

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

Studies of particulate matter and heavy metals of urban air pollution, in Antananarivo City, Madagascar, using total reflection X-ray fluorescence

Hery Tiana RAKOTONDRAMANANA*, Lucienne Voahangilalao RANDRIAMANIVO*,
Raoelina ANDRIAMBOLOLONA*, Mamiseheno RASOLOFONIRINA*

Résumé

On peut améliorer considérablement les performances de la technique de la fluorescence X classique par la réflexion totale. Nous appliquons cette dernière à l'étude de la distribution granulométrique des éléments toxiques, indésirables et PM_{10} dans les aérosols de la ville d'Antananarivo. L'échantillonneur DICHOTOMOUS est utilisé pour les prélèvements d'échantillons. On peut obtenir deux types d'aérosols : les particules respirables ou les particules fines $PM_{2,5}$ (diamètre aérodynamique inférieur à $2,5 \mu m$) et les particules inhalables ou les grosses particules $PM_{2,5-10}$ (diamètre aérodynamique entre $2,5 \mu m$ et $10 \mu m$). Les échantillons sont prélevés sur les sites suivants : le tunnel d'Ambohidahy, le tunnel d'Ambanidia, Andravoahangy, Soarano, Mahamasina et Ankorondrano. Les résultats montrent la présence d'éléments comme le soufre (S), le potassium (K), le calcium (Ca), le titane (Ti), le chrome (Cr), le manganèse (Mn), le fer (Fe), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le brome (Br), le rubidium (Rb), le strontium (Sr) et le plomb (Pb) dans les aérosols. Leurs concentrations sont très élevées dans les particules respirables. La concentration moyenne du plomb, de valeur $1,8 \mu g.m^{-3}$, est largement supérieure à la valeur $0,5 \mu g.m^{-3}$ adoptée par l'OMS (Organisation mondiale de la santé) et à la valeur maximale admissible de $1,5 \mu g.m^{-3}$ de l'US EPA (United States Environmental Protection Agency). Concernant la distribution granulométrique du plomb, les résultats ont montré que les particules fines contiennent beaucoup de plomb. De même, on constate pour les PM_{10} une concentration moyenne de $240 \mu g.m^{-3}$, supérieure à la valeur $150 \mu g.m^{-3}$ recommandée par les deux organisations mentionnées ci-dessus. Ainsi, la ville d'Antananarivo est classée zone saturée pour les deux paramètres (plomb et particules en suspension). De plus, les résultats sur les facteurs d'enrichissement par la méthode de Mason ont montré que les éléments comme S, Cr, Cu, Zn, Br et Pb proviennent des sources naturelles et anthropiques. Les éléments comme K, Ca, Ti, Mn, Fe et Sr proviennent du sol. Le zonage des sites étudiés a montré que la ville d'Antananarivo est classée zone saturée. L'importation massive de vieilles voitures (bus, automobiles) depuis quelques années a encore aggravé la pollution atmosphérique de façon alarmante ainsi que ses effets sur la santé de la population : le Service des Maladies Respiratoires de l'Hôpital général d'Antananarivo a noté entre 1997 et 1999 un net accroissement du nombre de malades ayant des affections respiratoires aiguës.

* Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires Madagascar (Madagascar-INSTN), BP 4279 Antananarivo 101 Madagascar ; E-mail : instn@ds.mg

Abstract

Classic X-ray fluorescence (XRF) analysis may be greatly improved by using total reflection X-ray fluorescence (TXRF) to study the size distribution of toxic elements, undesirable ones and PM₁₀ in the aerosols of Antananarivo urban areas. The air sampler DICHOTOMOUS was used for sampling, with which two types of aerosols could be obtained : respirable aerosols or fine particles PM_{2.5} (aerodynamic diameter below 2.5 µm) and inhalable or coarse particles PM_{2.5-10} (aerodynamic diameter from 2.5 µm to 10 µm). Samples were taken from six sites, namely Ambohidahy tunnel, Ambanidia tunnel, Andravoahangy, Soarano, Mahamasina and Ankorondrano. The results show the presence of elements such as sulfur (S), potassium (K), calcium (Ca), titanium (Ti), chromium (Cr), manganese (Mn), iron (Fe), copper (Cu), zinc (Zn), bromine (Br), rubidium (Rb), strontium (Sr), and lead (Pb) in the aerosols. Their concentrations are high in respirable particles. The 1.8 µg.m⁻³ mean concentration value of lead is higher than 0.5 µg.m⁻³ (World Health Organization adopted value), and than 1.5 µg.m⁻³ US EPA (United States Environmental Protection Agency) admissible maximum. Regarding the size distribution, PM_{2.5} are mainly enriched in lead. The same result may also be stated for PM₁₀ with a 240 µg.m⁻³ mean concentration value, higher than 150 µg.m⁻³, adopted by the two above-mentioned organizations. Therefore, the Antananarivo urban area is classified as saturated zone for both parameters (lead and particulate matter). The utilization of Mason's enrichment factors shows that the elements such as S, Cr, Cu, Zn, Br and Pb are from both natural and anthropogenic sources. Elements such as K, Ca, Ti, Mn, Fe and Sr originate from the soil. The zoning of the selected areas shows that the urban areas of Antananarivo are classified as saturated zone. Finally, data from the Lung Diseases Department from Main Hospital in Antananarivo show that the number of patients with lung diseases increased about 20 % from 1997 to 1999.

Introduction

La pollution de l'air est un problème majeur de la santé publique et de l'environnement aussi bien dans les pays développés que dans les pays en voie de développement. L'émission des gaz toxiques et des particules dans l'atmosphère peut causer des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement.

Plusieurs paramètres physico-chimiques caractérisent la qualité de l'air. Citons entre autres les particules en suspension de dimension inférieure à 10 µm (PM₁₀), le plomb (Pb), l'anhydride sulfureux (SO₂), le dioxyde d'azote (NO₂), le monoxyde de carbone (CO), l'ozone O₃ et les composés organiques volatils (COV).

Dans ce travail, nous étudierons la pollution atmosphérique par les matières particulaires et par les métaux lourds, notamment par le plomb, à Antananarivo, Madagascar, en utilisant la technique d'analyse de la fluorescence X à réflexion totale.

