

Microparticules et santé humaine : matières particulaires, éléments-traces métalliques et carbone noir dans les aérosols prélevés à Andravoahangy-Antananarivo, Madagascar.

Rasoazanany Elise O., Andriamahenina Njaka N., Harinoely Manovantsoatsiferana, Ravoson Herinirina N., Randriamanivo Lucienne V., Raoelina Andriambololona, Ramaherison Hanitriniaina
Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar)
B.P. 4279 101 Antananarivo, Madagascar, instn@moov.mg

Résumé

Le présent travail consiste à déterminer les concentrations des microparticules de diamètre inférieur à 10 μm (PM_{10}), des éléments-trace métalliques et du carbone noir dans les aérosols prélevés à Andravoahangy-Antananarivo, Madagascar en 2008. L'échantillonneur d'air GENT est utilisé pour collecter les échantillons d'aérosols. La chaîne d'analyse par fluorescence X à réflexion totale est utilisée pour les analyses qualitative et quantitative de façon simultanée de tous les éléments-traces métalliques présents dans les aérosols. Le réflectomètre M43D permet de mesurer les reflectances du carbone noir afin de déterminer les concentrations de ce carbone noir. Les résultats montrent que les concentrations moyennes des matières particulaires $\text{PM}_{2,5-10}$ sont supérieures à celles de $\text{PM}_{2,5}$. Les concentrations moyennes des PM_{10} dans les aérosols dépassent la valeur guide de 50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ adoptée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et l'Union Européenne et celles de $\text{PM}_{2,5}$ ne respectent pas les valeurs guides de l'OMS (25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) selon la directive 2005 et de l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Par conséquent, la qualité de l'air à Andravoahangy ne respecte pas ces valeurs guides journalières. Les éléments-traces métalliques présents dans les aérosols sont Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn et Pb. Les concentrations moyennes de ces éléments sont également supérieures dans les particules grossières que dans les particules fines. Les concentrations du carbone noir ont des valeurs élevées dans les particules fines. Sa valeur maximale est de 9,12 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Mots clés : Pollution, aérosol, fluorescence X à réflexion totale, matière particulaire, élément-trace métallique, carbone noir, Madagascar.

Abstract

The present work is to determine the concentrations of microparticles having diameter inferior to 10 μm (PM_{10}), the metal trace elements and the black carbon in the aerosols sampled in Andravoahangy-Antananarivo, Madagascar in 2008. The air sampler GENT is used to collect aerosol samples. The total reflection X-ray fluorescence spectrometer is used for qualitative and quantitative analysis of simultaneous way all metallic trace elements contained in the aerosols. The M43D reflectometer permits to measure the reflectances in order to determine the black carbon concentrations. The results show that the average concentrations of the particulate matters $\text{PM}_{2,5-10}$ are higher than those of $\text{PM}_{2,5}$. The average concentrations of PM_{10} in the aerosols are exceeding the World Health Organisation (WHO) and European Union guidelines, set at 50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and those of $\text{PM}_{2,5}$ are higher than the 2005 WHO (25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) and the United States Environment Protection Agency (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) guidelines. Consequently, air quality in Andravoahangy does not respect these daily guidelines. The identified metallic trace elements in the aerosols are Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn and Pb. The average concentrations of these elements are also higher in the coarse particles than in the fine particles. The concentrations of black carbon are higher in the fine particles. The maximum value is 9.12 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Keywords: Pollution, aerosol, total reflexion X-ray fluorescence, particulate matter, metallic trace element, black carbon, Madagascar.

1. Introduction

La pollution microparticulaire concerne la pollution de l'air (atmosphère, air intérieur). Elle est un grave problème mondial et menace la santé humaine et l'environnement. Dans le domaine de la physique, une **microparticule** est une particule dont la taille est comprise entre 0,1 et 100 μm . Selon

la taille des particules en micromètres, nous distinguons en métrologie les $PM_{2,5}$ ou particules fines dont le diamètre aérodynamique équivalent (DAE) est inférieur à $2,5 \mu m$, les $PM_{2,5-10}$ ou particules grossières ayant un DAE compris entre $2,5 \mu m$ et $10 \mu m$ et les PM_{10} appelées particules en suspension dans l'air, d'un diamètre aérodynamique inférieur à $10 \mu m$. Le carbone noir qui est principalement de la suie des moteurs diesel, des centrales à charbon et de la combustion du bois produit une série de polluants responsables de la pollution de l'air. L'objectif de ce travail est d'étudier le niveau de la pollution de l'air par les microparticules et les éléments-traces métalliques (ou métaux lourds) et par le carbone noir dans le quartier d'Andravoahangy - Antananarivo et de transmettre les résultats obtenus aux autorités compétentes afin qu'elles puissent prendre des décisions en vue de diminuer les impacts de la pollution de l'air sur la population.

