

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

5/95

وزارة التربية الوطنية

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT *de l'Environnement*

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Contribution à l'étude des
particules totales en suspension
dans le grand Alger.*

Proposé par :

D^r R. KERBACHI

Etudié par :

M^r NESSAH, S

Dirigé par :

D^r R. KERBACHI

PROMOTION

Juin 1995

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية

MINISTRE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT *de l'Environnement*

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Contribution à l'étude des
particules totales en suspension
dans le grand Alger.*

Proposé par :

P^r R. KERBACHI

Etudié par :

M^r NESSAH.S

Dirigé par :

P^r R. KERBACHI

PROMOTION

Juin 1995

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents

Mes frères

Ma soeur Amel

Mes oncles

**Mes amis (es) : Hocine, Azzeddine, Rachid, Mehdi, Fadéla, Leïla, Karima, Yacine
et Mourad.**

Et à tous ceux que j'aime.

REMERCIEMENTS

Pour son apport et soutien, je tiens à remercier le Pr. R. KERBACHI qui n'a cessé de m'orienter et de me prodiguer ses précieux conseils.

Je tiens également à remercier les membres du Jury :

- | | |
|-------------------------|---------------------|
| <i>- Mme BELHANACHE</i> | <i>Presidente</i> |
| <i>- Mr H. GRIB</i> | <i>Examinateur</i> |
| <i>- Mr A. MAZIGHI</i> | <i>Examinateur</i> |
| <i>- Melle J. ARRAR</i> | <i>Examinatrice</i> |
| <i>- Mr BOUGHDAOUI</i> | <i>Examinateur</i> |

Je tiens à remercier l'ensemble de tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Pour son accueil, je remercie Madame la directrice de l'Ecole Mohamed El Aid Khalifa (Rata Hamidou).

Je remercie également Myriam et sa maman pour leur travail.

SOMMAIRE

	Pages
<u>I- INTRODUCTION</u>	1
<u>II- ORIGINE DES PARTICULES</u>	3
II-1- Les particules d'origine naturelle	3
a) L'érosion éolienne	3
b) Embruns marins	3
c) Les cendres volcaniques	4
d) Les poussières d'origine extra-terrestre	4
II-2- Les particules d'origine anthropogéniques	5
a) La combustion	5
b) Les process industriels	5
c) L'incinération des déchets urbains	5
d) Le trafic routier	6
e) Les cimenteries	6
<u>III- PROPRIETES PHYSICO-CHIMQUES DES PARTICULES</u>	12
III-1- Dimension des particules	12
III-2- Répartition granulométrique	13
III-3- Dynamique des particules	16
III-4- Processus naturel d'élimination des poussières de l'atmosphère	20
<u>IV- NUISANCES ENGENDREES PAR LES POUSSIERES EN SUSPENSION</u>	22
IV-1- Effets nuisibles sur l'homme	22
IV-2 - Effets sur les animaux	29
IV-3- Effets sur les végétaux	29
IV-4- Effets divers	29
<u>V- PRELEVEMENTS DES PARTICULES</u>	30
V-1- Echantillonnage	30
V-2- Mesure de la concentration particulière	32
V-3- Des filtres et mebranes de rétention	33
<u>VI- METHODOLOGIE</u>	35
VI-1- Site de prélèvement	35
VI-2- Mode de prélèvement	35
VI-3- Traitement et analyse des échantillons	39

VII- RESULTATS ET INTERPRETATIONS

VII-1- Etude des particules totales en suspension

VII-1-1 Particules en suspension à Raïs Hamidou

VII-1-2 Particules en suspension à Bachdajrah

VII-2- Etude des éléments métalliques associés aux particules totales en suspension

a) Les éléments présents en traces

b) Les éléments majeurs

c) Etude comparative

VIII- CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

40

40

40

49

51

52

58

67

69

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
École Nationale Polytechnique

CHAPITRE I

I- INTRODUCTION

La pollution atmosphérique n'est pas un fait nouveau, mais existait déjà depuis des siècles à travers l'ensemble du globe terrestre. Les principales origines étaient l'érosion éolienne, l'utilisation domestique du feu, les éruptions volcaniques, les feux de forêts, les tempêtes de vents..... etc.

Cette pollution s'est accentuée avec l'apparition de la révolution industrielle du 19ème siècle qui a donné naissance à un nouveau type d'industrie, à de nouveaux moyens de déplacement et à un nouveau mode de vie. Tous ces changements dans les activités créées par l'homme ont donné naissance à l'émission dans l'atmosphère de composés divers qui viennent perturber la composition naturelle de l'air pur que nous respirons.

Aujourd'hui, la diversité des substances synthétiques ou naturelles émises dans l'atmosphère et leur très probable interaction chimique ont créé des phénomènes jusque là inconnus, qui menacent en général l'équilibre naturel de l'atmosphère et en particulier la santé de l'homme.

Parmi les diverses formes de pollutions atmosphériques qui de nos jours sont devenues la préoccupation permanente des scientifiques et autres écologistes, on notera la contamination de l'atmosphère par les particules. Ces particules émises dans l'atmosphère par diverses sources peuvent sédimenter rapidement mais aussi, et le plus souvent séjourner longtemps dans l'atmosphère en restant en suspension.

Cette dernière classe de particules caractérisée par des vitesses de chute très faibles est appelée particule totale en suspension ; elle englobe les particules non viables dont les dimensions sont généralement comprises entre 0 et 30 μm .

Du point de vue santé publique, ces particules sont considérées comme étant dangereuses car une fois inspirées par l'homme, elles peuvent atteindre les voies respiratoires terminales, c'est à dire les alvéoles pulmonaires.

Les nuisances causées par ces particules inspirables sont d'autant plus graves que beaucoup de métaux lourds et autres composés cancérigènes sont associés à ces particules. C'est le cas par exemple du Plomb, du Cd et des suies qui supportent les substances polyaromatiques.

C'est pour cette raison qu'un peu partout dans le monde on a installé depuis plusieurs années, des réseaux de surveillance qui suivent en permanence l'évolution des particules en suspension et leurs teneurs en composés chimiques.

Dans notre pays les premiers travaux ayant trait à ce genre de pollution ont été effectués par le laboratoire de pollution atmosphérique de notre département, et se sont limités à l'étude des particules sédimentables. C'est donc en continuité de ces travaux que nous abordons dans cette étude l'examen de la pollution par les particules en suspension.

L'objet de notre travail portera sur l'évaluation des teneurs atmosphériques en particules en suspension en un site urbain industriel et en un site purement urbain qui servira de base pour l'étude de la pollution urbaine .

Nous effectuerons, parallèlement , une étude des teneurs de certains éléments chimiques qui sont associés à ces particules en suspension.

CHAPITRE II

II- ORIGINE DES PARTICULES :

Les particules émises dans l'atmosphère peuvent être d'origine naturelle ou d'origine anthropogéniques.

II-1- Les particules d'origine naturelle :

On peut rencontrer différents phénomènes naturels qui contribuent fortement à la pollution de l'air.

Les particules qu'on y rencontre proviennent soit directement à partir du sol ou de la haute atmosphère, soit après transformation chimique de composés gazeux présents dans l'atmosphère.

Les phénomènes naturels qui y contribuent le plus sont :

a) L'érosion éolienne :

L'érosion éolienne est due à l'action du vent sur la surface du sol, le vent dissocie les couches superficielles du sol. Les poussières sont déplacées suivant les directions et vitesses des vents; en absence de végétation, cette source peut prendre une ampleur considérable [1].

Il faut noter que chaque année, des millions de tonnes de métaux "en trace" sont extraits du sol par les vents.

Le phénomène d'érosion est prédominant dans les régions dont le sol est à texture grossière (sableux) dans les régions à relief atténué avec de grandes étendues plates favorisant l'action du vent et dans les régions à climat sec. Certaines particules les plus fines peuvent être soulevées en nuages de poussières pouvant monter jusqu'à 3.000 m d'altitude. Ces nuages se retrouveront dans les précipitations donnant lieu à des pluies de poussières [2].

b) Embruns marins :

Les brumes et les embruns venant de l'océan et des mers, apportent dans l'atmosphère continentale des cristaux de sels qui s'agglomèrent en noyaux de condensation. Les sels introduits dans l'atmosphère par les embruns marins sont principalement composés de chlorure de sodium (NaCl) mais également de chlorure de magnésium ($MgCl_2$), de chlorure de calcium ($CaCl_2$) et de bromure de potassium (KBr). Les plus fortes teneurs en sel sont relevées les jours de forte houle.

Le vent peut transporter les embruns marins à de grandes distances à l'intérieur des terres.

Des météorologistes anglais estiment que les brouillards si fréquents dans leur pays sont dus en partie à des condensations de sel. Suivant certaines estimations dans les régions côtières de BRETAGNE, les pluies déposent au sol 25 à 35 g de sels par m^2 au cours d'une année; 70% de ces dépôts étant constitués par du chlorure de sodium [1].

c) Les cendres volcaniques :

Elles résultent de la pulvérisation des laves au cours d'explosions violentes très intenses; projetées dans l'atmosphère à grande altitude et en masses énormes, elles forment des nuages épais qui peuvent parcourir des milliers de km et rester en suspension très longtemps .

"Le brouillard sec" qui, en 1783 couvrit pendant 3 mois presque toute l'Europe, après être apparu d'abord à COPENHAGUE où il persista 126 jours, avait pour origine une éruption en ISLANDE [3].

Ainsi le volcanisme constitue une source naturelle d'aérosol dont l'importance peut excéder toute autre cause spontanée ou anthropogène d'émissions particulières. Les éruptions de première magnitude s'accompagnent de l'introduction de plusieurs millions de tonnes de telles particules dans la stratosphère.

Ainsi, l'éruption du Mont Saint Helens, en Mai 1980, dans l'état de WASHINGTON "ETATS-UNIS" est accompagnée de l'émission de près de $3 \cdot 10^9$ tonnes de particules dont $1,4 \times 10^6$ tonnes ont atteint la stratosphère. L'éruption du KRAKATOA (1883) a injecté dans l'atmosphère 18 km^3 de roches dont $50 \cdot 10^6$ tonnes se répandirent dans la stratosphère, provoquant une baisse de 10% de la transparence atmosphérique pendant plusieurs mois [4].

d) Les poussières d'origine extra terrestres :

De petites particules provenant de météorites pénètrent de façon constante dans l'atmosphère.

Quelques milliers de tonnes (10.000 tonnes environ) de poussières d'origine extraterrestre sont captées quotidiennement par la terre. Il s'agit de petites particules cosmiques, provenant de météorites composées essentiellement d'oxyde de sodium, magnésium, calcium et fer.

Globalement on estime les émissions d'origine naturelles en particules solides à quelques $2096 \cdot 10^9$ kg/an.

Nous reportons dans le tableau N°1, selon la source, les taux d'émissions de poussières naturelles [5].

Source	Production (10^9 Kg/an)	Pourcentage du total
Aérosol marin	908	44
Nitrates (issues du NO et NO ₂)	390	18
Ammonium	245	11
Sulfates	182	9
Terpènes biogéniques	182	9
Erosion du sol	182	9
Volcans	4	/
Feux de forêts	3	/
TOTAL	2096	100

Tableau N° 1 : Production des particules d'origine naturelles

II-2- Les particules d'origine anthropogéniques :

Les activités humaines sous toutes leurs formes sont productrices de poussières. Le simple phénomène d'usure tels que, l'usure de nos chaussures, de nos vêtements, des planches, des pneus d'automobiles, des rails, des roues, etc. contribuent à la formation d'une quantité importante de particules.

Il y a encore les résidus de la vie domestique et même si ces détritiques sont brûlés ou transformés en engrais, ils sont une source de poussières dangereuses.

A une échelle plus importante, on retrouve les diverses sources que l'être humain a créé pour atteindre le niveau industriel et économique que connaît le monde actuellement. La sidérurgie, les procès de combustion, les mines et cimenteries et le transport sont entre autres d'importantes sources d'émission de particules anthropiques. Une partie importante de la pollution particulaire résulte des réactions chimiques que subissent dans l'atmosphère les polluants gazeux tels que le SO_2 et les NO_x .

a) La combustion :

La combustion des énergies fossiles solides, liquides ou gazeuses est à l'origine d'une importante pollution par les particules minérales et organiques :

On y distingue particulièrement les suies, le nickel et le vanadium issue du pétrole et les composés polycycliques qui se fixent en général sur les poussières.

En France, on a estimé en 1988 les émissions de particules issues des installations de combustions fixes (centrales thermiques, chauffage urbain, raffinerie, combustion industrielle) à $73 \cdot 10^6$ Kg soit 26% du total des poussières anthropiques [6].

b) Les process industriels :

Les process industriels les plus incriminés dans la pollution particulaire sont, incontestablement, les diverses opérations sidérurgiques, la pyro-métallurgie ou fonderie des métaux ferreux et l'industrie des métaux non ferreux tels que le zinc, le cuivre et le plomb, où lors des diverses opérations de grillage, raffinage et fusion dans les fours, il y a émission de particules métalliques qui peuvent s'oxyder et sublimer en fines particules sédimentables ou non. Ainsi, la métallurgie du cuivre et du nickel émet presque autant de plomb que la métallurgie de plomb lui-même [7].

c) L'incinération des déchets urbains :

Divers métaux lourds entrent dans la composition d'un grand nombre de produits qui finissent leur vie dans les déchets : batteries au plomb ou Ni-cd, peintures et pigments minéraux (cd), piles au mercure, cuir et caoutchouc (Cr et Zn) etc.. Lors de leur incinération, ces produits et bien d'autres, donnent naissance à des émissions atmosphériques fort redoutables.

d) Le trafic routier :

Les activités liées au transport qui ne cessent de s'intensifier constituent en milieu urbain la principale source de pollution particulaire.

Cette pollution est constituée principalement par les composants suivants :

- Les suies qui sont des particules de carbone et d'imbrûlés dénommés "fumées noires" qui sont dues à la combustion incomplète.

Leur présence est très importante dans les échappements des véhicules Diesel.

- Les hydrocarbures polynucléaires sont présents dans le carburant lui-même ou synthétisés lors de la combustion. Malgré leur présence à des proportions extrêmement faibles, ils exercent un pouvoir nuisible très élevé (substances susceptibles d'être cancérogènes).

- Les métaux lourds : parmi ces composés c'est surtout le plomb qui, de loin, est le composé le plus incriminé dans la pollution par le trafic routier et le plus répandu en milieu urbain.

Ajouté aux carburants comme antidétonant sous forme de tétra-éthyle de plomb à raison de 0,15 g à 0,4 g/l, il est rejeté dans sa presque totalité dans l'atmosphère des villes [8].

On estime qu'environ 16% de la production globale du plomb est destiné à être utilisé comme additif dans l'essence.

Les émissions issues du trafic routier sont estimées à $248 \cdot 10^6$ kg/an [5].

Cependant et depuis l'introduction dans les années 80 de l'essence sans plomb, ces taux d'émissions sont en nette régression.

e) les cimenteries :

De part le process de fabrication et la nature des matières premières utilisées, l'industrie du ciment représente une importante source de pollution par les poussières.

Les étapes principales du process de fabrication sont : l'extraction en carrière de la matière première, le broyage, le concassage, le mélange et enfin la production du clinker dans le four qui correspond à l'opération de cuisson. Lors de cette dernière opération, la matière première homogénéisée est introduite dans un four rotatif incliné où elle est échauffée progressivement : elle sèche, est calcinée et finalement portée à une température proche du point de fusion de la charge (≈ 1600 °C). C'est à cette température que se forme le Clinker.

Une production de 1 tonne de Clinker nécessite au moins 1,6 tonnes de matières premières.

Nous illustrons en figure N°1 , le schéma classique de fabrication du ciment par voie sèche et humide. Pratiquement toutes les étapes du procédé de production sont génératrices de poussières. La pollution commence déjà au niveau de l'extraction en carrière, lors du transport vers l'usine et enfin, au niveau de l'usine, où la production de clinker dans l'atelier de cuisson représente l'étape la plus polluante [9].

Les poussières rejetées par les cimenteries ont une composition essentiellement alcaline en rapport avec les matières premières utilisées (chaux, silice, alumine, oxyde de fer...etc.).

Selon le site d'extraction et le combustible utilisé dans le four, on y trouve aussi divers métaux lourds.

A toutes ces sources de pollution par les poussières, on peut ajouter celles provenant de l'industrie des fertilisants, et surtout celle provenant de la conversion dans l'atmosphère par divers mécanismes, de polluants gazeux en particules; c'est le cas des sulfates issues du SO₂ et nitrates issues des NO_x.

Globalement le taux d'émission des particules d'origine anthropique est évalué à 269.10⁹ Kg/an soit environ 12% du taux des particules d'origine naturelles [5].

Comme le montre le tableau N° 2, l'émission directe des particules anthropiques s'élève seulement au 1/3 du taux global ; les 2/3 restant proviennent de la conversion gaz-particules [5].

Sources	Production (Kg/an)
Emissions sous forme de particules	84.10 ⁹
Particules formées des gaz polluants	"
- sulfates de SO ₂	133.10 ⁹
- Nitrates de NO _x	27.10 ⁹
- Particules photochimiques issues des hydrocarbures	25.10 ⁹
TOTAL	269.10⁹

Tableau N° 2 : Taux d'émission des particules d'origine anthropogéniques

En ce qui concerne les métaux lourds nous illustrons en tableau N° 03, l'ampleur des émissions de certains d'entre eux en fonction de la source d'émission [7].

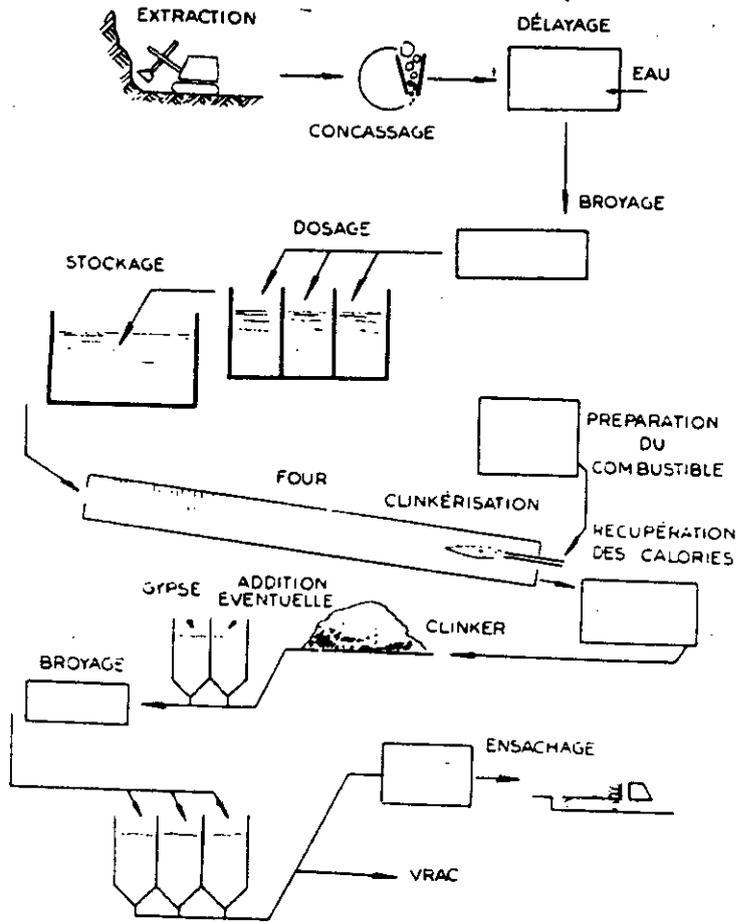


Schéma de fabrication du ciment par voie humide.

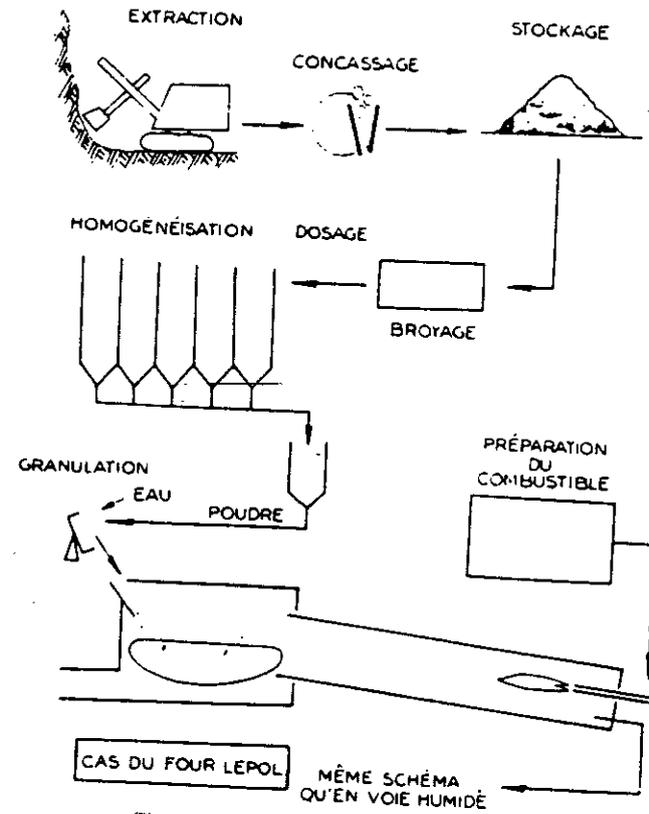


Schéma de fabrication du ciment par voie sèche.

Figure N° 1 : Schéma classique de fabrication du ciment par voie sèche et humide

Valeurs médianes des émissions de métaux de sources naturelles et anthropogéniques					
Nature des sources	Cr	Cu	Ni	pb	Zn
Combustion du charbon	11275	5005	13763	8158	11101
Centrales électriques	4495	2015	5348	2713	4418
Industrie et chauffage domestique	6780	2990	8415	5445	6683
Combustion du fuel	1408	1959	27065	2419	2159
Centrales électriques	334	1334	9170	986	727
Industrie et chauffage domestique	1074	625	17895	1433	1432
Production métaux non ferreux	0	26738	8781	49085	71572
Mines		480	800	2550	465
Production de plomb		273	331	21420	332
Production cuivre et nickel		25525	7065	16575	6375
Production de zinc et cadmium		460		8510	64400
Production secondaire de métaux non ferreux		110		765	855
Sidérurgie fer et acier	15620	1491	3568	7633	19525
Incinération des déchets	1139	1575	364	2370	5900
- municipale	539	1470	259	2100	5600
- boues	600	105	105	270	300
Industrie des fertilisants		411	411	165	4110
Production de ciment	1335		490	7129	9790
Combustion du bois		900	1200	2100	3600
sources mobiles (trafic routier)				248030	
Divers				4000	3254
Total des émissions anthropogènes	30777	38189	55642	331851	131866
Total des émissions naturelles	44000	28000	30000	12000	45000

Tableau N° 03 : Valeur médianes des émissions de métaux de sources naturelle et anthropogéniques (tonnes/an) [7].

D'après ce tableau, on voit que le chrome issu des émissions naturelles dépasse le chrome anthropique. On remarque, par ailleurs l'ampleur du nickel qui avec le vanadium et cobalt sont les traceurs de la combustion du fuel et la quasi totalité du plomb issu du trafic routier.

Sur la figure N° 2, nous représentons les distributions par origine, du Cu, Ni, pb, Zn valable pour la France pour l'année 1989 [7].

