes, le risque de dépassement de la moyenne annuelle n'est pas négligeable dans cette zone.

Le site de Kawéni nord se distingue fortement des quatre autres sites. En effet, les niveaux de polluants (HAP et quelques métaux) sont plus élevés que sur les autres sites et varient dans la semaine avec de fortes concentrations en semaine et de faibles concentrations en weekend.

N'ayant pas atteint les 14% de temps annuel recommandé par les directives, la campagne de mesure des HAP et des métaux lourds va poursuivre son cours en couvrant la totalité de l'année et les deux saisons (été austral et hiver austral). Les résultats de ces campagnes donneront une indication sur les niveaux de métaux lourds et HAP tout en prenant en compte les variations saisonnières.

En cas de dépassements des seuils d'évaluations et/ou de la valeur cible, des mesures complémentaires seront réalisées pour atteindre la période minimum demandée par les directives. Une stratégie de surveillance des HAP et métaux lourds par des mesures conventionnelles ou par modélisation sera alors mise en place.

## Hygiène et Sécurité

En termes d'hygiène, l'association Hawa Mayotte est équipée dans chaque pièce d'une poubelle. A Mayotte, le tri des déchets existe mais n'est pas encore généralisé. Cependant au sein de l'association un tri est réalisé pour ce qui concerne les piles, les ampoules, les bouteilles en plastiques et les cartons. Les cartons sont stockés dans une pièce puis envoyés à la société de recyclage Enzo Recyclage. Les piles, les ampoules et les bouteilles sont stockées dans des boîtes en carton avant d'être jetés au tri sélectif.

La propreté des locaux qui comprend le ramassage des ordures, le lavage du sol et le dépoussiérage est assurée une fois par semaine par une entreprise de nettoyage. L'agent d'entretien assure également le nettoyage des bureaux de chaque salarié. Ce qui n'est pas sans améliorer les conditions de travail du personnel.

Pour la manipulation des échantillons, des gants et des gels désinfectants sont disponibles dans le laboratoire de l'association.

En termes de sécurité, l'association a doté le personnel d'équipements de protection individuel tels que des chaussures de sécurité, des casquettes et des protections auditives. Des casiers à cadenas sont également disponibles pour le rangement des effets personnels. Pour une meilleure protection du personnel, les locaux ont été mis aux normes de sécurité en vigueur. Ils ont été équipés de 3 détecteurs d'incendie et d'extincteurs qui sont régulièrement révisés par une société agréée. Par ailleurs, pour plus de sécurité l'entrée dans le bâtiment de l'association n'est permis que par un badge détenu par les occupants du bâtiment.

Soucieux du bien-être de ses employés, la direction de Hawa Mayotte met un point d'honneur sur l'ergonomie. Ainsi chaque poste de travail est équipé d'un bureau à hauteur adaptée, de siège dont les accoudoirs et la hauteur peuvent être réglés. Une voiture de type « Citroën berlingot » est mise à disposition du personnel pour leur déplacement sur le terrain et pour la traction de la remorque laboratoire du matériel de mesure.

