

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

# ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE DE L'ENVIRONNEMENT  
LABORATOIRE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'ENVIRONNEMENT

## MEMOIRE

En vue de l'obtention du Diplôme de Magistère  
en Génie de l'Environnement

OPTION : GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

### CONTRIBUTION A L'ETUDE, PAR CLASSE GRANULOMETRIQUE, DES AEROSOLS PARTICULAIRES SUR UN SITE DE PROXIMITE A L'ENP

Présenté par : Melle. OUCHER Nassima

Président	: Mr. MAMERI Nabil	Professeur, ENP
Directeur	: Mr. KERBACHI Rabah	Professeur, ENP
Examineurs	: Mme. BELHANECHÉ Naima	Professeur, ENP
	Mme. BELLAKROUF Amina	Maître de Conf., U. BOUMERDES
	Mme. KITOUS Ouiza	Chargée de Cours, ENP
Invité	: Mr. BOUKADOUM Abderrahmane	Chef de Service de l'Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable

Année Universitaire 2006-2007

## **DEDICACE**

*Je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers et proches ainsi, qu'à tous ceux qui m'ont aidé à faire aboutir ce travail.*

**Nassima.**

# **REMERCIEMENT**

*Tout d'abord louange à dieu tout puissant qui nous a donné toutes les capacités physiques et morales pour la réalisation du présent travail.*

*Nous le remercions également, car il nous a permis de rencontrer tout au long de notre parcours, un grand nombre de personnes douées d'intelligence et de gentillesse.*

*Nous adressons de même nos vifs remerciements à toutes les personnes qui ont contribué moralement et matériellement à la réalisation de ce travail, nous citons parmi eux :*

- ***Le Professeur KERBACHI Rabah** pour ces précieux conseils et son aimable aide.*
- ***Mr. MAMERI Nabil, Professeur à l'ENP** pour nous avoir fait l'honneur de présider ce jury.*
- ***Mme. BELHANECHÉ Naima, Mme. BELLAKROUF Amina et Mme. KITOUS Ouiza** pour leur bienveillante attention quant à l'examen de ce travail.*
- ***Mr. BOUKADOUM Abderrahmane** pour avoir honoré notre invitation.*
- ***Commandant DJENET de l'EMP** pour nous avoir accueilli à son laboratoire.*
- ***Mr. KERCHICH Yacine** pour sa présence et son aide.*
- ***Mlle CHEIKH Assira** pour son soutien et son aide.*
- *Mes Amies : **Fatima, Dalila, Aicha et Oumessaad***
- *Mes Responsables et Collègues de Travail.*
- *Sans oublier tous les Enseignants du Département et toute l'Équipe de Pollution Atmosphérique.*

**A Tous**  
**Un Grand Merci.**

## **ABREVIATIONS**

**TSP** = Particules Totales en Suspension.

**PM** = Particulates Matters

**PM-10** = Particules Inhalables.

**PM-2,5** = Particules Respirables ou Alvéolaires.

**PM-1** = Particules Très Fines.

**HAP** = Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.

**SOF** = Fraction Organique Soluble.

**OMS** = Organisation Mondiale de la Santé.

**FPD** = Filtre de Particules Diesel.

**GNC** = Gaz Naturel Carburant.

**EPA** = Environmental Protection Agency.

**HVS** = High Volume Sampler.

**TEOM** = Tapered Element Oscillating Microbalance.

**SAA** = Spectrométrie d'Adsorption Atomique.

**MFC** = Mass Flow Controller.

**D<sub>50</sub>** = Diamètre Median.

**R<sup>2</sup>** = Facteur de Corrélation.

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure N°I.1 :</b>	L'émission annuelle des PM 10 due au trafic routier en France	<b>08</b>
<b>Figures N°I.2 :</b>	Mécanismes de formation des particules secondaires	<b>11</b>
<b>Figure N°I.3 :</b>	Composition de l'aérosol atmosphérique et ses principales sources	<b>13</b>
<b>Figure N°I.4 :</b>	Proportions relatives des fractions chimiques composant les particules en fonction de leur taille	<b>15</b>
<b>Figure N°I.5 :</b>	Composants majeurs des PM 10 et leur proportion dans les particules fines PM-2,5 mesurées en Angleterre	<b>16</b>
<b>Figure N°I.6 :</b>	Composition chimique des PM-10 en site de proximité à Zurich	<b>17</b>
<b>Figure N°I.7 :</b>	Déplacement moyen par seconde des particules de différents diamètres	<b>20</b>
<b>Figure N°I.8 :</b>	Effets de l'agglomération et de la sédimentation sur une poussière atmosphérique ordinaire	<b>20</b>
<b>Figure N°I.9 :</b>	Présentation simplifiée de la distribution de taille des particules d'un aérosol atmosphérique proche des sources et des processus les plus importants	<b>21</b>
<b>Figure N°II.1 :</b>	Appareil respiratoire et pénétration des particules	<b>26</b>
<b>Figure N°IV.1 :</b>	Variation de l'efficacité de collecte d'une tête de prélèvement	<b>37</b>
<b>Figure N°IV.2 :</b>	Tête de prélèvement NF X 43-021	<b>38</b>
<b>Figure N°IV.3 :</b>	Tête de prélèvement PM-10	<b>38</b>
<b>Figure N°IV.4 :</b>	Tête de prélèvement PM-2.5	<b>39</b>
<b>Figure N°V.1 :</b>	L'échantillonneur HVS PM -10 avec cascadeur d'Andersen pour la collecte des PM-i	<b>45</b>
<b>Figure N°V.2 :</b>	Étages du cascadeur d'Andersen et classes granulométriques recueillies	<b>46</b>
<b>Figure N°V.3 :</b>	Schéma simplifié du mode d'échantillonnage	<b>47</b>
<b>Figure N°VI.1 :</b>	Photo d'un filtre de fractionnement granulométrique chargé par les PM -3	<b>50</b>
<b>Figure N°VI.2 :</b>	Photo d'un filtre de l'étage terminal chargé par les PM-1	<b>50</b>
<b>Figure N°VI.3a :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en PM-i mesurées à l'ENP (Alger)	<b>51</b>
<b>Figure N°VI.3b :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en PM-i mesurées à l'ENP (Alger)	<b>52</b>
<b>Figure N°VI.3c :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en PM-i mesurées à l'ENP (Alger)	<b>53</b>
<b>Figure N°VI.3d :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en PM-i mesurées à l'ENP (Alger)	<b>54</b>
<b>Figure N°VI.4 :</b>	Teneurs moyennes des PM-i	<b>55</b>
<b>Figure N°VI.5 :</b>	Répartition massique des particules collectées par classe granulométrique	<b>57</b>
<b>Figure N°VI.6 :</b>	Diagramme log-probabilité de la masse cumulée des particules en fonction du diamètre.	<b>59</b>
<b>Figure N°VI.7 :</b>	Teneurs moyennes en PM-i et contribution (en % massique) aux PM-10	<b>60</b>
<b>Figure N°VI.8 :</b>	Distribution bimodale des particules.	<b>61</b>
<b>Figure N°VI.9 :</b>	Évolution des teneurs en PM-1, PM-3 et PM-10 mesurées à Alger	<b>62</b>
<b>Figure N°VI.10 :</b>	Corrélation entre les teneurs en PM-1 et PM-10	<b>63</b>
<b>Figure N°VI.11 :</b>	Corrélation entre les teneurs en PM-1 et PM-3	<b>63</b>
<b>Figure N°VI.12 :</b>	Corrélation entre les teneurs en PM-3 et PM-10	<b>63</b>
<b>Figure N°VI.13a :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Fe mesurées à l'ENP (Alger)	<b>68</b>
<b>Figure N°VI.13b :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Fe mesurées à l'ENP (Alger)	<b>68</b>
<b>Figure N°VI.13c :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Fe mesurées à l'ENP (Alger)	<b>69</b>
<b>Figure N°VI.13d :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Fe mesurées à l'ENP (Alger)	<b>69</b>
<b>Figure N°VI.14a :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Pb mesurées à l'ENP (Alger)	<b>70</b>
<b>Figure N°VI.14b :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Pb mesurées à l'ENP (Alger)	<b>70</b>
<b>Figure N°VI.14c :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Pb mesurées à l'ENP (Alger)	<b>71</b>
<b>Figure N°VI.14d :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Pb mesurées à l'ENP (Alger)	<b>71</b>
<b>Figure N°VI.15a :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Cu mesurées à l'ENP (Alger)	<b>72</b>
<b>Figure N°VI.15b :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Cu mesurées à l'ENP (Alger)	<b>72</b>
<b>Figure N°VI.15c :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Cu mesurées à l'ENP (Alger)	<b>73</b>
<b>Figure N°VI.15d :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Cu mesurées à l'ENP (Alger)	<b>73</b>

<b>Figure N°VI.16a :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Mn mesurées à l'ENP (Alger)	<b>74</b>
<b>Figure N°VI.16b :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Mn mesurées à l'ENP (Alger)	<b>74</b>
<b>Figure N°VI.16c :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Mn mesurées à l'ENP (Alger)	<b>75</b>
<b>Figure N°VI.16d :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Mn mesurées à l'ENP (Alger)	<b>75</b>
<b>Figure N°VI.17a :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Ni mesurées à l'ENP (Alger)	<b>76</b>
<b>Figure N°VI.17b :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Ni mesurées à l'ENP (Alger)	<b>76</b>
<b>Figure N°VI.17c :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Ni mesurées à l'ENP (Alger)	<b>77</b>
<b>Figure N°VI.17d :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Ni mesurées à l'ENP (Alger)	<b>77</b>
<b>Figure N°VI.18a :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Co mesurées à l'ENP (Alger)	<b>78</b>
<b>Figure N°VI.18b :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Co mesurées à l'ENP (Alger)	<b>78</b>
<b>Figure N°VI.18c :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Co mesurées à l'ENP (Alger)	<b>79</b>
<b>Figure N°VI.18d :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Co mesurées à l'ENP (Alger)	<b>79</b>
<b>Figure N°VI.19a :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Cd mesurées à l'ENP (Alger)	<b>80</b>
<b>Figure N°VI.19b :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Cd mesurées à l'ENP (Alger)	<b>80</b>
<b>Figure N°VI.19c :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Cd mesurées à l'ENP (Alger)	<b>81</b>
<b>Figure N°VI.19d :</b>	Evolution des teneurs atmosphériques en Cd mesurées à l'ENP (Alger)	<b>81</b>
<b>Figure N°VI.20 :</b>	Distribution des teneurs atmosphériques moyennes des métaux dans chaque classe granulométrique	<b>82</b>
<b>Figure N°VI.21 :</b>	Pourcentage massique moyen des métaux dans chaque classe granulométrique	<b>83</b>
<b>Figures N°VI.22 :</b>	Corrélation des métaux lourds dans les PM-10	<b>85</b>
<b>Figures N°VI.23 :</b>	Corrélation des métaux lourds dans les PM-3	<b>86</b>
<b>Figures N°VI.24 :</b>	Corrélation des métaux lourds dans les PM-1	<b>86</b>
<b>Figure N°VI.25 :</b>	Diagramme log-probabilité de la masse cumulée du Fe et du Pb en fonction du diamètre des particules collectées.	<b>88</b>
<b>Figure N°VI.26 :</b>	Courbes de Distribution du Fer et du Plomb	<b>89</b>
<b>Figures N°VI.22</b>	<b>Corrélation des métaux lourds dans les PM-10</b>	<b>95</b>
<b>Bis-a :</b>		
<b>Figures N°VI.22</b>	<b>Corrélation des métaux lourds dans les PM-10</b>	<b>96</b>
<b>Bis-b :</b>		
<b>Figures N°VI.22</b>	<b>Corrélation des métaux lourds dans les PM-10</b>	<b>97</b>
<b>Bis-c :</b>		
<b>Figures N°VI.22</b>	<b>Corrélation des métaux lourds dans les PM-10</b>	<b>98</b>
<b>Bis-d :</b>		
<b>Figures N°VI.23</b>	<b>Corrélation des métaux lourds dans les PM-3</b>	<b>99</b>
<b>Bis-a :</b>		
<b>Figures N°VI.23</b>	<b>Corrélation des métaux lourds dans les PM-3</b>	<b>100</b>
<b>Bis-b :</b>		
<b>Figures N°VI.23</b>	<b>Corrélation des métaux lourds dans les PM-3</b>	<b>101</b>
<b>Bis-c :</b>		
<b>Figures N°VI.23</b>	<b>Corrélation des métaux lourds dans les PM-3</b>	<b>102</b>
<b>Bis-d :</b>		
<b>Figures N°VI.24</b>	<b>Corrélation des métaux lourds dans les PM-1</b>	<b>103</b>
<b>Bis-a :</b>		
<b>Figures N°VI.24</b>	<b>Corrélation des métaux lourds dans les PM-1</b>	<b>104</b>
<b>Bis-b :</b>		
<b>Figures N°VI.24</b>	<b>Corrélation des métaux lourds dans les PM-1</b>	<b>105</b>
<b>Bis-c :</b>		
<b>Figures N°VI.24</b>	<b>Corrélation des métaux lourds dans les PM-1</b>	<b>106</b>
<b>Bis-d :</b>		