Madagascar est une île située au sud-est du continent africain. Elle est entourée par le canal de Mozambique et l'océan Indien. Antananarivo, la capitale, est située à 18°54'5"S et 47°31'6"E et le nombre de ses habitants est d'environ 1,5 million (Figure 1 ci-contre).

L'étude de la pollution de l'air menée par l'Institut national des sciences et techniques nucléaires de Madagascar (Madagascar-INSTN) a commencé en 1996 dans les différents sites de la ville d'Antananarivo [1-3].

Elle porte sur les mesures des concentrations des métaux lourds dans l'air. Il est bien connu que plus les particules sont fines, plus elles sont dangereuses pour la santé humaine car elles peuvent pénétrer les alvéoles, ce qui a amené à étudier la distribution granulométrique du plomb et des PM₁₀ dans l'air.

Nous avons déterminé les concentrations moyennes des éléments dans l'air suivant leur taille dans les aérosols ainsi que l'origine de chaque élément dans les aérosols par le calcul des facteurs d'enrichissement de Mason [4].

Méthodologie

Notation

Les notations suivantes sont adoptées pour distinguer les particules en suspension selon leur diamètre aérodynamique.

- PM_{2.5} : particules dont le diamètre est inférieur à 2,5 µm.
- PM_{2.5-10} : particules dont le diamètre est compris entre 2,5 µm et 10 µm.
- PM₁₀ : particules dont le diamètre est inférieur à 10 µm.

Méthode analytique

La fluorescence X classique (à énergie dispersive ou à longueur d'onde dispersive) est utilisée pour les analyses qualitative et quantitative des éléments. On peut affiner les précisions pour la détermination des éléments traces à quelques parties par million (ppm) et même à quelques dizaines de parties par billion (ppb) en utilisant la technique de la fluorescence X à énergie dispersive et à réflexion totale (TXRF) (Figure 2 ci-contre) [1, 5-7].

La limite de détection de l'élément j est donnée par la formule

$$(LD)_j = 3 C_j \frac{\sqrt{(N_b)_j}}{N_j}$$

où C_j est la concentration de l'élément j, N_j l'aire nette de l'élément j ; (N_b)_j représente le bruit de fond.

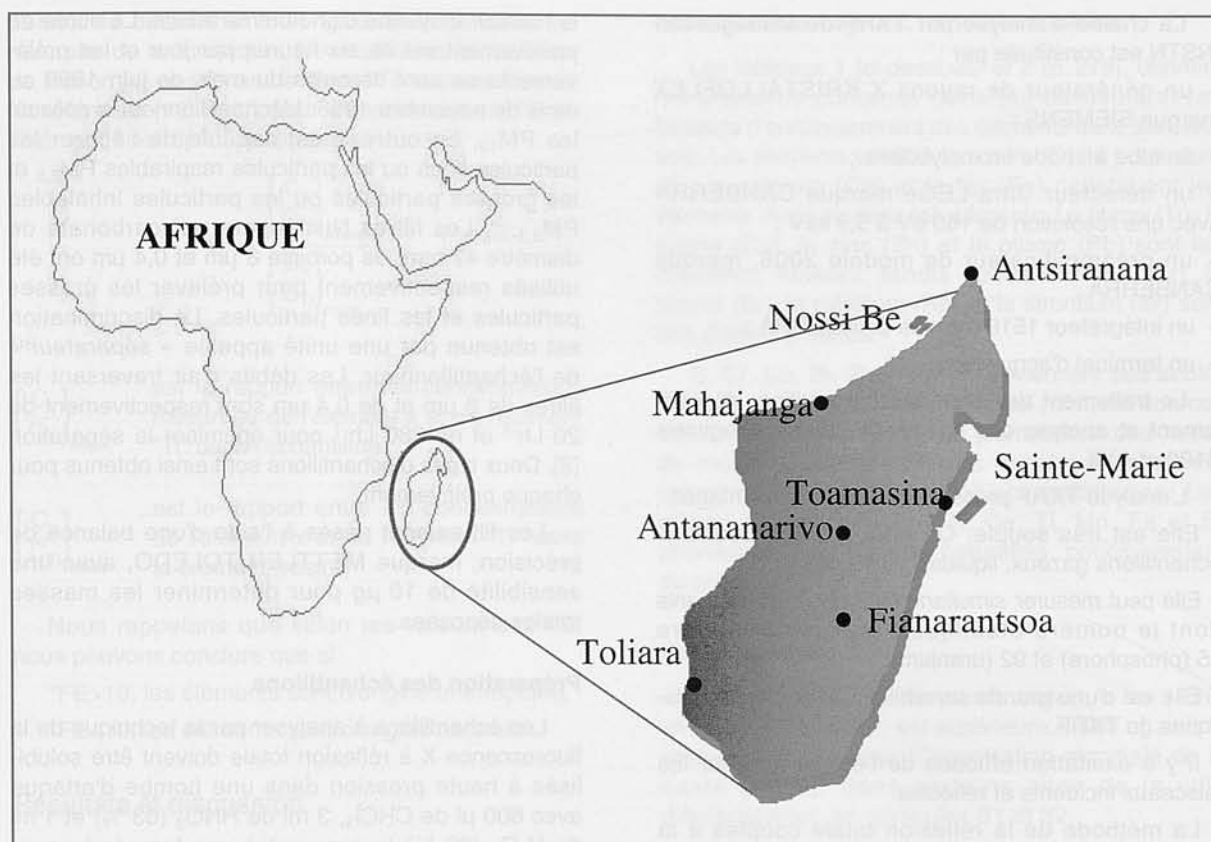


Figure 1.
Localisation de Madagascar.
Madagascar localization.