## Références bibliographiques

- [1] G. Harel et E. Leoz-Garziandia, «Synthèse des du LCSQA menés sur les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (1997-2011),» 2011.
- [2] B. Temime, Contribution à l'étude de la répartition des HAP entre les phases gazeuse et particulaire : Validation de la technique de prélèvement par tube denuder annulaire, 2006.
- [3] CITEPA, «Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques - HAP,» 5 Octobre 2015. [En ligne]. Disponible: <http://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/polluant-organiques-persistants/hydrocarbures-aromatiques-polycycliques>. [Accès le 15 Février 2016].
- [4] Air Breizh, «Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP),» [En ligne]. Disponible: <http://www.airbreizh.asso.fr/polluants/les-hydrocarbures-aromatiques-polycycliques-hap/>.
- [5] S. Adeel, X. Shuyu, M. A. Hafeez, X. Wang, H. Hafiz Iftikhar, I. Zhad, Y. Pan, I. Mujahid, S. Muhammad Abubakr et Y. Zonghui, «Metabolism and toxicity of arsenicals in mammals,» *Environmental Toxicology and Pharmacology*, pp. 215-222, 2016.
- [6] Eléments Chimiques, «Abondance dans la croute terrestre,» [En ligne]. Disponible: <http://www.elementschimiques.fr/?fr/proprietes/abondances/abondance-dans-la-croute-terrestre>. [Accès le 15 Février 2016].
- [7] R. Maggs, «A Review of Arsenic in Ambient Air in the UK,» Février 2000. [En ligne]. Disponible: <https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/empire/arsenic00/arsenic.htm>.
- [8] OMS, «Air Quality Guidelines for Europe,» 2000.
- [9] OMS, «Air Quality Guidelines for Europe,» 1987.
- [10] CITEPA, «Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France au titre de la convention sur la pollution transfrontalière à longue distance et de la directive Européenne relative aux plafonds d'émissions nationaux (NEC),» Mars 2016. [En ligne]. Disponible: [http://www.citepa.org/images/III-1\\_Rapports\\_Inventaires/UNECE\\_France\\_mars2016\\_sec.pdf](http://www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/UNECE_France_mars2016_sec.pdf).
- [11] AIRPARIF, «Surveillance des métaux dans l'air ambiant,» Juin 2008. [En ligne]. Disponible: [https://www.airparif.asso.fr/\\_pdf/publications/Rapmontereau\\_biblio.pdf](https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/Rapmontereau_biblio.pdf).
- [12] Planétoscope, «Production mondiale de cadmium,» [En ligne]. Disponible: <http://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1967-production-mondiale-de-cadmium.html>. [Accès le 15 Février 2016].
- [13] R. Leygoni, «Les métaux lourds dans l'air : sources, émissions, mesure et effets,» *Pollution atmosphérique*, n° %1139, pp. 63-74, 1993.

- [14] World Bank Group, Pollutant Prevention and Abatement Handbook, 1998.
- [15] G. Kazantis, Cadmium, Lawrence Fishbein, 1987.
- [16] V.-C. Liao et J. Freedman, «Cadmium regulated genes from the nematode *Caenorhabditis elegans*. Identification and cloning of new cadmium-responsive genes by differential display.,» *The Journal of Biological Chemistry*, p. 273:31962–33170, 27 Novembre 1998.
- [17] Société Chimique de France, «Cours et production mondiale de quelques métaux,» [En ligne]. Disponible: <http://www.societechimiquedefrance.fr>. [Accès le 15 Février 2016].
- [18] J. M. Pacyna, «Estimation of the atmospheric emissions of trace elements from anthropogenic sources in Europe,» *Atmospheric Environment*, vol. 18, n° 11, pp. 41-50, 1984.
- [19] INERIS, Nickel et ses dérivés, 2006.
- [20] INERIS, «Plomb et ses dérivés inorganiques,» 2016.
- [21] CITEPA, «Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la population Atmosphérique,» Avril 2016. [En ligne]. Disponible: <http://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/metaux-lourds>. [Accès le 10 Mai 2017].
- [22] INERIS, «Chrome et ses dérivés,» 2005.
- [23] INERIS, «Manganèse et ses dérivés,» 6 Juillet 2012. [En ligne]. Disponible: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiMgo\\_H\\_uTTAhXE0hOKHUf5BkkQFggmMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.ineris.fr%2Fsubstances%2Ffr%2Fsubstance%2FgetDocument%2F2797&usg=AFQjCNFZQ7zEDULKudvuKvc9ZRk0ovn9iA](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiMgo_H_uTTAhXE0hOKHUf5BkkQFggmMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.ineris.fr%2Fsubstances%2Ffr%2Fsubstance%2FgetDocument%2F2797&usg=AFQjCNFZQ7zEDULKudvuKvc9ZRk0ovn9iA). [Accès le 5 Mai 2017].
- [24] INERIS, Zinc et ses dérivés, 2005.
- [25] M. Borgie, «Etude des particules fines et ultrafines en suspension : dans l'air au Liban : caractérisation physicochimique et evaluation des effets toxicologiques sur des cellules pulmonaires humaines BEAS-2B,» 2014.