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau N°I.1 :</b>	Taux d'émission des particules anthropiques	<b>08</b>
<b>Tableau N°I.2 :</b>	Taille, origine, composition et source des particules	<b>08</b>
<b>Tableau N°I.3 :</b>	Valeurs médianes des émissions de métaux de sources naturelles et anthropogénique tonnes/an	<b>09</b>
<b>Tableau N°I.4 :</b>	Principales caractéristiques influant sur la formation des particules diesel	<b>12</b>
<b>Tableau N°I.5 :</b>	Les principales formes de particules	<b>14</b>
<b>Tableau N°I.6 :</b>	Forme des particules et leur pourcentage pour un diamètre $\phi > 0.1 \mu\text{m}$	<b>14</b>
<b>Tableau N°I.7 :</b>	Vitesse de sédimentation de quelques particules sphériques	<b>17</b>
<b>Tableau N°II.1 :</b>	Mode et site de dépôt des particules dans l'appareil respiratoires	<b>26</b>
<b>Tableau N°II.2 :</b>	Résumé selon l'OMS des effets sur la santé causés par un bref accroissement des PM-10 et PM-2,5	<b>27</b>
<b>Tableau N°II.3 :</b>	Résultats des études sur les effets à long terme de l'exposition aux PM-10 et PM-2,5	<b>28</b>
<b>Tableau N°II.4 :</b>	Concentrations moyennes des particules et effets sur la santé	<b>28</b>
<b>Tableau N°II.5 :</b>	Effets toxiques de certains métaux lourds sur la santé	<b>30</b>
<b>Tableau N°III.1 :</b>	Valeurs guides de l'OMS de 1996 pour les métaux lourds	<b>35</b>
<b>Tableau N°III.2 :</b>	Normes de la future directive européenne relative aux métaux lourds	<b>35</b>
<b>Tableau N°IV.1 :</b>	Principales méthodes d'échantillonnage de la matière particulaire en suspension	<b>41</b>
<b>Tableau N°VI.1 :</b>	Teneurs moyennes et extrêmes en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des PM-i mesurées à l'ENP (Alger)	<b>49</b>
<b>Tableau N°VI.2 :</b>	Variations saisonnières des teneurs atmosphériques en particules	<b>55</b>
<b>Tableau N°VI.3 :</b>	Directions des vents dominants (%) mesurées à la station métrologique de Dar-EI-Beida	<b>56</b>
<b>Tableau N°VI.4 :</b>	Moyenne mensuelle des vitesses de vent (en m/s) mesurées à la station métrologique de Dar-EI-Beida	<b>56</b>
<b>Tableau N°VI.5 :</b>	Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique	<b>58</b>
<b>Tableau N°VI.6 :</b>	Calcul de la distribution modale des particules	<b>61</b>
<b>Tableau N°VI.7 :</b>	Normes et valeurs guides régissant les PM-10	<b>65</b>
<b>Tableau N°VI.8 :</b>	Teneurs atmosphériques en PM-10 et PM-2,5 mesurées dans certaines villes	<b>66</b>
<b>Tableau N°VI.9 :</b>	Teneurs atmosphériques moyennes des métaux lourds mesurées à Alger	<b>82</b>
<b>Tableau N°VI.10 :</b>	Distribution des fractions massiques moyennes des métaux lourds selon la classe granulométrique	<b>83</b>
<b>Tableau N°VI.11 :</b>	Distribution granulométrique des métaux lourds	<b>84</b>
<b>Tableau N°VI.12 :</b>	Facteurs de corrélation entre les métaux lourds dans les PM-10	<b>85</b>
<b>Tableau N°VI.13 :</b>	Facteurs de corrélation entre les métaux lourds dans les PM-3	<b>85</b>
<b>Tableau N°VI.14 :</b>	Facteurs de corrélation entre les métaux lourds dans les PM-1	<b>85</b>
<b>Tableau N°VI.15 :</b>	Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique pour le Fe	<b>87</b>
<b>Tableau N°VI.16 :</b>	Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique pour le Pb	<b>87</b>

## SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION	01
I. GENERALITES SUR LA POLLUTION DE L'AIR PAR LES AEROSOLS PARTICULAIRES	03
<u>I.1 DEFINITION DE LA POLLUTION PARTICULAIRE</u>	03
<u>I.2 ORIGINES ET SOURCES D'EMISSION DES PARTICULES EN SUSPENSION</u>	04
I.2-1 Les sources naturelles	04
I.2-2 Les sources artificielles	05
<u>I.3 MECANISME DE FORMATION DES PARTICULES EN SUSPENSION</u>	10
I.3-1 Particules primaires	10
I.3-2 Particules secondaires	10
I.3-3 Formation des particules dans les différents types de moteurs	11
<u>I.4 CARACTERISTIQUES DES PARTICULES EN SUSPENSION</u>	13
I.4.1 Forme des particules	13
I.4.2 Composition chimique	14
I.4.3 Dynamique des particules	17
<u>I.5 DISPERSION DES PARTICULES EN SUSPENSION</u>	21
I.5.1 La turbulence atmosphérique	21
I.5.2 Le vent	22
I.5.3 La température	22
I.5.4 La stabilité et l'instabilité atmosphérique	22
I.5.5 Les précipitations	23
II. EFFETS DES PARTICULES EN SUSPENSION SUR LA SANTE ET L'ENVIRONNEMENT	24
<u>II.1 GENERALITES</u>	24
<u>II.2 EFFETS SUR LA SANTE</u>	24
II.2.1 Cheminement des particules dans le système respiratoire	25
II.2.2 Effets à court et long terme des aérosols particuliers	26
<u>II.3 EFFETS SUR LES ANIMAUX</u>	29
<u>II.4 EFFETS SUR LES VEGETAUX</u>	29
<u>II.5 EFFETS SUR LES MATERIAUX</u>	29
<u>II.6 EFFETS SUR LA VISIBILITE</u>	30
<u>II.7 EFFETS TOXIQUES DES METAUX LOURDS</u>	30
II.7.1 Effets sur la santé	30
II.7.2 Les effets sur l'environnement	32
III. REGLEMENTATION ET LUTTE CONTRE LA POLLUTION PARTICULAIRE	33
<u>III.1 LA LUTTE CONTRE LA POLLUTION PARTICULAIRE</u>	33
<u>III.2 LE FILTRE A PARTICULES DIESEL (FPD)</u>	33

<b><u>III.3 LA SURVEILLANCE DES PARTICULES DANS L'AIR AMBIANT</u></b>	<b>34</b>
<b><u>III.4 SURVEILLANCE ET NORMES DE RESTRICTION SUR LES METAUX LOURDS</u></b>	<b>34</b>
<b>IV. PRINCIPALES METHODES DE MESURE ET D'ANALYSE DES PARTICULES EN SUSPENSION</b>	<b>36</b>
<b><u>IV.1 ECHANTIONNAGE</u></b>	<b>36</b>
IV.1.1 Les prélèvements sans coupure granulométrique précise	36
IV.1.2 Les prélèvements avec coupure granulométrique	37
IV.1.3 Les prélèvements avec fractionnement granulométrique	39
<b><u>IV.2 LA MESURE EN TENEUR ATMOSPHERIQUE EN PARTICULES</u></b>	<b>40</b>
IV.2.1 La méthode gravimétrique (échantillonneur à grand débit)	40
IV.2.2 La réflectométrie (indice de fumées noires)	40
IV.2.3 La radiométrie (jauge bêta)	40
IV.2.4 La microbalance à variation de fréquence (TEOM : Tapered Element Oscillating Microbalance)	41
IV.2.5 La mesure optique	41
<b><u>IV.3 L'ANALYSE DES PARTICULES EN SUSPENSION</u></b>	<b>42</b>
<b>V. METHODOLOGIE</b>	<b>44</b>
<b><u>V.1 SITE DE PRELEVEMENT</u></b>	<b>44</b>
<b><u>V.2. MODE DE PRELEVEMENT</u></b>	<b>44</b>
<b><u>V.3 ANALYSE DES METAUX LOURDS</u></b>	<b>48</b>
<b>VI. RÉSULTATS ET DISCUSSION</b>	<b>49</b>
<b><u>VI.1 ETUDE DES NIVEAUX DE POLLUTION PAR LES AEROSOLS PARTICULAIRES</u></b>	<b>49</b>
VI.1.1 Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-i	49
VI.1. 2 Calcul du diamètre médian $d_{50}$ et des PM-2,5	57
VI.1.3 Etude de la distribution modale des particules atmosphériques	60
VI.1.4 Corrélations entre les PM-1, PM-3 et PM-10	61
VI.1.5 Ampleur de la pollution : comparaison aux normes et situation par rapport à d'autres pays	64
<b><u>VI.2 ETUDE ET AMPLEUR DES MÉTAUX LOURDS ASSOCIÉS AUX PARTICULES FINES</u></b>	<b>67</b>
VI.2.1 Niveaux de pollution par les métaux lourds	67
VI.2.2 Corrélations entre les métaux lourds	84
VI.2.3 Exploitation statistique des teneurs atmosphériques en métaux lourds	87
<b>CONCLUSION</b>	<b>90</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>91</b>
<b>ANNEXE</b>	<b>95</b>

# **INTRODUCTION**

## INTRODUCTION

La pollution de l'air par les particules en suspension, en général et la fraction fine de ces particules, en particulier, fait ces dernières années l'objet d'une attention soutenue. De part leur finesse et les interactions qu'ils subissent, ces aérosols particuliers séjournent longtemps dans l'atmosphère et contribuent fortement à la dégradation de la qualité de l'air.

Plusieurs travaux effectués en Europe et aux USA ont montré que sur le plan sanitaire, les particules fines représentent en milieu urbain un indicateur majeur de la qualité de l'air [1, 2, et 3]. De nombreuses et cohérentes études leur attribuent une forte responsabilité dans la survenue d'une vaste gamme d'effets biologiques et sanitaires [4 et 5]. Leur impact sur l'environnement et les nuisances qu'elles engendrent dépendent toutefois de leur granulométrie et de leur composition chimique, elle-même liée à leurs sources d'émission [6].

En vertu du cheminement des particules dans le système respiratoire et de leur rétention dans le corps humain, ce sont surtout les PM-10, particules fines inhalables de diamètre inférieur à 10 $\mu$ m qui sont les plus incriminées et donc aussi les plus étudiées. Les particules PM-10 ne sont pas arrêtées par le système nasopharyngien et aboutissent dans les voies respiratoires profondes [6]. Comme le potentiel nuisance des aérosols particuliers est accrue par la présence de particules très fines qui atteignent les alvéoles du segment pulmonaire, la communauté scientifique accorde de plus en plus d'importance à l'étude de la fraction alvéolaire ou fraction respirable, les PM-2,5 (particules de diamètre inférieur à 2,5 $\mu$ m). L'importance et le rôle que jouent ces aérosols particuliers en tant que vecteurs essentiels de la pollution atmosphérique (maladies obstructives des voies aériennes, bronchites chroniques, mortalité cardio-vasculaire, etc.) a fait que de nombreux pays ont récemment révisé les normes existantes ou proposé de nouvelles réglementations.

Ces particules fines véhiculent principalement des imbrûlés et noyaux carbonés issus de processus de combustion, des particules secondaires issues de la conversion gaz / particules, des éléments minéraux liés à l'érosion des sols et à la remise en suspension des particules déposées ainsi que divers métaux lourds toxiques tels que le Pb, Cu, Ni, Cr, etc. qui jouent sans doute un rôle important dans la toxicité de l'aérosol.

Les activités du transport contribuent de manière importante à la pollution de l'air par les particules. En milieu urbain, le trafic routier constitue, en effet l'une des principales sources émettrices de particules fines. Les véhicules diesel et, à un degré moindre, les véhicules à essence émettent majoritairement des particules très fines de granulométrie inférieure à 1 $\mu$ m [7]. C'est ainsi qu'avec la diésélisation de plus en plus forte du parc automobile qu'on observe ces dernières années un peu partout en Europe et même en Algérie, on se focalise de plus en plus sur l'étude des particules PM-1 qui se déposent de manière irréversible dans les voies respiratoires terminales et sur lesquelles s'adsorbent des composés très toxiques comme les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques).

On constate ainsi que l'augmentation des déplacements motorisés est telle que les émissions polluantes s'accroissent, et ce malgré les progrès techniques réalisés sur les véhicules et carburants pour les limiter. Il apparaît un conflit inéluctable entre, d'une part, le désir et le besoin d'accroître la mobilité des personnes et des biens et d'autre part, la nécessité de réduire la pollution générée.

Toutes ces indications font que de nos jours, l'étude des différentes fractions de particules véhiculées par les aérosols atmosphériques constitue un axe important dans l'évaluation globale de la pollution de l'air.

En Algérie, la croissance du parc automobile induite par le développement socio-économique et la forte urbanisation ont conduit à l'émergence chez la population citadine de maladies chroniques liées à la dégradation de la qualité de l'air.

Des études récentes ont montré que le Grand Alger est, comme toute grande agglomération urbaine, confronté à une intense pollution atmosphérique [8 ,9 et 10]. La principale source d'émission est le trafic routier. Pour arriver à formuler une stratégie de prévention, il est toutefois nécessaire d'avoir des données sur les niveaux et types de pollution ainsi que les composés qu'elle véhicule.

Aussi et en continuité des travaux antérieurs effectués sur les particules inhalables [11], nous avons étudié la pollution de l'air par les aérosols particuliers par classe granulométrique et évalué les niveaux de pollution par les PM-10, PM-2,5 et PM-1 atteints à Alger en site influencé par les émissions du trafic routier et où l'exposition des populations est maximale. Les métaux lourds Fe, Pb, Cu, Ni, Mn, Co et Cd associés à ces particules et leur contribution à la pollution globale ont été également étudiés.

# CHAPITRE I

# **I. GENERALITES SUR LA POLLUTION DE L'AIR PAR LES AEROSOLS PARTICULAIRES**

## **I.1 DEFINITION DE LA POLLUTION PARTICULAIRE**

Les aérosols particuliers se caractérisent par la suspension dans l'air de fines particules solides ou liquides, dont la dimension est de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$  au moins dans l'air au repos et de quelques centaines de microns dans l'air en mouvement (tempête) [12].

L'aérosol de pollution se définit par sa nature chimique, sa forme, sa densité, sa granulométrie et sa concentration en nombre (particules par  $\text{m}^3$  d'air) ou en poids (milligrammes ou microgrammes par  $\text{m}^3$ ) [12].

La taille des particules est déterminante quant aux effets sur la santé car leur cheminement dans l'appareil respiratoire dépend de leur granulométrie [13, 14, 15 et 3] :

Dans la littérature, et pour traduire la grande diversité des particules dans leur origine, leur composition et leur comportement aérodynamique, on utilise différents termes pour qualifier la pollution particulaire. Les termes les plus employés sont [16 et 17] :

- **Les aérosols** : ce sont des suspensions, dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides ou les deux présentant une vitesse de chute négligeable. Ce qui dans l'air et dans les conditions normales, correspond à des particules de dimensions inférieures à 100  $\mu\text{m}$ , les plus fines ayant des dimensions de quelques angströms.
- **Les fumées noires** : ce sont des particules carbonées de diamètre inférieur à 5  $\mu\text{m}$  ;
- **Les suies** : il s'agit de particules de carbone et d'imbrûlés que produisent les combustibles qui ne brûlent qu'incomplètement ;
- **Les poussières** : sont faites de particules solides inférieures à 75  $\mu\text{m}$ , les plus grosses retombent près de la source d'émission ;
- **Les brumes** : sont des ensembles de gouttelettes dans un gaz. Les particules dans les brumes ont des dimensions supérieures à 1  $\mu\text{m}$ . c'est le cas par exemple des brumes marines qui contiennent des particules de sels ;
- **Les cendres volantes** : les cendres désignent les résidus solides subsistants après combustion des matériaux carbonés. Ces cendres finement divisées sont entraînées dans les fumées de combustion pour donner des cendres volantes ;
- **Les particules** : ce terme englobe l'ensemble des définitions précédentes, indifféremment des propriétés physico-chimiques de chacune d'elles.

Cette diversité dans le type de particules étudiées a fait qu'il était difficile de comparer les niveaux de pollution mesurés d'une région à une autre et d'un pays à un autre.