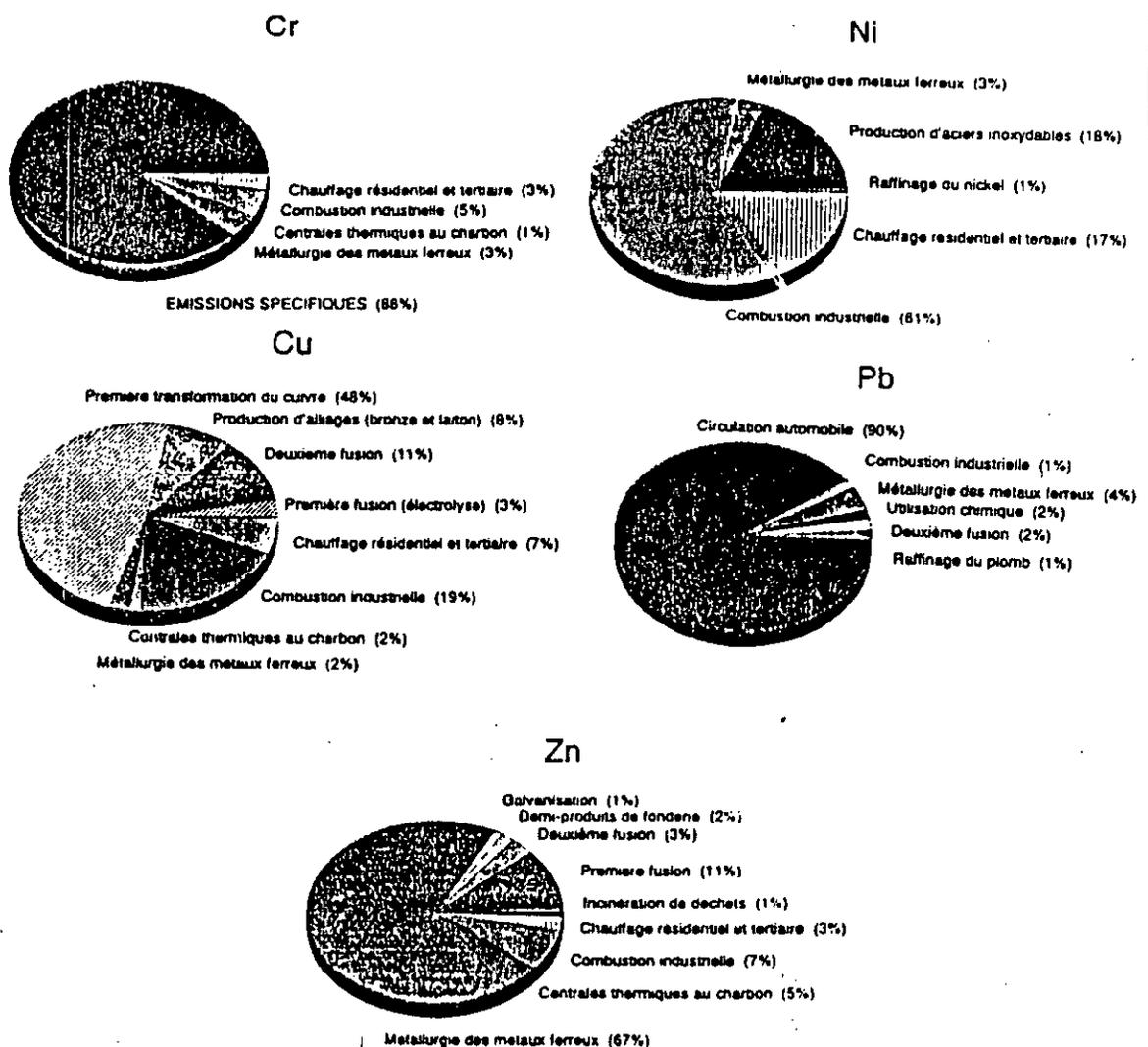


Figure N°2 : Distribution par origine de certains métaux lourds en France (1989) [7] .

Dans le tableau N° 4, nous reportons les émissions des poussières et métaux aux U.S.A en 1970 [5].

Polluant	Combustion fixe	Incineration des déchets	Combustion mobile	Process industriel	Divers	Total
Particules en suspension	$3,4 \cdot 10^9$	$7,0 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^8$	$6,6 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$	$13,1 \cdot 10^9$
cd	-	$4,9 \cdot 10^3$	$0,5 \cdot 10^3$	$1,03 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^3$	$1,082 \cdot 10^6$
pb	$1,11 \cdot 10^6$	$1,36 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^8$	$5,35 \cdot 10^6$	$2,1 \cdot 10^4$	$1,148 \cdot 10^8$
M n	$1,015 \cdot 10^6$	$88 \cdot 10^3$	-	$7,95 \cdot 10^6$	-	$8,95 \cdot 10^6$
Hg	$1,34 \cdot 10^5$	$90 \cdot 10^3$	-	$74 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^5$	$4,28 \cdot 10^5$
Ni	$3,13 \cdot 10^6$	-	-	$5,18 \cdot 10^5$	-	$3,65 \cdot 10^6$
V	$1,005 \cdot 10^7$	-	-	$1,16 \cdot 10^5$	-	$1,017 \cdot 10^7$

Tableau N° 4 : Emissions des polluants particulaires en [Kg/an] au U.S.A en 1970.

Ce tableau montre aussi l'importance de Ni et V issue de la combustion et l'ampleur de pb issue du trafic routier.

Les teneurs habituelles des poussières en suspension que l'on rencontre généralement dans la basse couche de l'atmosphère, varient selon les régions et la nature des industries qui y sont implantées. En milieu urbain, les teneurs varient de dizaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à quelques centaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En milieu industriel, ces teneurs peuvent atteindre des niveaux plus élevés de l'ordre de quelques mg/m^3 d'air.

Nous reproduisons en fig N°3, la concentration des poussières dans les villes en fonction du nombre d'habitants [10].

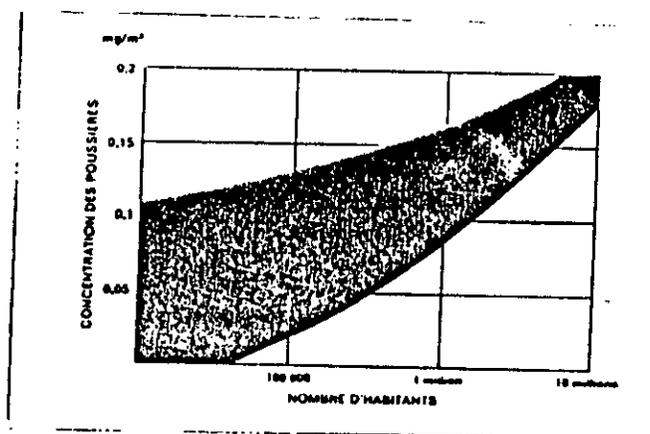


Figure N° 3 : Concentration de TSP_{extérieur} en fonction du nombre d'habitants.

CHAPITRE III

III- PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES PARTICULES :

III-1- Dimension des particules :

Les particules existants dans l'atmosphère sont de formes diverses et présentent des dimensions allant de moins de 0,1 μm à plus de 100 μm .

De nombreuses particules de plus de 10 μm sont visibles à l'oeil nu.

Les particules des fumées présentent de grandes différences de taille. La plupart d'entre elles ont une dimension inférieure au μm et se situent entre 0,1 et 0,3 μm .

Les particules viables tels que les virus ont une taille de 0,005 à 0,1 μm , ils se présentent le plus souvent en colonie ou en compagnie d'autres particules.

La plupart des germes ont une dimension de 0,4 à 0,8 μm et sont généralement portés par des particules de plus grandes dimensions.

Nous présentons en figure N°4 les classes de dimension de différentes sortes de particules inertes (non viables) et particules viables ainsi que leur système de rétention [10].

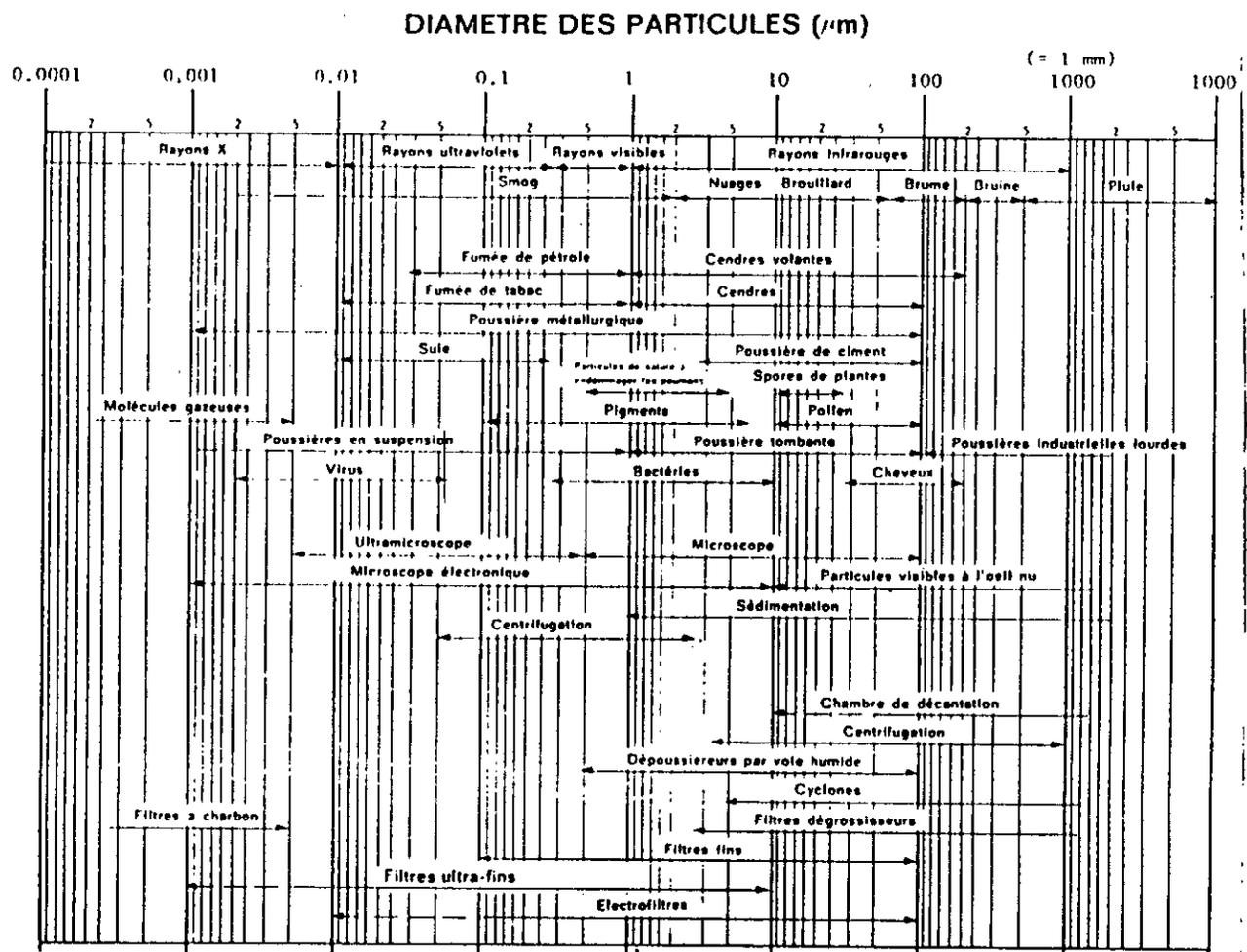


Figure N° 04 : Diamètre des particules

Comme les poussières ont des formes géométriques très irrégulières, on ne peut les caractériser que par une dimension relative, c'est le diamètre aérodynamique moyen ou "masse médian équivalent diamètre" (M.M.E.D).

Ce diamètre équivalent serait le diamètre d'une particule sphérique lisse qui se comporterait comme la poussière étudiée vis-à-vis d'un phénomène ou d'une propriété choisi à priori, par exemple un diamètre équivalent relié à la vitesse de sédimentation.

On dira ainsi d'une particule de forme et de densité quelconque qu'elle a même diamètre aérodynamique équivalent $DAE = d\mu m$, si elle sédimente à la même vitesse qu'une particule sphérique et lisse de densité unitaire ($f = 1g/cm^3$) qui présente, précisément, un diamètre égal à $d\mu m$.

Nous présentons à titre d'illustration dans le tableau N° 5 les vitesses de sédimentation de quelques sphères lisses [11].

$d(\mu m)$	$V(cm/s)$
200	130
100	32
50	8
10	0,32
50	0,08
1	0,032

Tableau N° 5 : Vitesse de sédimentation dans l'air de sphères lisses de densité $f = 1g/cm^3$ et $T = 0^\circ C$

III- 2- : Répartition granulométrique : [10, 11, 12]

Les diverses particules présentes dans l'air peuvent se classer par ordre de tailles décroissantes en catégories distinctes :

- Les poussières de grand diamètre sédimentables.
- Les poussières semi-fines peu ou pas sédimentables.
- Les poussières infra microscopiques non sédimentables.

a) Les grosse particules sédimentables :

Elles mesurent en moyenne 20 μm , se localisent dans les basses couches de la troposphère (au-dessous de 300 m) et retombent rapidement dans les environs de leur source d'émission, leur mouvement est peu dépendant du vent.

Elles prédominent dans l'atmosphère des agglomérations fortement industrialisées. C'est ainsi qu'en Algérie, on estime à 60 à 200 $g/m^2/mois$ la quantité de particules sédimentables qui retombent sur les régions où sont implantées des cimenteries [13].

b) Les particules semi-fines :

Elles ont une taille comprise entre 2,5 et 0,1 μm , cette dimension représente la limite inférieure au-delà de laquelle la sédimentation n'est plus possible à cause du mouvement Brownien dont l'accélération devient supérieure à celle de la gravitation.

Elles sont malgré tout ramenées tôt ou tard au sol même si leur taille est plus faible que 1000 Å , par les précipitations et des phénomènes électrostatiques qui conduisent à leur agglomération en certaines circonstances.

c) Les particules infra-microscopiques :

On les dénomme souvent particules ou noyaux d'Aitken. Leur diamètre moyen est à peine de 300 Å . Leur taille peut descendre au dessous de 10 Å . Elles se rencontrent dans toute l'atmosphère mais leur concentration décroît très vite au-delà de la tropopause.

Cette catégorie de particule n'est en général pas incluse dans l'étude de la pollution particulaire.

Quantitativement, la répartition granulométrique des particules peut être mise en évidence par le diagramme de WHITBY que nous présentons en figure N°5 [10].

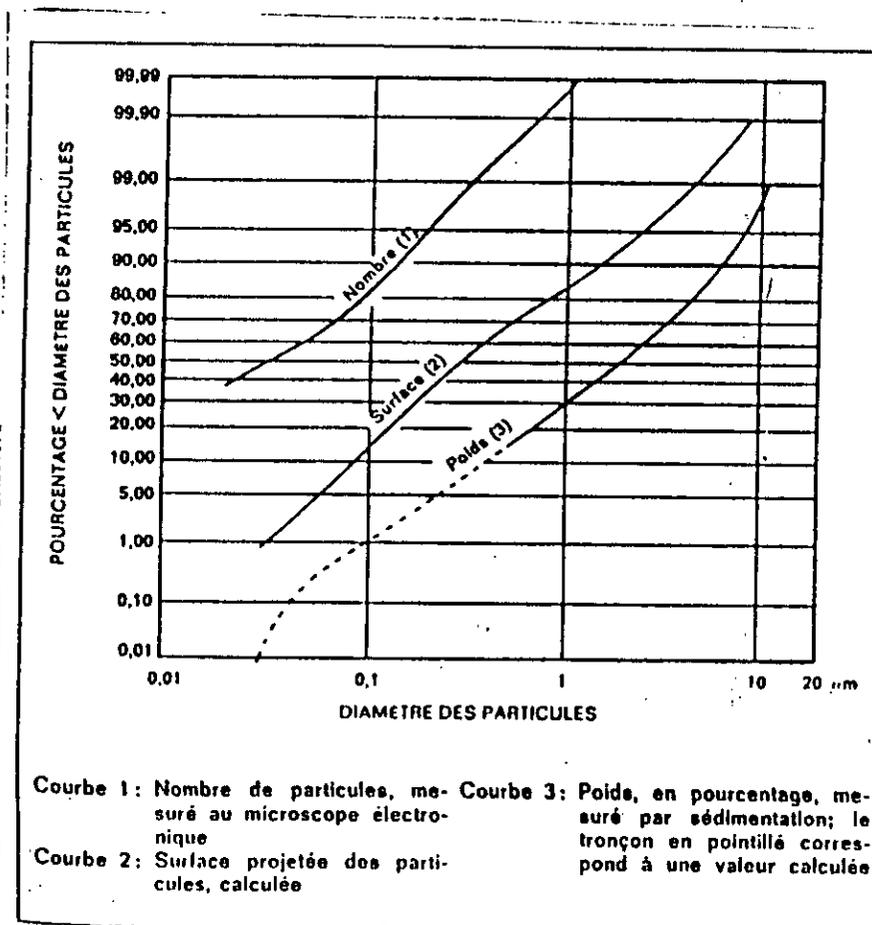


Figure N° 5 : Répartition des particules dans l'atmosphère (diagramme de WITHBY)

Ce diagramme présente 3 courbes qui montrent comment les particules sont réparties quant à leur nombre, à leur poids et à leur surface projetée.

La courbe supérieure indique, en pourcentage du chiffre total, le nombre de particules en suspension dans l'air, d'un diamètre inférieur à un diamètre de référence donné. Ainsi 99,9% ont moins de 1 μm de diamètre.

La courbe du milieu montre la répartition de la surface projetée des particules; par exemple, la surface projetée des particules d'une taille inférieure à 1 μm représente 80% environ de la surface projetée de l'ensemble des particules.

La courbe inférieure donne la répartition en poids de la poussière atmosphérique; par exemple, les particules d'une grosseur inférieure à 1 μm représente 30% du poids total des particules.

Il faut tenir compte de la grande différence existant entre ces valeurs : 0,1 % du nombre des particules présentes dans l'air ont une taille supérieure à 1 μm , mais leur poids représente 70% du total.

Certains chercheurs pensent que partout dans le monde, les particules en suspension dans l'atmosphère se répartissent statistiquement sur une courbe à deux maxima. (figure N°6)

Les particules de petite taille (inférieure à 1 μm) sont surtout des sous-produits de combustion au caractère acide et se forment par un mécanisme de coagulation. Les grosses particules n'ont par contre aucun caractère acide et sont formées mécaniquement par effritement et dispersion de substances naturelles ou industrielles [14].

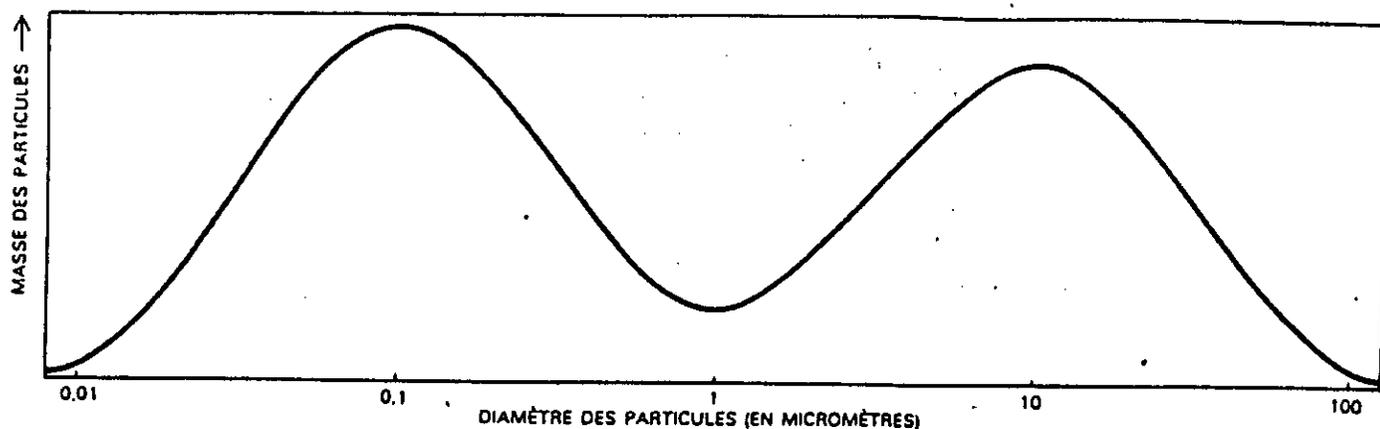


Figure 6 : Répartition des particules selon le diamètre.

En fait, il est difficile de prétendre assigner à l'aérosol atmosphérique une répartition granulométrique bien définie, car dès sa formation, l'aérosol atmosphérique est instable; il voit comme nous le verrons dans le point suivant sa répartition granulométrique évoluer en raison des phénomènes de sédimentation, d'agglomération, d'attractions électrostatiques et de condensation.

Toutefois, si l'on tient compte de l'ensemble de ces phénomènes, on trouvera dans un air au repos une répartition granulométrique voisine de celle définie par la fig N°7 [15].

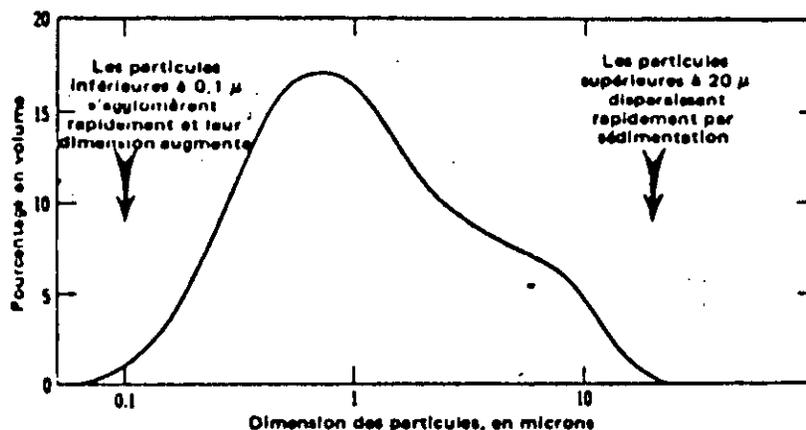


Figure N°7 : Répartition granulométrique des poussières. - effets de la sédimentation et de l'agglomération...

Signalons enfin que la taille des particules jouera un rôle primordial en ce qui concerne leur effet biologique, selon qu'elles soient inspirables ou non précipitables ou non dans le système pulmonaire.

Cet aspect des nuisances dues aux particules sera discuté dans un autre chapitre.

III-3- Dynamique des particules :

Selon leur taille, les particules en suspension peuvent avoir une tendance plus ou moins prononcée vers la sédimentation.

Les particules d'une grosseur inférieure à 0,1 µm se comportent comme des molécules gazeuses et migrent selon la loi de BROWN (mouvement Brownien), sans qu'il soit possible de déterminer ou de mesurer leur vitesse de chute.

Les particules d'une grosseur de 0,1 µm ont une vitesse de chute calculable. Mais cette vitesse est si faible qu'elle est sans importance pratique, étant donné que les flux d'air ascendants empêchent la tendance à la sédimentation.

Les particules d'une grosseur de 1 à 10 µm tombent à une vitesse constante et calculable mais les flux d'air normaux les maintiennent généralement en suspension.

Les particules d'une taille supérieure à 10 μm tombent assez rapidement et ne peuvent être maintenues en suspension qu'au voisinage de la source ou dans certaines conditions de ventilation (tempête).

Pour les particules comprises entre 1 et 5 μm , la sédimentation a lieu grâce aux processus d'interception et d'impaction, tandis que les particules de diamètres supérieurs à 5 μm se déposent grâce à la sédimentation gravitaire [10].

III- 3-1-Cas des grosses particules (diamètre > 0,5 μm) :

En régime de sédimentation une particule atteint une vitesse limite de chute donnée par l'égalité des forces qu'elle subit :

Force de gravité - poussée d'Archimède = Force de viscosité

$$\text{soit : } \frac{4}{3} \pi \frac{d^3}{8} (f_{\text{particule}} - f_{\text{fluide}}) \cdot g = 3 \pi \mu v d \quad (1)$$

comme f_{fluide} est négligeable d'ans l'air devant $f_{\text{particule}}$, on obtient la vitesse de sédimentation V_s connue sous la loi de STOKES [11].

$$V_s = \frac{d^2}{18\mu} f_p \cdot g \quad (2)$$

f_p = densité des particules
 μ = viscosité de l'air
 d = diamètre des particules

Cette vitesse n'est toutefois valable que pour les particules ayant un diamètre compris entre 30 et 2 μm .

Pour les particules ayant un diamètre compris entre 2 et 0,5 μm , on introduit le facteur de correction de Cunningham qui tient compte de l'influence grandissante de la viscosité, du nombre de Reynolds et de la valeur du libre parcours moyen des molécules. L'expression de la vitesse de chute devient [10] :

$$V = V_s \left(1 + A \frac{\lambda}{2} \right) \quad (3)$$

avec A = facteur correctif de l'ordre de 0,8 à 0,9
 λ = espace libre moyen intermoléculaire

En général, les vitesses de sédimentation des particules inférieures à 10 μm sont si faibles que la moindre correction les maintient en suspension.

Vers 0,5 μm l'amplitude du mouvement brownien devient supérieure à la vitesse de sédimentation, assurant le maintien des particules en suspension permanente.

III- 3- 2- Cas des particules fines (diamètres compris entre 0,1 et 1 μm) :

Si les dimensions des particules tombent en-dessous d'une fraction de micromètre, l'air recommence à se comporter comme un milieu discontinu (le libre parcours moyen des molécules d'air est de 0,065 μm) et les particules subissent des collisions qui provoquent des déplacements aléatoires (mouvement brownien) : il en résulte une diffusion. Par contre, les collisions des molécules d'air avec les grosses particules se compensent statiquement et n'affectent pas le mouvement de la particule.

Cette diffusion est caractérisée par le coefficient de diffusion D qui peut être calculé à partir de la théorie cinétique des gaz.

$$D = \frac{k \cdot T}{3 \pi \mu \cdot d} \quad (4)$$

k = constante de Boltzmann

($1,38 \cdot 10^{-16} \text{erg}/^\circ\text{C}$)

μ = viscosité de l'air (18 μP à 27°C)

d = diamètre des particules (cm)

T = température

$$\text{à } 27^\circ\text{C} \quad D = 2,6 \frac{1}{d(\mu \text{ m})} \cdot 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s} \quad (5) \quad [11]$$

Le déplacement moyen X que subit la particule sur un temps t est alors donné par l'équation d'Einstein [11] :

$$\bar{X} = \sqrt{2Dt} \quad (6)$$

ou

$$\bar{X} = \sqrt{\frac{2kT \cdot t}{3\pi\mu \cdot d}} \quad (7)$$

Nous représentons au tableau N° 6 les vitesses des sédimentations et les déplacements moyens en fonction du diamètre des particules [10].