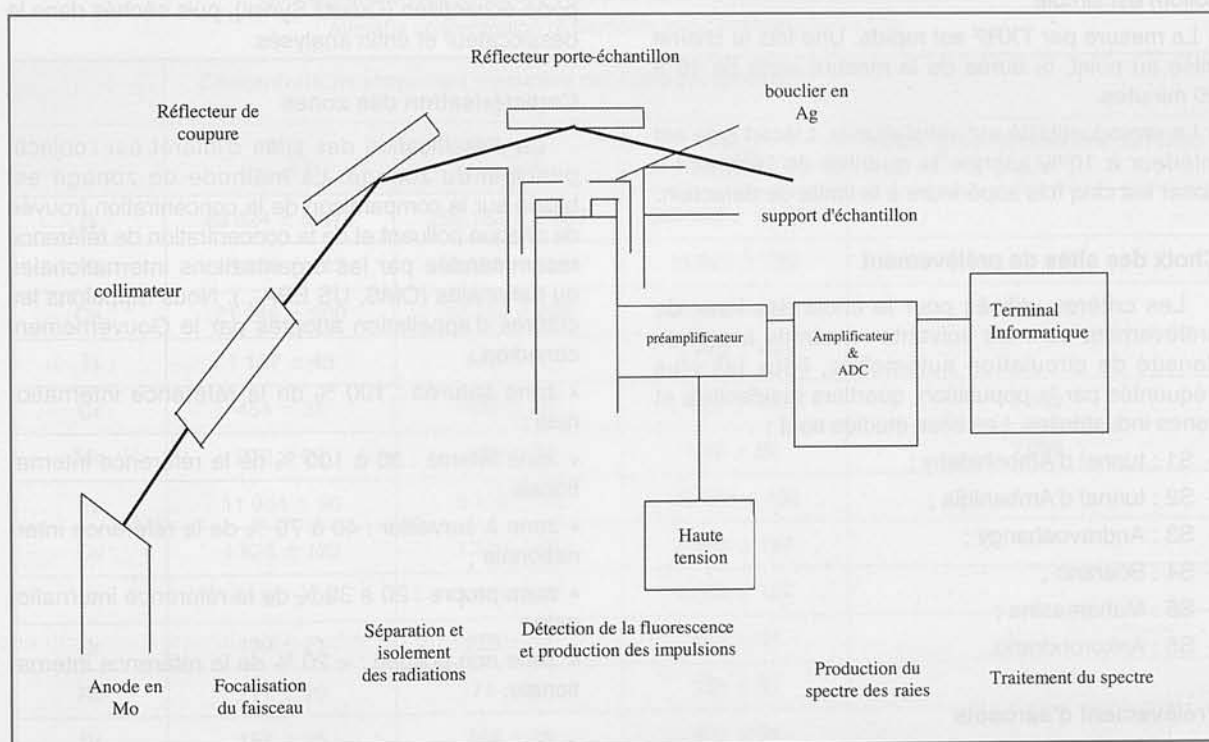


Figure 2.
Diagramme schématique de la spectrométrie de fluorescence X à réflexion totale (TXRF).
Schematic diagram of the Total reflection X-Ray Fluorescence (TXRF) spectrometry chain.

La chaîne d'analyse par TXRF de Madagascar-INSTN est constituée par :

- un générateur de rayons X KRISTALLOFLEX marque SIEMENS ;
- un tube à anode en molybdène ;
- un détecteur Ultra-LEGE marque CANBERRA avec une résolution de 160 eV à 5,9 keV ;
- un préamplificateur de modèle 2008, marque CANBERRA ;
- un intégrateur 1510 marque CANBERRA ;
- un terminal d'acquisition.

Le traitement des données (acquisition, dépouillement et analyse des spectres) utilise les logiciels S100 et AXIL.

L'analyse TXRF présente beaucoup d'avantages.

- Elle est très souple. On peut l'utiliser pour des échantillons gazeux, liquides ou solides.
- Elle peut mesurer *simultanément* plusieurs éléments dont le numéro atomique Z est compris entre 15 (phosphore) et 92 (uranium).
- Elle est d'une grande sensibilité liée aux caractéristiques du TXRF.
- Il y a excitation efficace de l'échantillon par les faisceaux incidents et réfléchis.
- La méthode de la réflexion totale couplée à la coupure en énergie réduit le bruit de fond. La limite de détection est généralement de l'ordre de 10 pg à 4 ng. En affinant encore la méthode, elle peut descendre jusqu'à plusieurs femtogrammes (fg).
- La préparation de l'échantillon (gazeux, liquide, solide) est simple.
- La mesure par TXRF est rapide. Une fois la chaîne mise au point, la durée de la mesure varie de 10 à 20 minutes.
- La reproductibilité est satisfaisante. L'écart type est inférieur à 10 % lorsque la quantité de l'élément à doser est cinq fois supérieure à la limite de détection.

Choix des sites de prélèvement

Les critères utilisés pour le choix des lieux de prélèvement sont les suivants : endroits à grande densité de circulation automobile, lieux les plus fréquentés par la population, quartiers résidentiels et zones industrielles. Les sites étudiés sont :

- S1 : tunnel d'Ambohidahy ;
- S2 : tunnel d'Ambanidia ;
- S3 : Andravoahangy ;
- S4 : Soarano ;
- S5 : Mahamasina ;
- S6 : Ankorondrano.

Prélèvement d'aérosols

La collecte des échantillons d'aérosols a été faite à l'aide de l'échantillonneur DICHOTOMOUS fourni par l'AIEA. Il est placé à 1,60 m au-dessus du sol, à

la hauteur moyenne d'un homme adulte. La durée de prélèvement est de six heures par jour et les prélèvements se sont déroulés du mois de juin 1998 au mois de novembre 1998. L'échantillonneur a collecté les PM₁₀. En outre, il est capable de séparer les particules fines ou les particules respirables PM_{2,5} et les grosses particules ou les particules inhalables PM_{2,5-10}. Les filtres Nucléopore polycarbonate de diamètre 47 mm, de porosité 8 µm et 0,4 µm ont été utilisés respectivement pour prélever les grosses particules et les fines particules. La discrimination est obtenue par une unité appelée « séparateur » de l'échantillonneur. Les débits d'air traversant les filtres de 8 µm et de 0,4 µm sont respectivement de 20 l.h⁻¹ et de 380 l.h⁻¹ pour optimiser la séparation [8]. Deux types d'échantillons sont ainsi obtenus pour chaque prélèvement.

Les filtres sont pesés à l'aide d'une balance de précision, marque METTLER TOLEDO, avec une sensibilité de 10 µg pour déterminer les masses totales déposées.