Ces dernières années et suite à la standardisation des échantillonneurs de prélèvement et de collecte, aux recommandations des études épidémiologiques et à l'adoption dans plusieurs pays de seuil limites à ne pas dépasser, on assiste à une certaine uniformisation et homogénéisation dans l'étude des particules aéroportées. Les anciennes définitions sont de plus en plus délaissées au profit de nouvelles qui portent sur :

- **Les particules totales en suspension (TSP)** : ces particules de diamètre inférieur à 30-40  $\mu\text{m}$  séjournent longtemps dans l'atmosphère et sont en général captées par le segment extra thoracique (elles sont arrêtées au niveau de la bouche et du nez) ;

- **Les particules inhalables appelées PM-10 (PM = particulates matters) :** de diamètre aérodynamique moyen inférieur à 10 µm, ces particules peuvent pénétrer dans le système respiratoire ;
- **Les particules respirables ou alvéolaires, PM-2,5 :** c'est la fraction de particules en suspension qui ont une granulométrie inférieure à 2,5 µm. Ces particules pénètrent profondément dans le système respiratoire pour atteindre les alvéoles ;
- **Les particules très fines, PM-1 :** ces particules se forment par coagulation et agglomération de particules submicroniques. Comme les PM-2,5, les PM-1 atteignent les alvéoles où elles se déposent de manière irréversible.

## **I.2 ORIGINES ET SOURCES D'EMISSION DES PARTICULES EN SUSPENSION**

Les particules en suspension, quelque soit leur granulométrie, sont constituées de particules primaires, c'est à dire des particules émises directement par les sources polluantes, et de particules secondaires qui ne sont pas émises directement mais qui résultent de la conversion dans l'atmosphère de polluants gazeux en particules solides : c'est la conversion gaz-particules [18].

L'ensemble de ces particules peuvent être d'origine naturelle ou d'origine artificielle appelée aussi origine anthropique ou anthropogénique [18].

### **I.2-1 Les sources naturelles [13, 19, 20 et 15] :**

Les phénomènes naturels sont à l'origine d'une importante émission de particules dans l'atmosphère. Annuellement et à l'échelle mondiale, la production de particules naturelles est estimée à environ  $2\ 096 \cdot 10^6$  tonnes [21].

Dans certains cas, la capacité de pollution par les sources naturelles peut être considérable ; c'est le cas par exemple lors du soulèvement dans l'atmosphère des particules du sol ou lors d'éruptions volcaniques, etc.

Cependant en général, on attribue une importance moindre à la pollution due aux sources naturelles et ce pour deux raisons [21] :

- Elle est produite par les substances qui ont généralement un effet nocif faible ou bien qui se transforment assez rapidement en composés inoffensifs entrant dans les cycles biologiques naturels ;
- Elle provient de sources émettrices dispersées et souvent éloignées des grandes agglomérations urbaines.

Parmi les sources naturelles on compte :

- L'érosion éolienne (la poussière du sol et les particules minérales emportées par le vent) ;
- Les éruptions volcaniques (cendres volcaniques) dans lesquelles on retrouve par exemple les particules de sulfates issues de la conversion de SO<sub>2</sub> ;
- Les embruns et sels marins (le brouillard marin) qui après évaporation donnent des particules de NaCl ;
- Les particules d'origine extraterrestre qui proviennent de la décomposition de météorites ;
- Les composées biologiques (le pollen, les spores et les bactéries) ;
- La fumée des incendies de forêts causée par exemple par la foudre.

## I.2-2 Les sources artificielles [13] :

Les sources artificielles liées à toutes les activités humaines produisent à la fois :

- **des particules fines** issues des processus de combustion et de diverses activités industrielles ;
- **des particules grossières** issues des champs agricoles, des routes, des chantiers de construction, ...

Les sources artificielles peuvent être classées d'après plusieurs critères selon :

- qu'elles résultent de phénomènes de combustion ou de mécanismes plus spécifiques ;
- qu'elles soient ponctuelles ou diffuses ;
- qu'elles soient fixes ou mobiles.

De ce dernier classement, on trouve alors.

### a) **Les sources fixes :**

Tous les processus de combustion et la plupart des branches industrielles sont génératrices de particules dans l'air.

- **L'industrie thermo énergétique [22]** : La combustion induit dans l'atmosphère plusieurs variétés minérales, des métaux et des particules carbonées (suies), ainsi que des gaz qui se transforment dans l'atmosphère en particules tels que (les  $\text{NO}_x$  et le  $\text{SO}_2$ ).
- **L'industrie sidérurgique [21]** : Les principaux polluants issus de ce domaine sont des poussières de composition chimique variable et de granulométrie entre 2 et 100  $\mu\text{m}$  ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{AlO}_3$ ,  $\text{CaO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{ZnO}$ , ...) et des particules fines entre autre les fumées d'oxyde de fer. Ces émissions sont le résultat de différents processus de production à savoir : l'agglomération et « frittage » des minerais, la cokéfaction, la fusion dans les hauts fourneaux, le chauffage, le transport, etc.
- **L'industrie des matériaux non ferreux [21]** : Elle participe à l'émission d'importantes quantités de Pb, Zn, Cu, Cd, Ni, Hg,.... Lors du raffinage de ces métaux au cours des opérations de fusion, des vapeurs métalliques se répandent dans l'air, s'oxydent et se subliment en fines particules, qui sont entraînées sur de longues distances par la circulation de l'air.
- **L'industrie des matériaux de construction [21]** : La production des matériaux de construction contribue fortement à la pollution particulaire à cause des procédés d'extraction, de transport, de broyage et de fusion des minerais. Les cimenteries sont des grandes émettrices de poussières, du fait de l'importance des quantités de ciment produites et des roches utilisées pour sa production.
- **L'industrie chimique [20]** : ne présente pas une importante source de poussière dans l'air, mais participe d'une manière indirecte dans la pollution par l'émission des gaz qui se transforment en particules. Certains métaux (Cd) et certains hydrocarbures aromatiques polycycliques sont produits dans l'air par les raffineries de pétrole.
- **L'incinération des déchets [23]** : engendre l'émission de grandes quantités de particules. Ces particules peuvent contenir d'importantes quantités de métaux (Fe, Zn, Cd, Pb, Hg) et des oxydes métalliques divers dont la toxicité est considérable. En plus de ces particules, on trouve les gaz qui dans l'air se transforment en particules ( $\text{SO}_2$ ).

## **b) Les sources mobiles :**

Le parc automobile, dont le volume croit continuellement, constitue en milieu urbain la principale source d'émission de particules [21].

La pollution issue du trafic routier comprend les émissions suivantes :

### **➤ Les particules routières [14] :**

Le trafic automobile émet surtout des halogénures (bromures et chlorures) de plomb, volatils à la température du gaz à l'échappement, mais qui ensuite, par hydrolyse de ces sels, engendrent dans l'atmosphère des acides chlorhydriques (HCl) et bromhydriques (HBr) qui ne restent pas en général sous forme gazeuse mais se retrouvent adsorbés par les poussières atmosphériques. Ces rejets se présentent alors dans la gamme granulométrique des PM-2,5.

### **➤ Les particules diesel [24] :**

Les moteurs diesel émettent des particules toxiques capables d'atteindre les alvéoles pulmonaires. Ainsi, leur diamètre aérodynamique moyen est centré sur 0,1 µm en sortie d'échappement. Le diesel dégage une pollution spécifique visible, des fumées noires et des suies constituées de particules de carbone et imprégnées de diverses substances, en particulier d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Ainsi, les particules diesel sont principalement constituées :

- de résidus solides sous forme de suies (carbone élémentaire et carbone organique) ;
- d'une partie soluble constituée d'hydrocarbures imbrûlés, principalement les HAP, issus de la combustion incomplète du carburant diesel ;
- d'une fraction insoluble (carbone non fonctionnalisé, etc.).

Ce sont en fait, des particules solides avec une structure fractale qui s'apparente à une éponge. Des mesures effectuées en site proche du trafic révèlent qu'environ 75% du carbone suie se trouve dans la fraction granulométrique inférieure à 1 µm, le reste étant à associer à des particules plus grossières. Ce qui démontre bien l'importance et la spécificité de la pollution diesel.

### **➤ Les métaux lourds :**

Parmi ces composés c'est surtout le plomb qui, de loin est 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 0.15g à 0.4g/l il est rejeté presque totalement dans l'atmosphère des villes [25].

On estime qu'environ 16% de la production globale du plomb était destinée à être utilisé comme additif dans l'essence. Une voiture utilisant une essence à 0.15 g/l de plomb peut émettre 100 à 150 mg/Km de particules dont la masse en plomb peut dépasser les 25% [21]. Il y'a quelque années, les émissions de plomb issues du trafic routier étaient estimées à 248.10<sup>6</sup> Kg/an [26].

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

### **➤ Les micro-suies [24] :**

Leur granulométrie est très largement inframicronique (0,05 à 0,1 micromètres), et elles sont émises par la combustion du fioul léger (moteurs diesel), de l'essence, du kérosène et du gaz. Elles sont essentiellement carbonées, mais peuvent contenir du soufre si le combustible dont elles sont issues en contient. Leur concentration atmosphérique serait en augmentation, en rapport avec le trafic automobile. Ces particules sont les plus

dangereuses pour la santé humaine car elles sont susceptibles de pénétrer dans les alvéoles pulmonaires.

Par ailleurs, elles contaminent les plus hautes couches atmosphériques et sont donc responsables d'une pollution globale. Les plus fines particules peuvent s'agréger aux plus importantes sous l'action des forces d'adhésion, de capillarité et de tension superficielle.

La moitié des particules fines ont un diamètre inférieur à 2  $\mu\text{m}$  sur une échelle allant jusqu'à 10  $\mu\text{m}$ .

Globalement on constate que [24, 27 et 28] :

- Près de 80 % des particules contenant du plomb sont inférieures à 2  $\mu\text{m}$ , ce qui confirme l'origine automobile de cette granulométrie ;
- Dans les émissions diesel, la quasi totalité du carbone élémentaire est contenue dans la fraction inférieure à 1  $\mu\text{m}$ , d'où l'importance de l'étude des PM-1 pour appréhender la pollution engendrée par le trafic routier ;
- Environ 80 % des particules contenant des HAP ou étant génotoxiques ont un diamètre inférieur à 2  $\mu\text{m}$ , or ces éléments sont préoccupants pour la santé ;
- Enfin, les particules contenant du Fer ou du Manganèse sont davantage grossières, 60 % d'entre elles faisant plus de 3,3  $\mu\text{m}$ .

Outre la fraction qui sort des pots d'échappements, les particules routières sont constituées d'un mélange hétérogène issu de [14] :

- L'usure de la chaussée (quartz, gypse...) arrachée par les pneus des véhicules, le sel et le sable utilisés l'hiver.
- L'usure des pneumatiques (noir de carbone, calcium, soufre, zinc...) avec des tailles supérieures à 7  $\mu\text{m}$ . Ainsi, un pneu perd 10 % de sa masse au cours de sa durée de vie.
- Des garnitures de frein et d'embrayage qui contiennent parfois encore une certaine quantité de fibres d'amiante.
- Des pots d'échappement (fer, plomb, carbone) avec aussi des oxydes métalliques comme les oxydes de calcium provenant des additifs des lubrifiants et l'oxyde d'aluminium provenant des supports des catalyseurs.

Ces résidus et débris sont constamment remis en suspension lors du passage des véhicules et par la turbulence induite.

Dans certaines grandes métropoles, la pollution issue du trafic routier s'élève à 20-30% de l'ensemble des sources. A Londres (en 2001), le trafic routier contribuait à 80% aux émissions de particules [29]. En France, la moyenne nationale donne un taux de 30%, soit une teneur moyenne d'émission de 18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  imputable uniquement au trafic routier [30 et 31].

La part liée à l'usure des routes n'est pas négligeable puisque l'inventaire effectué en France en 2000 montre qu'environ 40% des émissions du trafic routier sont dues à l'usure des routes. La figure N°1.1 illustre à cet effet la répartition des émissions des PM-10 issues du trafic routier en France [32].

Une étude similaire montre qu'à l'échelle nationale en France (année 2002), la part imputable au trafic routier est de 9% des TSP, 15% des PM-10, 22% des PM-2,5 et 24% des PM-1. Ces données montrent qu'en milieu urbain le taux de pollution issue du trafic urbain est important et que ce taux augmente lorsque la granulométrie des particules diminue. En d'autres termes, le trafic routier se caractérise par des particules fines très nocives pour la santé [33].

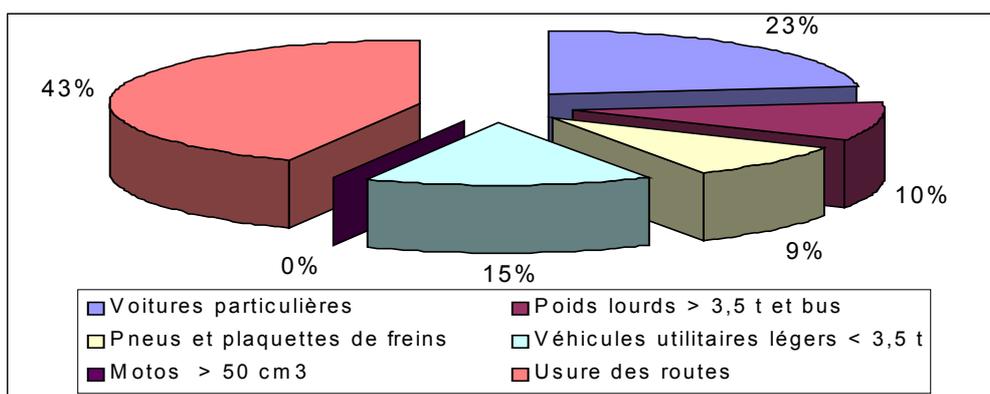


Figure N°1.1 : L'émission annuelle des PM-10 due au trafic routier en France [32].

A l'ensemble de ces émissions de particules solides par les sources stationnaires et mobiles, il faut ajouter la part importante provenant de la conversion dans l'atmosphère par divers mécanismes, des polluants gazeux en particules. C'est surtout le cas des sulfates et nitrates issus respectivement du SO<sub>2</sub> et des NO<sub>x</sub> [34].

Comme le montre le tableau N°1.1, l'émission directe des particules anthropiques s'élève seulement au 1/3 du taux globale, les 2/3 restant, résultent de l'émission secondaire, c'est à dire la conversion gaz-particules [35].

Tableau N°1.1 : Taux d'émission des particules anthropiques [35].

SOURCE D'EMISSION	QUANTITES EMISES [Kg/an]
Emissions sous forme de particules	84 .10 <sup>9</sup>
Particules formées des gaz polluants	
▪ Sulfates à partir de SO <sub>2</sub>	133. .10 <sup>9</sup>
▪ Nitrates à partir de NO <sub>x</sub>	27 .10 <sup>9</sup>
▪ Particules photochimiques issues des hydrocarbures	25 .10 <sup>9</sup>
<b>TOTAL</b>	<b>296. .10<sup>9</sup></b>

Le tableau N°1.2 présente un bref résumé des caractéristiques des particules rencontrées dans l'air ambiant [18].

Tableau N°1.2 : Taille, origine, composition et source des particules [18].