ϕ particules	vitesse de chute (sédimentation)		Déplacement moyen \bar{X} dans une direction en $\mu\text{m}/\text{s}$
	Cm/h	$\mu\text{m}/\text{s}$	
10 μm	1080	$3 \cdot 10^3$	1,8
1 μm	13	35	6
0,4 μm	2 à 3	7	10
0,1 μm	0,15 à 0,30	1	30

Tableau N° 6 Vitesse de chute et déplacement moyen des particules

En figure N°8 nous illustrons graphiquement les propriétés de migration des particules dans l'air en fonction de leur diamètre équivalent [11].

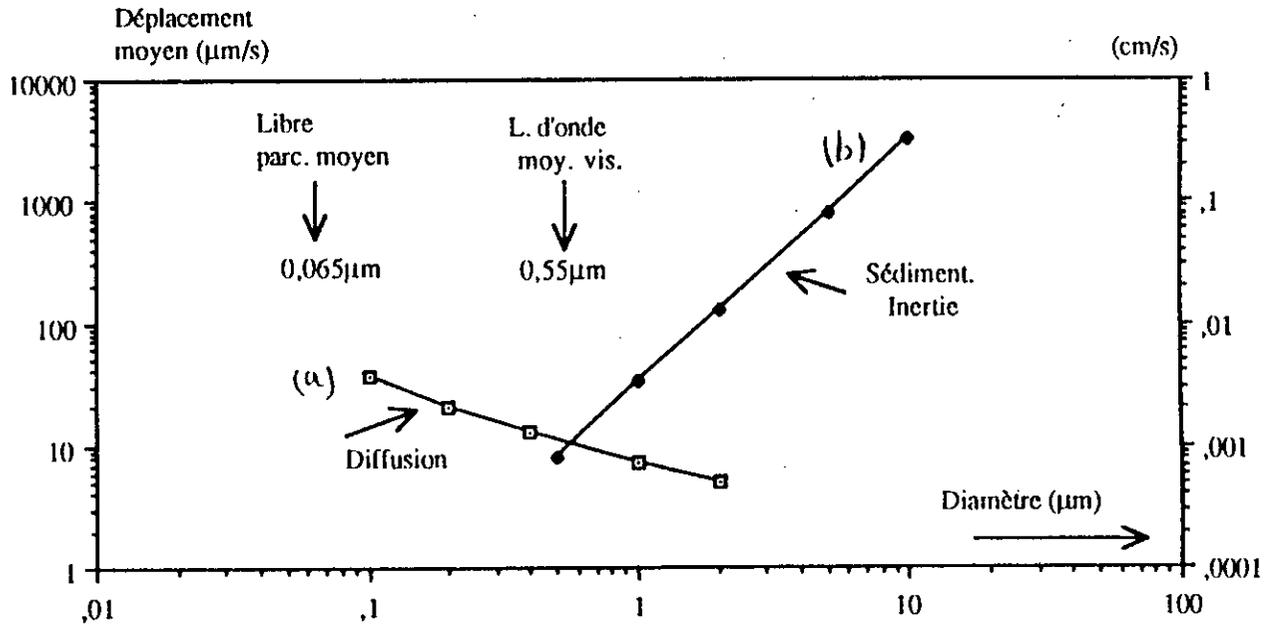


Fig N°8 : déplacement moyen par seconde, de particules de différents diamètres

(a) diffusion pour les plus fines ($d < 0,5 \mu\text{m}$).

(b) sédimentation pour les plus grosses ($d > 0,5 \mu\text{m}$).

III-3-3- Cas des particules très fines :

(diamètre inférieur à $0,1 \mu\text{m}$)

En raison du mouvement de diffusion, ces particules subissent de nombreuses collisions entre elles; il en résulte une coagulation ou agglomération qui en réduit progressivement le nombre.

Le taux de diminution du nombre de particules par coagulation s'exprime par :

$$\frac{-dn}{dt} = K \cdot n^2 \quad (8)$$

$$\text{soit} \quad \frac{1}{nt} - \frac{1}{n_0} = Kt \quad (9)$$

Avec n_0 = nombre de particules au temps $t = 0$

La valeur du coefficient K dépend de plusieurs paramètres tels que la température de l'air, la pression, la viscosité etc.

On a estimé pour ce facteur les valeurs suivantes :

aérosol avec $d = 1,0$ à $1,2 \mu\text{m}$ $K = 3,3$ à $10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$

aérosol avec $d = 6 \cdot 10^{-3}$ à $3 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$ $K = 1,93$ à $22,6 \cdot 10^{-9} \text{cm}^3/\text{s}$

Ce phénomène de coagulation s'observe surtout pour les particules de diamètre inférieur à $0,05 \mu\text{m}$ pour lesquelles le mouvement brownien est significatif.

Les particules de diamètre supérieur à $0,5 \mu\text{m}$ ont une diffusion négligeable et se comportent surtout comme noyaux de condensation des particules plus petites.

Pour les particules d'un diamètre de l'ordre de $2 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$, on estime que le taux de perte des aérosols pour coagulation à 50% par heure, il n'est plus que de 50 % par jour pour les particules de diamètre égal à $0,1 \mu\text{m}$ [11].

En conclusion de cette étude sur la dynamique des particules nous retiendrons que les particules les plus fines se condensent pour enrichir les fractions de diamètre supérieur, tandis que les particules les plus grosses disparaissent de l'atmosphère pour sédimentation ou impaction sur différentes surfaces.

Le résultat final est que ne devrait subsister en suspension dans l'air que des particules d'un diamètre équivalent compris entre $0,1$ et 10 à $15 \mu\text{m}$ (voir aussi fig. N°7).

Encore faut-il signaler que le processus de croissance d'une particule dans l'atmosphère est un phénomène qui reste encore mal compris : le diamètre d'une particule cesse de croître quand il atteint environ $1 \mu\text{m}$. D'autre part, la nature et les processus mécaniques ne semblent pas capables de diviser une substance en particule de diamètre inférieur à $1 \mu\text{m}$.

A ces phénomènes, viennent s'ajouter les diverses transformations que peuvent subir les particules dans l'atmosphère ; certaines servent de noyaux de condensation des gaz, d'autres réagissent chimiquement avec les gaz et les vapeurs pour former d'autres composés (formation par exemple de particules de $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$ à partir du SO_2 et NH_3).

On a très tôt reconnu que les particules fines proviennent surtout des réactions de combustion, elles sont essentiellement acides et nécessitent une attention particulière. De même, les particules les plus fines contiennent la majorité des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) avec un diamètre aérodynamique médian de moins de $1 \mu\text{m}$ [16].

III- 4- Processus naturel d'élimination des poussières de l'atmosphère :

Après un séjour plus ou moins prolongé dans l'atmosphère, les particules en suspension retournent vers le sol. Ce rabattement peut se faire par voie sèche, c'est le dépôt sec ou par voie humide, c'est le dépôt humide.

Dans le dépôt sec, le flux descendant ou retombée atmosphérique est exprimé en termes de $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$.

Si on connaît ce flux de dépôt ϕ qui peut être mesuré expérimentalement par les jauges de dépôt et la concentration dans l'air d'un contaminant donné c , on peut alors définir une vitesse de dépôt V_d suivant [5] :

$$V_d \text{ (m / s)} = \frac{\Phi \text{ (g / m }^2\text{ s)}}{c \text{ (g / m }^3\text{)}} \quad (10)$$

La vitesse de dépôt globale va dépendre naturellement de :

- La turbulence de l'air qui conditionne le transfert à proximité des surfaces réceptrices.
- La réactivité et propriétés des particules et gaz
- La nature des surfaces piégeantes (humidification, rugosité des surfaces végétales, du sol... etc.)

Généralement, les vitesses de dépôt sec des divers éléments varient entre 0,1 et 0,2 cm/s et ce, en fonction de la granulométrie des particules qui les véhiculent [5, 11].

Dans les pays à pluviosité importante, le dépôt humide représente la principale voie d'élimination des particules de l'air.

Deux mécanismes sont ici responsables du rabattement par les pluies :

- Le contact entre particules et gouttes d'eau a lieu lors de condensation de la vapeur d'eau dans les nuages. Ce phénomène est appelé "rain out" ou "in cloud scavenging".
- Le lessivage des masses d'air contenant les particules par les gouttes de pluie. Ce rabattement qui se fait en dessous des nuages est appelé "wash out" ou "below-cloud-scavenging".

Le dépôt humide d'un polluant est caractérisé par un facteur de lavage W défini par :

$$W = \frac{\text{teneur du polluant dans les pluies } [\mu\text{g} / \text{Kg}]}{\text{teneur du polluant dans l'air } [\mu\text{g} / \text{Kg}]} \quad (11)$$

Le facteur de lavage w qui est donné sans unité varie entre 500 et 2000. Des valeurs élevées de w signifient la présence de fortes teneurs de polluant à des altitudes élevées (vers 3 Km d'altitude où la pluie se forme).

De faibles valeurs de w montrent qu'il s'agit probablement d'un polluant d'origine locale et faiblement dispersé [5].

CHAPITRE IV

IV - NUISANCES ENGENDREES PAR LES POUSSIERES EN SUSPENSION :

IV- 1- Effets nuisibles sur l'homme :

Tous les polluants, qu'ils soient particulaires ou gazeux, pénètrent profondément dans les voies respiratoires et peuvent atteindre et se déposer dans les alvéoles pulmonaires.

Les polluants particulaires sont retenus suivant différents effets dans les différentes parties du système respiratoire. Les polluants gazeux agissent surtout par absorption physico-chimique (échange diphasique : gaz-vapeur et solide-liquide).

Nous illustrons, en fig N° 9, le devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en fonction de la granulométrie [16].

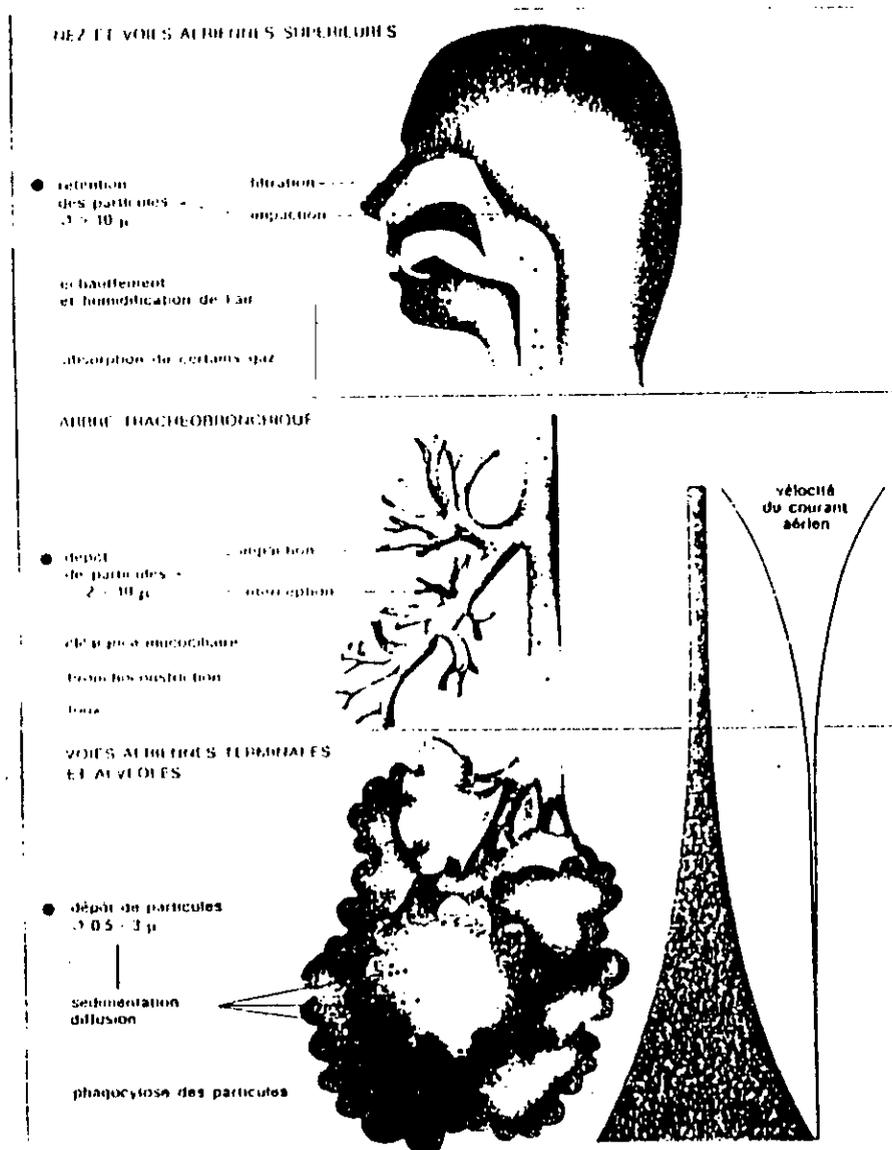


Figure N° 9 : Devenir des particules atmosphériques dans l'appareil respiratoire en fonction de leur granulométrie moyenne

La figure N°10 illustre d'une manière analogue la pénétration des particules dans les trois principaux segments de l'appareil respiratoire [17].

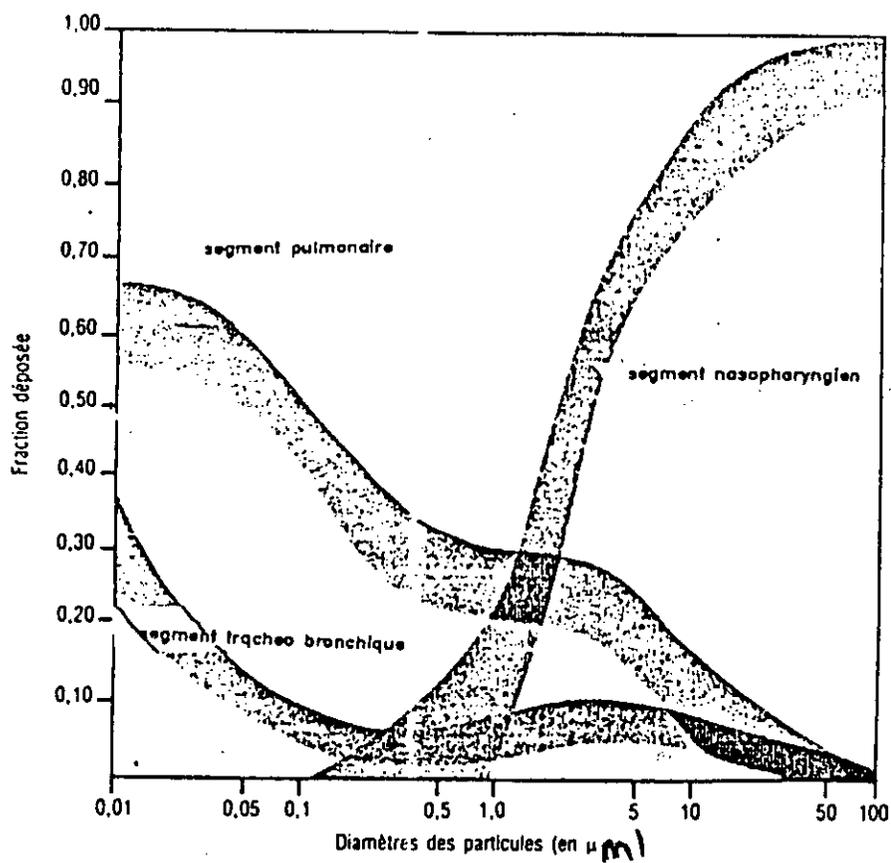


Fig N°10 : Dépôt des particules dans le système respiratoire selon leur diamètre

Enfin, nous présentons en fig N°11 la fraction de dépôt des particules dans le système respiratoire en fonction de la granulométrie [17].

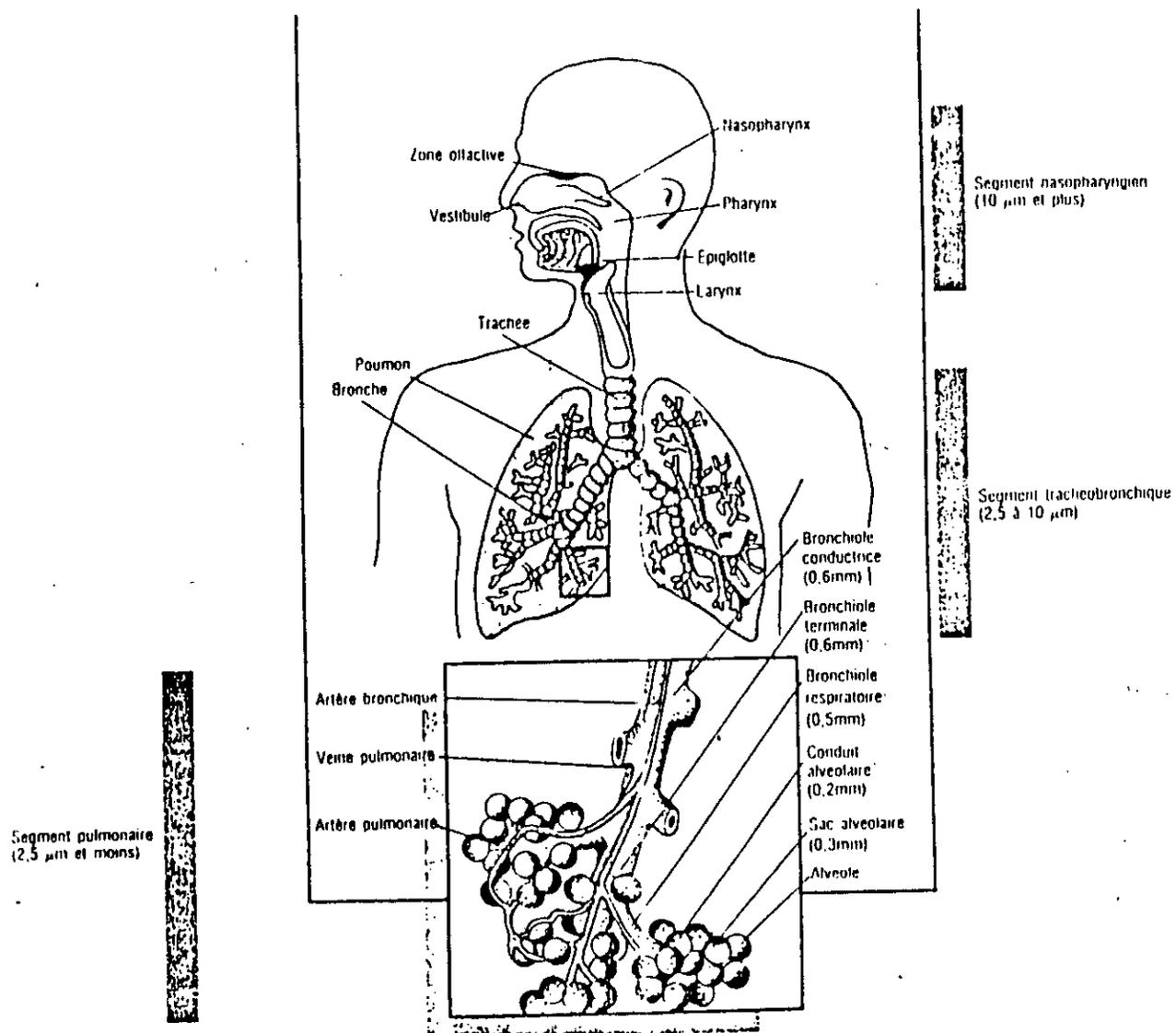


Fig N°11 : Système respiratoire et pénétration des particules selon leur diamètre.

Ces données montrent que sur le plan biologique, l'accessibilité des particules aux différents niveaux de l'appareil respiratoire dépend largement de leur granulométrie.

Selon leur taille moyenne, elles y pénètrent plus moins profondément et avec des rendements de déposition variés.

Les particules les plus grosses de diamètre aérodynamique moyen supérieur à 10 μm sont retenues par filtration et impaction au niveau du nez et des voies respiratoires supérieures. C'est la fraction extra-thoracique correspondant au segment naso-pharyngien.

Les particules de diamètre compris entre 2 et 10 μm se déposent selon des mécanismes d'impaction et d'interception au niveau de l'arbre trachéobronchique, d'où elles pourront, en général, être éliminées par clearance mucociliaire et la toux.

Enfin les particules les plus fines ($d < 2 - 3 \mu\text{m}$) se déposent au niveau des voies aériennes terminales et des alvéoles dans les poumons. Le dépôt se fait par sédimentation et diffusion, car la vitesse du courant aérien est très faible. A ce niveau, les particules peuvent être phagocytés par les macrophages pulmonaires [16].

Ceci explique pourquoi sur le plan sanitaire, la communauté internationale focalise son attention sur les particules qui ont la propriété de se déposer dans l'arbre trachéobronchique et surtout dans les alvéoles pulmonaires.

L'impact biologique des particules sur l'homme est dû non seulement à la présence de certaines particules inorganiques qui possèdent une cytotoxicité propre (silice, silicates, métaux etc.) mais aussi à la présence des poussières fines du segment pulmonaire qui, par la lenteur des processus d'épuration alvéolaire, sont retenues très longtemps, voire indéfiniment dans les poumons occasionnant par effets mécaniques ou cytotoxiques des processus lésionnels lentement évolutifs [18].

Cette nocivité est en général accrue par les propriétés absorbantes des poussières. En effet, certaines particules ont une grande surface spécifique capable d'absorber des gaz et des liquides qui resteront longtemps au contact des tissus et des cellules pulmonaires, augmentant par là leur pouvoir toxique (cas par exemple de l'absorption du SO_2 sur les particules métalliques).

Généralement, les nuisances engendrées par les poussières varient des simples irritations jusqu'à divers stades de pneumoconiose et de cancer. Il est probable que même les poussières inertes exercent un risque potentiel dans le cancer du poumon.

Nous présentons en fig N°12 les organes et parties de l'organisme humain qui peuvent être touchés par les aérocontaminants [5].

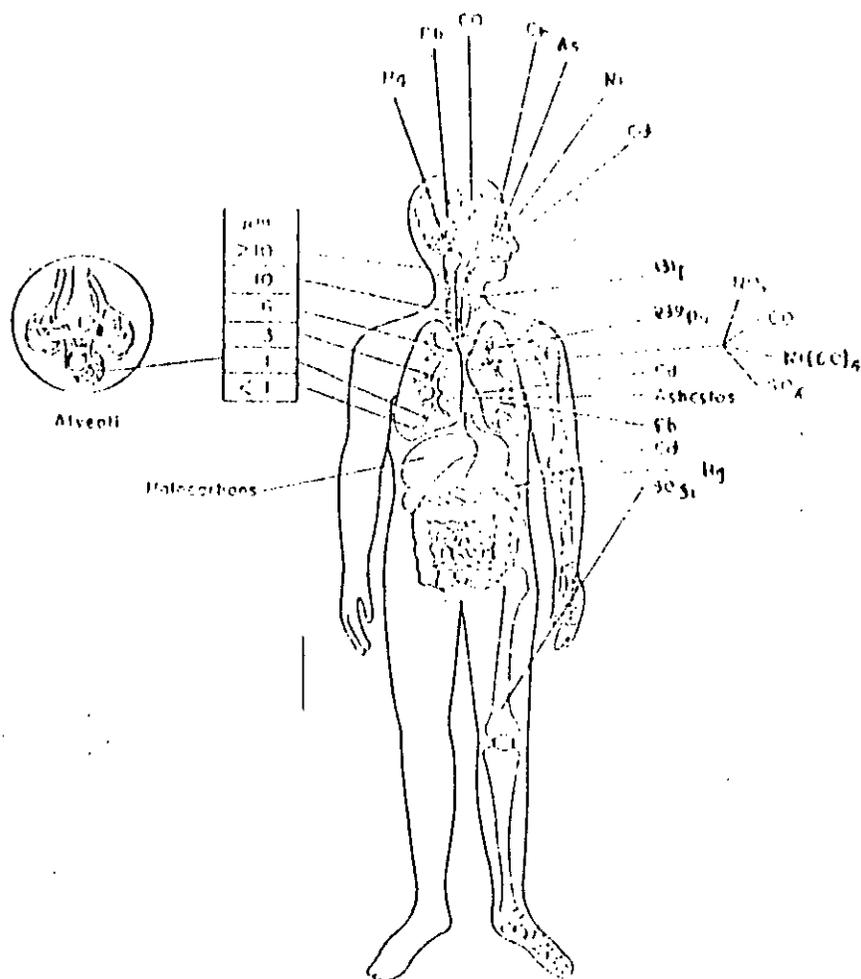


Figure N° 12 : Target areas and organs of the human body for some chemical elements and compounds commonly present in polluted air.