# Annexes

# Annexe 1

---

Présentation de l'Association Agréée de  
surveillance de la qualité de l'air du  
département de Mayotte :

Hawa Mayotte

Hawa<sup>8</sup> Mayotte est l'association agréée par le ministère chargé de l'environnement pour la surveillance de la qualité de l'air de Mayotte. Elle représente la 27<sup>ème</sup> AASQA de France depuis sa création le 21 novembre 2014. L'association a obtenu son agrément, le 15 décembre 2014, par la Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC). Les membres fondateurs se regroupent en quatre collèges dont les représentants sont :

- (1) L'**Etat** représenté par la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL), l'ARS (Agence Régionale de Santé) et le SGAR (Secrétaire Général pour les Affaires Régionales)
- (2) Les **collectivités locales** représenté par l'Association des maires
- (3) Les **industriels** représentés par Électricité de Mayotte (EDM)
- (4) Les **associations** représentées par les Naturalistes de Mayotte

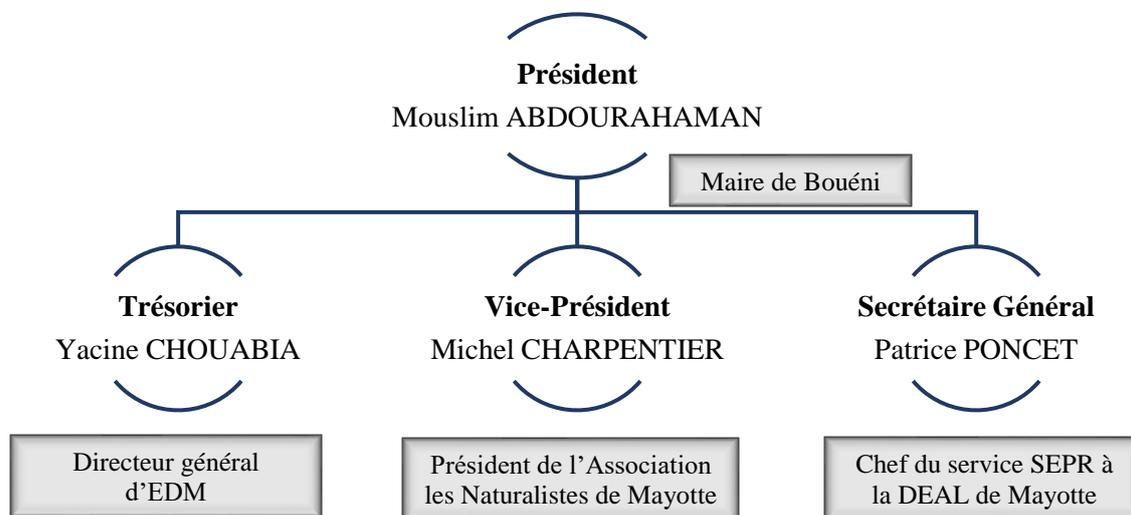


Figure 14: Organigramme hiérarchique des membres élus du bureau de Hawa Mayotte

L'association compte 3 salariés dont un directeur et deux techniciens chargés d'études, d'exploitation et de maintenance.

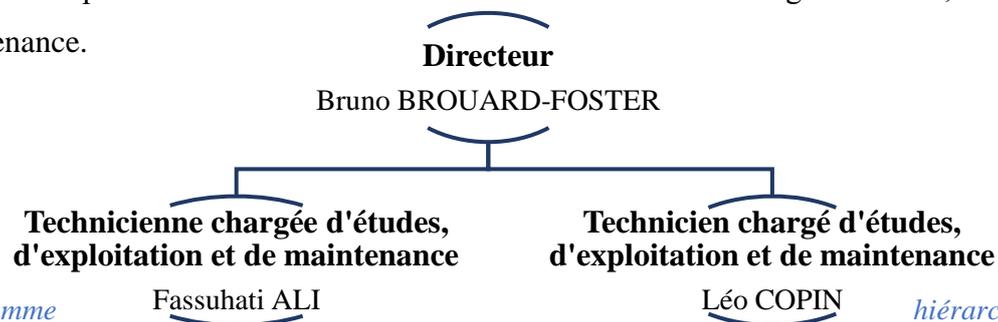


Figure 15 :  
Organigramme  
personnel de Hawa

hiérarchique du  
Mayotte au 1<sup>er</sup> février

2017

<sup>8</sup> Hawa signifie « air » en shimaoré. Le shimaoré étant la langue principalement parlée sur l'île de Mayotte.