<b>PARTICULES FINES</b> diamètre : 2,5-10 µm	<b>PARTICULES TRES FINES</b> diamètre : < 2,5 µm
<b>Origine</b> Procédés mécaniques (broyage, meulage) Évaporation d'aérosol Recirculation de poussières Combustion incomplète	<b>Origine</b> Condensation de vapeur et de gaz Coagulation de très petites particules Réactions chimiques diverses Nucléation
<b>Composition chimique</b> Cristaux de silice, de fer, de sel Cendres volatiles, Pollens, Fibres Débris végétaux et animaux ...	<b>Composition chimique</b> Sulfates, Nitrates, Ammoniac Hydrocarbures aromatiques polycycliques ...
<b>Source</b> Transport, agriculture, mines, construction, démolition, combustion de charbon et 'huile, biotechnologie, océans	<b>Source</b> Combustion (industries, transport) Transformation atmosphérique de précurseurs (NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> ) Procédés industriels à très haute température (métallurgie, incinération)

Comme les particules en suspension véhiculent certains métaux lourds toxiques, le tableau N°1.3 présente l'ampleur des émissions de certains d'entre eux en fonction des sources émettrices [36].

Ce tableau montre par exemple que le chrome issu des émissions naturelles est plus élevé que le chrome anthropique. On remarque par ailleurs, l'ampleur du Ni qui est le traceur de la combustion de fuel et l'importance du Pb dont la quasi totalité est imputable au trafic routier.

Enfin signalons que les teneurs habituelles en TSP 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 du  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

**Tableau N°1.3 : Valeurs médianes des émissions de métaux de sources naturelles et anthropogénique tonnes/an [3]**

<b>Nature des sources</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
<b>Combustion du charbon</b>	<b>11.275</b>	<b>5.005</b>	<b>13.763</b>	<b>8.158</b>	<b>11.101</b>
▪ Centrales électriques	4.495	2.015	5.348	2.713	4.418
▪ Industries et chauffage domestique	6.780	2.990	8.415	5.445	6.683
<b>Combustion du fuel</b>	<b>1.408</b>	<b>1.959</b>	<b>27.065</b>	<b>2.419</b>	<b>2.159</b>
▪ Centrales électriques	334	1.334	9.170	986	727
▪ Industries et chauffage domestique	1.074	625	17.895	1.433	1.432
<b>Production des métaux non ferreux</b>	<b>0</b>	<b>26.783</b>	<b>8.781</b>	<b>49.085</b>	<b>71.572</b>
▪ Mines		480	800	2.250	465
▪ Production de plomb		273	331	21.420	332
▪ Production de cuivre et de nickel		25.525	7.065	16.57	6.375
▪ Production de Zinc et de Cadmium		460		8.510	64.400
<b>Production secondaire des métaux non ferreux</b>		<b>110</b>		<b>765</b>	<b>855</b>
<b>Sidérurgie Fer et Acier</b>	<b>15.620</b>	<b>1.491</b>	<b>3.568</b>	<b>7.633</b>	<b>19.525</b>
<b>Incinération des déchets</b>	<b>1.139</b>	<b>1.575</b>	<b>464</b>	<b>2.370</b>	<b>5.900</b>
▪ Municipales	539	1.470	259	2.100	5.600
▪ boues	600	105	105	270	300
<b>Industries des fertilisants</b>		<b>411</b>	<b>411</b>	<b>165</b>	<b>4.110</b>
<b>Production de ciment</b>	<b>1.335</b>		<b>490</b>	<b>7.129</b>	<b>9.790</b>
<b>Combustion du bois</b>		<b>900</b>	<b>1.200</b>	<b>2.100</b>	<b>3.600</b>
<b>Sources mobiles (trafic routier)</b>				<b>248.030</b>	
<b>Divers</b>				<b>4.000</b>	<b>3.254</b>
<b>Total des émissions anthropiques</b>	<b>30.777</b>	<b>38.189</b>	<b>55.642</b>	<b>331.851</b>	<b>131.866</b>
<b>Total des émissions naturelles</b>	<b>44.000</b>	<b>28.000</b>	<b>30.000</b>	<b>12.000</b>	<b>4.000</b>

### **I.3 MECANISME DE FORMATION DES PARTICULES EN SUSPENSION**

Les particules en suspension ont généralement des mécanismes de formation distincts avec parfois certaines similitudes.

Ils existent trois modes de formation principaux qui sont les suivants [12] :

- la dispersion des poudres : provenant de la désagrégation d'un matériau solide en particules assez petites pour être mises en suspension (cendres, envols, suies provenant des centres d'émission industriels).
- La condensation de vapeur : elle donne naissance aux nuages, au brouillard, à la brume, aux fumées et à la plus grande partie de la pollution particulaire (résultat des process métallurgique ou chimique faisant intervenir des fusions ou sublimations de certains produits).
- La pulvérisation des liquides : dont il résulte aussi bien des gouttelettes liquides (vésicules) que des particules solides ; par exemples :
  - les vagues créent des bulles qui en éclatant forment les embruns dont l'évaporation donne lieu à la formation de noyaux de condensation constitués essentiellement de sel marin ;
  - les humidificateurs à pulvérisation donnent naissance à de fines particules provenant des sels dissous dans l'eau.

Selon la voie de leur introduction dans l'air, les particules se rangent en deux catégories [37] :

#### **I.3-1 Particules primaires :**

Les particules primaires sont émises directement dans l'atmosphère. Elles résultent essentiellement des processus mécaniques tels l'altération éolienne et autres. Parmi ces particules on distingue :

- les noyaux Aitken ( $\varnothing < 0,1\mu\text{m}$ ) et les particules fines ( $0,1\mu\text{m} < \varnothing < 2,5\mu\text{m}$ ), formées par les processus naturels (les embruns marins et les feux de forêts) et par les processus de combustion industriels.
- Les particules vivantes, les micro-organismes, les bactéries et les pollens.
- Les grosses particules : les poussières transportées par les vents et les matières particulaires à partir des activités industrielles.
- Les particules issues des activités de transport.
- Les matières carbonées : les suies.

#### **I.3-2 Particules secondaires :**

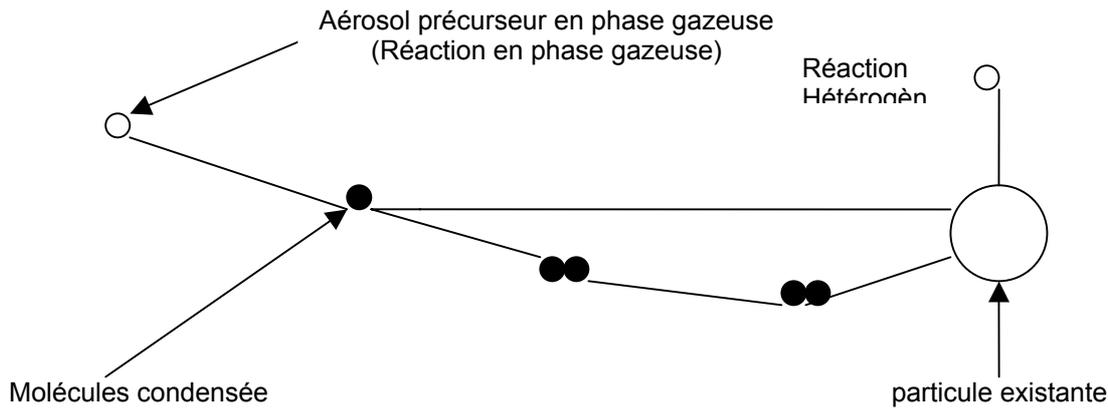
Les émissions primaires peuvent évoluer chimiquement dans l'atmosphère pour former des particules secondaires. Les processus les plus connus pour la formation de ces particules secondaires sont :

- La transformation du dioxyde de soufre  $\text{SO}_2$  en sulfates  $\text{SO}_4^{2-}$ .
- La transformation des oxydes d'azote  $\text{NO}_x$  en nitrates  $\text{NO}_3^-$ .
- La transformation des composés organiques lourds en particules organiques.

Les particules secondaires constituent généralement les particules fines de  $\varnothing < 2,5\mu\text{m}$ .

La formation des particules secondaires se fait par plusieurs mécanismes (figure N°I.2) :

- La réaction des gaz pour former des produits à basse pression de vapeur, qui par la suite se combinent pour donner de nouvelles particules ou se condensent en particules préexistantes.
- La réaction des gaz sur la surface des particules existantes pour former des particules condensées.
- Les réactions chimiques de l'aérosol lui-même.



**Figures N°1.2 :** Mécanismes de formation des particules secondaires [37].

### I.3-3 Formation des particules dans les différents types de moteurs [30] :

#### a) Moteur à allumage commandé :

Dans ce type de moteur, les particules ont trois origines distinctes :

- **Les émissions de sulfates** : Elles concernent surtout les véhicules équipés de catalyseurs d'oxydation en post-combustion. Le soufre du carburant transformé en  $\text{SO}_2$  dans la combustion est oxydé en  $\text{SO}_3$  par le catalyseur à l'échappement. Ce dernier se combine aux molécules d'eau pour donner un brouillard de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Les niveaux à l'émission dépendent donc directement des teneurs en soufre des carburants.
- **Avec les carburants plombés** : Ces particules de plomb se forment par condensation des sels de plomb émis à l'échappement. Les véhicules à essence plombée et non plombée émettent respectivement 6 à 20 fois moins de particules que les véhicules diesel correspondants.
- **Les émissions de suies** : Elles sont anormales dans le cas des moteurs à allumage commandé bien réglés, car elles ne se produisent que dans le cas de mélange carburés excessivement riches.

#### b) Moteurs diesel :

Les particules diesel se composent d'un matériau carboné (la suie) engendré lors de la combustion sur lequel sont adsorbées des espèces organiques diverses (la SOF : *Soluble Organic Fraction*) constituées de molécules condensées sur la suie.

Les particules de suie prennent naissance essentiellement à partir du carbone contenu dans le carburant et dépendent de la nature de carburant de départ, du nombre d'atomes de carbone de la molécule et du rapport H/C : en partant de molécules contenant 1 à 2 atomes de carbone avec un rapport H/C d'environ 2, on parvient à des sphérules contenant quelques  $10^5$  atomes de carbone ayant un rapport H/C d'environ 0,1.

Les émissions de suie des moteurs diesel proviennent de trois processus se déroulant partiellement en parallèle :

- des réactions de formation de suie à partir de carburant et l'air essentiellement dans la première phase de combustion ;
- des réactions de formation de suie à partir de carburant au sein des gaz brûlés surtout dans la seconde phase de la combustion ;
- de l'oxydation de la suie formée, après mélange dans des zones riches en oxygène.

La suie diesel composée de la phase carbone et des composés extractibles associés (SOF) provient donc de diverses sources au cours de la combustion. Les principales voies de formation des HAP et de la suie peuvent être les suivantes :

- *la flamme elle-même*, qui crée des HAP et conduit à une formation de suie modérée ou faible ;
- *la pyrolyse à plus basse température*, qui crée des HAP et des produits oxygénés, avec faible formation de suie ;
- *la vaporisation du carburant et des lubrifiants*, qui apporte des composants de ces produits, sans former de suie.

Les mécanismes de mélange entre l'air et le carburant sont d'une importance primordiale sur la genèse de la suie et les variations d'émissions en fonction du régime et de la charge du moteur peuvent être interprétées comme des variations de qualité du mélange air/carburant.

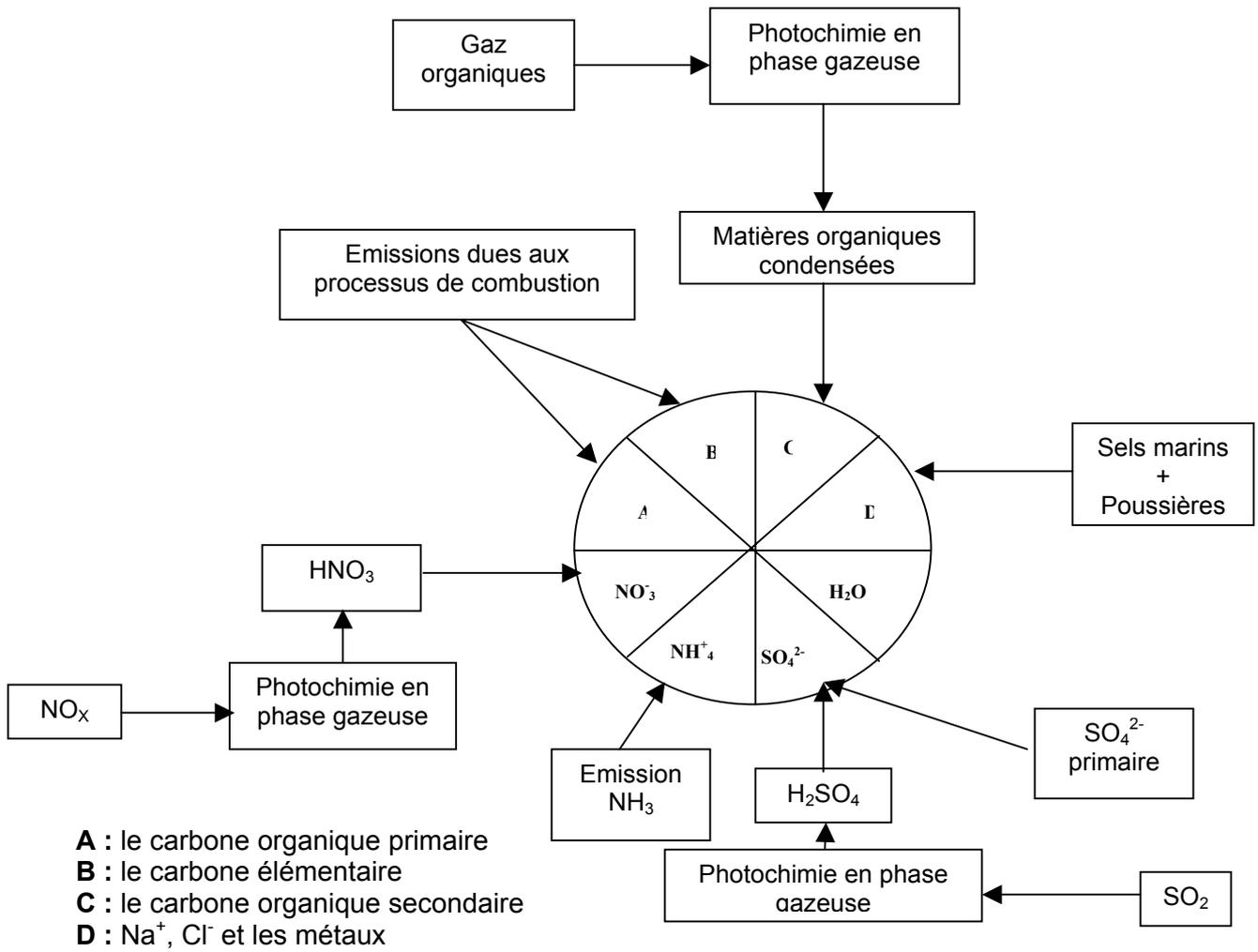
- **Oxydation de la suie** : la suie émise est la résultante de la suie totale formée diminuée de la quantité oxydée avant l'échappement.
- **Incorporation de la SOF aux particules** : le processus final de formation des particules, mesurées suivant les techniques réglementaires, consiste dans la condensation et dans l'adsorption des composés organiques lourds constituant la SOF sur les agglomérats de suie issus de la combustion.
- **Formation des HAP et des dérivés nitrés** : les composés aromatiques polynucléaires jouent un rôle essentiel pendant les premiers stades de formation de la suie et participent également à la constitution de la phase adsorbée sur les particules.