Nous résumons dans le Tableau N°7, l'action locale des particules atmosphériques sur les voies respiratoires [19].

Action sur les voies respiratoires	Types de polluants
1. pneumoconiose - Sidérose - Silicose - Abestose	Fer Silice Amiante
2. Irritations - Trachée - Bronches - Poumons	Poussières irritantes (éventuellement associées aux polluants gazeux).
3. Allergie respiratoire - Asthme	Aeroallergènes (particules hygrosopique atteignant l'épithélium).
4. Les cancers pulmonaires	Poussières cancérogènes (Hydrocarbures aromatiques polynucléaire)

Tableau N° 7 : Actions locales des particules atmosphériques sur les voies respiratoires

Dans l'évaluation des nuisances par l'étude de la citotoxicité (survie cellulaire et inhibition de croissance), et l'altération de certaines fonctions telles que les macrophages et la phagocytose, c'est surtout l'impact de la fraction alvéolaire qui est le plus déterminant. Dans cette fraction on y retrouve entre autres le plomb, le cadmium et les hydrocarbures aromatiques polynucléaires (HAP)

En effet, plus de 90 % des HAP particulaires présents dans l'air ambiant sont supportées par la fraction alvéolaire des particules inspirables [16].

On voit ainsi l'importance d'un prélèvement par classe granulométrique ou une collecte séparée des fractions alvéolaires et trachéobronchiques.

Du point de vue sanitaire, il est par ailleurs important de déterminer les éléments métalliques qui sont supportés par les particules en suspension.

Certains métaux lourds comme le plomb et le cadmium présentent de part leur pouvoir accumulatif, un risque d'impact à long terme.

Les métaux lourds qui doivent être les plus surveillés en pollution atmosphérique sont , Hg, Cd, Cu, pb, Cr, As et Ni.

Le tableau N° 8 résume les principaux effets du Hg, cd et pb [19].

MERCURE	
- Mercure minéral :	
. Néphrotoxicité (glomérulaire pour la vapeur de mercure)	
. Neurotoxicité	
. Dermatoxicité	
. Génotoxicité	
- Mercure organique :	
Dérivés alkylés	. Neurotoxicité dominante. . Néphrotoxicité faible . Perméabilité placentaire : génotoxicité et tératoxicité
Dérivés alkoxylés	. Neurotoxicité plus faible . Néphrotoxicité tubulaire
CADMIUM	
. Rôle de la métallothionéine	
. Pouvoir cumulatif exceptionnel	
. Néphrotoxicité	
. Ostéotoxicité	
. Génotoxicité - cancerogénicité	
PLOMB	
- Plomb ionisé :	
. Hématotoxicité	
. Neurotoxicité centrale et périphérique	
. Néphrotoxicité	
. Génotoxicité	
. Formation de chélates	
- Plomb	
. Neurotoxicité dominante	
. Hématotoxicité	

Tableau N° 8 : Effets toxiques sur l'être humain du Hg, cd et pb

Avant l'introduction de l'essence sans plomb, le plomb qui est très répandu en milieu urbain a failli constituer un fléau civilisationnel et ce, en vertu de son pouvoir neurotoxique qui se manifeste le plus chez les enfants avec réduction ou perte de l'intelligence.

IV-2- Effets sur les animaux :

Le zinc, le sélénium, les poussières, les suies, le benzopyrène et le plomb pourraient avoir des effets nocifs sur les animaux d'après les expériences effectuées en laboratoire. Toutefois, les cas de maladies dues à ces substances et constatées réellement sont pour l'instant extrêmement rares.

Ces polluants sont fixés par l'organisme animal par l'intermédiaire des voies respiratoires et par la voie digestive. En effet, les animaux herbivores, en consommant de l'herbe ayant déjà concentré une dose importante de polluant en particulier les métaux lourds pourraient présenter avec les années des symptômes d'atteinte à leur santé dues à l'accumulation des polluants.

IV-3- Effets sur les végétaux :

Certains métaux, oxydes métalliques ou anhydrides métalloïdiques se déposent parfois sur les plantes ou sur les sols de cultures. L'oxyde de zinc, ainsi observé aux alentours d'usines électrochimiques, peut déterminer le dépérissement de vergers entiers, probablement par suite de l'obturation des stomates assimilateurs par les très fines particules en suspension dans l'atmosphère.

Les poussières de cimenterie forment des croûtes grisâtres sur les plantes d'épaisseur variable.

Ces croûtes de ciment adhérentes ne sont que difficilement lavables par les pluies.

Les croûtes adhèrent aux feuilles, bouchent les stomates et brûlent la matière végétale.

En s'hydratant, les poussières alcalines des cimenteries libèrent les hydroxydes de calcium et de sodium, qui pénètrent à l'intérieur des feuilles, dénaturent le cytoplasme, le noyau cellulaire et les chloroplastes et détruisent la chlorophylle. Les poussières attaquent également la cuticule en ôtant toute résistance aux plantes [11].

III-4- Effets divers :

Les poussières portent souvent un préjudice esthétique à toute sortes de constructions et de monuments historiques. Les poussières à caractères acides participent aussi à la corrosion de divers matériaux. Très souvent, il y a aussi infiltration des poussières dans les locaux internes causant de multiples désagréments aux habitants.

Les poussières exercent aussi des changements dans la physique de l'atmosphère. L'augmentation du taux d'aérosols dans l'atmosphère entraîne une plus forte turbidité atmosphérique qui réduit l'intensité du rayonnement solaire arrivant au niveau du soleil, parallèlement on peut assister à une réduction de la visibilité comme c'est le cas en présence de vent de sable.

CHAPITRE V

V- PRELEVEMENT DES PARTICULES EN SUSPENSION

V-1- Echantillonnage :

Le prélèvement des particules en suspension comprend en général deux aspects :

- L'analyse pondérale qui permet d'accéder à la masse des particules par unité de volume d'air.

- L'analyse granulométrique en nombre ou en masse qui donnent des informations quant à l'origine des particules et des informations relatives aux risques d'inhalation par les êtres humains.

Quel que soit, le mode d'échantillonnage utilisé, le rendement granulométrique des particules en suspension n'est égal à 100% que pour les tailles de particules approximativement inférieurs à 3 μm . Au delà de cette dimension, l'efficacité de collecte des divers dispositifs est influencée aussi bien par les conditions météorologiques, en particulier la vitesse du vent, que par les conditions de prélèvements telles que : le débit d'aspiration, la position et les conceptions du dispositif de captage (filtration ou autres) [16].

Il s'ensuit qu'au vu de la diversité des méthodes utilisées, les études de comparaison sont toujours difficiles à réaliser.

Généralement, l'échantillonnage se fait avec ou sans fractionnement granulométrique, ce qui donne lieu à trois catégories de prélèvements [16,20].

- Les prélèvements sans coupure granulométrique spécifiques
- Les prélèvements avec coupure granulométrique
- Les prélèvements avec fractionnement granulométrique.

V-1-1- Les prélèvements sans coupure spécifique :

Il s'agit ici de capter toutes les poussières en suspension allant jusqu'à 30 μm ou plus. Selon le débit d'aspiration choisi, on enrichit ou non le prélèvement avec les particules de diamètre supérieur à 10 μm .

On distingue dans cette catégorie 3 modes de prélèvements [16] :

- Méthode des fumées noires (FN) :

Dans cette méthode normée on utilise une faible vitesse d'aspiration ($\sim 1 \text{ cm/s}$) on privilégie la captation des particules fines inférieures à 5 μm .

- Méthode de prélèvement sur filtre ouvert à débit moyen :

Dans ce cas les prélèvements sont effectués par aspiration de l'air et rétention des particules sur un filtre ouvert de 47 mm de diamètre. Le débit d'aspiration est de l'ordre de 1,5 m^3/h (vitesse $\sim 20 \text{ cm/s}$). La durée d'échantillonnage est de 24 h ou plus. La méthode donne la teneur des particules en suspension totale plus connu sous le terme mesure des "TSP".

- Méthode de prélèvement à très fort débit :

La méthode utilise, comme la précédente, la rétention des particules sur filtre. Toutefois les appareils sont dotés d'une pompe d'aspiration d'un très fort débit de l'ordre de 60 à 100 m³/h. Ces appareils portent le nom de High Volum Sampler, HVS. Comme la méthode précédente, ils donnent les TSP et peuvent avoir une efficacité de collecte des particules de diamètre supérieur à 10 µm qui atteint jusqu'à 25% pour les grosses particules de 30 µm. Le fort débit utilisé permet d'avoir sur une durée de 24 heures de grandes masses de particules recueillies, ce qui facilite toutes sortes d'analyse de l'échantillon.

Les modes de prélèvement à débit moyen et par HVS sont largement utilisés de nos jours.

V-1-2- Prélèvement avec coupure granulométrique :

Il s'agit de matériels équipés d'une "tête" qui, par sa conception ne capte que des particules dont le diamètre est inférieur à une valeur fixe. En pratique, les têtes commercialisées sont conçues pour capter les particules de diamètre inférieur ou égal à 10 µm. Il s'agit ici de collecter uniquement les particules en suspension inspirables c'est à dire la fraction trachéobronchique et alvéolaire.

L'appareil le plus connu de nos jours et accepté comme référence est le HVS - PM 10 de la firme américaine Andersen. C'est un HVS équipé d'une entrée sélective pour la collecte des particules ≤ 10 µm.

La jauge bêta, dont le principe de mesure est basé sur la radiométrie, est un autre appareil qui mesure les particules inspirables. La méthode ne permet pratiquement pas l'étude ultérieure des particules collectées.

V-1-3- Les prélèvements avec fractionnement granulométrique [22] :

Ce sont des méthodes qui permettent une séparation plus fine des particules inspirables. La sélection des particules en classe granulométrique se fait par impaction d'où le nom d'impacteur.

Les impacteurs virtuels ou "dichotomes" travaillent à débit moyen (1,7 m³/h) et permettent d'avoir deux classes granulométriques : la fraction alvéolaire ($d < 2,5 \mu\text{m}$) et la fraction trachéobronchique ($2,5 < d < 10\mu\text{m}$)

Les impacteurs à cascade sont équipés de 5 à 7 niveaux d'impaction et permettent d'avoir 5 à 7 fractions granulométriques (de 0 à 1 µm, de 1 à 2,5 µm etc.) Ces cascadeurs travaillent à débit fort (30 à 60 m³/h).

L'appareil le plus connu est le HVS- PM 10 avec cascadeur d'andersen considéré comme référence par l'agence américaine EPA.

Nous résumons dans le tableau N° 9 les principales méthodologies de mesures utilisées pour l'échantillonnage des particules en suspension [16,20]

Dispositif de prélèvement	sélection granulométrique des particules	Nombre de fractions	diamètre des particules (μm)	débit m^3/h	durée d'échantillonnage (h)	Principe de la mesure	Analyse ultérieures de particules
sans tête (FN)	non	1	0 à 7	0,1 1,5	24 h	Réflectométrie	non
sans tête	non	1	0 à 20	1,5	24 h	Gravimétrie	oui
HVS	non	1	0 à 20-30	66 à 100	24 h	Gravimétrie	oui
HVS-PM10	oui	1	0-10	66 à 100	24 h	"	"
Jauge bêta	oui	1	0-10	1,5	24 h	Radiométrie	difficile
HVS-PM10 impacteur à cascade	oui	2 à 7	0-10	34 à 68	24 h	Gravimétrie	oui
Dichotomes	oui	2	0-10	1,7	24 h	Gravimétrie	oui

Tableau N° 9 : Principales méthodes d'échantillonnage des particules en suspension.

V-2- Mesure de la concentration particulaire :

A partir des particules collectés sur filtres, l'appréciation de la charge globale s'effectue soit par gravimétrie, soit par réflectométrie, soit par radiométrie bêta.

a) Méthode gravimétrique :

La méthode est simple dans son principe. Les filtres doivent être pesés dans les mêmes conditions avant et après prélèvement. La nature du filtre, sa résistance au fort débit, son hygroscopicité, sa porosité doit faire l'objet d'un choix adapté à l'étude envisagée.

b) La réflectométrie : méthode des fumées noires , FN :

L'air échantillonné passe au travers d'un papier filtre sur lequel se déposent les particules. La réflectométrie mesure la réflectance du dépôt par référence à celle du papier vierge, fixée arbitrairement à 100 %. Une courbe de calibration fournit une correspondance entre la noirceur du dépôt ainsi évaluée et la masse des particules recueillies. Cette méthode privilégie les particules fines issues des combustions fixes et mobiles (suies et imbrûlés) et n'est valable que dans les zones strictement urbaines [16].

c) Détecteur du rayonnement bêta :

Le principe de la méthode est la mesure sur le filtre lui-même de la masse particulaire par atténuation d'un rayonnement bêta. La jauge se compose d'un émetteur de rayons bêta de faible énergie et d'un détecteur ou compteur d'électrons.

Le rayonnement bêta est absorbé par la matière et la mesure consiste à calculer la variation d'absorption des rayons bêta entre le filtre chargé et le filtre vierge.

L'absorption du rayonnement bêta est indépendante de la nature des particules [14].

V-3- Les filtres et membranes de rétention [14, 21] :

Les filtres utilisés dans la collection des particules en suspension doivent remplir trois conditions :

- une efficacité de collection égale à au moins 99 % pour les particules de diamètre égal à 0,3 μm et plus.

- une hygroscopicité faible.

- un taux d'impuretés aussi faible que possible pour éviter les interférences dans l'analyse quantitative des composés métalliques que véhiculent les poussières.

Les filtres les plus utilisés sont les filtres en fibre de verre et les filtres membrane à base de dérivées de la cellulose.

a) Les filtres à fibre de verre :

Ils ont une efficacité de collection de 99,9% pour les particules de diamètre 0,3 μm . Cette efficacité est mesurée sur les particules d'aérosol du diactyl-phthalate [21].

L'hygroscopicité des filtres en fibre de verre est faible ; la teneur d'humidité est de 0,1 à 0,5 %. Ils sont adaptés aussi bien pour les prélèvements à fort débit que ceux à faible ou moyen débit.

L'inconvénient majeur de ces filtres provient du fait qu'ils contiennent divers éléments métalliques à des teneurs variables. Dans ce contexte, l'élément le plus gênant est le zinc qu'on retrouve lors de la minéralisation des filtres à des teneurs élevées. La teneur des filtres Gelman type A et whatmas GF- A contiennent plus de 50 $\mu\text{g Zn/cm}^2$ [21].

b) les filtres membranes :

Ce sont des filtres en nitro-cellulose (sartorius et millipore) ou acétate de cellulose (Gelman GA-3) qui sont solubles dans les esters, éthers et alcools. On peut ainsi dissoudre les filtres dans l'acétone et récupérer totalement les particules après évaporation du solvant organique. L'étape de minéralisation est ainsi facilitée.

Les filtres membranes les plus utilisés pour la collecte des particules en suspension ont une porosité 0,8 μm .

Ces fibres sont plus hygroscopiques que les filtres en fibre de verre , mais présentent l'avantage d'avoir des teneurs très faibles en éléments métalliques.

A titre d'exemple, leurs teneurs en zinc varie selon la marque entre 5 et 7 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ [21].

Leur inconvénient est qu'ils présentent une forte résistance à l'écoulement de façon qu'on ne peut les utiliser dans la filtration de l'air à fort débit par HVS.

CHAPITRE VI

VI- METHODOLOGIE

VI-1- Sites de prélèvement :

Pour l'étude des particules en suspension dans la région d'Alger, nous avons sélectionné deux sites qui se différencient par leur environnement global et par la nature de pollution susceptibles d'y être rencontrées.

Le premier site est implanté dans l'école fondamentale de Mohamed El Aïd El Khalifa, dans la ville de Rais Hamidou, à 8 Km à l'ouest d'Alger.

L'école elle-même, qui fait partie du tissu urbain de Rais Hamidou, se trouve à proximité et sur le côté ouest de l'imposante cimenterie de la ville.

Ce site qui est influencé par les rejets de la cimenterie est caractéristique d'un milieu industriel urbain.

En ce milieu, la population résidente a, à maintes fois, signalé les nuisances et dangers auxquels elle est exposée depuis plusieurs années.

Le deuxième site est un site purement urbain. Le poste de mesure est installé à Bachjarah (école de Maâmar Kharour) à 7 km au sud est du centre ville d'Alger. Il n'existe à proximité de ce site aucune importante installation industrielle.

Ce site serait ainsi caractéristique de la pollution urbaine de fond et devrait être représentatif de la plupart des quartiers populaires d'Alger.

Nous représentons en figure N°13,14 , la situation des sites sur la carte d'Alger.

VI-2- Mode de prélèvement :

Selon les moyens disponibles, nous avons opté pour un prélèvement à débit d'air moyen sans tête de coupure granulométrique (voir paragraphe V) . Ce mode d'échantillonnage permet donc la collecte des particules totales en suspension (TSP) avec une granulométrie moyenne allant de 0,1 à 30 μm .

Le dispositif expérimental utilisé, est illustré en figure N°15

Il s'agit d'une ligne d'échantillonnage classique, qui se compose d'un entonnoir dirigé vers le bas, d'un porte-filtre, d'un compteur à gaz sec et d'une pompe à vide.

Les poussières sont ainsi retenues sur un filtre, fixé à une cartouche de filtration en Teflon, de diamètre $\phi = 47$ mm qui est conçue pour de telles opérations.

La pompe à membrane utilisée ne nécessite pas une maintenance spéciale, et peut travailler sans problème pendant plusieurs mois.

Le débit d'air aspiré que nous avons fixé en moyenne à 1,5 m^3/h , est mesuré pour un compteur à gaz de la SONEGAS pour la rétention des particules, nous avons à notre disposition 3 sortes de filtres.

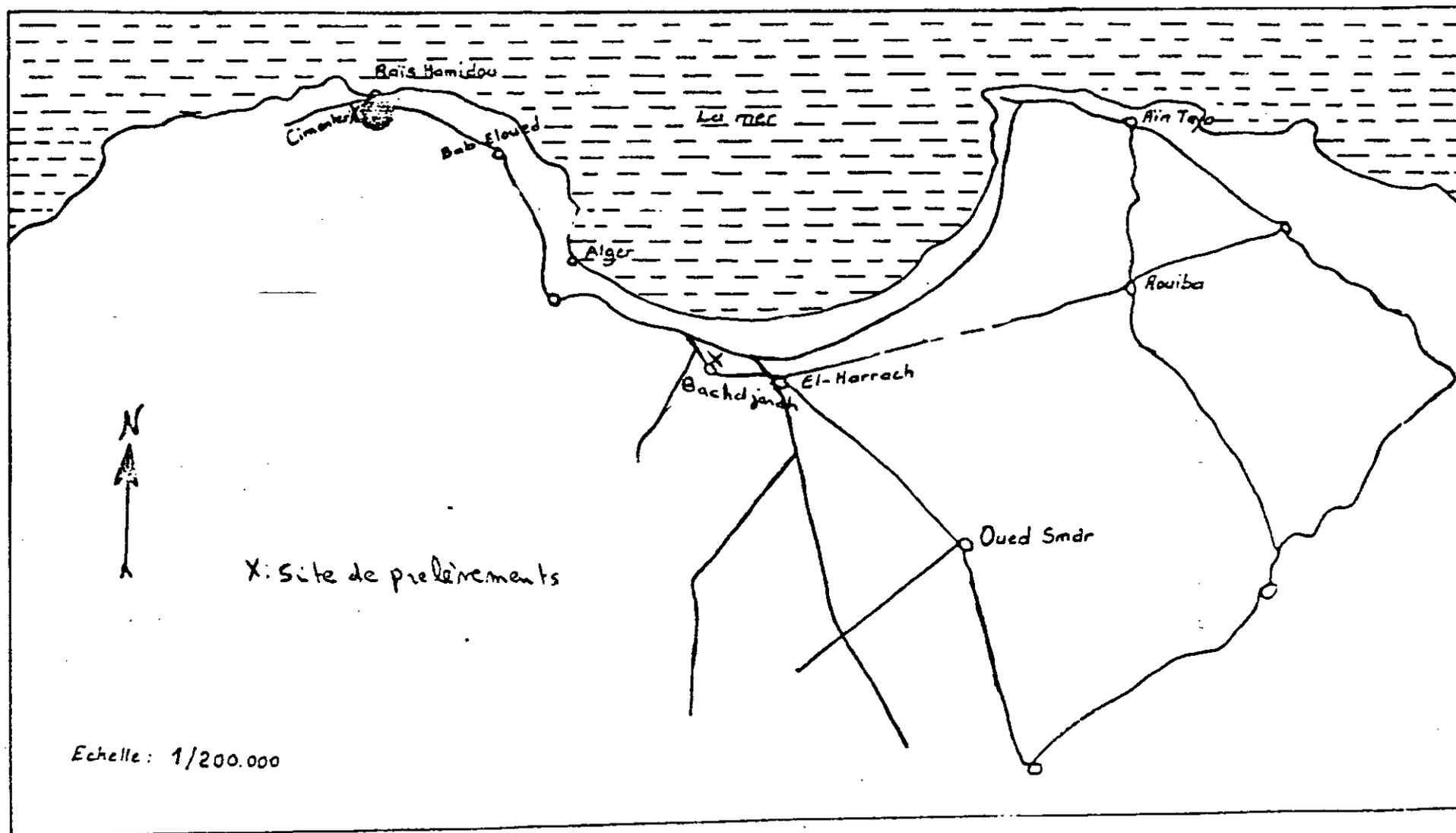
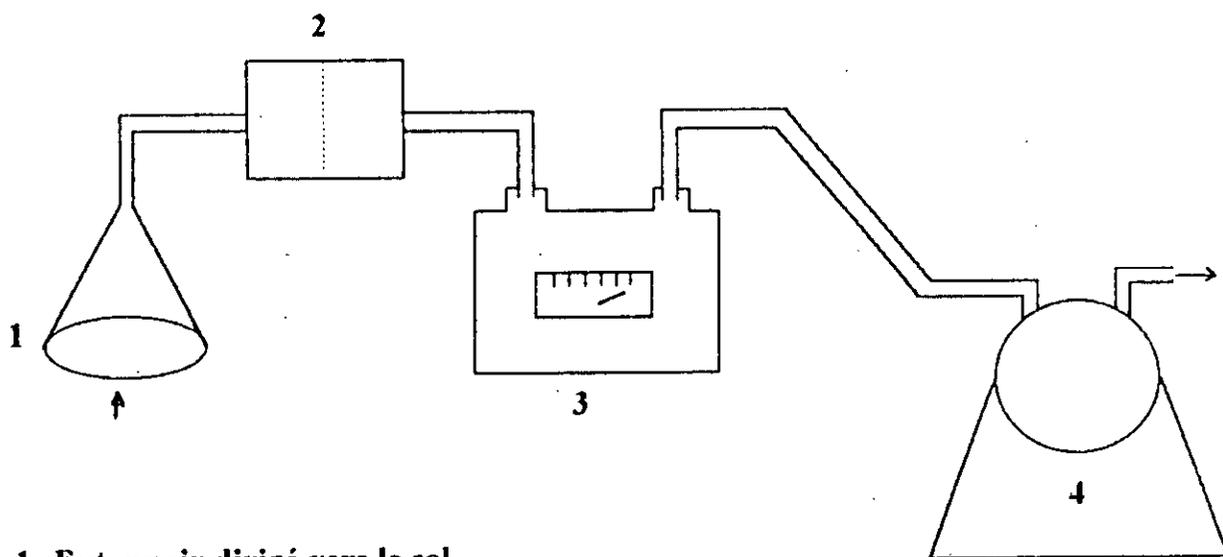


Figure N° 14 : Schéma global des lieux d'implantation des dispositifs de prélèvements des TSP



- 1: Entonnoir dirigé vers le sol**
- 2: Porte-filtre et filtre de rétention**
- 3: Débimètre à air**
- 4: Pompe d'aspiration**

Figure N°15 : Dispositif expérimental pour les prélèvements des TSP

- Filtre membrane en Teflon (cole- PARMER) de $\phi = 47$ mm et de porosité 0,5 μ m.
- Filtre membrane en Nitro-cellulose (mSD) de $\phi = 47$ mm et de porosité 0,45 μ m.
- Filtre en fibre de verre- WHATMAN GF/F, $\phi = 47$ mm

Après quelques essais préliminaires, il s'est avéré que les filtres en fibre de verre étaient suffisamment adaptés à notre étude. Ils sont plus résistants et, par ailleurs, moins chers que les filtres membranes.

La durée de prélèvement a été fixée à 24 heures (chargement manuel des filtres tous les matins). Au site de Bachdjarah, nous avons effectué quelques prélèvements sur une durée de 72 heures.

Tous les prélèvements ont été effectués à une hauteur d'environ 10 m, cette hauteur permet d'éviter les perturbations causées au niveau du sol par des sources locales accidentelles ou par des turbulences diverses (jeux des enfants, balayage des rues...)