2. Matériels et méthodes

2.1. Site de prélèvement

L'échantillonnage a été effectué à l'Ecole Primaire Publique d'Andravoahangy (latitude $18^{\circ}53'$ S et longitude $47^{\circ}31'$ E) dans la ville d'Antananarivo (capital de Madagascar, $18^{\circ} 54' 24''$ S et $47^{\circ} 31' 24''$ E) du mois d'avril jusqu'au mois d'août 2008. Il s'agit d'une zone assez peuplée, à trafic routier dense et de plus dans l'enceinte de cette école où sont scolarisés des enfants de six à treize ans.

2.2. Protocole d'échantillonnage

Les matières particulaires sont collectées par l'échantillonneur d'air "GENT". Cet échantillonneur d'air a été capable de séparer les particules fines ou respirables de dimension aérodynamique inférieure à $2,5 \mu m$ ($PM_{2,5}$) et les particules grossières ou inhalables de diamètre compris entre $2,5 \mu m$ et $10 \mu m$ ($PM_{2,5-10}$). Il a été placé à $1,60$ m du sol. Les échantillons ont été collectés sur les deux types de filtres *Nuclepore* en polycarbonate de diamètre 47 mm pour collecter respectivement la fraction grossière $PM_{2,5-10}$ (de porosité $8 \mu m$) et la fraction fine $PM_{2,5}$ (de porosité $0,4 \mu m$) [1]. Le temps de collecte est de 24 h. Les filtres ont été pesés avec une microbalance METTLER TOLEDO ($10 \mu g$ de sensibilité) avant et après l'échantillonnage pour déterminer la masse des aérosols déposés sur les filtres.

2.3. Préparation des échantillons d'aérosols

Comme la méthode d'analyse par fluorescence X à réflexion totale est conçue spécialement aux échantillons liquides donc il faut ramener les échantillons d'aérosols à l'état solide en des échantillons liquides. Pour cela, les filtres chargés des échantillons d'aérosols sont minéralisés dans une bombe d'attaque en Téflon avec des mélanges de $500 \mu L$ de chloroforme ($CHCl_3$), de $2000 \mu L$ d'acide nitrique (HNO_3) et $1000 \mu L$ de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). Ensuite, la bombe d'attaque bien fermée est portée à une température de $165^{\circ}C$ pendant 6 heures dans un four [2]. Dans un petit flacon en polyéthylène contenant $995 \mu L$ de cette solution obtenue, $5 \mu g$ d'yttrium (à partir d'une solution mère de $1000 mg.L^{-1}$) pris comme étalon interne ont été ajoutés.

2.4. Protocole d'analyse

Les échantillons d'aérosols sont mesurés à l'aide d'un spectromètre de fluorescence X à réflexion totale (*TXRF*) disposé dans le laboratoire de Madagascar-INSTN afin de déterminer les concentrations des éléments-traces métalliques dans les matières particulaires collectées sur les filtres.

Les concentrations massiques journalières [$\mu g.m^{-3}$] des matières particulaires $PM_{2,5}$ et $PM_{2,5-10}$ sont déterminées à partir des masses des particules déposées et des volumes d'air aspiré. Les filtres sont déjà pesés à l'aide d'une microbalance avant et après les prélèvements.

Le réflectomètre Modèle 43D permet de mesurer l'obscurité des tâches de fumée dans les filtres afin de déterminer le carbone noir dans les aérosols. La théorie de Cohen permet de calculer les concentrations du carbone noir [3].

3. Résultats et Discussion

3.1. Matières particulaires : $PM_{2,5}$, $PM_{2,5-10}$, et PM_{10}

Le tableau 3.1 montre que les concentrations journalières des matières particulaires $PM_{2,5-10}$ dans les aérosols prélevés à Andravoahangy en 2008 sont supérieures à celles des $PM_{2,5}$.

Tableau 3.1. Concentrations journalières des matières particulaires dans les aérosols prélevés à Andravoahangy.