Le tableau N°1.4 résume les paramètres favorisant les émissions de particules diesel.

**Tableau N°1.4** : Principales caractéristiques influant sur la formation des particules diesel [30]

<b>Formation de la fraction insoluble favorisée par :</b>	-17 température élevée ; -18 pression élevée ; -19 défaut d'oxygène.
<b>Oxydation de la fraction insoluble favorisée par :</b>	-20 température élevée ; -21 forte pression ; -22 présence d'oxygène.
<b>Formation des particules de HC favorisée par :</b>	-23 zones de mélange pauvre ; -24 températures inférieures à la limite d'inflammabilité ; -25 couches d'hydrocarbures sur les parois du bol ; -26 carburant gouttant aux injecteurs.
<b>Sources de particules venant du lubrifiant :</b>	-27 surface des chemises des cylindres ; -28 joints des queues de soupapes ; -29 joints du turbocompresseur ; -30 retour à l'admission des gaz de carter.

En conclusion, nous illustrons en figure N°1.3 les voies de formation, la composition et les principales sources de l'aérosol particulaire (émission primaire et secondaire)



**Figure N°1.3** : Composition de l'aérosol atmosphérique et ses principales sources [37]

**1.4 CARACTERISTIQUES DES PARTICULES EN SUSPENSION**

Les particules en suspension sont caractérisées par plusieurs paramètres tel que :

**1.4.1 Forme des particules**

Il y a une grande différence entre les formes des particules atmosphériques. Elles peuvent être divisées en sphériques, irrégulières, cubiques, flocons, fibres, flocons condensés. La forme de particule dans un aérosol dépend en général de la source d'émission [38].

Les tableaux N°1.5 et 1.6 donnent respectivement les différentes formes des particules en suspension et leur pourcentage de la masse d'échantillon [39].

**Tableau N°1.5 :** Les principales formes de particules [22].

Forme	Apparence	Nature
sphérique		fumées pollens cendres
irrégulière cubique		minéraux
en plaques		minéraux épiderme
fibreuse		fibres végétales et minérales
en agrégats		noirs de charbon fumées

**Tableau N°1.6 :** Forme des particules et leur pourcentage pour un diamètre  $\phi > 0.1 \mu\text{m}$  [39].

Forme	Pourcentage de la masse d'échantillon	Particule
<b>Sphérique</b>	0-20	<i>Pollen, cendres volantes, fumée</i>
<b>- irrégulière - cubique</b>	10-90	<i>-minéraux -cendres</i>
<b>Flocons</b>	0-10	<i>Minéraux</i>
<b>Fibreuse</b>	3-35	<i>Fibres de plantes</i>
<b>Flocons condensés</b>	0-40	<i>Fumée</i>

#### 1.4.2 Composition chimique

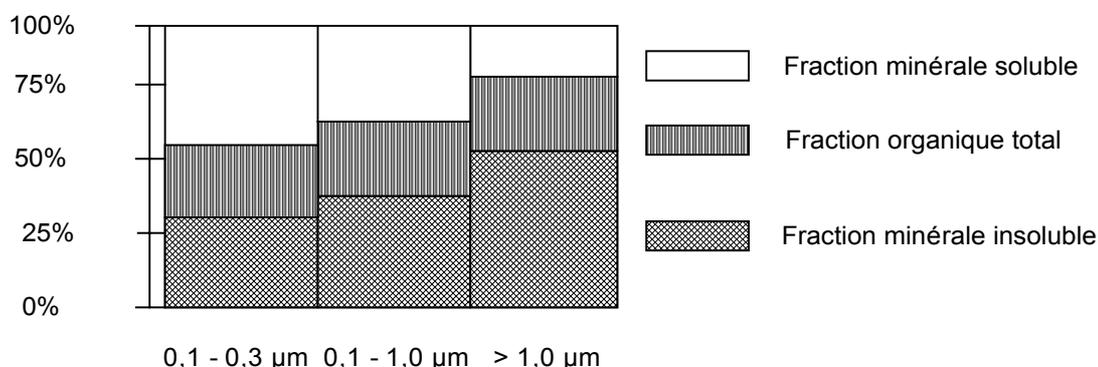
L'aérosol de particules est constitué de quatre fractions majeures [40] :

- **la fraction minérale soluble dans l'eau :** Elle contient principalement les aérosols secondaires, les sulfates et les nitrates provenant de la conversion du  $\text{SO}_2$  et  $\text{NO}_2$  ainsi que les ions chlorures et ammonium.

- **la fraction minérale insoluble** : Elle est riche en fer, aluminosilicates et métaux lourds.
- **la fraction carbonée** : Elle est constituée de carbone élémentaire appelé aussi « carbone suie » ou « black carbon ». Ce carbone non fonctionnalisé et hautement polymérisé est non réactif. Il provient de toutes les combustions et les débris de matériaux organiques relargués par les activités humaines.
- **la fraction organique** : Elle se trouve sous forme d'alcane lourds, d'alcools, d'esters et de composés aromatiques polycycliques (HAP). Il s'agit de composés organiques à chaînes longues de 8 à 30 atomes de carbones.

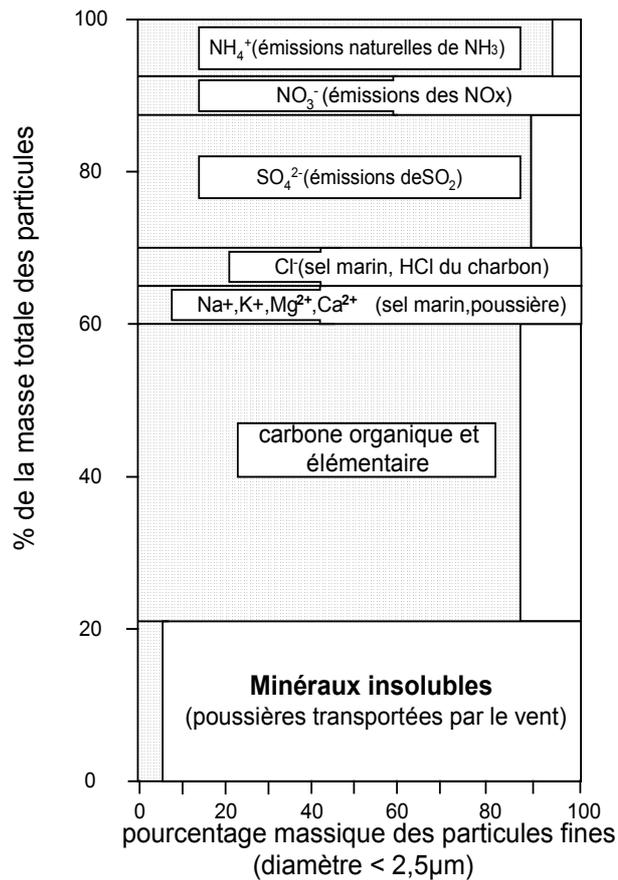
La répartition des fractions diffère de façon importante suivant la taille des particules (figure N°1.4), ainsi [40] :

- *la fraction insoluble* augmente régulièrement quand la taille augmente ;
- *la fraction soluble* diminue quand le diamètre augmente ;
- L'importance relative *des fractions carbonées et organiques* varie beaucoup, mais la somme de ces deux fractions reste approximativement constante.



**Figure N°1.4** : Proportions relatives des fractions chimiques composant les particules en fonction de leur taille [40].

La figure N°1.5, présente un exemple des composés majeurs des PM-10 et leur proportion dans les particules fines mesurées en Angleterre en 1997 [41].



**Figure N°1.5 :** Composants majeurs des PM-10 et leur proportion dans les particules fines PM-2,5 mesurées en Angleterre [41].

On estime globalement que plus de 80% du carbone élémentaire, du carbone organique et des aérosols secondaires se trouvent dans les PM-2,5. Les particules d'un diamètre compris entre 2,5 et 10 μm contiennent environ 50% de ces substances et un taux important de minéraux insolubles [41].

Les particules atmosphériques ont des compositions chimiques différentes selon la nature du processus qui a conduit à leur formation. Cette multiplicité de sources conduit également à une multiplicité dans la composition chimique qui reste délicate et coûteuse à analyser [42].

A titre d'exemple nous présentons en figures N°1.6 la composition chimique des PM-10 mesurées en Suisse à proximité d'une route à grande circulation à Zurich [38].

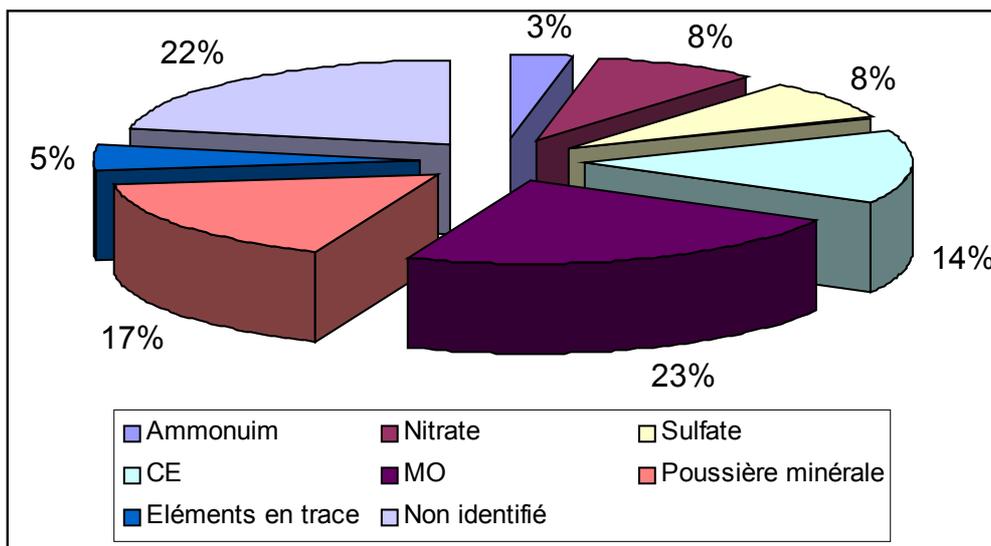


Figure N°I.6 : Composition chimique des PM-10 en site de proximité à Zurich [38].

### I.4.3 Dynamique des particules

Généralement, une particule dans l'air est soumise aux forces suivantes [43] :

- force de gravité ;
- forces d'inertie ;
- forces dues à la viscosité de l'air ;
- forces dues aux mouvements browniens des particules ;
- autres forces, électrique, thermique, sonique capillaire, etc.

Ces forces peuvent agir en même temps ou séparément sur la particule.

Les particules présentent dans l'air ambiant des vitesses de chute liées [43] :

- à leurs caractéristiques physiques (masse, diamètre, ...) ;
- aux conditions météorologiques du milieu (calme, tourbillonnement, circulation de l'air, ...).

Le tableau N°I.7 illustre la variation de la vitesse de chute des particules en fonction de leur diamètre.

Tableau N°I.7 : Vitesse de sédimentation de quelques particules sphériques [42].

DIAMETRE ( $\mu\text{m}$ )	VITESSE DE SEDIMENTATION (cm/s)
200	120
100	30
50	7
10	0,3
5	0,07
1	0,007
0,5	0,0007

Selon leur taille, les particules peuvent se comporter comme suit :

#### a) Cas des particules de diamètre supérieur à $1\mu\text{m}$ [44] :

Lorsqu'une particule est suffisamment grosse par rapport au libre parcours moyen des molécules de gaz vecteur (l'air dans notre cas), théoriquement il est possible de prédire une trajectoire en fonction des diverses forces agissant sur elle.

Le mouvement peut être prédit en résolvant l'équation d'équilibre des forces :

$$\Sigma F = m \, dv/dt \quad (1)$$

m : masse de la particule ;  
 F : forces extérieures agissant sur la particule ;  
 v : vitesse de chute de la particule.

C'est la loi de Stokes dont les conditions d'applications sont, en fait, très limitées (vitesse de la particule très faible (< 1m/s), couche superficielle parfaitement adhérente et écoulement laminaire), qui nous permet de déterminer la vitesse de chute des particules.

La particule de diamètre  $d_p$  tombant sous l'effet de son poids, atteint sa vitesse limite de chute  $V_{ts}$  lorsque la force de viscosité équilibre la pesanteur et la poussée d'Archimède

$$\text{Donc : } dv/dt = 0 \quad (2)$$

Les forces qui agissent sur la particule dans ce cas sont :

$$\text{➤ la force de gravité : } P = m.g = 4/3 \rho_p \pi [d_p/2]^3 .g \quad (3)$$

$\rho_p$  : masse volumique de la particule ;  
 $d_p$  : diamètre de la particule ;  
 g : le champ de gravité.

$$\text{➤ La poussée d'Archimède : } f = 4/3 \rho_a \pi [d_p/2]^3 .g \quad (4)$$

$\rho_a$  : masse volumique de l'air.

$$\text{➤ La force de viscosité : } f_v = 3 .\pi .\mu .d_p \quad (5)$$

$\mu$  : viscosité dynamique de l'air.

$$\text{En remplaçant dans l'équation (1), on aura : } V_{ts} = (\rho_p .g /18 . \mu) .d_p^2 \quad (6)$$

### ***b) Cas des particules de diamètre compris entre 1 $\mu$ m et 0,1 $\mu$ m :***

Généralement, au moment où les particules atteignent des diamètres inférieurs à 1 $\mu$ m, l'air commence à se comporter comme un milieu discontinu et les particules subissent des collisions erratiques qui provoquent des déplacements aléatoires des particules et il en résulte une diffusion. Ces particules ont une vitesse de chute très faible, qui peut être calculable à l'aide de la loi de Stokes moyennant un facteur de correction qui tient compte de l'influence de la viscosité, du nombre de Reynolds et de la valeur du libre parcours moyen des particules [45].

$$\text{La vitesse de chute } V_c \text{ est donnée par : } V_p = V_c[1+A.(\lambda/2)] \quad (7)$$

$V_p$  : vitesse de la particule calculée par la loi de Stokes ;

$[1+A.(\lambda/2)]$  : facteur de correction (facteur de Cunningham), dont A est un facteur de correction secondaire (A = 0,8-0,9) et  $\lambda$  est l'espace moyen intermoléculaire.

Le mouvement brownien est significatif pour ces particules et devient supérieur à la vitesse de sédimentation pour les particules inférieures à 0,5 $\mu$ m, et la diffusion devient supérieure à la sédimentation.

Les particules qui diffusent subissent alors un déplacement moyen «  $X$  » en fonction du temps  $T$ , donné par la loi d'Einstein [44] :

$$X = (D.T)^{0,5} \quad (8)$$

$D$  : coefficient de diffusion.