Le département de Mayotte est considéré comme une seule zone de surveillance : zone régionale (ZR). La ZR est constituée par l'ensemble du territoire mahorais, dépendances comprises. Elle comprend une unité urbaine de plus de 50 000 habitants (Mamoudzou : 58197 habitants)

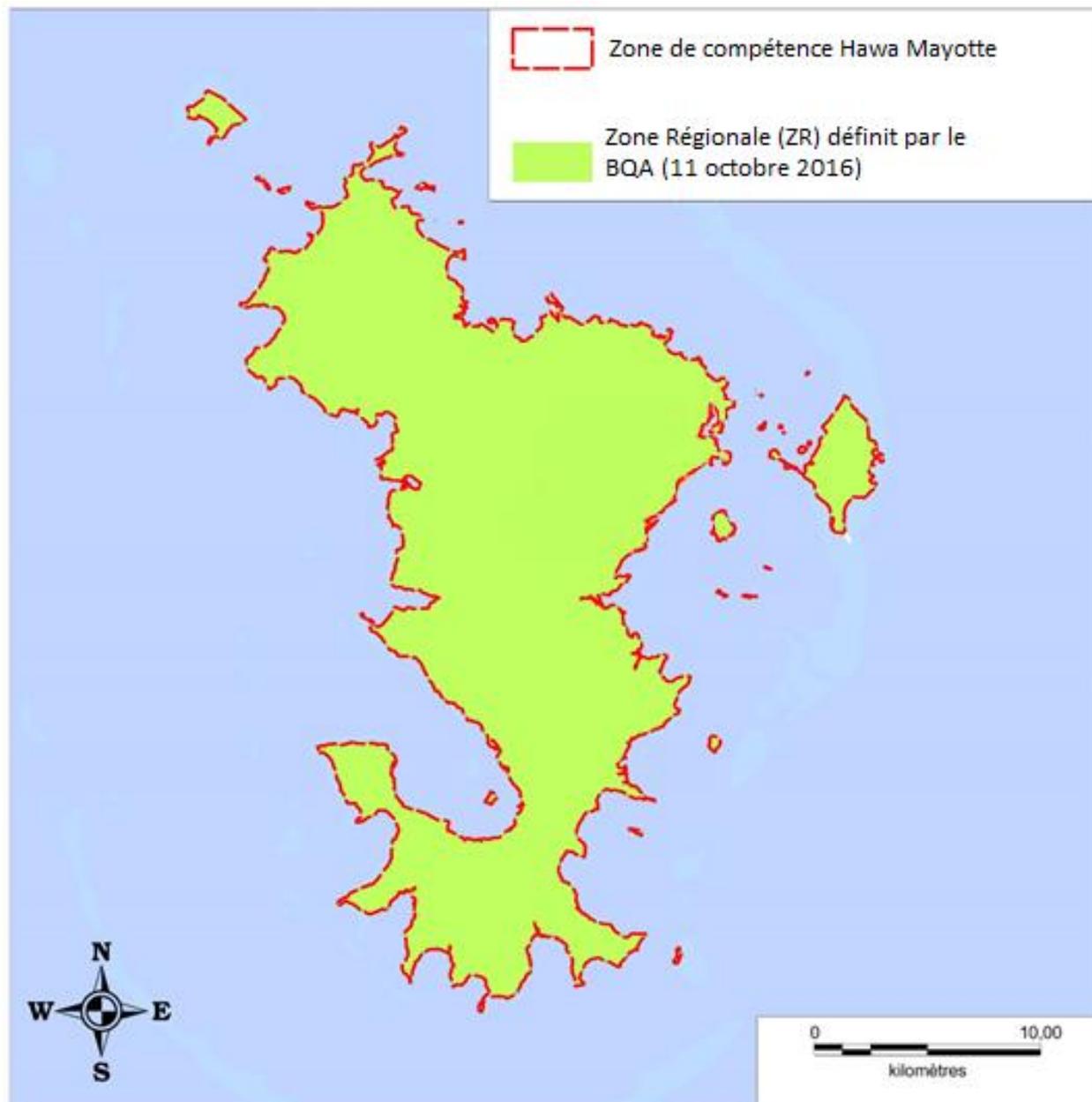


Figure 16 : Zone de compétence de l'association de surveillance de la qualité de l'air (Document du BQA n°16-0573 du 11/10/2016)

## Annexe 2

---

Caractéristiques des hydrocarbures aromatiques polycycliques et des métaux lourds cités dans la directive n°2004/107/CE du 15 décembre 2004