VI-3- Traitement et analyse des échantillons :

Le filtre chargé est introduit en entier dans un bécher en verre borosilicaté où les poussières retenues sur filtres subissent une minéralisation.

La minéralisation se fait à environ 80° C en présence de 10 à 15 ml d'acide nitrique de qualité p.a pendant deux heures. Après évaporation partielle, on y ajoute 20 ml d'eau distillée et reprend la minéralisation pendant quelques minutes.

Après refroidissement, le minéralisat est filtré sur filtre WHATMAN où le résidu insoluble des divers alumino-silicates est retenu. Le filtrat est transformé dans une fiole jaugée, puis ajustée avec l'eau distillée à un volume de 100 ml. Un filtre vierge servant de "blanc" subira la même procédure de traitement.

Les chlorures et métaux extraits des poussières sont analysés comme suit :

- Chlorures : méthode volumétrique de MOHR. [22]
- Métaux alcalins et alcalino-terreux : Na, K, Li et Ca par photométrie de flamme.
- Métaux en traces : Fe, Mn, Cu et Pb par spectrométrie d'absorption atomique.

Les courbes d'étalonnage nécessaires aux dosages des métaux ont été effectuées selon les indications données dans Rodier [22]. Les solutions mères de 1g/l sont issues de solutions étalons Titrisolde MERCK.

CHAPITRE VII

VII- RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

Nous avons effectué deux campagnes de mesure; une relative à un suivi journalier des particules totales en suspension (TSP), à Raïs Hamidou, qui s'est étalée du 14/03 au 19/05/95 et qui nous a permis de collecter 62 échantillons journaliers.

La deuxième campagne de mesure a porté sur l'étude des TSP au niveau du site de Bachdjarah, cette campagne qui s'est étalée sur la période allant de 20/05 au 10/06/95 nous a permis d'accéder à la collecte de 14 échantillons.

Pour l'analyse chimique de métaux lourds associés aux poussières prélevées, nous avons étudié 16 échantillons de Raïs Hamidou et 5 échantillons de Bachdjarah.

VII-1- Etude des particules totales en suspension :

VII-1-1- Particules en suspension à Raïs Hamidou :

VII-1-1-1- Teneurs des particules totales en suspension :

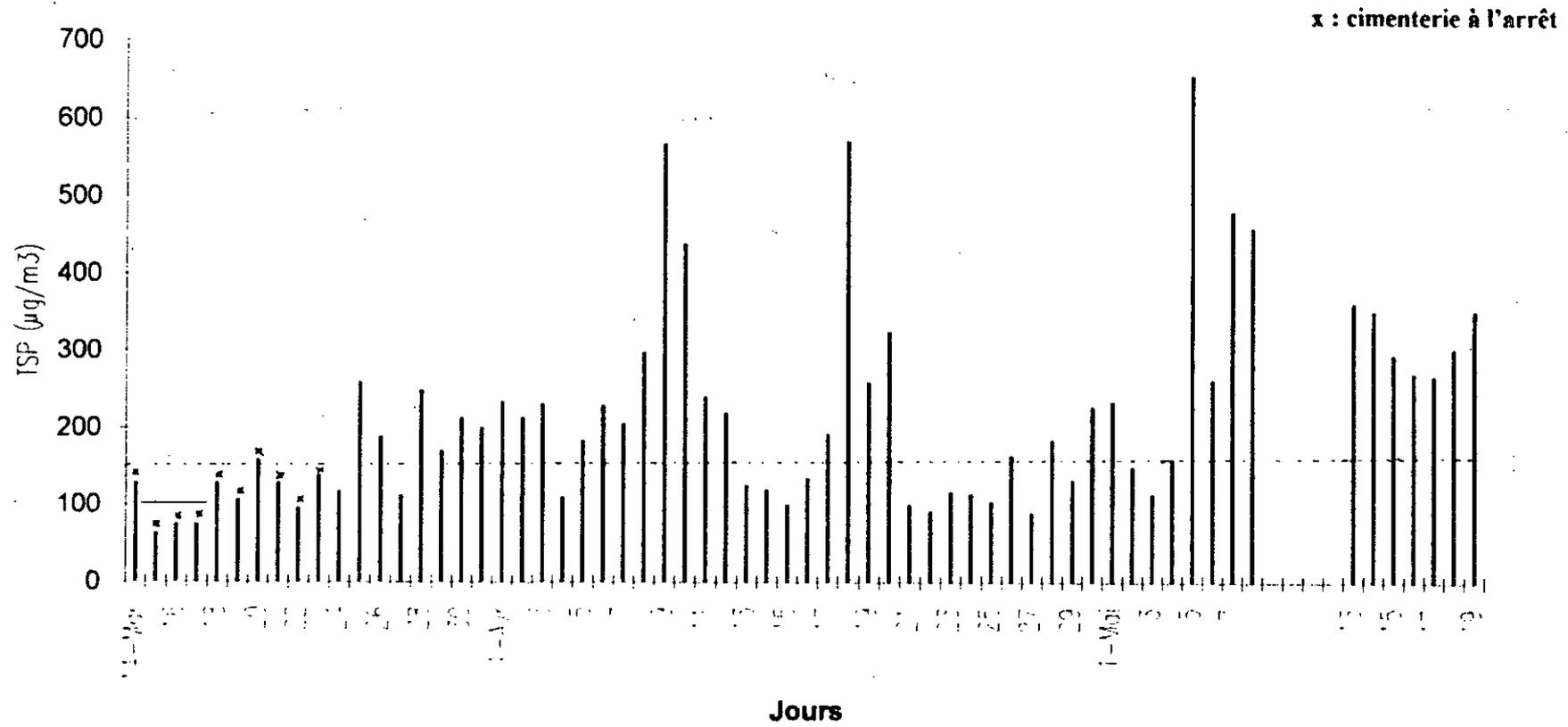
Les teneurs des TSP enregistrées à Raïs Hamidou sont exprimées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'air sont illustrées en figure N° 16.

On constate à première vue qu'il existe une large fourchette de variations des teneurs, le minimum étant de $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et un maximum à $655 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces variations temporelles sont dues non seulement aux influences des facteurs météorologiques (pluies, vent) mais aussi à certaines interruptions dans les activités de la cimenterie. C'est ainsi que, durant les dix premiers jours de notre étude qui coïncidaient avec un arrêt de la cimenterie et l'absence d'émission directe par les cheminées de l'installation, on enregistre en moyenne les teneurs les plus faibles de l'étude.

Dès la reprise des activités de la cimenterie, on constate une augmentation significative des teneurs en particules en suspension, dans l'ensemble et avec une moyenne de $217 \mu\text{g}/\text{m}^3$, le milieu de Raïs Hamidou accuse des teneurs excessives en TSP.

La comparaison avec les normes édictées par certains pays, que nous présentons en tableau N° 10 met clairement en évidence l'ampleur de cette pollution particulaire.

Figure 16 : Evolution temporelle des teneurs en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des TSP à Rais Hamidou



Pays	Normes requises en $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Canada et USA [23]	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne annuelle des prélèvements, 24 h
Allemagne [24]	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne annuelle des prélèvements, 24 h p.98* 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Suisse [25]	70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne annuelle des prélèvements, 24 h
C.E.E [24]	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenne annuelle des prélèvements, 24 h P.98* 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

P98 : Percentile 98 : 98 % des teneurs mesurées sur l'année ne doivent pas excéder la valeur limite indiquée

Tableau N°10 : Normes régissant les teneurs limites en TSP

Toutes ces comparaisons montrent l'impact des rejets de la cimenterie sur la contamination de l'atmosphère par les particules en suspension. Sans la cimenterie, une ville de la taille de Rais Hamidou aurait une moyenne de TSP de l'ordre de 50 à 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

VII-1-1-2 : Influence de la pluviométrie :

Les facteurs météorologiques, comme la pluie et le vent, exercent respectivement une action autoépuratrice de l'atmosphère et une dilution des particules dans les volumes d'air plus vastes.

C'est ainsi qu'en comparant les jours pluvieux avec les teneurs en TSP, on constate dans le cadre de cette étude, qu'il existe une corrélation significative entre ces deux paramètres, en ce sens que l'effet de lessivage de l'atmosphère se manifeste toujours par une diminution notable des TSP.

L'effet de ce phénomène que l'on appelle aussi " wash-out " est présenté en figure N° 17 où nous illustrons en parallèle les journées pluvieuses et les teneurs en TSP correspondantes.

On y remarque que :

- une journée de précipitation est suivie le lendemain par une diminution des TSP.
- si les précipitations persistent sur plusieurs journées, c'est toute la période qui accuse des faibles teneurs en TSP. C'est le cas dans notre étude de la période allant du 19/04 au 28/04 où le temps pluvieux prédomine.

Comme nous le montrerons par la suite dans l'étude statistique, plus de la moitié des teneurs mesurées à Rais Hamidou sont supérieures à la norme la moins sévère qui s'élève à 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et que dans environ 13% des cas les teneurs dépassent le double de cette norme, soit 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le percentile 95 quant à lui s'élève à 450 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

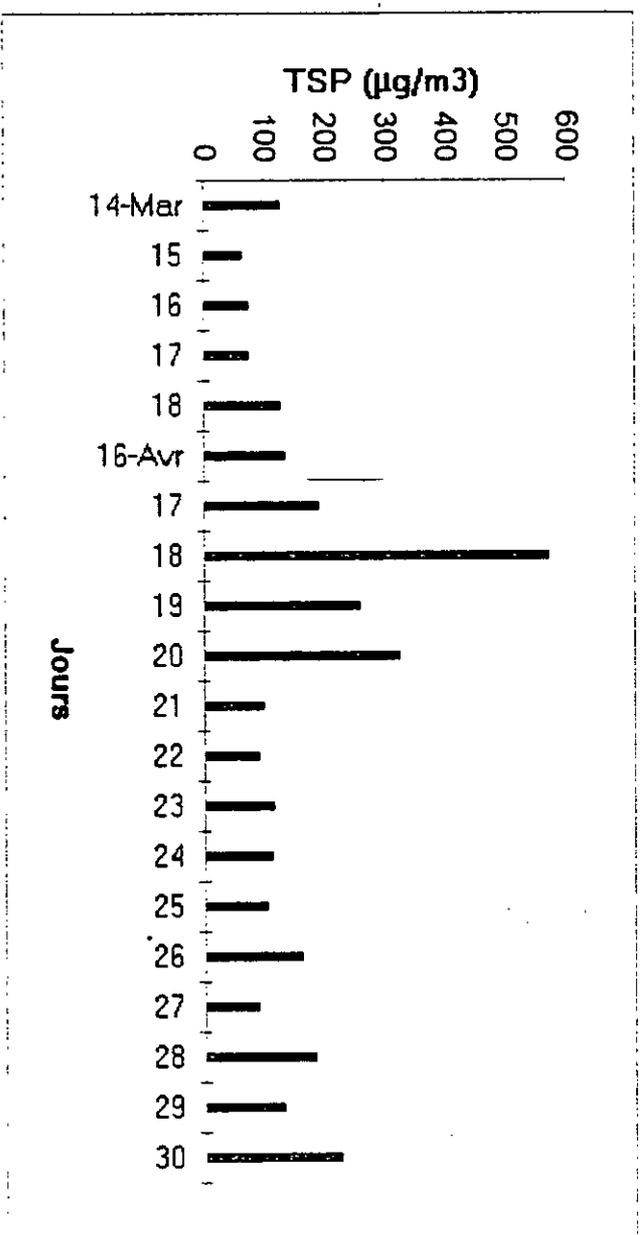
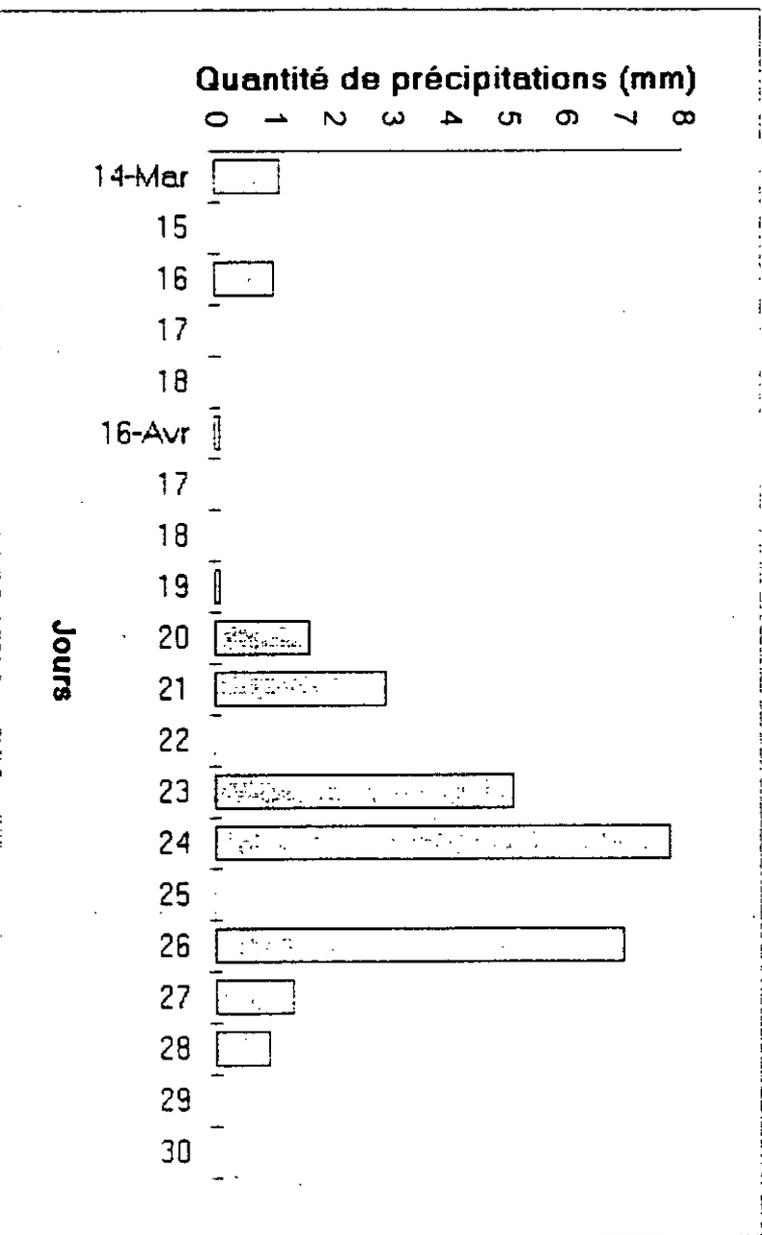


Figure 17 : Evolution des teneurs des TSP en fonction de la pluviométrie à Rais Hamidou

En général, même dans les grandes villes européennes à forte industrie des concentrations en TSP restent en moyennes inférieures à $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Une comparaison forte et instructive est donnée en tableau N°11 qui reprend certaines valeurs relevées dans la bibliographie

Villes	Teneur en TSP $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observation	Ref
Lille	100	Zone urbaine	[26]
Marscille	140	Zone urbaine - industrielle	[27]
Région Ruhr (Allemagne)	80 184 (P95)	Zone urbaine - industrielle	[24]
Berlin	64 167	Zone urbaine	[24]
Rais Hamidou	217 (moyenne sur 2 mois) 450 (P95)	Zone urbaine	

Tableau N° 11 : Comparaison des concentrations moyennes des TSP dans certaines grandes métropoles

En ce qui concerne l'influence de l'autre paramètre météorologique qu'est le vent, nous avons constaté que les directions de vent mesurées par l'office national de la météo (O.N.M) de Dar El Beida était inapplicable à la zone de Rais Hamidou. En effet, de constatation visuelle sur terrain, la direction du panache de la cheminée de la cimenterie ne concordait pas avec les données fournies par l'O.N.M.

Nous pouvons toutefois affirmer à partir de nos observations que la tendance vers les grandes teneurs en TSP est relevée à chaque fois que le panache est orienté vers l'ouest c'est à dire en direction de la ville et balayant le poste de mesure.

Il est clair que cette étude sur les effets météorologiques ne présente que des tendances plus ou moins simplifiées. Le problème est certainement plus complexe, car une durée de prélèvement de 24 heures correspondant rarement à des conditions météorologiques homogènes; au cours d'une journée, le vent peut changer plusieurs fois de directions et de vitesses; la concentration des TSP observée représente alors la somme d'influences contraires; par ailleurs les divers facteurs météorologiques peuvent agir simultanément, ce qui renvoie l'étude à une fonction à plusieurs variables.

VII-1-1-3- Exploitation statistiques des teneurs TSP de Rais Hamidou :

Ayant un grand nombre de mesures d'observations, il est intéressant de déterminer du point de vue statistique, la loi de distribution qui régit les teneurs en TSP mesurées à Rais Hamidou.

En général, en pollution atmosphérique, la loi normale de Gauss (distribution symétrique) ne décrit pas correctement la distribution des concentrations.

La meilleure approximation est donnée par la loi log-normale qui, dans une représentation graphique log/probabilité donne théoriquement une droite. C'est le cas des polluants $\text{SO}_2, \text{O}_2, \text{NO}_x$ et même parfois les particules en suspension [28].

Pour les données de Rais Hamidou, nous présentons dans le tableau N°12, les fréquences des classes de concentration choisies par intervalle de 40 µg, les fréquences cumulées ainsi que les fréquences cumulées en pourcentage, c'est à dire le pourcentage de temps pendant lequel une teneur donnée est égale ou dépassée.

Classes de teneurs (µg/M ³)	Nbre d'observations	Fréquences cumulées	Fréquences cumulées en %
40-80	3	3	95,2
80-120	14	17	72,6
120-160	10	27	56,5
160-200	7	34	45,2
200-240	10	44	29,1
240-280	7	51	17,8
280-320	3	54	12,9
320-340	2	56	9,7
360-400	1	57	8,1
400-440	1	58	6,7
440-480	2	60	4
480-520	0	60	4
520-560	1	61	1,7
560-600	0	61	1,7
600-640	0	61	1,7
640-680	1	62	-

Tableau N°12 : Distribution des classes et fréquences cumulées des TSP de R.H

La figure N°18 présente la distribution des fréquences des TSP mesurées à Rais Hamidou.

En portant ces données sur un graphe log/normale appelés aussi probit (l'ordonnée représente les fréquences cumulées en % et l'abscisse les teneurs en TSP en µg/m³, sur échelle logarithmique) on obtient une droite (figure N°19)

Les teneurs en TSP mesurée à Rais Hamidou se distribuent donc selon la loi log-normale.

Cette distribution permet donc d'avoir la médiane C 50 qui s'élève à 175 µg/m³. La déviation standard géométrique sg est alors observée en divisant la concentration au 16ème percentile par la médiane,

$$sg = \frac{\text{Teneur à P16}}{\text{Teneur à P50}} \quad (12) \quad [11]$$

$$sg = \frac{310}{175} = 1,77$$

On peut déduire aussi à partir du graphe log normale le percentile 95, qui s'élève ici à 450 µg/m³, ce qui signifie que 5 % des teneurs observées sont supérieures à 450 µg/m³.

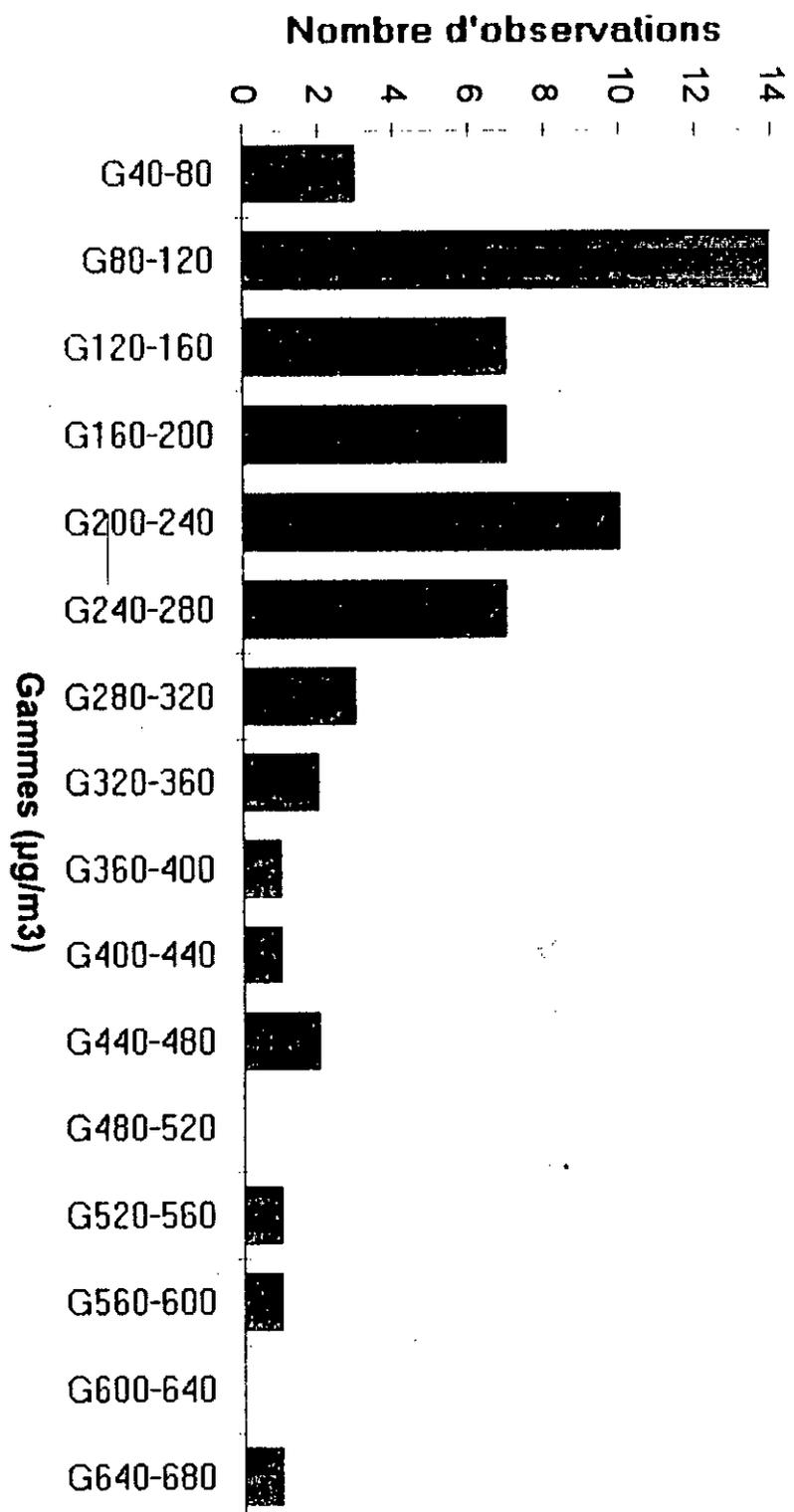


Figure 18 : Distribution des fréquences des TSP enregistrées à Rais Hamidou

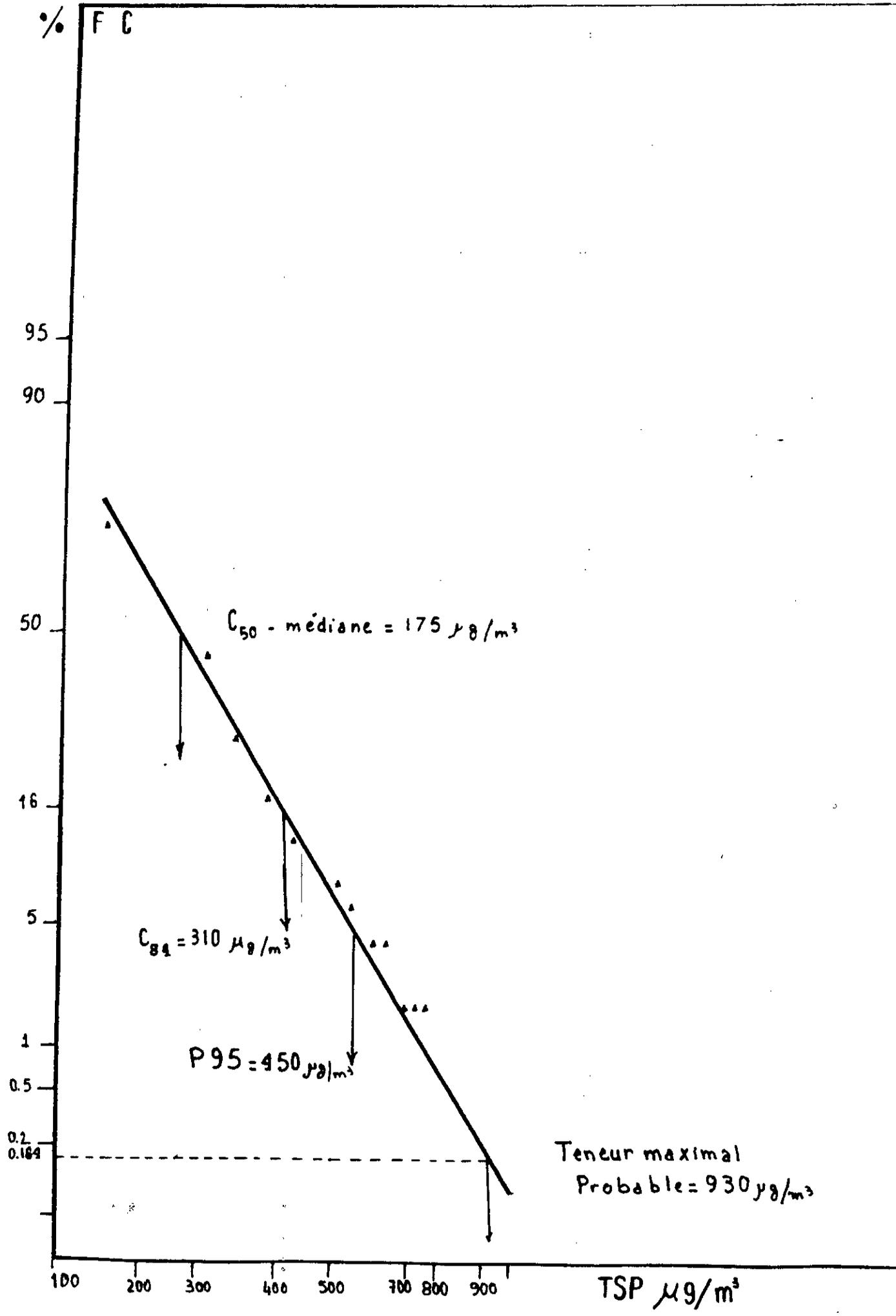


Figure N° 19 : Représentation des résultats enregistrés dans la région de R.H sur graphe log-normale

Une telle exploitation statistique permet donc de déterminer aisément, si une telle norme est dépassée; si elle risque statistiquement d'être dépassée et combien de fois elle le sera.