**c) Cas des particules de diamètre inférieur à  $0,1\mu\text{m}$  [43] :**

Les phénomènes de diffusion des particules provoquent la collision de ces derniers, il en résulte l'adhésion et la fusion d'une particule à une autre ce qui donne le phénomène de « coagulation ». Ces phénomènes se produisent essentiellement lorsqu'on se trouve en présence d'une suspension de particules à une forte concentration dans l'air.

La concentration des particules varie uniquement à la suite de rencontres entre les particules, on peut admettre que le nombre  $dn$  de ces dernières qui disparaissent par coagulation, pendant le temps  $dt$ , dans l'unité de volume, est proportionnel à  $n^2$ , ce qu'on écrit sous forme :  $dn = -K n^2 dt$  (9)

$n$  : nombre de particules à un certain temps  $t$  ;

$K$  : coefficient de la coagulation des particules, il est donné par :

$$K = 8\pi.D.r_p \quad (10)$$

$D$  : coefficient de diffusion ;

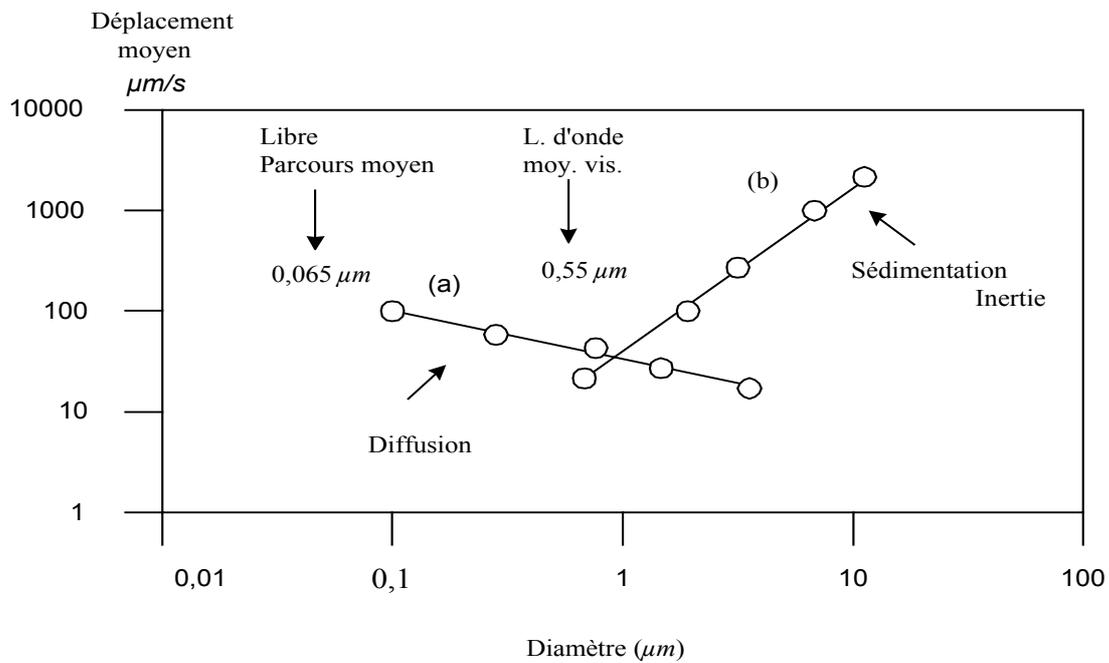
$r_p$  : rayon de la particule.

Et si, à un temps  $t = 0$  on a un nombre  $n_0$  de particules, après un certain temps  $t$ , on aura un nombre  $n_t$  :

$$1/n_t - 1/n_0 = Kt \quad (11)$$

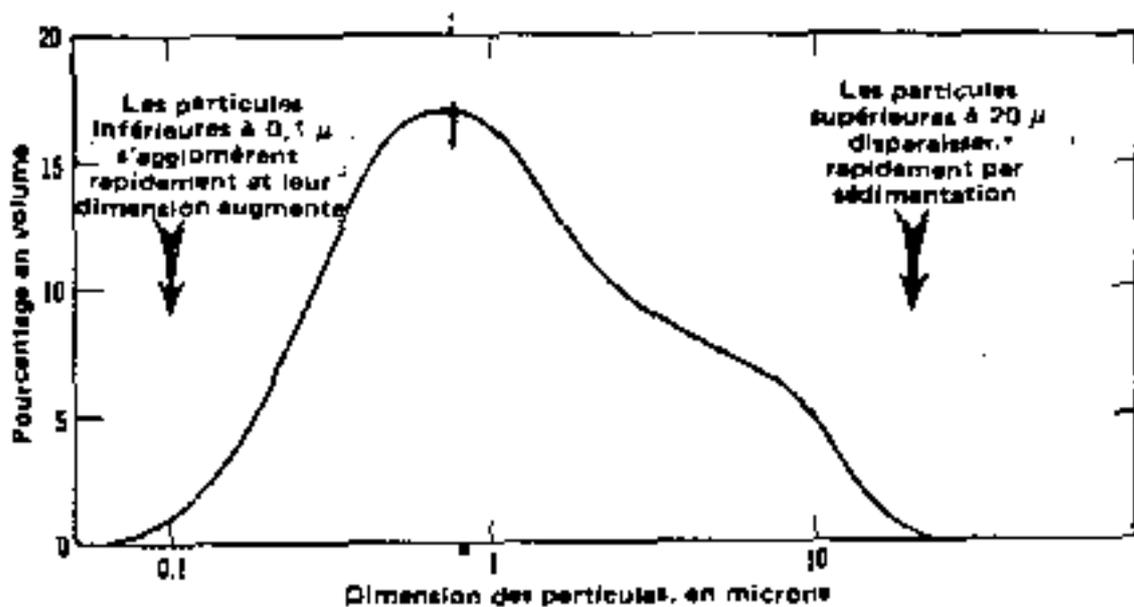
En résumé, l'étude de la dynamique des particules en suspension montre que les particules les plus fines ( $d_p < 0,1\mu\text{m}$ ) se condensent et ce coagulent pour enrichir les fractions de diamètre supérieur, tandis que les particules les plus grosses disparaissent de l'atmosphère par sédimentation ou impaction, seules les particules d'un diamètre équivalent compris entre  $0,1$  et  $15$  à  $20\mu\text{m}$  subsistent dans l'air.

Nous illustrons en figure N°1.7 le comportement dynamique des particules et leurs propriétés de migration dans l'atmosphère en fonction de leur diamètre [46].



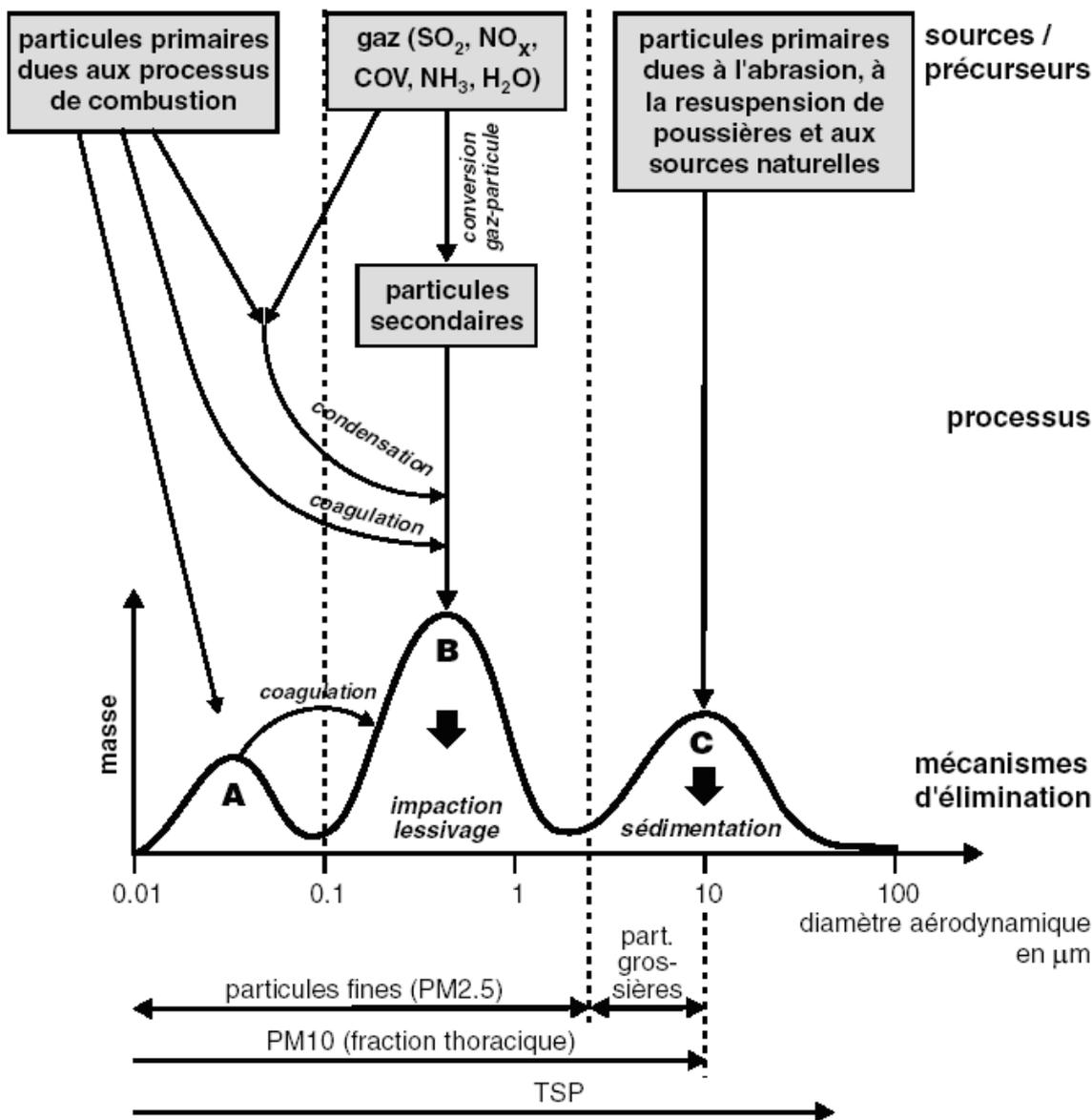
**Figure N°1.7 :** Déplacement moyen par seconde des particules de différents diamètres [46].  
 (a) Diffusion pour les plus fines ( $d < 0,5 \mu\text{m}$ )  
 (b) Sédimentation pour les plus grosses ( $d > 1 \mu\text{m}$ )

Aussi donc, en tenant compte de l'ensemble des phénomènes précédents qui agissent sur la composition de l'aérosol, on lui trouvera dans un air au repos une répartition granulométrique voisine de celle définie par la figure N°1.8 [12].



**Figure N°1.8:** Effets de l'agglomération et de la sédimentation sur une poussière atmosphérique ordinaire [12].

La figure N°1.9 résume de manière simplifiée les processus de formation des particules et les mécaniques d'élimination dans l'atmosphère en fonction du diamètre granulométrique [47].



A: particules ultrafines, B: mode d'accumulation, C: particules grossières. Loin des sources, c'est le mode d'accumulation B qui prédomine.

**Figure N°1.9 :** Présentation simplifiée de la distribution de la taille des particules d'un aérosol atmosphérique proche des sources et des processus les plus important.

### **1.5 DISPERSION DES PARTICULES EN SUSPENSION**

Une fois produits, les polluants se dispersent dans l'atmosphère, leur dispersion s'effectue essentiellement dans la couche limite atmosphérique, couche la plus troublée, agitée sans cesse par des mouvements turbulents tant horizontaux que verticaux [48].

#### **1.5.1 La turbulence atmosphérique [48]**

Sachant que, les mouvements à petite échelle vont brasser la masse d'air et permettre la dilution des polluants, les mouvements à plus grande échelle vont assurer le transport.

Plus la turbulence est importante, meilleure est la dispersion atmosphérique, de ce fait :

- *les situations dépressionnaires (basses pressions)* correspondent généralement à une turbulence de l'air assez forte et donc à de bonnes conditions de dispersion ;
- *les situations anticycloniques (hautes pressions)* où la stabilité de l'air ne permet pas la dispersion des polluants, entraînent des épisodes de pollution (inversion thermique).

### I.5.2 Le vent [48]

Entre la vitesse du vent et les niveaux de concentrations de polluants, il existe une relation évidente :

- la dispersion des polluants augmente avec la vitesse et la turbulence du vent ;
- alors que, l'accumulation des polluant est favorisée par un vent faible.

La vitesse du vent augmente en général avec l'altitude.

### I.5.3 La température [49]

Les inversions de température sont des phénomènes sources de pollution. Ils se produisent le plus souvent en hiver ou en été par des nuits sans nuages.

En plus du transport horizontal des polluants, il ne faut pas négliger la composante verticale : l'air près du sol se réchauffe plus rapidement, il se dilate et devient plus léger. La température de l'air diminuant avec l'altitude, cet air plus chaud s'élève dans les couches supérieures de l'atmosphère entraînant avec lui les polluants dont il est chargé.

### I.5.4 La stabilité et l'instabilité atmosphérique [48]

La stabilité ou l'instabilité de l'atmosphère sont les facteurs principaux de la dispersion atmosphérique.

Selon que l'atmosphère sera stable ou instable, la dilution des polluants sera faible ou importante.

Si on élève une particule d'air d'une certaine altitude, elle va subir une chute de pression et donc une chute de température :

- si la particule d'air que l'on vient de soulever est plus froide que le milieu environnant, elle sera plus lourde et donc redescendra à son niveau de départ, **l'atmosphère** est alors **stable** ;
- si la particule d'air subissant cette élévation est plus chaude et plus légère que le milieu environnant, elle a donc tendance à continuer son ascension, **l'atmosphère** est alors **instable**.

La stabilité va donc dépendre de la vitesse de croissance de la température avec l'altitude. Selon que l'air est saturé en vapeur d'eau ou non, les valeurs limites fixant la stabilité ou l'instabilité d'une atmosphère sont donc :

- **air saturé** :
  - décroissance plus rapide que :  $-0,65^{\circ}/100$  mètres = (instable) ;
  - décroissance moins rapide que :  $-0,65^{\circ}/100$  mètres = (stable).
- **air non saturé** :
  - décroissance plus rapide que :  $-1^{\circ}/100$  mètres = (instable) ;
  - décroissance moins rapide que :  $-1^{\circ}/100$  mètres = (stable).

### **I.5.5 Les précipitations [49]**

Certains polluants gazeux et certaines particules solides peuvent **se dissoudre** ou **être captés** dans les **gouttelettes d'eau** des brouillards, des nuages ou des pluies voire même dans les flocons de neige. Lors d'une pluie ou d'une chute de neige, les composés captés sont alors précipités au sol : on dit que l'atmosphère a été « **lessivée** ».