Préparation des échantillons

Les échantillons à analyser par la technique de la fluorescence X à réflexion totale doivent être solubilisés à haute pression dans une bombe d'attaque avec 600 µl de CHCl₃, 3 ml de HNO₃ (63 %) et 1 ml de H₂O₂ (30 %) (suprapure) à une température de 165 °C pendant quatre heures [9] ; 200 µl de cette solution préparée sont dilués dans 800 µl d'eau bi-distillée ; 5 µg de cobalt (1 000 ppm) sont utilisés comme standard interne. Ensuite, 10 µl de cette solution préparée sont déposés sur le réflecteur porte-échantillon (Quartz Synsil), puis séchés dans le dessiccateur et enfin analysés.

Caractérisation des zones

La classification des sites d'intérêt est l'objectif principal du zonage. La méthode de zonage est basée sur la comparaison de la concentration trouvée de chaque polluant et de la concentration de référence recommandée par les organisations internationales ou nationales (OMS, US EPA...). Nous rappelons les critères d'appellation adoptés par le Gouvernement canadien :

- zone saturée : 100 % de la référence internationale ;
- zone latente : 80 à 100 % de la référence internationale ;
- zone à surveiller : 40 à 79 % de la référence internationale ;
- zone propre : 20 à 39 % de la référence internationale ;
- zone non polluée : < 20 % de la référence internationale.

Origine de la pollution

Le calcul du facteur d'enrichissement (FE) de chaque élément trouvé dans les échantillons d'aérosols

permet de déterminer si l'origine de la pollution est naturelle ou anthropique. Nous utilisons la méthode de Mason [4] en prenant le titane "Ti" comme élément de référence [10]. Le facteur d'enrichissement FE de l'élément x est défini par la relation

$$FE = \frac{\left\{ \frac{C_x}{C_{Ti}} \right\}_{\text{échant.}}}{\left\{ \frac{C_x}{C_{Ti}} \right\}_{\text{croûte}}}$$

où

$\left\{ \frac{C_x}{C_{Ti}} \right\}_{\text{échant.}}$ est le rapport entre les concentrations mesurées de l'élément x et de l'élément "Ti" dans l'échantillon.

$\left\{ \frac{C_x}{C_{Ti}} \right\}_{\text{croûte}}$ est le rapport entre les concentrations de l'élément x et de l'élément "Ti" dans la croûte terrestre.

Nous rappelons que selon les valeurs des FE, nous pouvons conclure que si

*FE>10, les éléments sont d'origine anthropique,

*FE<10, les éléments sont d'origine naturelle.

Résultats et discussion

Les résultats sont donnés dans les tableaux 1 à 4.

Les éléments majeurs, mineurs et traces

Les tableaux 1 (ci-dessous) et 2 (p. 278), donnent les éléments contenus dans les aérosols et les facteurs d'enrichissement des éléments dans les aérosols. Les éléments comme le soufre (S), le potassium (K), le calcium (Ca) et le fer (Fe) constituent les éléments majeurs dans les aérosols. Le titane (Ti), le cuivre (Cu), le zinc (Zn) et le plomb (Pb) sont les éléments mineurs, tandis que le chrome (Cr), le brome (Br), le rubidium (Rb) et le strontium (Sr) sont des éléments traces.

S, Cr, Cu, Br, Zn et Pb ne proviennent pas seulement de la croûte terrestre ou du sol ; d'autres sources dues aux activités humaines (combustion des huiles de moteurs, incinération des ordures ménagères, industries...) apportent aussi leur contribution. Les autres éléments comme K, Ca, Ti, Mn, Fe et Sr proviennent des sources naturelles, principalement du sol.

Cas du plomb

La concentration du plomb obtenue en 1996, environ 4 000 ng.m⁻³, est supérieure à 500 ng.m⁻³, la valeur guide fixée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), dans certains sites de la ville d'Antananarivo, en particulier S1 et S2.

Nous avons observé en 1998 que la valeur guide fixée par l'OMS pour le plomb n'est pas respectée

Tableau 1.
Concentrations moyennes des éléments dans l'air de la ville d'Antananarivo.
Average concentration of elements in air in Antananarivo City.

	Concentrations moyennes mesurées par Madagascar-INSTN (ng.m ⁻³)			Valeur guide journalière de l'OMS (ng.m ⁻³)
	PM _{2,5} (ng.m ⁻³)	PM _{2,5-10} (ng.m ⁻³)	PM ₁₀ (ng.m ⁻³)	
S	83 924 ± 5 974	256 182 ± 8 757	340 106 ± 14 731	
K	16 530 ± 217	5 392 ± 522	21 922 ± 739	
Ca	21 246 ± 200	17 194 ± 539	38 440 ± 739	
Ti	1 137 ± 43	646 ± 70	1 783 ± 113	
Cr	454 ± 35	435 ± 35	889 ± 70	1 000
Mn	272 ± 26	170 ± 26	442 ± 52	1 000
Fe	11 954 ± 96	8 119 ± 70	20 073 ± 166	
Cu	4 826 ± 122	1 717 ± 65	6 543 ± 187	
Zn	4 135 ± 96	1 928 ± 61	6 063 ± 157	
Br	199 ± 21	225 ± 17	424 ± 38	
Rb	111 ± 20	71 ± 10	182 ± 30	
Sr	157 ± 25	144 ± 26	301 ± 51	
Pb	1 333 ± 70	488 ± 55	1 821 ± 125	500

Source : Madagascar-INSTN.

Tableau 2.
Facteur d'enrichissement (FE) pour les éléments dans les aérosols de la ville d'Antananarivo.
Enrichment factor of elements in aerosol of Antananarivo City.

	Concentration de référence dans la croûte terrestre ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	PM _{2,5} ($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$)	FE	PM _{2,5-10} ($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$)	FE
S	260	83 924	1 249	256 182	6 711
K	25 900	16 530	2	5 392	1
Ca	36 300	21 246	2	17 194	3
Ti	4 400	1 137	1	646	1
Cr	100	454	18	435	30
Mn	950	272	1	170	1
Fe	50 000	11 954	1	8 119	1
Cu	55	4 826	340	1 717	213
Zn	70	4 135	229	1 928	188
Br	3	199	257	225	511
Rb	–	111	–	71	–
Sr	375	157	2	144	3
Pb	13	1 333	397	488	256

Source : Madagascar-INSTN.