Dans le cas d'une distribution log-normale, il est possible par une approche statistique donnée par le modèle de LARSEN [11] de déterminer, entre autres, quelle est la teneur maximale probable qui risque d'être atteinte un jour de l'année ou plusieurs années, ce qui permet, à partir d'une campagne de mesure réduite dans le temps, de prévoir si une norme donnée risque d'être dépassée un ou plusieurs fois.

Le modèle statistique de LARSEN est basé sur un grand nombre d'observations effectuées durant sept années sur huit sites urbains importantes des Etats-Unis.

L'équation empirique qui permet de calculer la concentration maximale annuelle probable est :

$$f = 100\% \frac{r - 0,4}{n} \quad (13)$$

avec f = fréquence recherchée
 r = le rang de la concentration, il s'agit ici de la teneur la plus élevée donc au 1er rang.
 n = nombre d'échantillons

Dans le cas des TSP (prélèvement sur 24h) et sur une année, $n = 365$.

$$f = 100\% \frac{1 - 0,4}{365} = 0,164$$

Pour une durée de prélèvement de 24 h, cette fréquence correspond à un écart type (ou valeur réduite) z égale à 2,94. Nous donnons à cette effet en annexe le tableau donnant les concentrations extrêmes (percentile en %) et les écarts types z correspondant en fonction des durées d'échantillonnage.

Enfin la teneur maximale probable en TSP est donnée par la formule

$$C_{\max, 24 h} = \text{Médiane} \cdot 10^{z^2}$$

$$\text{Ce qui, dans notre cas, donne } C_{\max, 24 h} = 175 \cdot (1,77)^{2,94} = 937,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Sur le graphe et à la fréquence cumulée de 0,16 n , on retrouve pratiquement la même teneur, soit 937,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Il faut souligner que plus le nombre d'observations est grand, plus la précision du modèle est bonne.

En général, la formule (13) donne des résultats avec une erreur inférieure à 1%.

Remarquons tout de même que la concentration maximale de 930 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ est six fois plus élevée que la norme requise. Ceci montre l'ampleur de la pollution particulaire à Rais Hamidou et le caractère et l'utilité préventifs du modèle statistique.

La teneur maximale que nous avons mesuré en Mars-Avril s'élève à $655 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette valeur peut en effet être largement dépassée en été et dans le cas de stabilité de l'atmosphère qui conduit à une accumulation des polluants dans la basse atmosphère.

VII-1-2- Particules en suspension à Bachdjarah :

Les teneurs des particules totales en suspension mesurées en milieu urbain à Bachdjarah sont résumées en figure N°20. Là aussi on observe une certaine variation temporelle des teneurs, mais qui est moins accentuée que dans le cas de R.H.

Les teneurs varient entre 86 et $146 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Avec une teneur moyenne de $109 \mu\text{g}/\text{m}^3$, on a presque une évolution homogène dans le temps.

En comparaison avec le site urbain industriel de R.H, ce quartier d'Alger est relativement moins pollué. L'inexistence d'installations industrielles émettrices de poussières dans les environs du site étudié explique ces teneurs relativement faibles. Durant la période étudiée, la norme de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ n'a pas été dépassée.

Avec des teneurs en TSP tournant autour de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, nous sommes vraisemblablement en présence du niveau de pollution urbaine de fond.

Ce niveau de pollution atteint à Alger est d'ailleurs comparable avec ceux enregistrés dans les grandes métropoles urbaines.

A titre de comparaison, nous présentons dans le tableau N°13 certains niveaux de pollution relevés de part le monde.

Villes	Teneur moyennes annuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Observation	Ref
Quebec	60 100	Zone semi-urbaine Zone urbaine	[23]
Lille	61	site zone urbaine à circulation moyenne	[26]
Marscille	128	Zone urbaine	[27]
Zürich	50 - 60	Zone urbaine	[25]
Berlin	64	Zone urbaine	[24]
Paris	101 47,49	Zone urbaine Zone rurale	[28]
Alger (site Bachdjarah)	109 (moyenne mensuelle)	Zone urbaine	

Tableau N° 13 : Comparaison des concentration moyennes à travers certaines villes du monde

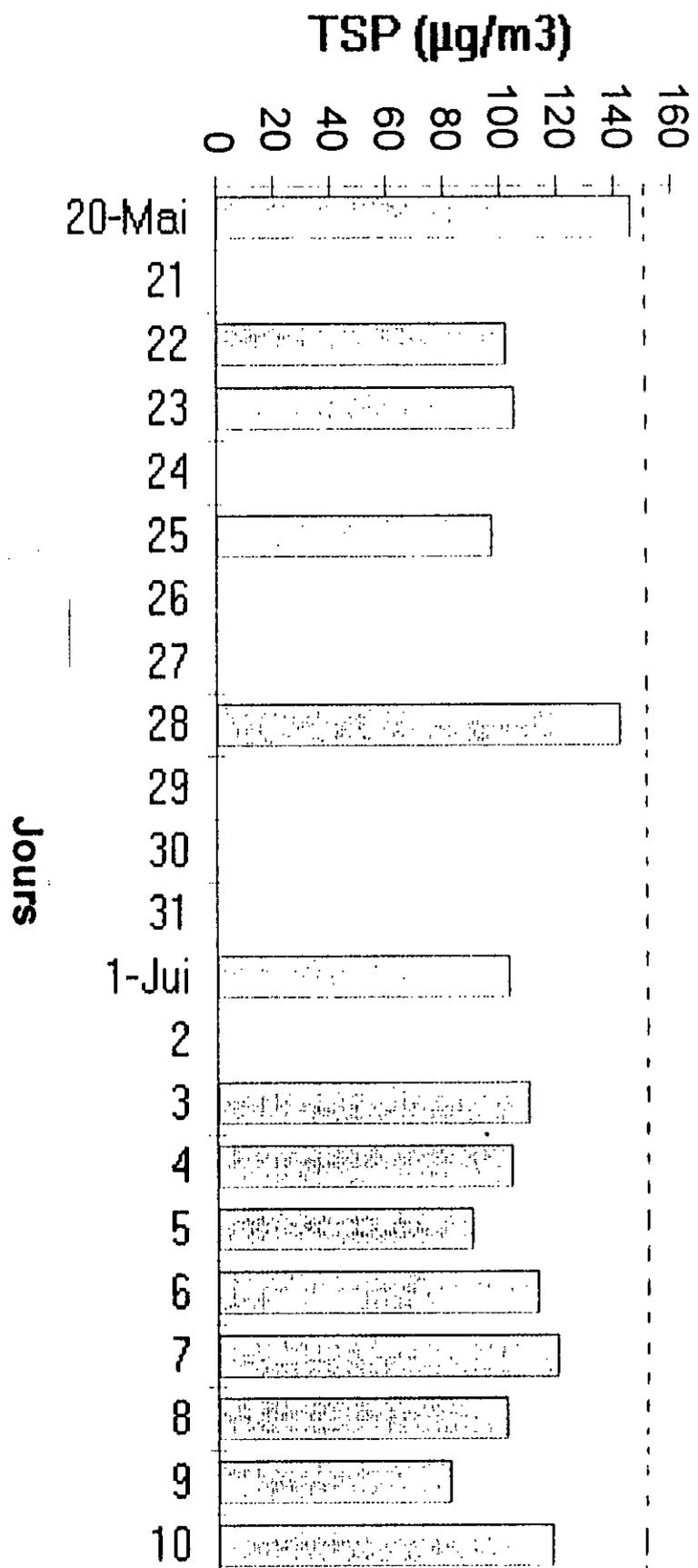


Figure 20 : Evolution temporelle des teneurs en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) des TSP à Bachdjarah

Il faut s'attendre à ce que les pays chauds et surtout les moins développés présentent des teneurs en TSP supérieures à celles des pays du Nord.

Dans les pays comme le nôtre, il existe différents facteurs qui favorisent l'émission des particules :

- La sécheresse facilite l'érosion
- Les sols sont souvent nus
- Les routes et pistes non goudronnées
- Balayage des trottoirs et routes quasi inexistant
- Mise en resuspension des particules très facile.
- Transport de divers matériaux sans couverture adéquate.
- Rareté des pluies d'où insuffisante auto épuration de l'atmosphère
- Industrie dépourvue de système d'épuration.
- etc.

Il s'ensuit que la pollution urbaine de fond à Alger risque d'être bien plus élevée qu'à Paris où le tissu urbain et industriel dépasse de loin celui d'Alger.

Enfin, vu le nombre réduit de prélèvement effectué à Alger, il n'est pas possible de faire l'étude de l'influence météorologique où les effets du transport de particules à partir de zones plus éloignées.

Il est nécessaire, dans ce contexte de continuer l'étude entreprise sur une plus longue période.

VII-2- Etude des éléments métalliques associés aux particules totales en suspension :

Afin d'avoir une idée sur la nature et l'origine des éléments métalliques supportés par les particules en suspension, nous avons effectué le dosage des éléments présents en traces tels que Fe, Mn, Cu et Pb et les éléments majeurs : les alcalino-terreux et alcalins Ca, Na, K de Li.

S'agissant de sites non éloignés de la mer, nous avons déterminé aussi les chlorures pour cerner l'apport dû aux embruns marins.

Par faute de moyens techniques d'analyse, nous n'avons pas pu étudier d'autres éléments toxiques, tels que le cd, qui sur le plan sanitaire sont très importants.

Les résultats obtenus seront présentés sous forme de teneurs atmosphériques de l'élément. (ex : 207 ng Fe/m³ d'air) et sous forme de fraction massique (ex : 0,53 µg de Fe/mg de poussières soit 0,052 % de fer)

Dans le cas de métaux lourds, le dosage a été effectué sur absorption atomique classique.

Pour cette méthode, les valeurs limites de détection sont généralement les suivantes [20].

Fe : 10 ng /m³.

Mn : 1 ng /m³.

Cu : 1 ng /m³.

Pb : 1 ng /m³.

L'étude d'un test à blanc (minéralisant d'un filtre vierge) n'a pas relevé pour ces métaux une teneur détectable.

Il y avait par contre relargage par le filtre en fibre de verre des teneurs notables de Zn, ce qui nous a amenés à abandonner par la suite l'étude de cet élément.

a) Les éléments présents en traces : Fe, Mn, Cu et Pb :

Les résultats obtenus au niveau des deux sites de mesure sont illustrés en figures n° 21,22,23,24 qui donnent respectivement les teneurs en Fe, Mn , Cu et Pb.

Le tableau N° 14 résume pour les quatre métaux lourds, les teneurs moyennes mesurées à Raïs Hamidou et à Bachdjarah

Eléments	Site de RAIS HAMIDOU		Site de BACHDJARAH	
	teneur atmosphérique (ng/m ³)	Fraction massique (µg/mg)	teneur atmosphérique (ng/m ³)	Fraction massique (µg/mg)
Fe	207	0,52	88	0,75
Mn	204	0,526	111	0,98
Cu	41	0,112	31	0,269
PB	2	0,006	6	0,047

Tableau N°14 : Niveaux des métaux lourds mesurés à Raïs Hamidou et Bachdjarah

La figure N°25 illustre graphiquement les teneurs moyennes aux deux sites.

L'examen de ces données révèle d'une part qu'au sein du même site, il existe une importante variation temporelle dans les teneurs atmosphériques. Cette variation est elle-même liée aux variations dans le temps des teneurs en TSP.

Ainsi par exemple, pour le Fer, les teneurs atmosphériques oscillent entre 110 et 378 ng/m³, avec une moyenne s'élevant à 207 ng/m³.

On note par ailleurs qu'il existe en passant d'un site à un autre une importante différence dans les teneurs atmosphériques.

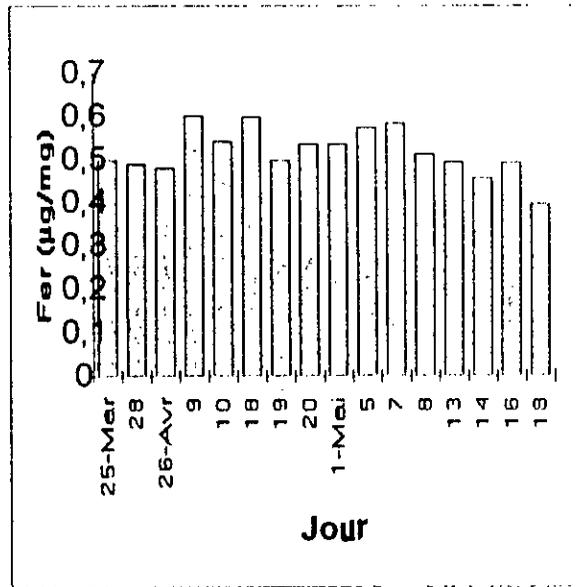
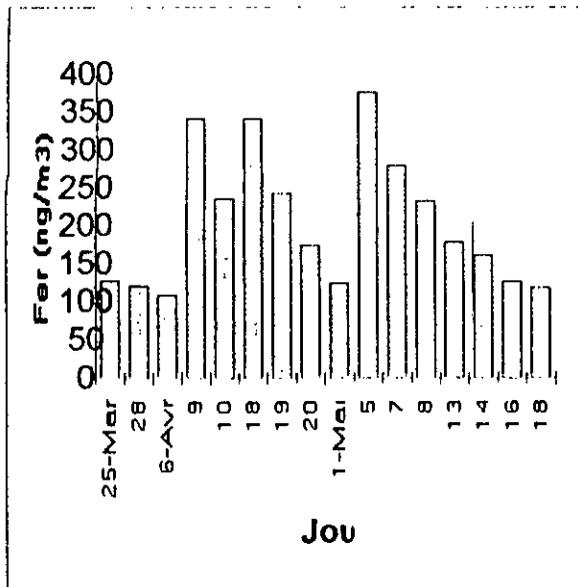
A l'exception du plomb, la contamination de l'atmosphère par les métaux lourds étudiés est plus importante à Raïs Hamidou qu'au milieu urbain d'Alger.

L'atmosphère de Raïs Hamidou est pratiquement deux fois plus riche en fer et manganèse (Tableau N°14) par contre le milieu urbain est plus riche en plomb.

La teneur en plomb à Bachdjarah est en moyenne trois fois plus élevée qu'à Raïs Hamidou. Ceci s'explique par l'importance du trafic routier dans la ville d'Alger. Rappelons qu'en milieu urbain, le plomb provient essentiellement des émissions des véhicules à essence.

Signalons enfin , qu'au niveau des deux sites, les teneurs atmosphériques en fer et manganèse sont de même grandeur.

Rais Hamidou



Bachdjarah

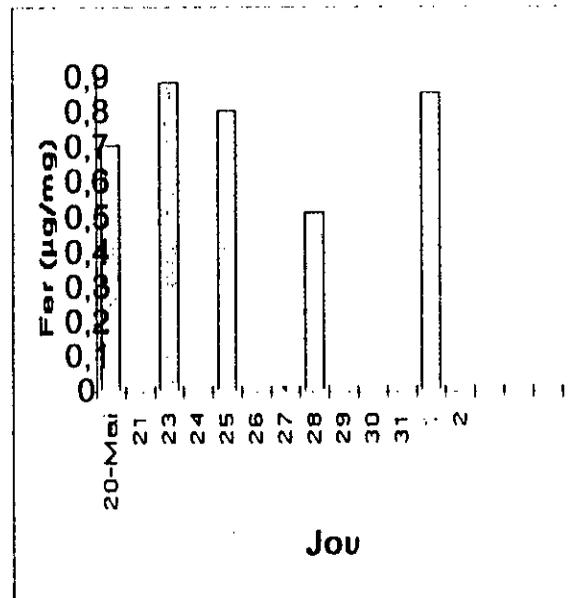
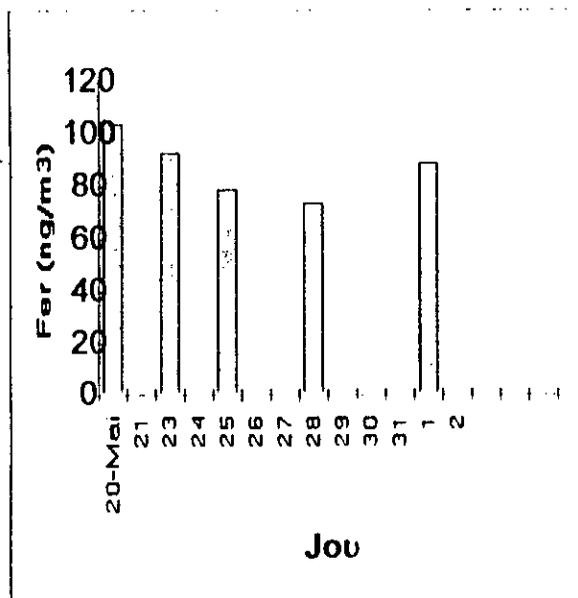
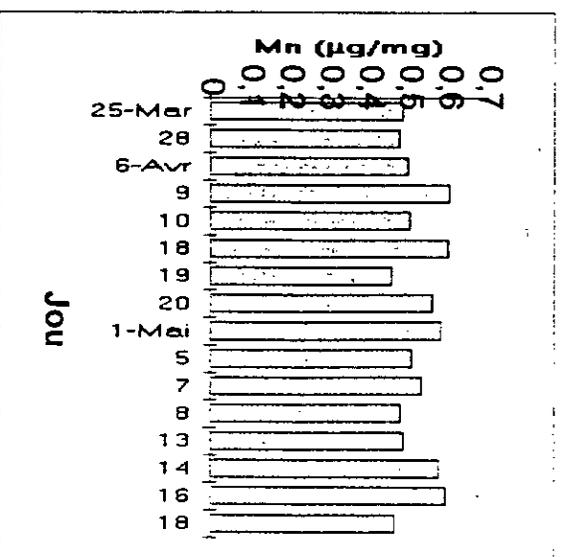
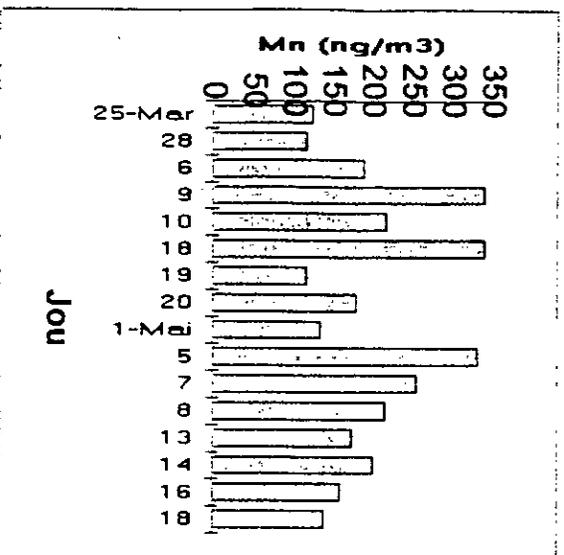


Figure 21 : Teneurs en Fe des particules en suspension

Rais Hamidou



Bachdjarah

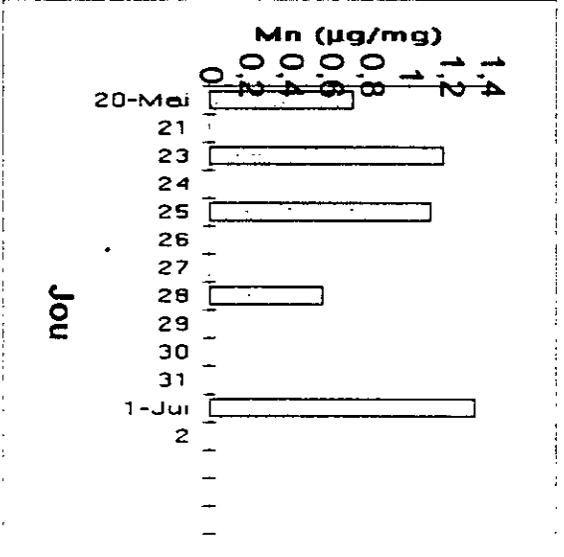
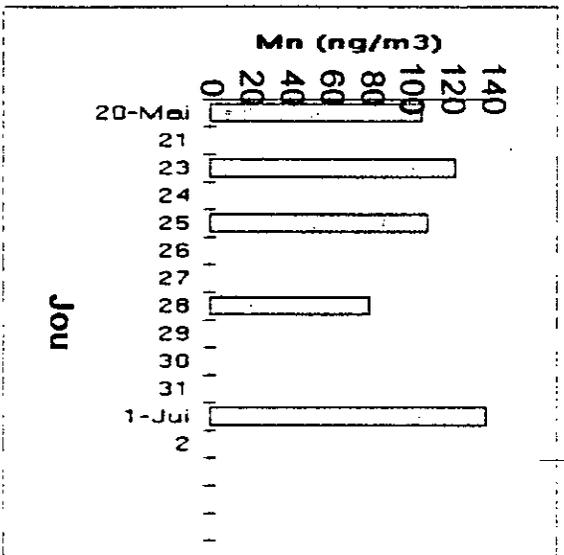
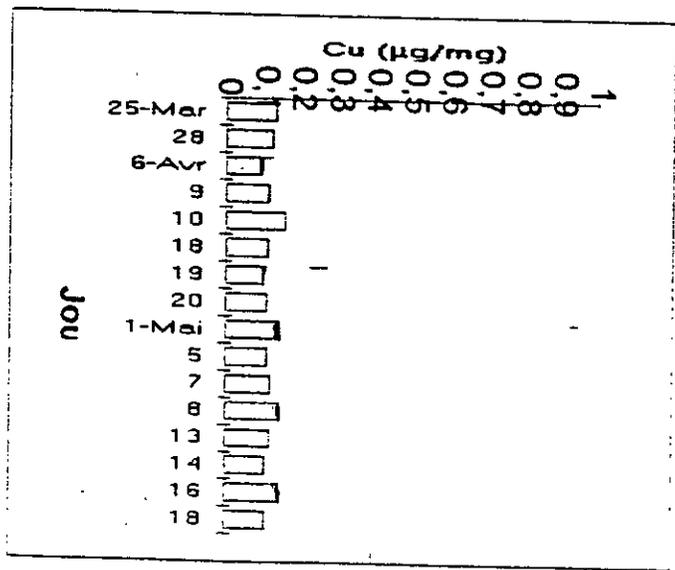
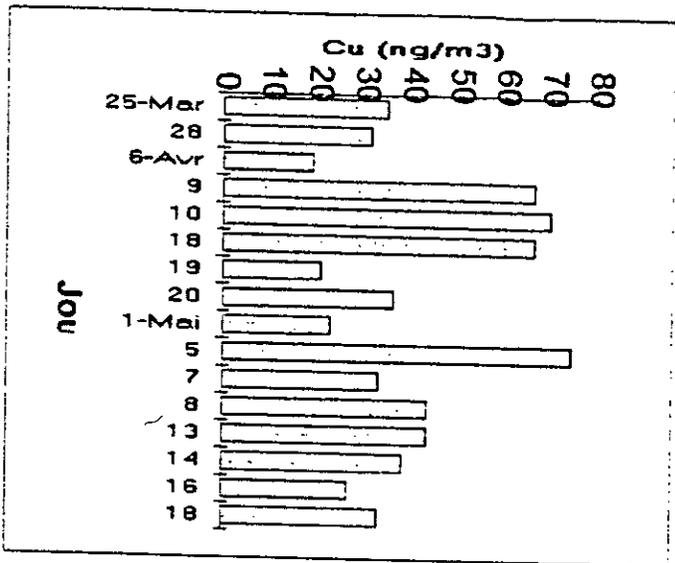