Ainsi la météorologie est un élément essentiel dans l'appréhension des phénomènes de dispersion de la pollution. Des paramètres météorologiques, on tire les informations relatives aux types de temps favorables ou défavorables à la dispersion et les types de temps favorables ou défavorables aux transformations physico-chimiques des polluants gazeux en particules.

## **CHAPITRE II**

## **II. EFFETS DES PARTICULES EN SUSPENSION SUR LA SANTE ET L'ENVIRONNEMENT**

### **II.1 GENERALITES**

Plusieurs études ont mis en évidence des relations entre les concentrations de particules et leurs effets sur la santé humaine. Deux facteurs déterminent les effets des particules : la taille et la composition chimique. Le niveau de déposition des particules inhalées dépend de leur taille. Les plus grosses restent dans la partie extra thoracique (nez-gorge-larynx) alors que jusqu'à 50% des particules ultrafines se déposent dans les alvéoles pulmonaires. Ces dernières peuvent pénétrer dans le sang, se distribuer dans tout le corps et atteindre les organes essentiels (rein, foie, moelle osseuse, cerveau). Dans ce cas, l'inhalation des particules ultrafines véhiculant des métaux comme l'arsenic, le chrome ou le cadmium et des hydrocarbures cancérigènes est très préoccupante. Les effets sont plus sensibles chez les sujets fragiles (enfants, personnes porteuses d'affections cardio-respiratoires). Jusqu'à 2006, l'OMS estimait qu'il n'y avait pas de niveaux de concentration et de durée d'exposition en dessous desquels il n'existerait aucun risque pour la santé humaine. Il ressort de publications américaines qu'une augmentation de 10 µg/m<sup>3</sup> de PM-10 était associée à un accroissement moyen de 3,4% de la mortalité respiratoire et de 1,4% de la mortalité cardiovasculaire.

Sur les végétaux, certaines particules peuvent réduire la photosynthèse et des composés chimiques sont susceptibles de contaminer la chaîne alimentaire. Sur les matériaux, les particules contribuent à la salissure des bâtiments et à la corrosion des matériaux [18].

### **II.2 EFFETS SUR LA SANTE**

Les effets biologiques des particules peuvent être classés schématiquement sous trois rubriques [50] :

#### **1) Réactions inflammatoires non spécifiques :**

Les particules respirées ont, in vitro et in vivo, une activité pro inflammatoire, avec libération de nombreuses cytokines, en partie liée à la génération de radicaux oxydants.

#### **2) Effets génotoxiques et cancérogènes :**

Le risque cancérigène lié à cet aérosol urbain est en particulier associé aux particules fines émises par les véhicules diesel. Une méta-analyse de 23 études épidémiologiques effectuées sur des populations professionnellement exposées aux aérosols d'échappement des véhicules diesel chiffre l'excès de risque de cancer bronchique à 33% (IC95% : 24-46%), résultats qui sont cohérents avec ceux des expérimentations chez le rat, il est vrai à des concentrations près de 100 fois supérieures.

#### **3) Effets immunotoxiques et allergiques :**

Les particules diesel ont également un pouvoir immunotoxique. Celui-ci s'exercerait de deux manières :

- par une modification du pouvoir antigénique de certains pollens ;
- en augmentant la production d'IgE par activation locale des lymphocytes T, ainsi que de certaines cytokines par les cellules épithéliales.

Les particules diesel sont donc une famille de polluants qui pourrait contribuer, avec d'autres facteurs plus au moins bien documentés (faiblesse de la stimulation antibactérienne aux jeunes âges, accroissement de la charge en acariens des

environnements intérieurs, tabagisme maternel pendant la grossesse et les premiers mois de la vie...), à l'augmentation constatée de la prévalence de l'asthme chez le jeune enfant. Il ne s'agit en l'état actuel que d'hypothèses qui font l'objet de nombreuses recherches.

Dans l'ensemble de ces études à court ou long terme, d'autres polluants que les particules sont présents dans l'air pollué. Il est donc difficile d'isoler leur rôle propre.

### II.2.1 Cheminement des particules dans le système respiratoire :

Les atteintes à la santé peuvent être dues à des particules ou molécules par [19] :

- **L'inhalation (voie respiratoire)** : Elle cause ou aggrave les maladies de la sphère ORL, mais surtout broncho-pulmonaire par irritation des muqueuses des voies respiratoires. Rappelons ici, qu'une personne respire  $15 \text{ m}^3$ /jour d'air et que la zone des échanges gazeux de l'appareil respiratoire constitue une interface d'environ  $70 \text{ m}^2$  entre le milieu extérieur et l'organisme [52 et 53].
- **L'absorption (voie digestive)** : Elle se fait par ingestion de toxiques contaminant l'eau et les aliments ; certaines pluies acides se sont trouvées chargées de métaux lourds (Pb, Mg, Al, ... etc.) qui étaient libérés dans l'atmosphère par l'industrie et le trafic routier ; l'effet toxique potentiel de ces éléments porte sur la moelle osseuse, le système nerveux, les reins, le foie, le système endocrinien et cardio-vasculaire.
- **Le contact (peau, muqueuse, conjonctives)** : Le contact avec le revêtement cutané et muqueux conduit plus à des désagréments qu'à des maladies, si l'on s'en tient à la liste des polluants considérés ici.

La profondeur de pénétration et les mécanismes de déposition des particules dans l'appareil respiratoire dépendent d'abord de leur granulométrie et de la morphologie des voies aériennes qui conditionne les modalités de l'écoulement aérien [51 et 52].

Or ce sont les particules les plus fines, dont la part issue des transports est importante mais mal définie, qui atteignent en plus grand nombre les alvéoles des poumons (près de la moitié), les particules de plus grande taille étant précipitées sur la muqueuse des voies aériennes puis dégluties.

On constate ainsi que [53, 6, 51 et 52] :

- **les particules de diamètre aérodynamique supérieur à  $10 \mu\text{m}$**  sont piégées par la muqueuse nasale. Leur rétention se fait par deux mécanismes principaux : la filtration - interception et l'impaction au niveau du nez, gorge et des voies aériennes supérieures. Par ailleurs, la plupart des pollens allergisants sont bloqués par les fosses nasales d'où la fréquence de la rhinite allergique ;
- **les particules de diamètre aérodynamique compris entre  $10$  et  $2,5 \mu\text{m}$**  se déposent au niveau de l'arbre trachéobronchique par impaction provoquant ainsi des pathologies respiratoires. Cependant dans cette zone, les particules sont arrêtées dans leur progression dans l'organisme par les défenses naturelles des voies respiratoires supérieures et moyennes (peuvent être éliminées par clearance mucociliaire et la toux).
- **les particules de diamètre aérodynamique inférieur à  $2,5 \mu\text{m}$**  pénètrent au plus profond des voies respiratoires et atteignent les alvéoles pulmonaires (sacs alvéolaires) où ils se déposent par diffusion. En ce point la vitesse de l'air est très faible. Au niveau alvéolaire, les particules déposées peuvent être phagocytées par les macrophages et selon leur solubilité, certaines seront retenues alors que

d'autres seront véhiculées vers les lymphatiques bronchiques d'où elles pourront diffuser par voie hémotogène dans tous les organes.

La figure N°II.1 illustre le cheminement des particules dans l'appareil respiratoire en fonction de leur diamètre aérodynamique [54]. Le tableau N°II.1 résume le mode et le site de dépôt des particules dans l'appareil respiratoire [55].

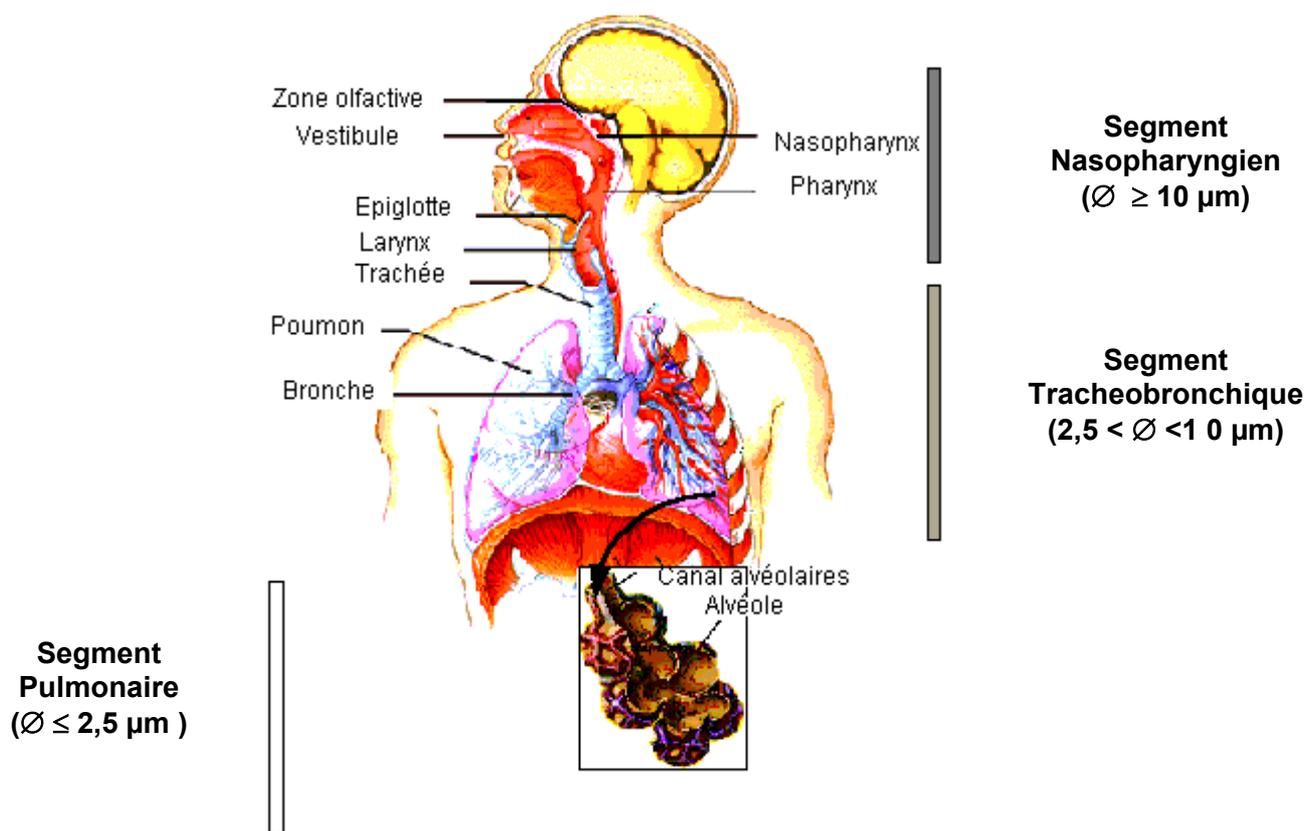


Figure N°II.1 : Appareil respiratoire et pénétration des particules [54].

Tableau N°II.1 : Mode et site de dépôt des particules dans l'appareil respiratoires [55].

Taille des particules (µm)	Endroit de l'appareil respiratoire où le dépôt est le plus probable	Mode de dépôt
5 < Ø < 30	Zone nasopharyngienne (nez et gorge)	Impaction
1 < Ø < 5	Zone de trachée, des bronches et des bronchioles (voies aérienne grandes ramifications des poumons)	Sédimentation
Ø < 1	Zone alvéolaire (petites ramifications et zone d'échange d'air)	Diffusion

## II.2-2 Effets à court et long terme des aérosols particuliers :

Les résultats des principales études épidémiologiques convergent pour attribuer aux particules fines une part de responsabilité dans la survenue d'une vaste gamme d'effets sanitaires [50] :

- **A court terme** : on observe l'aggravation des signes cliniques préexistants chez certains sujets asthmatiques, enfants et adultes, et l'augmentation de la fréquence des décès prématurés par affection respiratoire ou cardio-vasculaire chez des adultes souvent âgés ; ces manifestations ont été principalement attribuées à l'augmentation de la concentration des particules en suspension.
- **A long terme** : on observe une surmortalité modérée par affections cardio-vasculaire ou cancer du poumon dans les villes les plus polluées.

On résume dans les tableaux N°II.2 et N°II.3 respectivement les effets à court et à long terme des PM-10 et PM<sub>2,5</sub>.

**Tableau N°II.2** : Résumé selon l'OMS des effets sur la santé causés par un bref accroissement des PM-10 et PM-2,5 [56].

Effets su la santé	Evaluation de l'accroissement ou de la baisse de la valeur journalière moyenne correspondant à un changement dans les effets sur la santé	
	PM-10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM-2,5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
<b>Nombre de décès par jour :</b> - changement de 5% ; - changement de 10 % ; - changement de 20%.	<b>29</b> <b>55</b> <b>110</b>	<b>50</b> <b>100</b> <b>200</b>
<b>Hospitalisation pour maladies respiratoires :</b> - changement de 5% ; - changement de 10 % ; - changement de 20%.	<b>10</b> <b>20</b> <b>40</b>	<b>25</b> <b>50</b> <b>100</b>
<b>Consommation de médicaments chez les asthmatiques (broncho-dilatateurs) :</b> - changement de 5% ; - changement de 10 % ; - changement de 20%.		<b>07</b> <b>14</b> <b>29</b>
<b>Aggravation de la symptomatologie chez les asthmatiques :</b> - - changement de 5% ; - changement de 10 % ; - changement de 20%.		<b>10</b> <b>20</b> <b>40</b>
<b>Changement de la fonction pulmonaire :</b> - - changement de 5% ; - changement de 10 %.		<b>200</b> <b>400</b>

**Tableau N°II.3 : Résultats des études sur les effets à long terme de l'exposition aux PM-10 et PM-2,5.**

<b>EFFETS CHRONIQUES</b>	<b>VALEURS MOYENNES ANNUELLES</b>	<b>CHANGEMENT PAR 10 µg/m<sup>3</sup></b>	<b>REFERENCES</b>
<b>Mortalité</b>	<i>18-47 µg PM-10/m<sup>3</sup></i>	+ 09%	[4]
<b>Mortalité : Décès cœur /poumons Décès cancers Poumons</b>	<i>11-29 µg PM-2,5/m<sup>3</sup></i>	+ 14% + 20% + 20%	[4]
<b>Mortalité : Décès par maladie Cœur/poumons</b>	<i>09-33 µg PM-2,5/m<sup>3</sup></i>	+ 6,9% + 12,6%	[4]
<b>Capacité vitale forcée</b>	<i>10-34 µg PM-10/m<sup>3</sup></i>	- 3,1%	[57]
<b>Dyspnée Dyspnée travail léger Rhume allergique</b>	<i>10-34 µg PM-10/m<sup>3</sup></i>	+ 25% + 21% + 10%	[58]
<b>Infections des voies respiratoires 12 mois écoulés, enfant</b>	<i>10-33 µg PM-10/m<sup>3</sup></i>	+ 26%	[59]
<b>Toux à répétition au cours des 12 mois écoulés, enfants</b>		+ 54%	
<b>Bronchites 12 mois écoulés</b>	<i>20-25 µg PM-2,5/m<sup>3</sup></i>	+ 37%	[60]
<b>Toux chroniques, enfant</b>		+ 67%	

En France par exemple, des études ont montré que les hausses de mortalité observées pour chaque hausse de teneur de 10 µg/m<sup>3</sup> sont comprises entre 0,5% et 1,7% environ pour les PM-10 et sont de l'ordre de 1,5% pour les PM-2,5 [61].