Date d'échantillonnage	Concentrations journalières des matières particulaires dans l'air [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]			Valeurs guides journalières [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]		
	$PM_{2,5}$	$PM_{2,5-10}$	PM_{10}	$PM_{2,5}$		PM_{10}
				OMS	US EPA	OMS, UE
Lun 14/04/08	31,00	42,72	73,72	25	35	50
Mer 16/04/08	63,80	116,37	180,17			
Ven 18/04/08	85,70	116,56	202,26			
Dim 20/04/08	18,51	34,30	52,81			
Mar 22/04/08	20,96	33,46	54,42			
Jeu 24/04/08	75,85	84,27	160,12			
Sam 26/04/08	26,63	39,56	66,19			
Lun 28/04/08	32,23	53,18	85,41			
Mer 30/04/08	60,34	98,16	158,50			
Ven 02/05/08	49,09	76,81	125,90			
Dim 04/05/08	13,30	28,12	41,42			
Mar 06/05/08	25,80	60,77	86,57			
Jeu 08/05/08	29,88	61,44	91,32			
Sam 10/05/08	24,67	51,66	76,33			
Ven 16/05/08	32,48	61,67	94,15			
Sam 24/05/08	23,82	40,56	64,38			
Dim 01/06/08	16,47	25,06	41,53			
Lun 09/06/08	30,59	41,88	72,47			
Mar 17/06/08	22,54	39,16	61,70			
Mer 25/06/08	50,96	70,72	121,68			
Ven 04/07/08	40,77	59,08	99,85			
Jeu 10/07/08	35,99	44,89	80,88			
Sam 19/07/08	23,77	37,30	61,07			
Dim 27/07/08	17,18	25,96	43,14			
Lun 04/08/08	21,47	34,62	56,09			
Mar 12/08/08	25,34	36,04	61,38			
Mer 20/08/08	36,02	41,34	77,36			
Jeu 28/08/08	36,34	45,80	82,14			

Pour les $PM_{2,5}$, 18 sur 28 échantillons prélevés à Andravoahangy dépassent la valeur limite adoptée par l'OMS ($25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) selon la directive de l'OMS en 2005 et 10 sur 18 échantillons ne respectent pas la valeur fixée ($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) de l'US EPA en 2006. Les particules en suspension sont

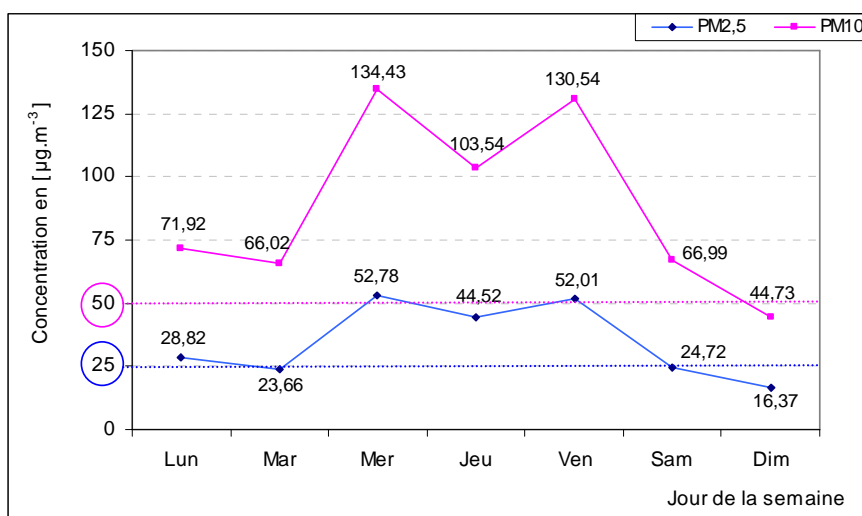
classées par l'OMS en fonction de leur toxicité : les $PM_{2,5}$ [4] (particules dont la moitié a un diamètre inférieur à $2,5 \mu m$) ont une taille telle qu'elles restent longtemps en suspension dans l'air (plusieurs jours). Les $PM_{2,5}$ sont issues de combustion (bois, carburants, notamment gazole). Les particules, dont les plus petites pénètrent profondément dans les poumons et le sang, sont à l'origine de pathologies respiratoires et cardio-vasculaires. Pour les $PM_{2,5}$, l'Union Européenne (UE) a posé comme valeur limite $25 \mu g.m^{-3}$ d'air en 2015. L'OMS recommande $10 \mu g.m^{-3}$.