Figure 22 : Teneurs en Mn des particules en suspension

Rais Hamidou



Bachdjarah

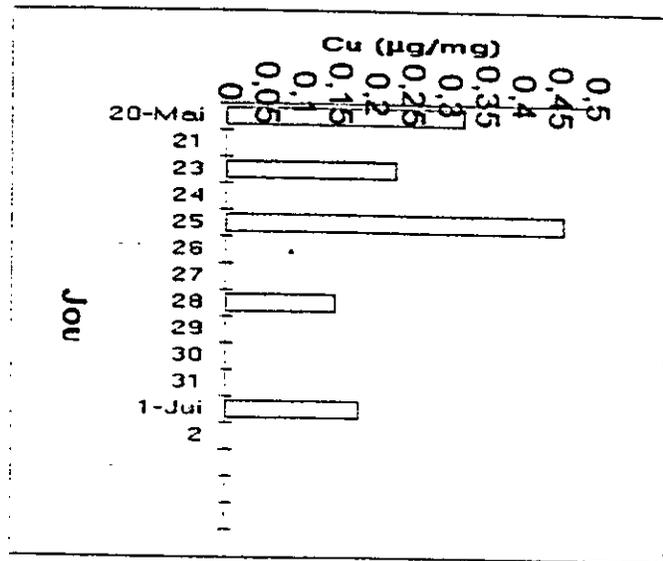
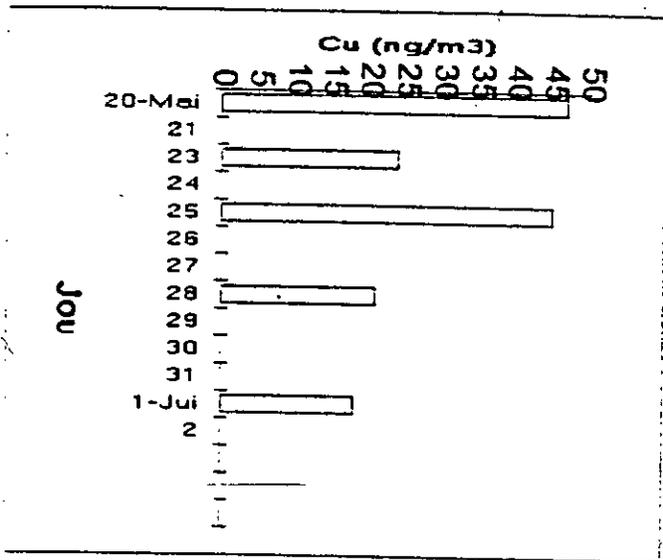
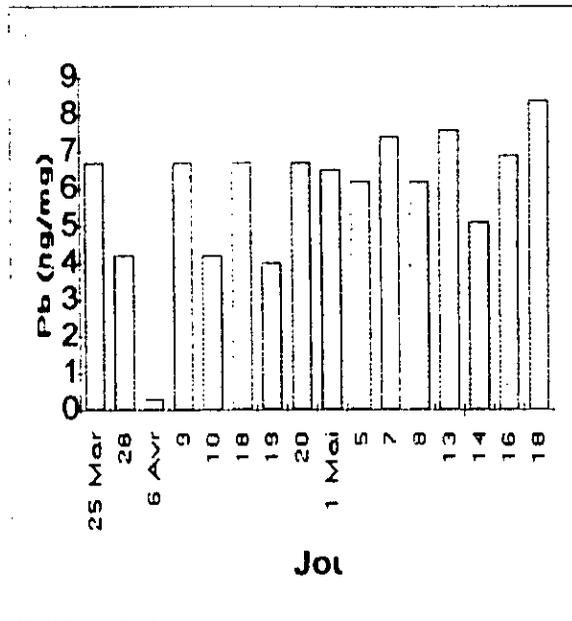
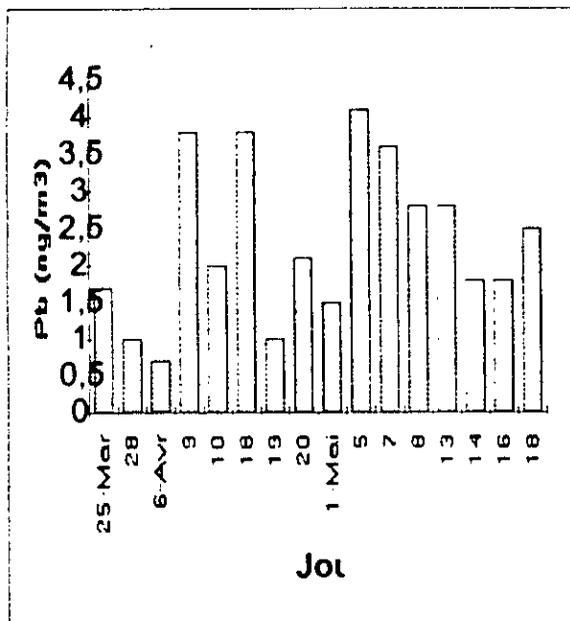


Figure 23 : Teneurs en Cu des particules en suspension

Rais Hamidou



Bachdjarah

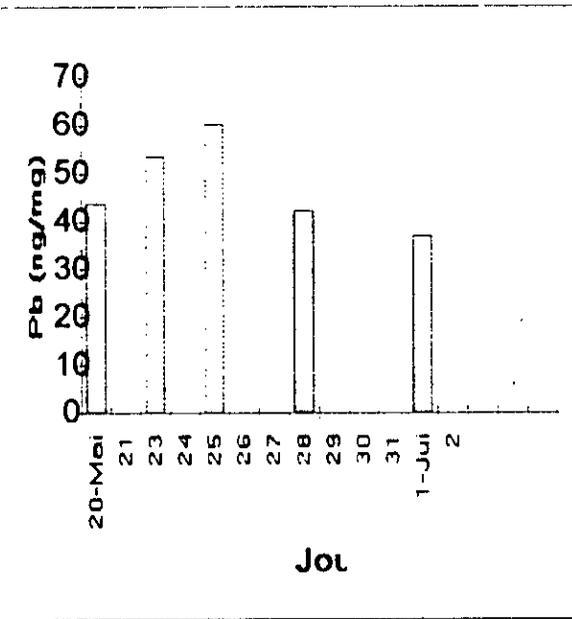
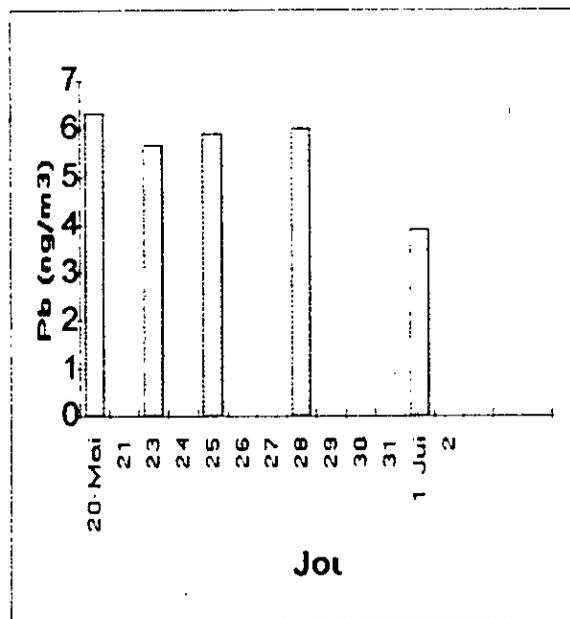


Figure 24 : Teneurs en Pb des particules en suspension

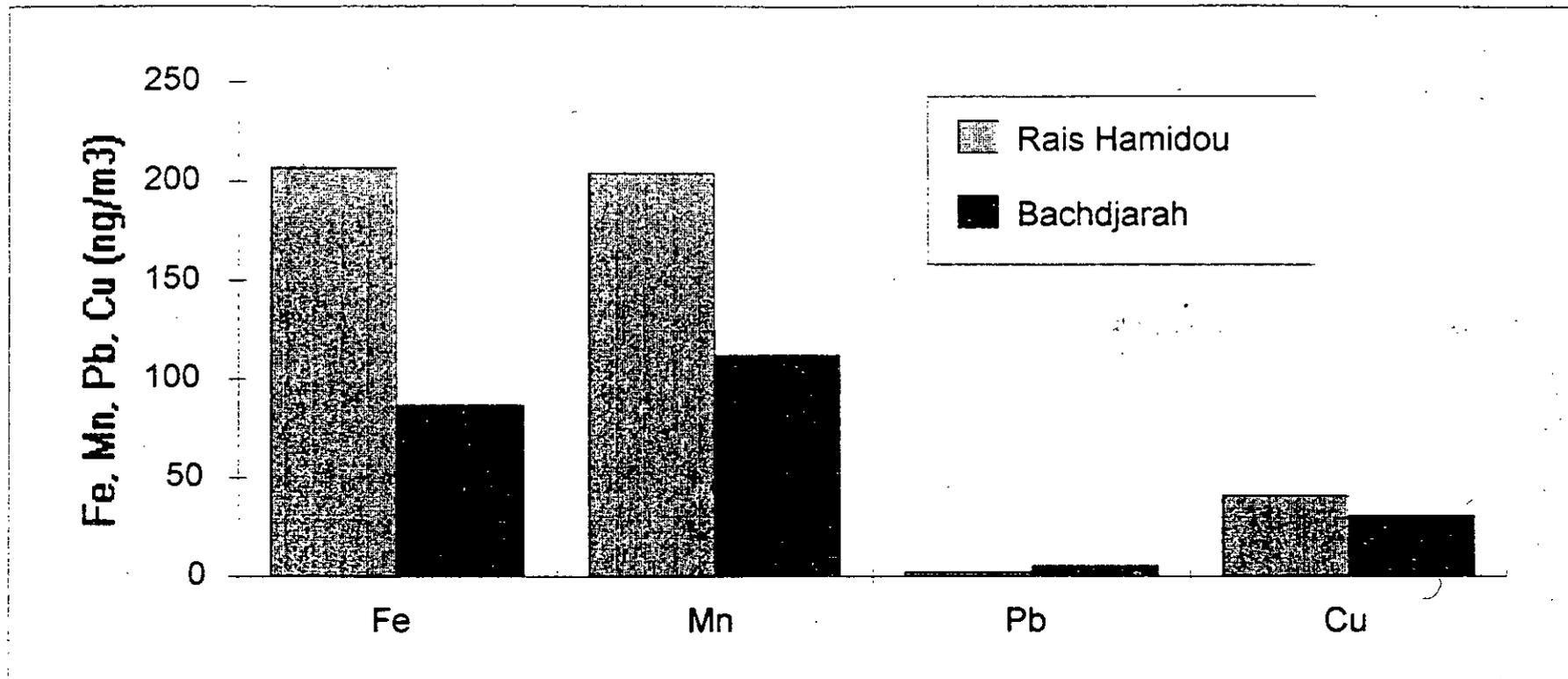


Figure 25 : Teneurs moyenne des métaux lourds Fe, Mn, Pb et Cu (ng/m³)

Ce résultat est étonnant car aussi bien dans la croûte terrestre que dans le minerai servant à la production de ciment, le fer est bien plus abondant que le manganèse.

D'autres études sont nécessaires pour éclaircir ce point.

En ce qui concerne l'étude des fractions massiques, il est intéressant de constater qu'au niveau de Raïs Hamidou, l'évolution dans le temps des fractions massiques du Fe, Mn et à un degré moindre du Cu, est très homogène; c'est à dire quelle que soit l'ampleur de la pollution particulaire, les poussières collectées contiennent le même taux de l'élément métallique considéré. Ce résultat est important car il signifie que ces métaux possèdent la même origine, ils proviennent de la même source qui est la cimenterie.

La fraction massique du plomb est par contre très divergente et dépend de l'ampleur du trafic routier.

Au niveau de Bachdjarah, les fractions massiques sont moins homogènes et peuvent fortement varier du jour au lendemain, ce qui implique, l'existence en plus des sources naturelles, d'une diversité de sources anthropogéniques diffusées ou ponctuelles.

Une comparaison des fractions massiques moyennes entre les deux sites montrent que les TSP du milieu urbain sont plus riches en métaux lourds; ainsi par exemple, les poussières de Bachdjarah contiennent deux fois plus de manganèse que celles de Raïs Hamidou (tableau N°14). Ceci s'explique par le fait que dans les particules de cimenterie, ce sont surtout les éléments alcalins et alcalino-terreux qui dominent.

b) Les éléments majeurs : Ca, Na, K, Li et Cl :

Les teneurs des éléments majeurs, alcalins, alcalino-terreux et les chlorures sont résumées dans les figures N°26,27,28,29 et 30 qui, pour les deux sites représentent les teneurs en Ca, Na, K, Li et Cl.

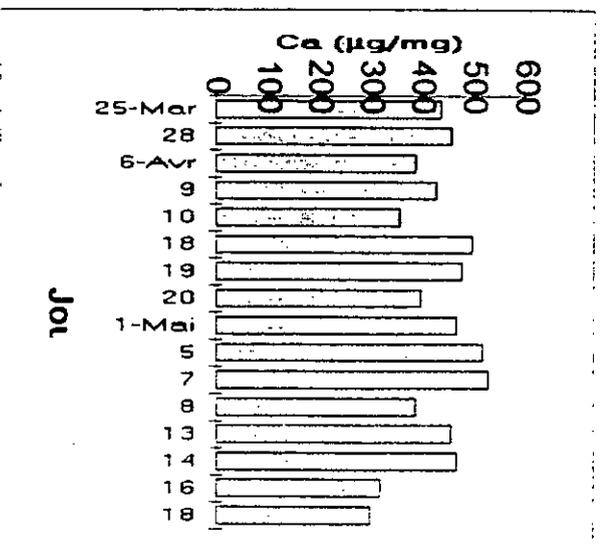
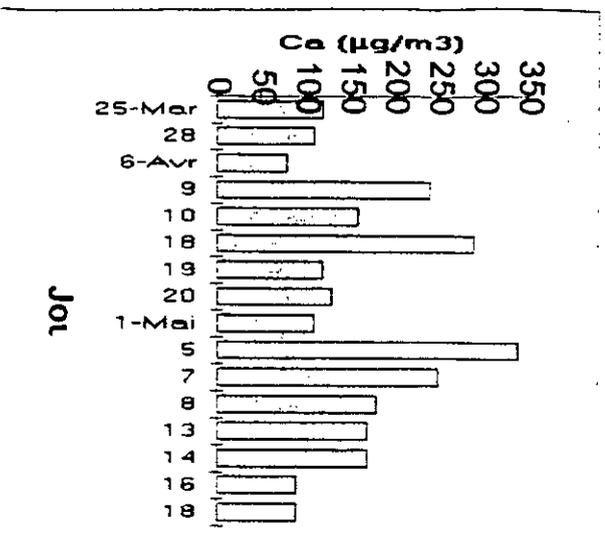
Tout comme pour les métaux lourds, on observe ici aussi une importante variation temporelle des teneurs atmosphériques. Il est alors plus facile de discuter les résultats en utilisant les teneurs moyennes dans le tableau N° 15.

Afin de comparer les teneurs moyennes en métaux lourds et en éléments majeurs, nous reprenons dans le tableau N°15, les teneurs des métaux lourds et les moyennes des TSP.

La figure N°31 illustre graphiquement les teneurs moyennes aux deux sites.

A Raïs Hamidou, on remarque l'ampleur de la teneur atmosphérique en Ca qui est pratiquement 500 fois plus élevée que celle du Fer ou du Manganèse. Au niveau du site urbain, les teneurs atmosphériques de calcium s'élève qu'au 1/10 de celle de Raïs Hamidou; or les rejets de la cimenterie de Raïs Hamidou sont très riches en Ca; environ 40% de la masse des particules à Raïs Hamidou est composé de calcium pour seulement 14% en milieu urbain.

Rais Hamidou



Bachdjarah

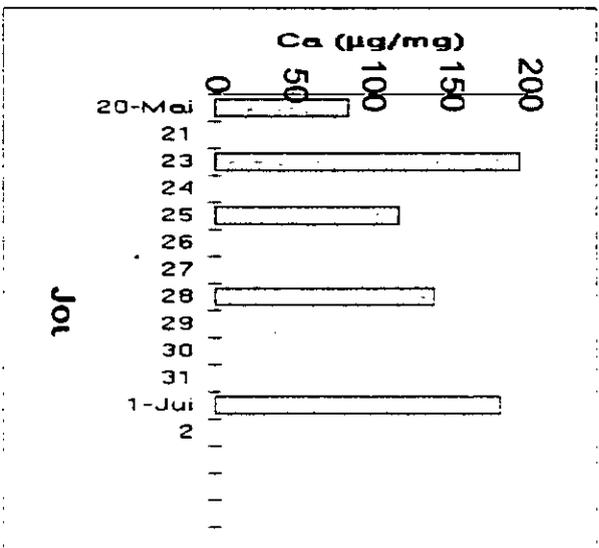
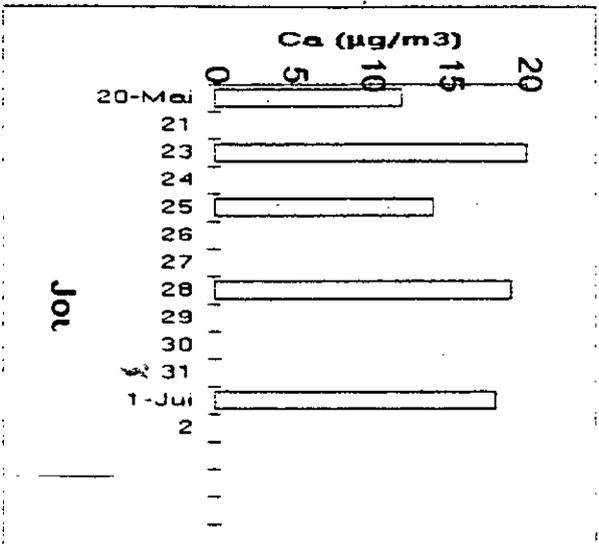
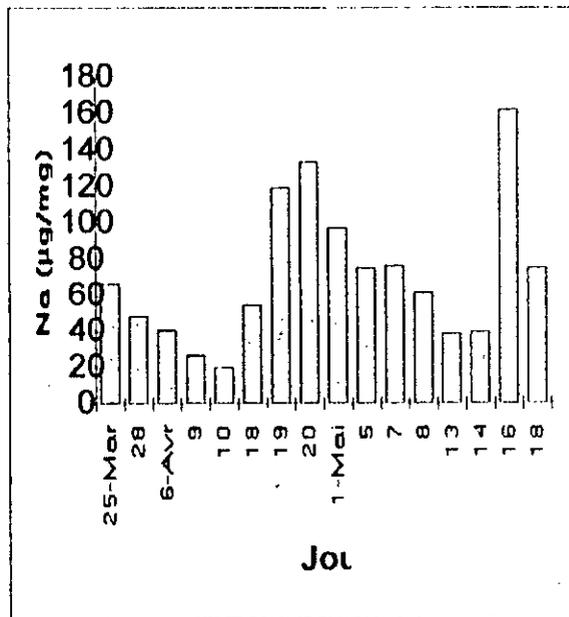
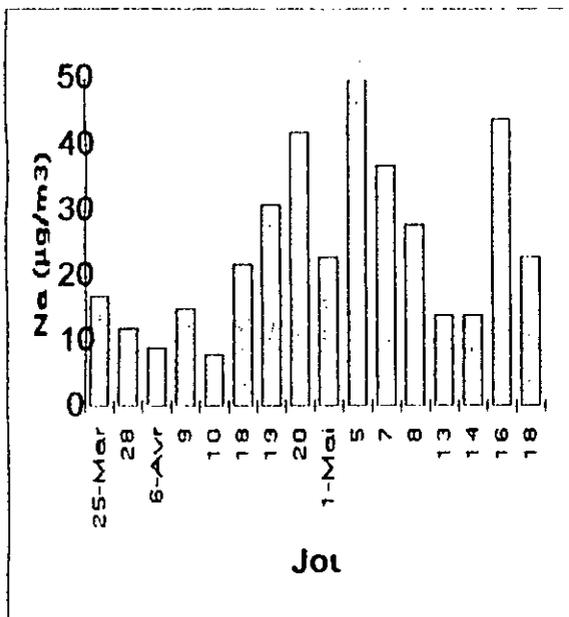


Figure 26 : Teneurs en Ca des particules en suspension

Rais Hamidou



Bachdjarah

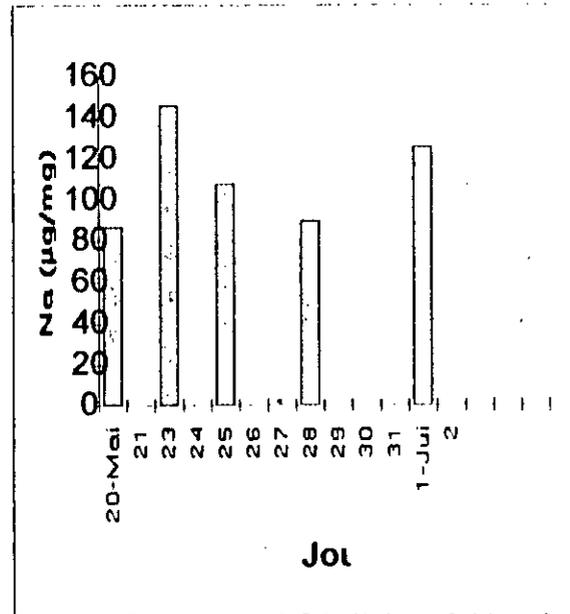
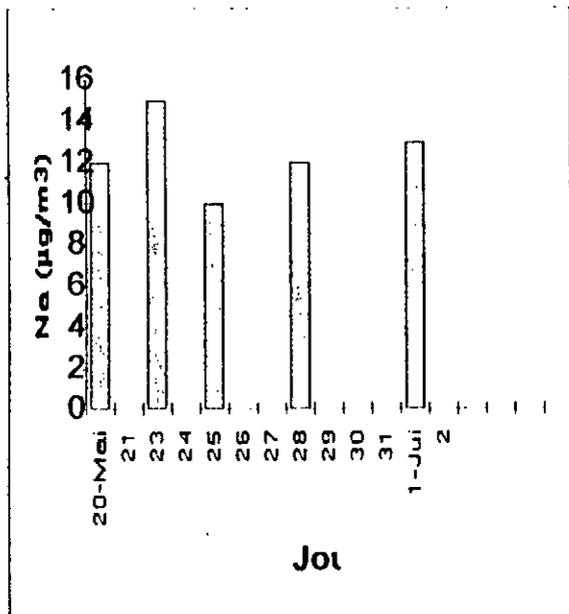
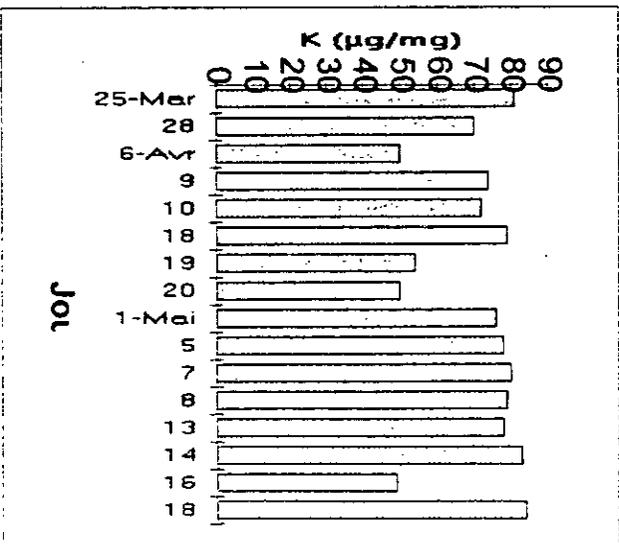
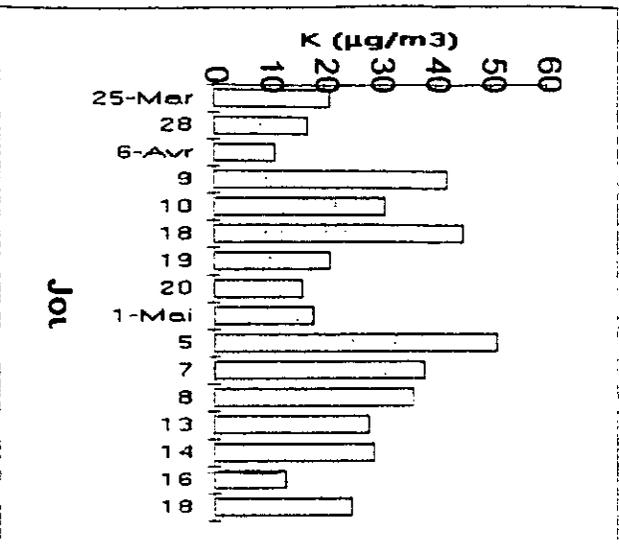