Tableau 3.
Concentrations journalières (minimales, moyennes, maximales, totales)
du plomb selon la taille des particules dans l'air des différents sites de la ville d'Antananarivo, en $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$.
Daily concentrations (minimum, mean, maximum, total) of lead according to particles size in air of different sites
of Antananarivo City, expressed in $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$.

	Pb dans PM _{2,5} ($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$)			Pb dans PM _{2,5-10} ($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$)			Pb dans PM ₁₀ ($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$)	OMS ($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$)	Zone
	Min.	Max.	Moyenne	Min.	Max.	Moyenne			
S1	1 235	3 722	2 925	139	600	426	3 351	500	saturée
S2	757	1 991	1 491	313	1 400	856	2 347	500	saturée
S3	487	2 878	1 350	462	545	504	1 854	500	saturée
S4	270	748	483	394	456	426	909	500	saturée
S5	690	1 626	972	174	348	261	1 233	500	saturée
S6	722	830	774	420	460	452	1 226	500	saturée

Source : Madagascar-INSTN.

pour les 6 sites étudiés (Figure 3 ci-contre). Les concentrations sont de **deux à quatre fois** cette valeur ($500 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$). De plus, la distribution granulométrique du plomb (Figure 4, ci-contre) dans l'air de la ville d'Antananarivo a montré que plus de 75 % du plomb se fixent sur les PM_{2,5}. Le plomb provient principalement des gaz d'échappement des voitures car l'essence plombée est la seule utilisée sur le territoire de la République de Madagascar. Les voitures importées très vétustes des pays développés et des

autres îles voisines polluent énormément. Les résultats des analyses des essences vendues dans quelques stations de la ville d'Antananarivo effectuées dans notre laboratoire en 1996 confirment la présence du plomb : l'essence ordinaire et l'essence super en renferment (118 ± 10) ppm et (174 ± 11) ppm respectivement [11].

Les sites sont tous classés « **zones saturées** ». La ville d'Antananarivo est une « **zone saturée** » pour le paramètre plomb (Tableau 3).

Tableau 4.
Distribution des masses des $PM_{2,5}$, $PM_{2,5-10}$ et PM_{10} dans les différents sites de prélèvement.
Mass distribution of $PM_{2,5}$, $PM_{2,5-10}$ and PM_{10} in different sampling sites.

	Distribution des masses des particules en suspension dans l'air ($\mu g.m^{-3}$)		Concentration moyenne journalière des PM_{10} ($\mu g.m^{-3}$)	Valeur guide journalière des PM_{10} selon l'OMS ($\mu g.m^{-3}$)	Zone
	$PM_{2,5}$	$PM_{2,5-10}$			
S1	474	30	504		saturée
S2	328	24	352		saturée
S3	115	9	124	150	latente
S4	147	17	164		saturée
S5	148	6	154		saturée
S6	119	27	146		latente
Moyenne des valeurs	221	19	240		saturée

Source : Madagascar-INSTN.

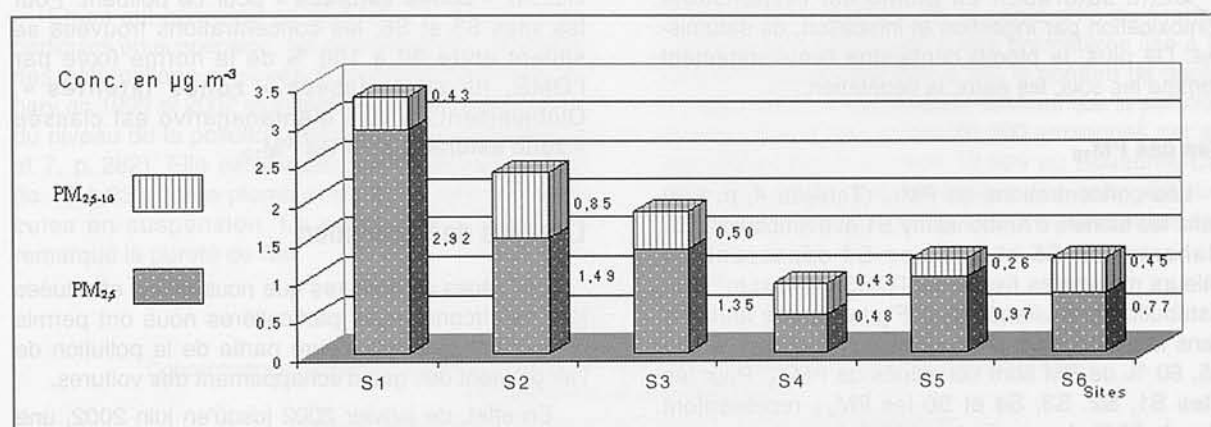


Figure 3.
Variation de la concentration moyenne du plomb dans les différents sites.
Variation of mean concentration of lead in different sites.

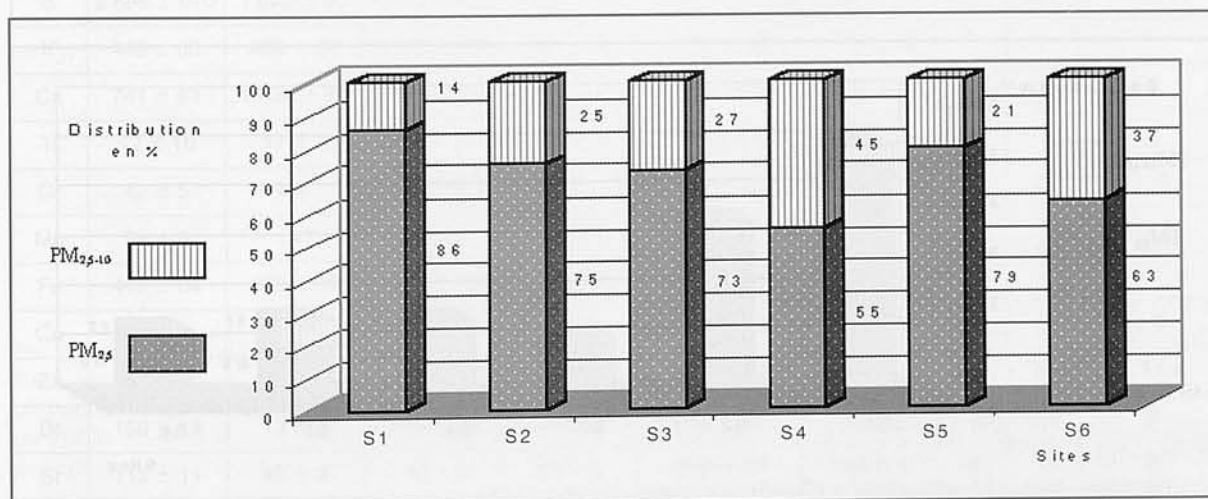


Figure 4.
Distribution granulométrique du plomb dans les sites de prélèvement.
Size distribution of lead in sampling sites.