Quant aux PM_{10} , 25 sur 28 échantillons ne respectent pas également la valeur limite de $50 \mu g.m^{-3}$ adoptée par l'OMS et l'US EPA. Par conséquent, le site d'Andravoahangy est pollué par les microparticules. Les PM_{10} (particules dont la moitié a un diamètre inférieur à $10 \mu m$) sont suffisamment grandes pour être rapidement dispersées par les précipitations et sont donc moins toxiques [5]. Les PM_{10} sont essentiellement émises par des processus mécaniques comme les activités de construction.

Tableau 3.2. Total des concentrations moyennes journalières des $PM_{2,5}$ et PM_{10}

Jour de la semaine	Concentrations moyennes [$\mu g.m^{-3}$]		Valeurs guides journalières adoptées [$\mu g.m^{-3}$]		
	$PM_{2,5}$	PM_{10}	$PM_{2,5}$		PM_{10}
			OMS	US EPA	OMS, UE
Lundi	28,82	71,92	25	35	50
Mardi	23,66	66,02			
Mercredi	52,78	134,43			
Jeudi	44,52	103,62			
Vendredi	52,01	130,54			
Samedi	24,72	66,99			
Dimanche	16,37	44,73			

La figure suivante illustre la variation du total des concentrations moyennes journalières des $PM_{2,5}$ et PM_{10} .



Les pics maxima se présentent les jours du mercredi, du jeudi et du vendredi avec des valeurs respectives de $52,78 \mu g.m^{-3}$, $44,52 \mu g.m^{-3}$, $52,01 \mu g.m^{-3}$ pour les $PM_{2,5}$ et de $134,43 \mu g.m^{-3}$, $103,54 \mu g.m^{-3}$ et $130,54 \mu g.m^{-3}$ pour les PM_{10} . Par comparaison à la valeur guide journalière de

25 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour les $\text{PM}_{2,5}$, le niveau de la pollution pendant ces trois jours est deux fois supérieurs à cette valeur guide. Les concentrations en PM_{10} dépassent largement la valeur guide de 50 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Comme le site d'Andravoahangy se trouve près de la route principale, les concentrations élevées en $\text{PM}_{2,5}$ et en PM_{10} sont probablement dues aux turbulences atmosphériques des particules de poussières produite par la circulation de voiture pendant les jours des marchés d'Andravoahangy et de Pochard à Analakely.

Par contre, les pics minima sont constatés le jour du dimanche avec des valeurs respectives de 16,37 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour les $\text{PM}_{2,5}$ et de 44,73 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour les PM_{10} . Ce phénomène est dû par l'absence d'embouteillage pendant le jour de "week-end".

3.2. Eléments-traces métalliques (métaux lourds)

Les échantillons d'aérosols de diamètre aérodynamique inférieur à 10 μm (PM_{10}) prélevés pendant les jours de prélèvement (du lundi au dimanche) contiennent huit (08) éléments-traces métalliques (ETM) tels que le titane (Ti), le chrome (Cr), le manganèse (Mn), le fer (Fe), le nickel (Ni), le cuivre (Cu), le zinc (Zn) et le plomb (Pb). Le total des concentrations moyennes des ETM dans les particules grossières sont également supérieures à celles dans les particules fines. Le tableau 3.3. résume le total des concentrations moyennes de ces ETM.

Tableau 3.3. Total des concentrations moyennes des éléments présents dans les aérosols prélevés à Andravoahangy.

Eléments	Concentrations moyennes [ng.m^{-3}]		
	$\text{PM}_{2,5}$	$\text{PM}_{2,5-10}$	PM_{10}
Ti	42,22 \pm 1,13	90,59 \pm 0,70	132,81 \pm 1,83
Cr	8,45 \pm 0,24	9,70 \pm 0,30	18,15 \pm 0,54
Mn	10,65 \pm 0,19	19,86 \pm 0,19	30,51 \pm 0,38
Fe	460,63 \pm 2,23	918,94 \pm 4,02	1379,57 \pm 6,25
Ni	5,12 \pm 0,20	6,13 \pm 0,12	11,25 \pm 0,32
Cu	9,62 \pm 0,18	10,94 \pm 0,14	20,56 \pm 0,32
Zn	93,89 \pm 0,27	77,42 \pm 0,40	171,31 \pm 0,67
Br	5,08 \pm 0,19	6,31 \pm 0,16	11,39 \pm 0,35
Sr	4,90 \pm 0,25	6,45 \pm 0,26	11,35 \pm 0,51
Pb	14,14 \pm 0,20	17,23 \pm 0,26	31,37 \pm 0,46

Notons que le brome et le strontium ne sont pas des éléments-traces métalliques. Les échantillons d'aérosols renferment respectivement 5,08 ng.m^{-3} de brome et 4,90 ng.m^{-3} de strontium.