Figure 27 : Teneurs en Na des particules en suspension

Rais Hamidou



Bachdjarah

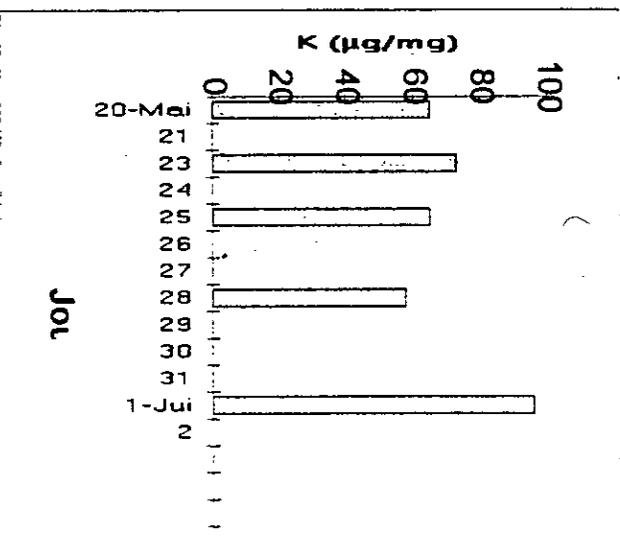
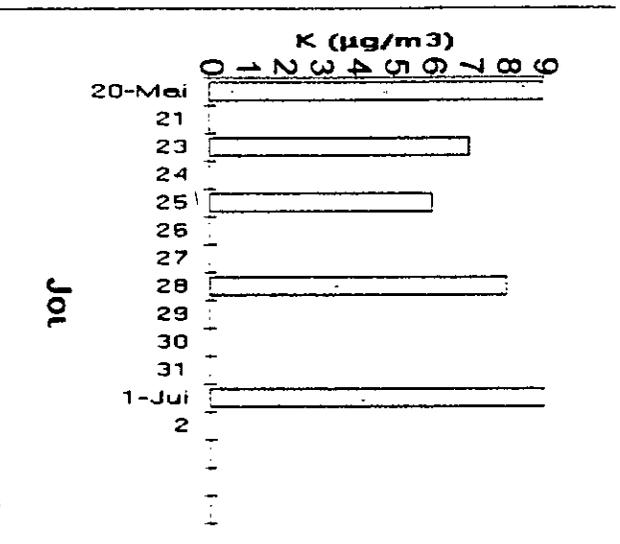
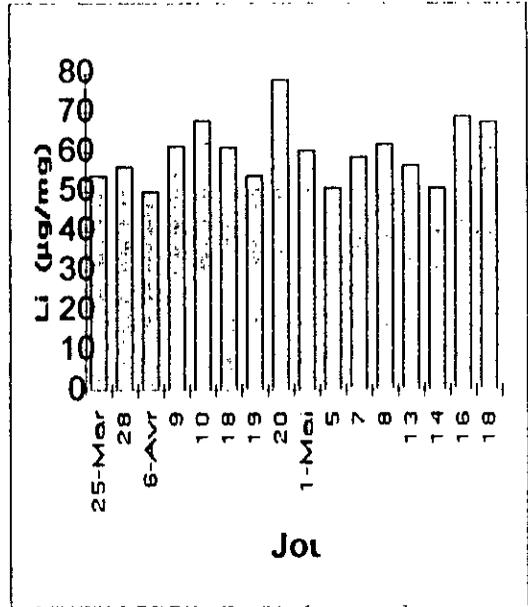
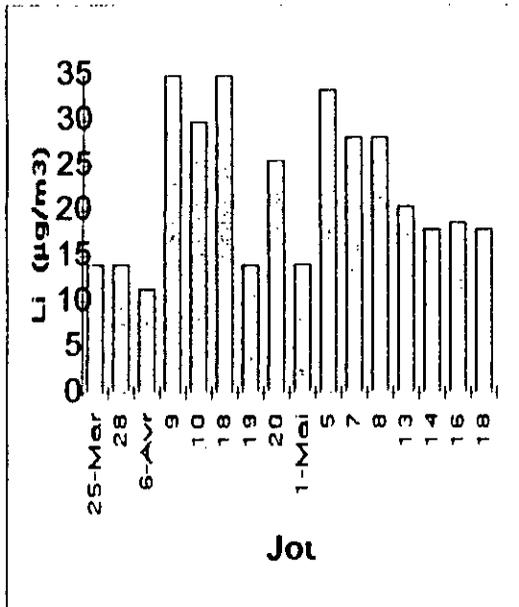


Figure 28 : Teneurs en K des particules en suspension

Rais Hamidou



Bachdjarah

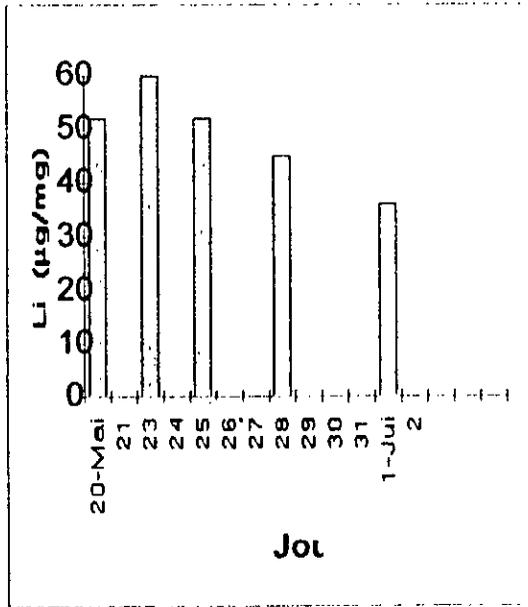
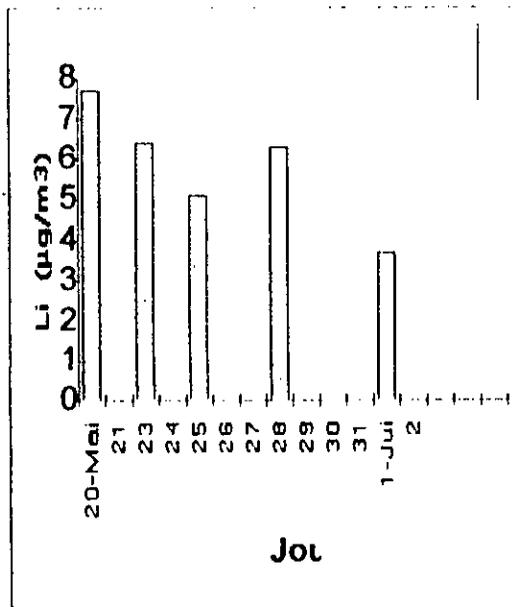
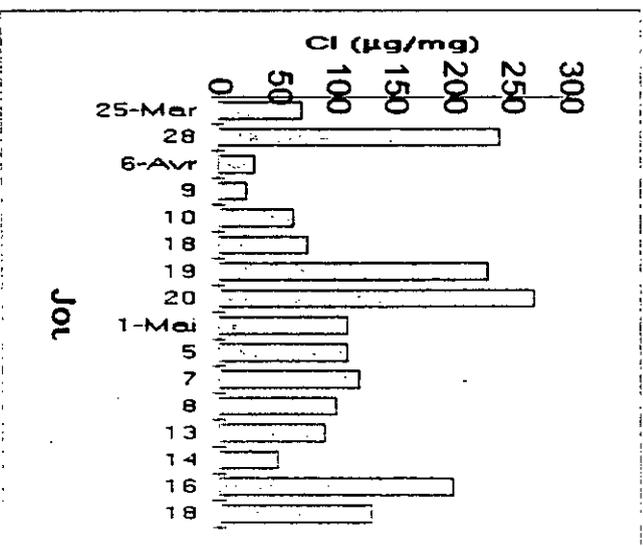
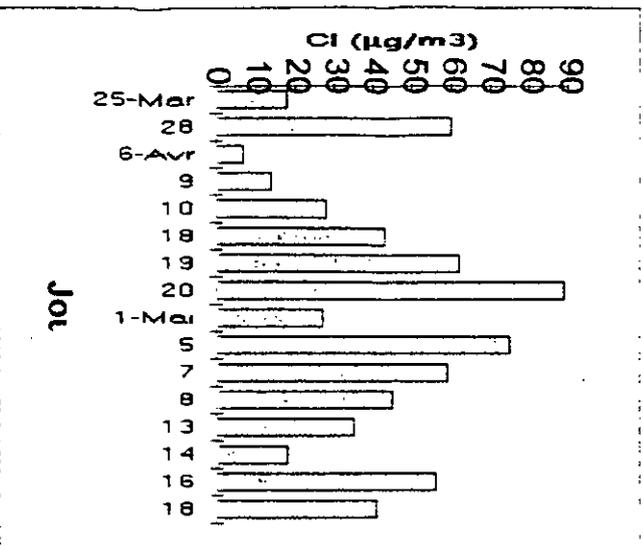


Figure 29 : Teneurs en Li des particules en suspension

Rais Hamidou



Bachdjarah

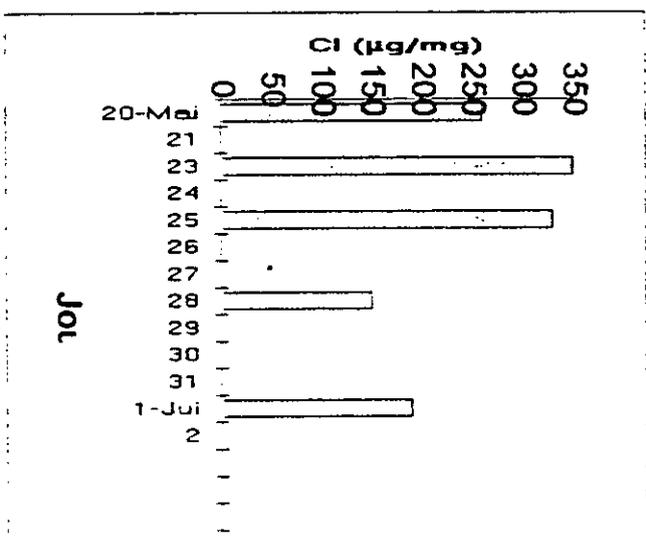
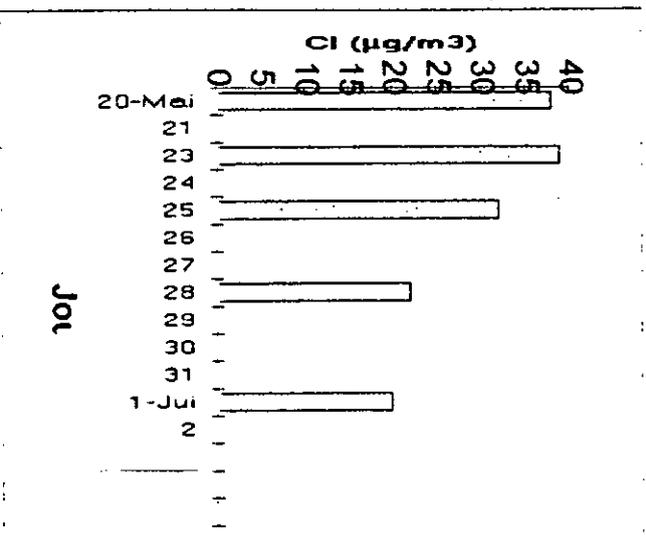


Figure 30 : Teneurs en CI des particules en suspension

T.S.P	Site de RAIS HAMIDOU		Site de BACHDJARAH	
	217 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		109 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Eléments	Teneur atmosphérique	Fraction massique	Teneur atmosphérique	Fraction massique
Fe	207 ng/m^3	0,52 $\mu\text{g}/\text{mg}$	88 ng/m^3	0,75 $\mu\text{g}/\text{mg}$
Mn	204 ng/m^3	0,526 $\mu\text{g}/\text{mg}$	111 ng/m^3	0,98 $\mu\text{g}/\text{mg}$
Cu	41 ng/m^3	0,112 $\mu\text{g}/\text{mg}$	31 ng/m^3	0,269 $\mu\text{g}/\text{mg}$
Pb	2 ng/m^3	0,006 $\mu\text{g}/\text{mg}$	6 ng/m^3	0,047 $\mu\text{g}/\text{mg}$
Ca	116 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,443 mg/mg	16,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,144 mg/mg
Na	24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,072 mg/mg	13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,111 mg/mg
K	28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,071 mg/mg	8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,070 mg/mg
Li	22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,060 mg/mg	6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,049 mg/mg
Cl	42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,120 mg/mg	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,256 mg/mg
Cl/ Na		1,75		2,3

Tableau N°15 : teneurs moyennes des métaux associés aux particules en suspension

Les teneurs en potassium sont aussi élevées à Raïs Hamidou; le potassium entre dans la composition du ciment (K_2O) mais provient aussi de la croûte terrestre.

Globalement, les éléments majeurs constituent à Raïs Hamidou, environ 70% de la masse des particules collectés.

En milieu urbain, ce taux n'est que de 60% avec une partie importante de chlorures.

A Raïs Hamidou, le rapport Cl/Na s'élève en moyenne à 1,75 et est très proche de la valeur 1,8 qui caractérise l'aérosol marin. Ce résultat concorde avec la situation géographique du site étant très proche de la mer, est très influencé par les rapports marins.

Au niveau de Bachdjarah, le rapport Cl/Na est un peu plus élevé, il s'élève en moyenne à 2,3. En plus des aérosols marins, ce site serait influencé par d'autres apports anthropiques en chlorures.

Signalons enfin qu'à Raïs Hamidou, l'évolution dans le temps des fractions massiques des éléments Ca, K et Li est très homogénéisée, ce qui montre l'origine commune de ces éléments.

En conclusion, nous retenons de l'étude qu'il y a une importante différence dans l'ampleur de la nature de la pollution particulaire en suspension qui caractérise la zone du Raïs Hamidou et le milieu urbain d'Alger.

A Raïs Hamidou, la pollution est principalement issue de la cimenterie où les rejets des éléments alcalins et alcalino-terreux dominent. La teneur de ces éléments est très importante.

En milieu urbain on trouve les alcalins et alcalino-terreux issues des sources naturelles (érosion du sol embruns marins) mais à un taux plus faible. La pollution métallique est par contre plus accentuée en milieu urbain (plus fort enrichissement des TSP en métaux lourds).

Nous retiendrons les teneurs mesurées en été au centre-ville de Paris [29] que nous présentons en tableau N°17.

Eléments	Teneur atmosphérique mg/m ³			Fraction massique		
	Paris	Alger	Raïs Hamidou	Paris	Alger	Raïs Hamidou
Ca	1,98	16,6	166	6,3%	14,4	44,3
Na	1,09	13	24	3,6%	11,1	7,2

Tableau N° 17 : Comparaison des éléments moyens mesurés à Paris et à Alger

La ville de Paris ne connaît pas l'influence des embruns marins d'où les faibles teneurs en Na par rapport à Alger.

A partir de cette étude comparative, on peut conclure deux points :

- A l'inverse des grandes métropoles européennes, Alger ne devrait pas faire l'objet d'une forte pollution par les métaux lourds.

- Par contre, les poussières issues du sol ou des embruns marins (Ca, K, Na) atteignent des teneurs extrêmement élevées qu'on ne rencontre pas dans les villes européennes et ce, en raison du temps pluvieux et l'entretien permanent et à tous les niveaux et dans toutes les directions.

CONCLUSION

CONCLUSION :

Dans le cadre de cette étude sur la contamination de l'atmosphère dans la région d'Alger, par les poussières, nous avons effectué une évaluation des concentrations des particules totales en suspension au niveau de Raïs Hamidou où se trouve implantée la plus vieille cimenterie du pays et au niveau d'un quartier populaire urbain à Bachdjarah.

Les résultats obtenus montrent que la zone de Raïs Hamidou est fortement polluée par les particules émises par la cimenterie. On y mesure en moyenne un taux de poussière de $217 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ce taux atteint parfois des maxima de 500 à $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les mesures effectuées révèlent que sur les deux mois du suivi, la norme internationale de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a été dépassée dans environ 50% des cas. Le percentile P95 s'élève quant à lui à $450 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les teneurs les plus basse sont mesurées soit durant les périodes pluvieuses où l'on a l'effet du lessivage de l'atmosphère par les précipitations, soit pendant les périodes d'arrêt prolongé de la production du ciment.

Le traitement statistique des résultats révèle que les teneurs des TSP se distribuent selon une loi log-normale et que la teneur maximale susceptible d'être atteinte au cours d'une année s'élève à pas moins de $930 \mu\text{g}/\text{m}^3$, soit six fois la norme sus-indiquée.

En ce qui concerne le site urbain de Bachdjarah, les résultats obtenus, bien qu'en nombre assez réduit, montrent que nous sommes en présence d'un niveau particulière caractéristique d'une pollution urbaine de fond. Les teneurs mesurées qui oscillent autour de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ restent en dessous de la norme et sont comparables à celles mesurées dans les grandes métropoles européennes.

La deuxième étape du travail consistait en l'étude des teneurs de certains métaux lourds et éléments alcalins et alcalino-terreux qui sont associés aux particules en suspension collectées.

Cette étude a montré que dans le cas des deux sites, c'est la pollution par la calcium, sodium et chlorures qui prédomine. Ces composés reflètent de part l'ampleur de leur teneur atmosphérique l'origine des sources polluantes :

- A Raïs Hamidou , les émissions de la cimenterie engendrent des teneurs très élevées en Ca.
- A Bachdjarah, la pollution d'origine naturelle engendre des taux moyens de Ca.
- et enfin, aux deux sites côtiers , des teneurs élevées en Na et Cl dues essentiellement aux embruns marins.

En ce qui concerne les éléments traces, les métaux lourds Fe, Mn, Cu et Pb, ils se retrouvent à des teneurs relativement faibles , de quelques ng/m^3 à quelques centaines de ng/m^3 selon l'élément considéré. Ces niveaux sont bien en deçà des métropoles. Notons toutefois que les teneurs du plomb atmosphérique sont en milieu urbain, en relation avec l'important trafic routier, 3 fois plus élevées qu'au site de Raïs Hamidou

On note par ailleurs que les particules urbaines d'Alger, sont, toutes proportions gardées, plus riches en métaux lourds que celles de Raïs Hamidou.

Il reste que d'autres études et des vérifications sur la reproductibilité des dosages sont nécessaires pour confirmer les faibles teneurs de Fe et en particulier du plomb urbain que nous avons enregistrées.

Enfin, et au vu des résultats obtenus, la principale recommandation qui s'impose est celle de veiller à ce que la cimenterie de Raïs Hamidou soit dotée le plus tôt possible d'un système adéquat de rétention des particules émises.

C'est à ce prix que les Raïs Hamidois, pourront enfin renouer avec un environnement propre et surtout respirer un air pur.

BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : J.P DETRIE " La pollution atmosphérique " DUNOD PARIS 1969.
- [2] : M. NAKIB " Cours pollution du sol " ENP ALGER 1994.
- [3] : A. ASSAILLY " Les poussières " QUE SAIS JE? N° 717 1956.
- [4] : F. RAMADE " Element d'écologie : action de l'homme sur la biosphère " Mc GRAW - HILL PARIS 1982.
- [5] : J.D. BUTLER " Air pollution chemistry " Academic Press LONDON 1979.
- [6] : C. DANG, J.P. FUNTELLE, R. LEYGUNIE, " Les émissions de poussières et généralités sur leurs mesures à l'émission ", Pollution Atmosphérique, Janvier - Mars 1990, pp 38-46.
- [7] : R. LEYGONIE " Les métaux lourds dans l'air : sources emissions, mesures, effets ", Pollution Atmosphérique, Juillet - Septembre 1993, pp 63-74.
- [8] : R. KERBACHI. " Cours de pollution atmosphérique " 5ème année, ENP ALGER 1994.
- [9] : M. PAPAKADIS et AL, " Industrie de la chaux, du ciment et du plâtre " DUNOD PARIS 1970.
- [10] : J.Y. REULT " Pollution particulaire de l'air ", Chaud - Froid - Plomberie (CFP) N°464, pp 155-163.
- [11] : J.C. RONNEAU " La pollution par les particules ", Conférences données à ENP ALGER 1992.
- [12] : A.C.STREN " Air pollution " Volume 3, Academic Press, 3ème édition, 1976.
- [13] : M. BOUGHEDAOU, R. KERBACHI " La pollution particulaire à Rais Hamidou, ampleur et dispersion " AJOT, Volume 10, série D, N°1, pp 149-168, 1994.
- [14] : R. SHAW, " La pollution par les particules atmosphériques, " Pour la Science Octobre 1987, pp 22-31.
- [15] : L.HERREBAUT, J.BEGUIN, " Mesure des pollutions particulières et gazeuses ", Nuisance et environnement, mai 1976, pp 24-28.
- [16] : F. PETIT-COVIAUX, A. PERSON et All, " Connaissances des particules atmosphériques en milieu urbain : représentativité biologique et difficultés météorologiques ", Pollution Atmosphérique, Janvier- mars 1990, pp 21-30.
- [17] : A.C .STERN, R.W. BOUBEL, D.B TURNER, D.L. FOX : Fundamental of air pollution, 2ème édition, 1984, Academic press.
- [18] : J.GONI, J.BEGNOW, G.BONNAUD, " Les poussières dans la pollution atmosphérique", Nuisances et Environnement, avril 1976, pp 37-41.
- [19] : C. BOUDENE, " Les métaux lourds en question ", Pollution Atmosphérique, juillet-sept 1993, pp 56-62.
- [20] : W.H SCHROEDER, M.DOBSON, D.M KANE, N.D JOHNSON, Toxic trace elements associated with Airborne particule matter : A Review. J.A. PC.A Vol 37 n°11, 1987, pp 1267-1285.
- [21] : K.OIKAWA, Trace analysis of atmospheric samples, Edition John Wiley et sons, London , 1977.
- [22] : J.RODIER, " L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer ", DUNOD, PARIS, 1984.
- [23] : Y.BOUTIN, R.LEDUC, " Les poussières en suspension à Québec ", Pollution Atmosphérique . oct- dec 1983, pp 292-298.

- [24] : E.LAHMANN, " Immissionsmessung in der.B.R.D ", staub, Band 47 n° 314, 1987, pp 82-87.
- [25] : C.HUTTER et J.HERTZ, Schwermetall- immissionen in der Gesamt deposition und schwebstand in wohn und Erholungsgebieten der stadt Zürich, Staub, Band 46, n° 7/8, 1986, pp327-333.
- [26] : PATRICK THOMAS, CYR VOISIN, " Huit années de mesures des métaux lourds dans l'atmosphère de l'agglomération lilloise ", Pollution Atmosphérique, juillet-septembre 1993, pp 89-97.
- [27] : A.VIALA, F.GOVEZO, B. MALLET, J.FONDARAL, " Mesure de quatre métaux traces (plomb, cadmium, chrome et zinc) dans les poussières atmosphériques à Marseille de 1977 à 1979 ", Pollution Atmosphérique, juil-sept 1981. pp 207-220.
- [28] : N. KOUTAL, " Etude de l'ozone et de ses précurseurs les NOx dans grand Alger ", Thèse de Magister, E.N.P, 1995
- [29] : J.P. OLIVIER, J.P VIDAL et R.STROEBEL, " Surveillance du plomb particulaire atmosphérique en sites urbains ", Pollution Atmosphérique, janvier-mars 1990, pp 31-37.
- [30] : A.PERSONN, F. PETIT -COVIAUX, Y LEMOULLEC et B.FESTY, " Contribution des principales sources en métaux et métalloïdes à la pollution particulaire dans l'agglomération parisienne ", Pollution Atmosphérique, juil-sept 1993, pp 75-87.

ANNEXE

ANNEXE:

D'après le modèle de LARSEN, la concentration maximale probable peut se calculer d'après la formule

$$C_{\max, 24 \text{ h}} = \text{médiane}(\text{sg})^z$$

L'exposant z est l'écart-type correspondant à la fréquence déterminée en fonction de la durée d'échantillonnage.

Nous présentons ci-dessous le tableau donnant la position des concentrations extrêmes (percentiles) et écarts-type z correspondants en fonction des durées d'échantillonnage.

Tableau : Fréquence des concentration maximales et écarts-type en fonction de la durée d'échantillonnage.

Durée d'échantillonnage	Percentiles %	Ecarts-type z
5 mn	0,000571	4,39
10mn	0,001142	4,24
30mn	0,00343	3,98
1 h	0,00685	3,81
3 h	0,02055	3,53
8 h	0,0548	3,26
12 h	0,0822	3,14
1 jour	0,1644	2,94
7 jours	1,153	2,27
1 mois	5,0	1,64
2 mois	10,0	1,28
6 mois	30,0	0,52
1 an	50,0	0,00