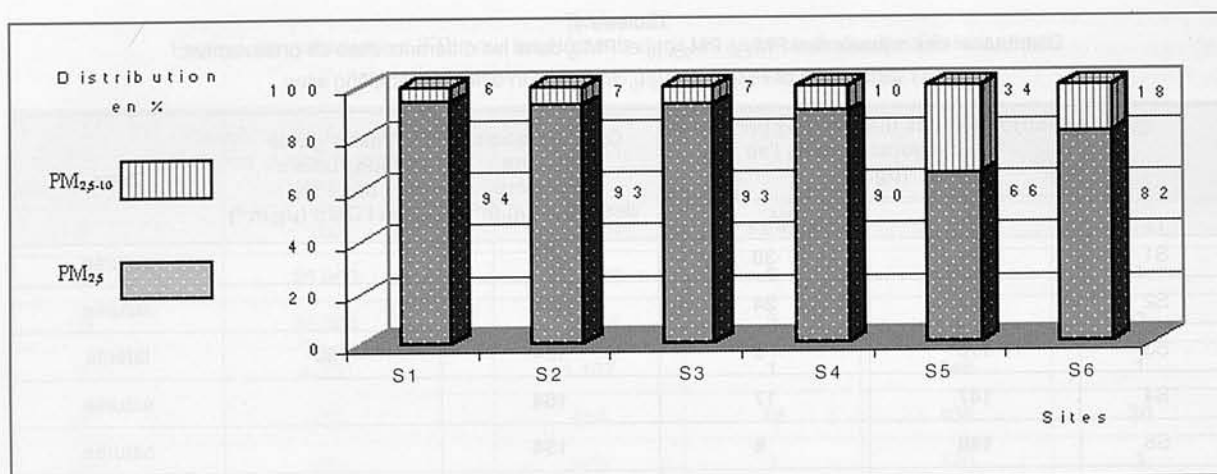


Figure 5.
Distribution granulométrique des PM₁₀ dans les différents sites.
Size distribution of PM₁₀ in different sites.

Cette saturation en plomb est responsable d'intoxication par ingestion et inhalation, de saturnisme. De plus, le plomb contamine l'environnement comme les sols, les eaux, la végétation.

Cas des PM₁₀

Les concentrations de PM₁₀ (Tableau 4, p. 279) dans les tunnels d'Ambohidahy S1 et d'Ambanidia S2, Mahamasina S5 et Soarano S4 dépassent les valeurs maximales fixées par l'OMS (150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). La distribution granulométrique (Figure 5) des aérosols dans la ville d'Antananarivo montre que pour le site S5, 60 % de PM sont constitués de PM_{2.5}. Pour les sites S1, S2, S3, S4 et S6 les PM_{2.5} représentent plus de 80 % des particules dans l'air.

Les concentrations moyennes de PM₁₀ (Figure 6) dans les sites S1, S2, S4 et S5 sont supérieures à la valeur maximale adoptée par l'OMS. Ces sites sont

classés « **zones saturées** » pour ce polluant. Pour les sites S3 et S6, les concentrations trouvées se situent entre 80 à 100 % de la norme fixée par l'OMS, ils sont classés « **zones latentes** ». Globalement, la ville d'Antananarivo est classée « **zone saturée** » pour les PM₁₀.

L'origine de la pollution

Les séries de mesures que nous avons effectuées lors de circonstances particulières nous ont permis de montrer que la majeure partie de la pollution de l'air provient des gaz d'échappement des voitures.

En effet, de janvier 2002 jusqu'en juin 2002, une grève générale a paralysé la vie économique du pays. Il y a eu une pénurie presque totale de carburant (essence, gasoil, pétrole) entraînant une immobilisation de presque toutes les voitures dans la capitale. Or,

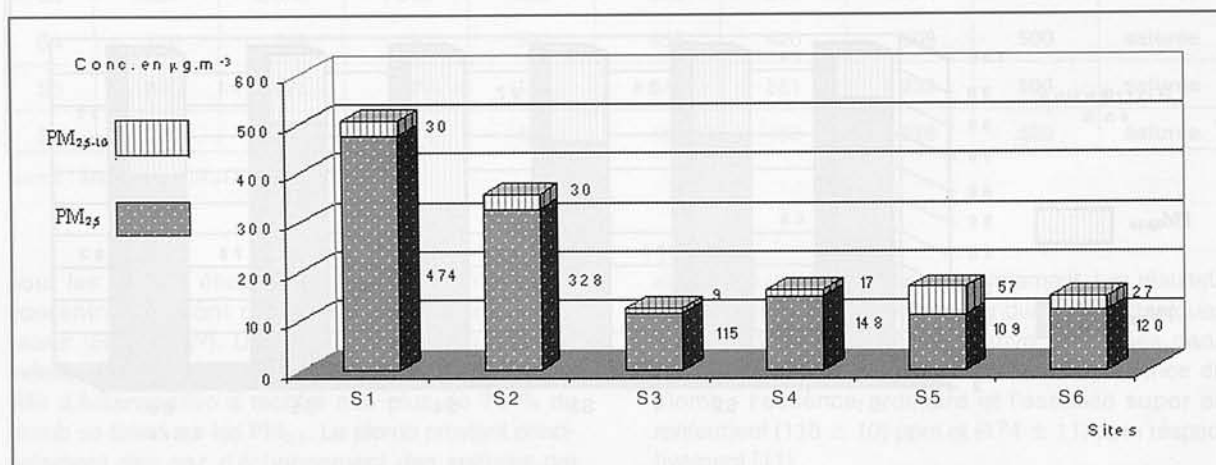


Figure 6.
Variation de la concentration moyenne des PM_{2.5} et PM_{2.5-10}.
Variation of mean concentration of PM_{2.5} and PM_{2.5-10}.

au mois d'avril 1999, nous avons procédé à une première campagne de prélèvements sur la terrasse d'un hôtel situé sur le bord du boulevard Ratsiman-drava à Andrefan'Ambohijannahary ; le capteur étant placé à 3,5 m au-dessus de la surface roulante.