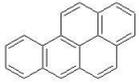
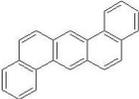
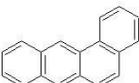
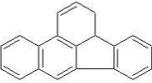
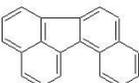
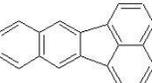
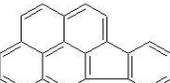
HAP	Formule chimique	N°CAS	MM (g.mol <sup>-1</sup> )	Log Kow	k <sub>H</sub> (atm.m <sup>3</sup> .mol <sup>-1</sup> )	P <sub>vap</sub> (Pa)	Solubilité (g.m <sup>-3</sup> )	CIRC	UE
Benzo[a]pyrène		50-32-8	252,3	6,35	4,6.10 <sup>-7</sup>	7,0.10 <sup>-7</sup>	0,0015	1	2
Dibenzo[a,h]anthracène		53-70-3	278,35	6,7	-	3,7.10 <sup>-10</sup>	0,0005	2A	2
Benzo[a]anthracène		56-55-3	228,3	5,8	5,8.10 <sup>-6</sup>	2,8.10 <sup>-5</sup>	0,011	2B	2
Benzo[b]fluoranthène		205-99-2	252,3	5,78	-	-	0,0015	2B	2
Benzo[j]fluoranthène		205-82-3	252,31	6,11	-	-	-	2B	2
Benzo[k]fluoranthène		207-08-9	252,3	6,5	1,6.10 <sup>-7</sup>	5,2.10 <sup>-8</sup>	0,0008	2B	2
Indéno[1,2,3,c,d]pyrène		193-39-5	276,3	6,7	-	-	0,00019	2B	nc

Tableau 12 : Classification par le CIRC et l'UE des HAP cités dans la directive 2004/107/CE (données tirées des fiches de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, INERIS)

## **Annexe 3**

---

Résultats obtenus sur les différents sites lors  
de la campagne de mesure : HAP

## ❖ Résultats HAP

HAP	Vahibé	Pamandzi	Hauts-Vallons	Port de Longoni	Kawéni
<b>B(a)P</b>	0,025	0,028	0,05	0,025	0,19
<b>DB(ah)A</b>	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
<b>B(a)A</b>	0,045	0,045	0,045	0,045	0,10
<b>B(b)F</b>	0,045	0,045	0,09	0,045	0,26
<b>B(j)F</b>	0,045	0,045	0,045	0,045	0,16
<b>B(k)F</b>	0,045	0,045	0,045	0,045	0,16
<b>IND</b>	0,045	0,045	0,10	0,045	0,31
<b>B(ghi)p</b>	0,045	0,045	0,11	0,045	0,37
<b>B(e)P</b>	0,045	0,045	0,045	0,045	0,23
<b>CHR</b>	0,10	0,045	0,10	0,10	0,13

*Tableau 13 : Niveaux moyens\* de HAP (en ng.m<sup>-3</sup>) mesurés sur l'île de Mayotte (\*pour le calcul de la moyenne, les valeurs inférieures à la limite de détection (LD) sont prises égales à LD/2)*

## **Annexe 4**

---

Résultats obtenus sur les différents sites lors  
de la campagne de mesure : métaux

## ❖ Résultats métaux

	<b>As</b> <b>ng.m<sup>-3</sup></b>	<b>Cd</b> <b>ng.m<sup>-3</sup></b>	<b>Ni</b> <b>ng.m<sup>-3</sup></b>	<b>Pb</b> <b>µg.m<sup>-3</sup></b>	<b>Cr</b> <b>ng.m<sup>-3</sup></b>	<b>Cu</b> <b>ng.m<sup>-3</sup></b>	<b>Mn</b> <b>ng.m<sup>-3</sup></b>	<b>Zn</b> <b>ng.m<sup>-3</sup></b>
<b>Hauts-Vallons</b>	0,5	0,3	1,7	6,3	6,7	5,5	11,8	160,2
<b>Kawéni nord</b>	0,7	0,2	6,2	1,3	4,7	10,4	11,4	64,0
<b>Port de Longoni</b>	0,3	0,2	8,2	0,4	1,8	0,8	2,6	115,7
<b>Vahibé</b>	0,5	0,2	2,6	0,6	3,9	1,9	2,6	122,0
<b>Pamandzi</b>	0,5	0,2	2,4	0,7	0,9	1,7	5,3	119,6