Le plomb est un élément très toxique. Il entraîne un trouble de développement cérébral et une perturbation psychologique chez les enfants. Il a un effet sur le système nerveux et sur les fonctions rénales et respiratoires. Le total des concentrations moyennes en plomb (31,37 ng.m^{-3}) présents dans les aérosols prélevés à Andravoahangy en 2008 est largement inférieur à la concentration de 1800 ng.m^{-3} obtenue en 2000 dans la ville d'Antananarivo [6]. Celle-ci est due à la décision du gouvernement malgache, du 18 décembre 2002, d'autoriser l'importation de l'essence sans plomb [7]

et d'interdire l'importation et l'utilisation de l'essence plombée sur le territoire malgache depuis le 1^{er} janvier 2006.

3.3. Carbone noir

Le calcul des concentrations du carbone noir par la théorie de Cohen [3] donné par le tableau 3.4. montre que les concentrations du carbone noir dans les particules fines sont supérieures à celles dans les particules grossières. La valeur maximale de 9,12 $\mu\text{g.m}^{-3}$ correspond à la concentration du carbone noir dans les particules fines prélevées le vendredi 02 mai 2008.

Tableau 3.4. Concentrations du carbone noir dans l'air ambiant du site d'Andravoahangy.

Jour et Date d'échantillonnage	Concentrations du carbone noir dans les aérosols [$\mu\text{g.m}^{-3}$]	
	PM _{2,5}	PM _{2,5-10}
Lun 14/04/08	5,25	0,96
Mer 16/04/08	8,42	3,40
Ven 18/04/08	7,55	1,50
Dim 20/04/08	6,81	1,98
Mar 22/04/08	1,42	1,02
Jeu 24/04/08	6,03	2,41
Sam 26/04/08	7,19	2,87
Lun 28/04/08	7,01	5,64
Mer 30/04/08	8,90	1,21
Ven 02/05/08	9,12	2,52
Dim 04/05/08	3,36	0,82
Mar 06/05/08	6,10	1,93
Jeu 08/05/08	4,99	0,78
Sam 10/05/08	6,57	2,59
Ven 16/05/08	6,64	1,56
Sam 24/05/08	3,95	2,91
Dim 01/06/08	4,18	1,49
Lun 09/06/08	8,84	1,48
Mar 17/06/08	4,52	1,32
Mer 25/06/08	7,80	3,80
Ven 04/07/08	6,71	2,38
Jeu 10/07/08	5,19	1,05
Sam 19/07/08	5,27	0,99
Dim 27/07/08	3,14	0,98
Lun 04/08/08	4,24	3,61
Mar 12/08/08	3,26	2,47
Mer 20/08/08	3,85	2,46
Jeu 28/08/08	4,13	2,27

Nous constatons que les concentrations du carbone noir dans les particules fines prélevées presque tous les mercredis ont des valeurs élevées. Cette élévation est due aux embouteillages pendant le jour du marché d'Andravoahangy. Les moteurs à diesels sont parmi l'une des sources des émissions du carbone noir. Le caractère toxique ou cancérigène de la fumée de diesel a été longuement débattu.

4. Conclusion

Dans les aérosols prélevés à Andravoahangy-Antananarivo, Madagascar en 2008, les concentrations moyennes maximales journalières des microparticules se présentent les jours du mercredi, du jeudi et du vendredi avec des valeurs respectives de $52,78 \mu\text{g.m}^{-3}$, $44,52 \mu\text{g.m}^{-3}$, $52,01 \mu\text{g.m}^{-3}$ pour les $\text{PM}_{2,5}$ et de $134,43 \mu\text{g.m}^{-3}$, $103,54 \mu\text{g.m}^{-3}$ et $130,54 \mu\text{g.m}^{-3}$ pour les PM_{10} . Par comparaison à la valeur guide journalière de $25 \mu\text{g.m}^{-3}$ pour les $\text{PM}_{2,5}$, le niveau de la pollution pendant ces trois jours est deux fois supérieurs à cette valeur guide. Les concentrations en PM_{10} dépassent largement la valeur guide de $50 \mu\text{g.m}^{-3}$. Les concentrations élevées en $\text{PM}_{2,5}$ et en PM_{10} sont probablement dues aux turbulences atmosphériques des particules de poussières produite par la circulation de voiture pendant les jours des marchés d'Andravoahangy et de Pochard à Analakely.