Nous avons donc saisi cette opportunité de la grève générale pour effectuer une seconde campagne de prélèvements, les 13 et 14 avril 2002 sur le même site. Le tableau 5 donne les concentrations moyennes mesurées des éléments contenus dans les aérosols à Andrefan'Ambohijannahary en 1999 et les 13 et 14 avril 2002. Les résultats obtenus montrent une diminution considérable de la pollution atmosphérique engendrée par les paramètres d'origine anthropique, entre autres le soufre, le chrome, le cuivre, le zinc, le brome et le plomb. Nous constatons une diminution notable du chrome (facteur 16), du brome (facteur 9), du zinc (facteur 19) et du plomb (facteur 23). Le chrome, le zinc et le brome proviendraient des gaz d'échappement des voitures. Cette situation s'explique par la vétusté des moteurs qui brûlent non seulement de l'essence mais aussi les lubrifiants.

En ce qui concerne en particulier le plomb et les particules en suspension, les concentrations mesurées des échantillons prélevés à Andrefan'Ambohijannahary en 1999 et 2002 montrent une nette décroissance du niveau de la pollution atmosphérique (Tableaux 6 et 7, p. 282). Elle est divisée par un facteur variant de 10 à 23 pour le plomb et de 5 à 7 pour les particules en suspension. La population a d'ailleurs remarqué la pureté de l'air.

Effets de la pollution sur la santé de la population d'Antananarivo

Des auteurs ont déjà étudié les effets des particules en suspension sur la santé humaine et les conséquences sur le plan économique :

- altération du fonctionnement des voies respiratoires ;
- augmentation journalière de fréquence des symptômes des maladies respiratoires ;
- augmentation des admissions pour affections respiratoires (asthme...) dans les hôpitaux ;
- augmentation du nombre d'hospitalisation pour maladies respiratoires et accidents cardiovasculaires ;
- augmentation des affections cardiaques et du taux de mortalité due à une exposition trop fréquente aux particules en suspension ;
- augmentation du taux d'absentéisme dans les différents secteurs d'activité et les écoles.

À Paris, une étude épidémiologique réalisée par l'Observatoire régional de la santé d'Ile-de-France sur la mortalité cardiovasculaire prématurée liée à la pollution évalue entre 260 à 350 le nombre de décès annuels. Certains scientifiques estiment que la pollution atmosphérique tue environ 60 000 personnes par an aux États-Unis et environ 10 000 au Royaume-Uni [12]. Or dans les grandes métropoles, cette pollution est due en grande partie aux gaz d'échappement des voitures.

Tableau 5.
Concentrations moyennes, exprimées en ng.m^{-3} , des éléments dans l'air d'Andrefan'Ambohijannahary en 1999 et les 13 et 14 avril 2002.

Average concentration of elements in air of Andrefan'Ambohijannahary in 1999 and 13-14 April 2002, expressed in ng.m^{-3} .

	PM _{2,5}		PM _{2,5-10}		PM ₁₀		FE		Ordre de grandeur du rapport (1)/(2)
	1999	2002	1999	2002	1999 (1)	2002 (2)	1999	2002	
S	6 696 ± 670	1 675 ± 93	5 348 ± 642	1 654 ± 89	12 043 ± 1 312	3 329 ± 182	592	335	4
K	443 ± 53	496 ± 27	1 193 ± 179	948 ± 15	1 637 ± 232	1 444 ± 42	1	1	1
Ca	741 ± 81	1 430 ± 11	1 195 ± 119	2 372 ± 12	1 936 ± 200	3 802 ± 23	1	3	1
Ti	92 ± 16	17 ± 2	253 ± 51	151 ± 4	343 ± 67	168 ± 6	1	1	2
Cr	42 ± 5	< 8*	89 ± 10	< 8*	131 ± 15	< 8*	17	2	> 16
Mn	24 ± 3	< 7*	49 ± 6	< 7*	74 ± 9	< 7*	1	1	> 11
Fe	419 ± 34	173 ± 11	2 108 ± 190	1 719 ± 8	2 527 ± 224	1 892 ± 19	1	1	1
Cu	31 ± 4	< 7*	22 ± 3	< 7*	53 ± 7	< 7*	12	3	> 8
Zn	458 ± 50	< 6*	463 ± 56	42 ± 3	921 ± 106	48	168	18	19
Br	156 ± 14	13 ± 1	116 ± 12	19 ± 1	272 ± 26	32 ± 2	1 160	279	9
Sr	115 ± 11	49 ± 3	113 ± 2	55 ± 3	228 ± 13	104 ± 6	8	7	2
Pb	59 ± 6	< 6*	79 ± 8	< 6*	138 ± 12	< 6*	136	12	> 23

* Limite de détection.

Source : Madagascar-INSTN.

Tableau 6.

Concentrations moyennes, exprimées en ng.m^{-3} , du plomb dans l'air à Andrefan'Ambohijahanahary en 1999 et les 13 et 14 avril 2002.

Average concentration of lead in air in Andrefan'Ambohijahanahary in 1999 and 13-14 April 2002, expressed in ng.m^{-3} .

	Concentrations moyennes du plomb (ng.m^{-3})		Valeur guide journalière selon l'OMS (ng.m^{-3})	Ordre de grandeur du rapport (1)/(2)	Zone	
	1999 (1)	2002 (2)			1999	2002
PM _{2,5}	59	< 6	500	> 10	Zone propre	Zone non polluée
PM _{2,5-10}	79	< 6		> 13		
PM ₁₀	138	< 6		> 23		

Source : Madagascar-INSTN.

Tableau 7.

Distribution des masses des particules en suspension dans l'air d'Andrefan'Ambohijahanahary en 1999 et les 13 et 14 avril 2002, exprimées en $\mu\text{g.m}^{-3}$.