	<b>As</b> <b>ng.m<sup>-3</sup></b>	<b>Cd</b> <b>ng.m<sup>-3</sup></b>	<b>Ni</b> <b>ng.m<sup>-3</sup></b>	<b>Pb</b> <b>µg.m<sup>-3</sup></b>	<b>Cr</b> <b>ng.m<sup>-3</sup></b>	<b>Cu</b> <b>ng.m<sup>-3</sup></b>	<b>Mn</b> <b>ng.m<sup>-3</sup></b>	<b>Zn</b> <b>ng.m<sup>-3</sup></b>
<b>Hauts-Vallons</b>	0,0	0,2	1,0	5,5	0,8	5,8	2,2	154,0
<b>Kawéni nord</b>	0,4	0,0	4,9	1,2	2,5	15,7	11,1	11,0
<b>Port de Longoni</b>	0,2	0,0	7,9	0,2	2,8	0,0	0,0	70,6
<b>Vahibé</b>	0,0	0,0	0,0	0,3	2,9	1,0	0,0	52,5
<b>Pamandzi</b>	0,0	0,0	1,6	0,4	2,0	1,0	2,2	45,8

*Tableau 14 : Moyennes et écart-types des concentrations en métaux sur les sites d'études (pour le calcul de la moyenne, les valeurs inférieures à la limite de détection (LD) et de quantification (LQ) sont prises égales à LD/2 ou LQ/2)*

# **Annexe 5**

---

## **Matériels et Méthodes**

## Matériels

---

Les prélèvements s'effectuent à l'aide d'un préleveur bas débit, le Partisol 2025*i*, muni d'une tête PM<sub>10</sub><sup>9</sup>. Le prélèvement se fait sur des filtres en quartz d'un diamètre de 47 mm.

Après échantillonnage, les filtres sont disposés dans des boîtes de pétri puis protégés de la lumière par du papier aluminium. En effet, les HAP sont très sensibles au rayonnement UV, le papier aluminium permet d'éviter la photodégradation de ces molécules. Enfin, ils sont conservés au froid dans un réfrigérateur jusqu'au jour de leur envoi dans le laboratoire d'analyse. Afin de maintenir la chaîne du froid, les échantillons sont mis dans des glacières lors de leur acheminement vers le laboratoire d'analyses.

## Zones d'étude

---

Pour la mesure des concentrations de HAP et métaux, il n'y a pas de réglementation spécifique. Cependant il est demandé d'utiliser les recommandations établies pour les autres polluants.

Les zones d'études choisies correspondent à cinq stations de mesure déjà existantes :

- Site 1 : Le premier site correspond à la station de Vahibé qui se trouve en zone rurale. La station se trouve au milieu d'une ferme. L'emplacement a été choisi pour sa proximité avec un capteur de Météo France. La station de Vahibé sert de référence en matière de qualité de l'air.
- Site 2 : Le deuxième site de mesure se trouve à Kawéni Nord (EDM). C'est un site trafic qui va permettre d'évaluer la pollution issue du trafic routier.
- Site 3 : Le troisième site se trouve dans la seule zone industrielle de l'île qui se trouve à la Capitainerie du Port de Longoni, non loin de la zone de stockage de Total et de la Centrale électrique du Badamier.
- Site 4 : Le quatrième site se trouve en zone périurbaine dans la ville de Majicavo. Elle va permettre d'évaluer la pollution en périphérie d'une zone urbaine qui est Mamoudzou.
- Site 5 : Le cinquième site situé à Pamandzi est un site urbain. Ce site va permettre d'évaluer la pollution urbaine (résidentiel et trafic)

## Méthodes

---

L'échantillonnage est réalisé pendant 24h conformément aux recommandations de la LSCQA. L'appareil est posé pendant 10 jours selon le site et les prélèvements se font en continu. Chaque série

---

<sup>9</sup> Selon la directive 2004/107/CE les PM<sub>10</sub> correspondent « aux particules qui passent dans un orifice d'entrée calibré tel que défini dans la norme EN 12341 avec un rendement de séparation de 50% pour un diamètre aérodynamique de 10µm. »

d'analyse comprend 3 blancs laboratoires (des filtres non exposés), 1 blanc terrain (filtre ayant été exposé aux conditions du terrain), 5 ou 6 filtres « normaux » pour prélèvement de l'air.