Le total des concentrations moyennes des éléments-traces métalliques (ETM) dans les particules grossières $\text{PM}_{2,5-10}$ sont supérieures à celles dans les particules fines $\text{PM}_{2,5}$.

Concernant le plomb, le total des concentrations moyennes ($31,37 \pm 0,46 \text{ ng.m}^{-3}$) présents dans les aérosols prélevés à Andravoahangy en 2008 est largement inférieur à la concentration de 1800 ng.m^{-3} obtenue en 2000 dans la ville d'Antananarivo. Celle-ci est due à la décision du gouvernement malgache, du 18 décembre 2002, d'autoriser l'importation de l'essence sans plomb et d'interdire l'importation et l'utilisation de l'essence plombée sur le territoire malgache depuis le 1^{er} janvier 2006.

Les concentrations élevées du carbone noir dans les particules fines prélevées presque tous les mercredis sont dues aux embouteillages pendant le jour du marché d'Andravoahangy. Les moteurs à diesels sont parmi l'une des sources des émissions de ce carbone noir. La valeur maximale de $9,12 \mu\text{g.m}^{-3}$ apparaît le jour du vendredi 02 mai 2008.

Suggestions et recommandations

Afin de diminuer les polluants atmosphériques, il faut diminuer les embouteillages par l'installation de toboggans aux carrefours les plus encombrés et par un étalement des heures d'entrées et de sorties des bureaux, d'interdire les importations des camions à lourd tonnage et/ou roulant au gasoil afin de diminuer les carbonés noirs. Il est également nécessaire de renforcer les sensibilisations des autorités locales, le public et les différents secteurs concernant les impacts sanitaires de la pollution de l'air, d'établir une politique de réhabilitation des routes et d'instituer des pistes cycliques.

Remerciements

Les auteurs voudraient remercier l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA, Vienne-Autriche) pour la dotation en matériel pour le TXRF et tout le personnel de Madagascar-INSTN pour leur précieuse collaboration.

Leurs vifs remerciements s'adressent à Madame la Directrice de l'Ecole Primaire Publique d'Andravoahangy I qui a accepté l'installation de l'échantillonneur d'air dans son établissement pendant la période de prélèvements.

Références bibliographiques

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA) (1993) Applied Research on Air Pollution using Nuclear Related Analytical Technique. *Report on the First Research Co-ordination Meeting. NAHRES 19: 19-249.* Vienna - Austria.
- [2] Dargie M., Marckowicz A., Tajini A., Valkovic V. (1996) Optimized sample preparation procedures for the analysis of solid materials by total reflection XRF. *Fresenius Journal Analytical Chemistry: 93-589.*
- [3] Cohen D.D., Taha G., Stelcer Ed, Carton D., Box G. (2000) *The Measurement and Sources of Fine Particles Elemental Carbon at Several Key Sites in NSW over the Past Eight Years. 15th International Clean Air Conference, Sydney – Australia.*
- [4] Nowack B. (2009) *The behavior and effects of nanoparticles in the environment*; Environmental Pollution, Volume 157, Issue 4, 1063-1064.
- [5] Ostiguy C., Roberge B., Ménard L., Endo C.A. (2008) Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques reliés aux nanoparticules de synthèse, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), Québec, Canada.
- [6] Rakotondramanana H.T. (2000) Etude quantitative de la distribution granulométrique des éléments toxiques, indésirables et PM₁₀ dans l'air de la ville d'Antananarivo par la méthode d'analyse par Fluorescence-X à réflexion totale. Thèse de Doctorat de troisième cycle, Faculté des Sciences - Université d'Antananarivo.
- [7] Rakotondramanana H.T., Randriamanivo L.V., Raelina Andriambololona, Rasolofonirina M. (2003) Application de la fluorescence X à réflexion totale à l'étude des matières particulaires et des métaux lourds de la pollution de l'air dans la ville d'Antananarivo, Madagascar, *Revue Pollution Atmosphérique*, N° 178, Paris - France, 274-282.