Mass distribution of suspended particulates in air of Andrefan'Ambohijahanahary in 1999 and 13-14 April 2002, expressed in ng.m^{-3} .

	Distribution des masses des particules en suspension dans l'air ($\mu\text{g.m}^{-3}$)		Valeur guide journalière selon l'OMS ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Rapport (1)/(2)	Zone	
	1999 (1)	2002 (2)			1999	2002
PM _{2,5}	136	19	150	7	Zone saturée	Zone propre
PM _{2,5-10}	64	13		5		
PM ₁₀	200	32		6		

Source : Madagascar-INSTN.

Les particules respirables (PM_{2,5}) sont encore plus dangereuses que les particules inhalables (PM_{2,5-10}) car elles peuvent non seulement altérer les fonctions pulmonaires mais aussi pénétrer les alvéoles et avoir des effets délétères généraux. Plusieurs études ont montré que le risque de mortalité est deux fois plus grand pour l'exposition aux PM_{2,5} qu'aux PM_{2,5-10}.

Madagascar, à cause de la récession économique, importe de plus en plus des voitures usagées (automobiles, bus, cars) interdites de circulation en Europe à cause de leur vétusté. Le taux de croissance annuel des véhicules importés est passé de 7 % à 12 % en 1999. Il entraîne des embouteillages paralysant pendant des heures la circulation. De 8 à 12 heures, et de 14 à 18 heures, en période de travail (du lundi au vendredi), il faut deux heures pour faire 2 km. En effet, depuis l'indépendance en 1960, aucune politique de gestion du trafic automobile n'a été envisagée. La vétusté du parc automobile (80 % des voitures ont plus de 8 ans d'âge) n'a fait qu'empirer la pollution par les gaz d'échappement.

On a noté une augmentation du nombre des malades atteints d'infections respiratoires aiguës (IRA). Les premiers atteints sont malheureusement les enfants. D'après une enquête de l'Institut national des statistiques (INSTAT) de Madagascar concernant les principales maladies à l'origine de la morbidité

des enfants, 28,5 % sont des IRA ; 187 073 enfants ont été atteints d'IRA pendant l'année 2000. Dans la commune urbaine d'Antananarivo, 4 000 à 10 000 enfants par mois souffrant d'IRA ont été traités en 1999 dans les hôpitaux d'Antananarivo [13].

Cette situation alarmante rend urgentes et impérieuses la lutte contre la pollution atmosphérique et la sensibilisation des autorités publiques.

Suite aux actions de sensibilisation que nous avons menées depuis 1996, entre autres lors des Séminaires interdisciplinaires Raelina Andriambololona (SIRA), en collaboration avec la Société pétrolière Galana et la Direction Générale de la Sécurité routière à Antananarivo, le Conseil du Gouvernement du 18 décembre 2002 a décidé et autorisé l'importation de l'essence sans plomb.

Remerciements

Nous voudrions remercier l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA, Vienne, Autriche) pour le support financier reçu dans le cadre du contrat programme de recherche en 1998 et 1999 (CPR 98 et 99), et en particulier M. B. Smadis et Mme Teresa Benson A. de l'AIEA, et E. O. Rasozanany, M. Mamizara et R. Razafy Andrianarivo, membres du Département Fluorescence X et Environnement de Madagascar-INSTN pour leur aide.

Mots clés

Pollution de l'air. Fluorescence X à réflexion totale. Matière particulaire. Constituant en éléments. Métaux lourds. Ville d'Antananarivo. Madagascar.

Keywords

Air pollution. Total reflection X-ray fluorescence. Particulate matter. Elemental component. Heavy metals. Antananarivo City. Madagascar.

Références

1. Randriamanivo LV. Étude de la pollution industrielle des eaux et de la pollution atmosphérique, Thèse de Doctorat de 3^e cycle, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo et Madagascar-INSTN, Madagascar 1996.
2. Raoelina Andriambololona, Randriamanivo L, Rakotondramanana HT, Rasolofonirina M, Rasoazanany E. Measurements of particulate matter PM_{2.5} and PM₁₀ and heavy metals in atmosphere of Antananarivo City in 1998. *Acad Nat des Arts, des Let et des Sc*, Antananarivo Madagascar, séance plénière du 18 mai 2000.
3. Rakotondramanana HT. Étude 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 3^e cycle, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo et Madagascar-INSTN, Madagascar 2000.
4. Mason B. Principles of Geochemistry, John Wiley 3rd Ed, New York 1966.
5. Leland DJ, Bilbrey DB, Leyden DE, Wobrauschek P, Aiginger H, Puxbaum H. Analysis of Aerosols using Total reflection X-ray spectrometry. *Analytical Chemistry American Chemical Society* 1987 ; 59 : 1911-4.
6. Aiginger H. Historical development and principles of total reflection X-ray fluorescence analysis. *Spectrochem Acta* 1991 ; 46B : 1313.
7. Schwenke H, Knoth J. In : Van Grieken RE, Markowicz A (eds). Handbook of X-Ray Spectrometry. Marcel Dekker, New York 1993 ; 14 : 453-71.
8. Stropnik B, Byrne AR, Smoldis B. Air pollution monitoring by ED XRF in the Šalek valley : Part I, *Acta Chimica Slovenica* 1993 ; 40 (3) : 305-7.
9. Dargie M, Markowicz A, Tajini AA, Valkovic V. Optimized sample preparation procedures for the analysis of solid materials by total reflection XRF, *Fresenius J Anal Chem* 1997 ; 357 : 589-93.
10. Applied research on air pollution using nuclear related analytical techniques. Report on the first research co-ordination meeting, NAHRES – 19 Vienna (Austria) 1994 : 19.
11. Andriambololona R, Randriamanivo LV, Rasoazanany EO, Razafy Andrianarivo R, Rakotondramanana HT, Rasolofonirina M. Méthodes de détection de fraude des carburants par addition de pétrole. *Bull Acad Nat des Arts, des Let et des Sc*, Antananarivo Madagascar 2000 ; 75 (1).
12. Robert MP, Susan FS, Zeisler R. *Bulletin de l'AIEA*, 1996 ; 38 (2) : 17.
13. Institut National des Statistiques de Madagascar, 1999 (Communication privée).