Par site, 1 filtre « normal » est utilisé pour réaliser un screening semi-quantitatif de 23 métaux dans les PM10. De plus 5 filtres ont été exposés aux retombées atmosphériques pour évaluer les métaux majoritaires dans la poussière totale.

Les analyses sont réalisées en sous-traitance par deux laboratoires :

- En ce qui concerne les HAP, l'analyse des filtres est réalisée par le LIC (Laboratoire Interrégional de Chimie) conformément à la norme NF EN 15549 par chromatographie gazeuse couplée à un spectromètre de masse (GC-MS).

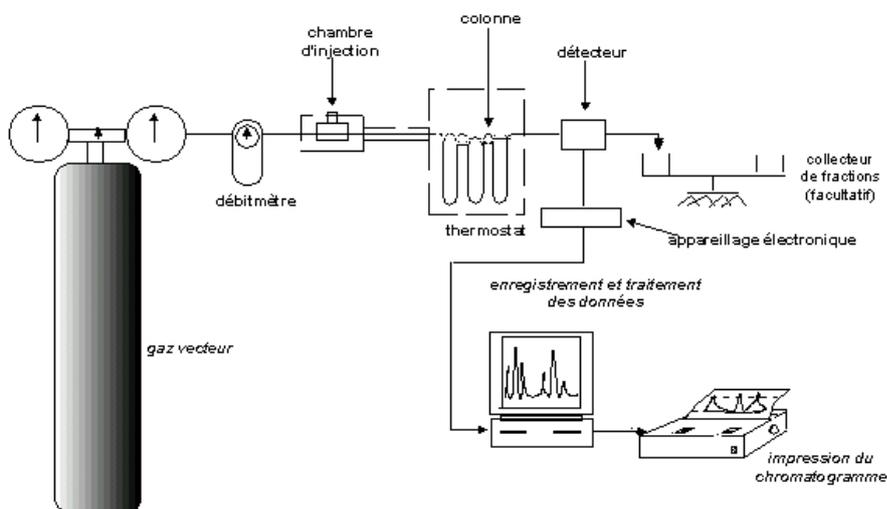


Figure 17 : Schéma du principe de fonctionnement d'une GC-MS

- Pour ce qui est des métaux lourds, les échantillons sont sous-traités par le laboratoire Micropolluants Technologies. Les analyses sont réalisées par Spectrométrie de Masse Induite par Couplage Plasma (ICP-MS) tel que le préconise la norme NF EN 14902.

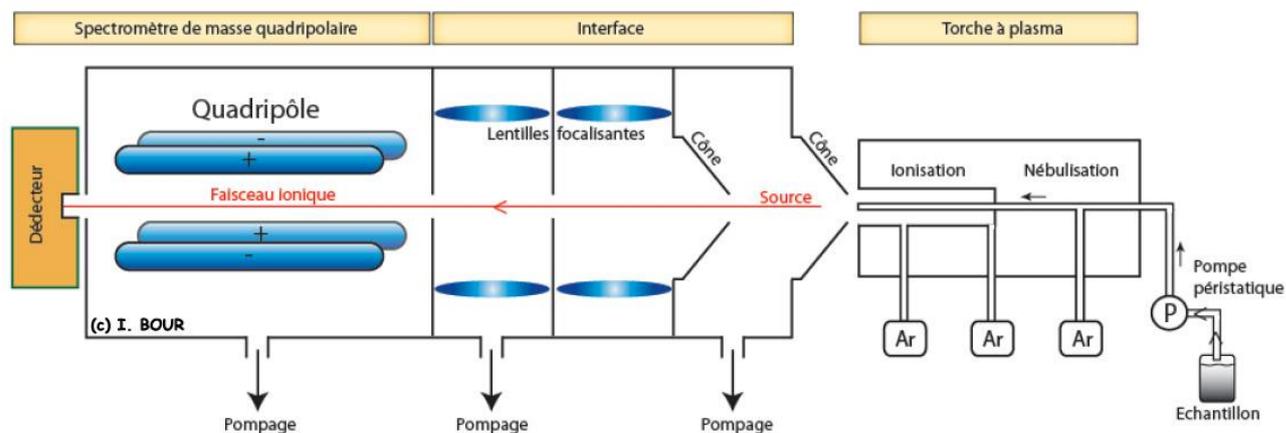


Figure 18 : Schéma descriptif du fonctionnement de l'ICP-MS