Les hausses d'hospitalisation, pour chaque hausse de 10 µg/m<sup>3</sup> dans la teneur en particule vont de 0,7% à 0,8% pour les PM-2,5 [61].

Ainsi, les PM2,5 semblent entraîner de plus fortes hausses de mortalité et de morbidité que les PM-10 [61].

Les concentrations moyennes ayant un effet sont résumées dans le tableau N°II.4.

**Tableau N°II.4 : Concentrations moyennes des particules et effets sur la santé [61].**

<b>Effets sur la santé</b>	<b>Etendue des valeurs observées dans les diverses études quant à la teneur moyenne sur 24 h (µg/m<sup>3</sup>)</b>	
<b>Absentéisme scolaire</b>	<i>PM-10</i>	<i>40,9-50,9</i>
<b>Santé pulmonaire et fonction respiratoire</b>	<i>PM-2,5</i>	<i>05-11,0</i>
<b>Hospitalisations</b>	<i>PM-10</i>	<i>29,6-50,0</i>
<b>mortalité</b>	<i>PM-2,5</i>	<i>11,0-29,6</i>
	<i>PM-10</i>	<i>18-47,9</i>

En conclusion, les résultats des études épidémiologiques conduites dans des contextes fort variés, au sein de populations différentes, convergent pour attribuer aux particules fines une part de responsabilité dans la survenue d'une vaste gamme d'effets sanitaires dont certains sont sérieux [50].

### **II.3 EFFETS SUR LES ANIMAUX [19]**

L'intoxication se traduit par l'introduction dans l'organisme animal de certaines substances toxiques supportées par les particules et après une exposition plus au moins longues.

- **l'arsenic, le plomb et le sélénium** sont toxiques pour les animaux. Ils produisent certains symptômes au niveau du système nerveux, de l'appareil respiratoire et du tube digestif.
- **Les poussières alcalines** provenant des composés du calcaire traité dans les cimenteries peuvent provoquer des troubles chez les animaux par des lésions du tube digestif et des modifications du pH.
- **Les particules riches en composés fluorés** entraînent la maladie des os, la fluorose.

### **II.4 EFFETS SUR LES VEGETAUX [19 et 62]**

Les végétaux sont exposés de façon durable à la pollution atmosphérique :

- ils sont utilisés comme « bio-indicateurs » (par exemple : lichens) dans certaines recherches.
- Ils peuvent être l'objet d'atteintes :
  - *aiguées* : telles que *des nécorces* ;
  - *chroniques* : telles que *des troubles de croissance*.

A part les forêts, la pollution de l'air touche aussi les céréales et les plantes agricoles, comme les pois, les épinards et le trèfle. Certaines espèces d'arbres fruitiers sont également très sensibles c'est le cas des abricotiers.

Les végétaux sont exposés à la fois à l'action des polluants en suspension dans l'atmosphère, aux retombées sèches de poussières, de métaux et aux dépôts acides. Ils sont atteints : directement par le feuillage et indirectement par l'intermédiaire du sol (lessivage d'éléments nutritifs). L'augmentation de l'acidité des sols peut entraîner des lésions aux racines des arbres et se répercuter sur l'activité des micro-organismes (bactéries de l'azote). Les plantes ont besoin de composés métalliques à base de cuivre, fer, zinc etc. en tant qu'oligo-éléments mais une accumulation de ces métaux équivaut à un empoisonnement.

### **II.5 EFFETS SUR LES MATERIAUX [15]**

Les dégradations des matériaux dues aux particules solides peuvent se produire par abrasion, salissure et corrosion. Ce phénomène se produit par les substances oxydantes et acides supportées par les particules solides.

La dégradation de la propriété bâtie (bâtiments, monuments historiques, ...) est l'effet le plus visible qui se traduit par le noircissement des façades par les dépôts de suies et de poussières.

Les peintures peuvent être assombries par les dépôts de particules solides noires.

Les particules solides se déposent aussi sur les rebords des fenêtres, des porches, des automobiles, des vêtements et provoquent leurs salissures. Ces particules peuvent s'infiltrer à l'intérieur des habitations et provoquent la salissure des murs, plafonds, tapis, etc.

Les substances oxydantes et acides véhiculées par les particules solides sont, en quelque sorte, la cause de corrosion de certains matériaux.

## **II.6 EFFETS SUR LA VISIBILITE [63]**

Les particules primaires influent sur la formation des nuages, de brouillards et des précipitations. Elles tendent à réduire la visibilité (effets sur la transparence de l'atmosphère et le climat).

Des études ont montré par ailleurs que les aérosols anthropogéniques interceptent le rayonnement solaire et en rétrodiffusent une partie dans l'espace. Le forçage radiatif qui en résulte pourrait annuler une partie du réchauffement induit par les gaz à effet de serre. Les sulfates et les nitrates « nitrate d'ammonium » (composantes importantes des PM-2,5) pourraient avoir une contribution égale dans le processus de diffusion du rayonnement solaire.

## **II.7 EFFETS TOXIQUES DES METAUX LOURDS**

Comme les particules en suspension véhiculent un grand nombre de métaux lourds, nous présenterons ci-après un bref aperçu sur leurs effets nocifs.

### **II.7.1 Effets sur la santé**

Les métaux lourds s'accumulent dans l'organisme et provoquent des effets toxiques à court et à long terme (intoxications aiguës et chroniques). Ils peuvent affecter le système nerveux, les fonctions rénales, hépatiques, respiratoires, ou autres [64].

De ce fait, pour les métaux lourds étudiés dans notre présent travail, le tableau qui suit indique les effets de chacun de ces métaux ...

**Tableau N°II.5 : Effets toxiques de certains métaux lourds sur la santé [65].**

<b>METAUX LOURDS</b>	<b>EFFETS SUR LA SANTE</b>
<b>Plomb</b>	<p><b>1- intoxications aiguës :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- troubles digestifs : (douleurs épigastriques, vomissements) ;</li> <li>- atteinte rénale : (albuminurie) ;</li> <li>- parfois atteinte hépatique ;</li> <li>- convulsions et coma.</li> </ul> <p><b>2- intoxications chroniques :</b></p> <p>on distingue classiquement trois phases :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <b>phase de présaturisme ou phase d'imprégnation :</b> caractérisée par des signes infracliniques et biologiques permettant de conclure à une absorption excessive de plomb.</li> <li>➤ <b>phase d'intoxication fœneche :</b> caractérisée par : <ul style="list-style-type: none"> <li>- des troubles de l'état général à type de céphalées, anorexie ;</li> <li>- une ... qui est peu sévère ;</li> <li>- la colique saturnine qui est la manifestation la plus fréquente caractérisée par des douleurs abdominales très intenses ;</li> <li>- polynévrite motrice : la forme la plus caractéristique est la paralysie radiale avec chute du poignet ;</li> <li>- hypertension ;</li> </ul> </li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- encéphalopathie saturnine : c'est la manifestation la plus grave pouvant aller du ..., convulsions ou coma ;</li> <li>- atteinte thyroïdienne.</li> </ul> <p>➤ <b>phase d'imprégnation ancienne :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- hypertension permanente ;</li> <li>- néphrite chronique ;</li> <li>- voir cancer.</li> </ul>
<b>Cuivre</b>	<p><b>1- intoxications aiguës :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- inflammation au niveau gastro-intestinal avec vomissements, diarrhées ;</li> <li>- convulsions ;</li> <li>- atteinte hépatique et rénale ;</li> <li>- irritation des voies respiratoires.</li> </ul> <p><b>2- intoxications chroniques :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- des lésions du foie peuvent apparaître chez l'animal. Chez l'homme, ces lésions ont été décrites dans la maladie de WILSON (dépôt de cuivre dans le foie d'origine génétique).</li> </ul>
<b>Nickel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dermite : appelée gale du nickel ;</li> <li>- l'allergie respiratoire est rare ;</li> <li>- le nickel peut être cancérigène.</li> </ul>
<b>Cadmium</b>	<p><b>1- intoxications aiguës :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- par voie orale entraîne une gastroentérite avec vomissements et diarrhées ;</li> <li>- par inhalation, le tableau clinique est celui d'une irritation pulmonaire avec dyspnée (gêne respiratoire), cyanose et toux ;</li> <li>- chez le rat, l'injection d'un sel de cadmium peut engendrer une stérilité permanente.</li> </ul> <p><b>2- intoxications chroniques :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- dent jaune cadmique qui est un signe clinique très caractéristique, c'est une pigmentation jaune de l'émail des dents ;</li> <li>- troubles respiratoires : diminution de l'odorat, apparition de rhinite et de bronchite ;</li> <li>- troubles rénaux : caractérisés par une excrétion urinaire accrue de protéines de faible poids moléculaire (protéinurie) ;</li> <li>- troubles osseux : douleurs violentes dans le bassin et les membres inférieurs ;</li> <li>- action hypertensive et cancérigène.</li> </ul>
<b>Magnésium</b>	<p>Les principaux effets toxiques sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la fièvre des fondeurs : fièvre très importante avec tableau d'un syndrome grippal</li> <li>- brûlures cutanées voir gangrène gazeuse ;</li> <li>- conjonctivite.</li> </ul>
<b>Cobalt</b>	<p>L'intoxication professionnelle peut entraîner :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- des manifestations respiratoires à type de dyspnée, rhinite avec atteinte du parenchyme pulmonaire ;</li> <li>- des troubles digestifs : douleurs épigastriques ;</li> <li>- le cobalt peut aussi produire une dermite allergique (éruption cutanée).</li> </ul>

### ❖ **La relation dose réponse [66]**

Quelles sont les doses susceptibles de provoquer des troubles neurologiques chez l'adulte ? Il n'y a pas de réponse claire à cette question. La seule certitude est qu'on ne connaît, à ce jour, aucun rôle biologique utile à l'homme, pour aucun des trois métaux (Pb, Cd et Ni), et que, par conséquent, moins l'homme ingère ou absorbe des métaux lourds et mieux c'est... Ce qui ne signifie pas qu'il y a un risque s'il en ingère. A l'exception du plomb, qui est le métal qui a été le plus étudié, en raison des plombémies, il n'y a pas d'accord général sur les doses à risques. Les éléments qui suivent font la synthèse de sources éparses, et sont données sous toutes réserves, à titre d'information.

#### ➤ **Plomb**

L'individu a couramment 50 µg de plomb par gramme de créatinine dans l'urine et dans le sang.

Les premiers effets de la toxicité du plomb commenceraient à 100 µg de plomb par litre de sang chez l'enfant et 150 µg de plomb par litre de sang chez l'adulte.

La dose hebdomadaire tolérable a été fixée à 25 µg de plomb par kilo de poids corporel. Cette dose correspond à un apport alimentaire de 250 mg/jour et une plombémie de 10 µg/litre.

#### ➤ **Cadmium**

La concentration de cadmium dans l'urine est inférieure à 2 µg/gramme de créatinine. Le risque de toxicité rénale apparaît à partir de 4/5 µg/gramme.

La concentration normale de cadmium dans le sang est de 5 µg/litre.

Cette valeur doit être surveillée.

La dose hebdomadaire tolérable est de 7 µg/kilo/semaine.

### **II.7.2 Les effets sur l'environnement [64]**

Les métaux toxiques contaminent les sols et les aliments. Ils s'accumulent dans les organismes vivants et perturbent les équilibres et mécanismes biologiques. Certains lichens ou mousses sont couramment utilisés pour surveiller les métaux dans l'environnement et servent de « bio-indicateurs ».

Le cadmium est aussi néfaste pour l'environnement car il perturbe l'écosystème forestier (décomposition de la matière organique). Chez les mammifères, il entraîne l'anémie, la diminution de la reproduction et de la croissance avec des lésions du foie et des reins. Enfin, chez les poissons, il induit une faible concentration d'hémoglobine dans le sang et une perte de calcium.

Aussi, le plomb et ses composés ont des effets sur l'environnement : effet neurologique du plomb méthylé sur le comportement de la méso-faune et macro-faune, et inhibition de l'activité microbienne dans la décomposition de la matière organique.

## **CHAPITRE III**

### **III. REGLEMENTATION ET LUTTE CONTRE LA POLLUTION PARTICULAIRE**

#### **III.1 LA LUTTE CONTRE LA POLLUTION PARTICULAIRE [18]**

C'est naturellement dans les pays occidentaux et certains autres pays industrialisés que de grands efforts ont été consentis et sont encore consentis pour réduire la pollution par les aérosols. Il existe de nos jours des techniques très performantes de dépoussiérage (filtres électrostatiques, filtres à manches, système de lavage, etc.) des émissions industrielles et notamment celles issues des usines d'incinération et des cimenteries. Ces techniques évoluent pour répondre aux normes d'émission qui, au fur et à mesure que l'effet des particules sur la santé est mieux connu, deviennent de plus en plus sévères.

En ce qui concerne les particules issues du trafic routier et plus particulièrement les fines particules diesel, les moyens de lutte sont plus récents, plus réduits et ne se mettent que lentement en place.

Pour les véhicules diesel, la directive européenne 98/69/CE du 13 octobre 1998 visait à réduire de près de 70% les émissions de particules à l'horizon 2005. En outre, des recherches sont effectuées en vue de réduire sensiblement les émissions de gaz d'échappement (pot catalytique, carburants plus propres...).

C'est ainsi que, des contraintes plus strictes sur la composition des carburants (50ppm de soufre en maximum dans le diesel) et les caractéristiques des véhicules concourent à la baisse des concentrations de particules dans les agglomérations.

Des contrôles techniques plus réguliers sur les véhicules ont permis de réduire les niveaux d'émission des polluants particuliers, mais la solution qui peut avoir un impact important réside dans la mise en place de filtres à particules diesel.

#### **III.2 LE FILTRE A PARTICULES DIESEL (FPD) [18]**

Pour réduire les émissions de suies issues des véhicules diesel, les constructeurs ont commencé récemment à équiper les véhicules haute gamme (Mercedes, Peugeot, BMW) d'un filtre à particules qui assure une oxydation continue des suies avant rejet dans l'atmosphère via le tuyau d'échappement.

Le filtre à particule contient deux éléments :

- 1- Le filtre proprement dit, formé d'un substrat poreux résistant à la chaleur (en monolithe céramique) qui retient plus de 95% des particules des gaz d'échappement ;
- 2- Un dispositif de régénération (électrique ou à l'aide d'additifs) qui calcine périodiquement les cendres pour maintenir une efficacité optimale.

Les filtres à particules sont conçus pour une « autorégénération » lorsqu'ils sont saturés de particules. Ce processus s'effectue par élévation de la température du flux gazeux. Lorsque celle-ci dépasse 550°C, les dépôts de particules commencent à se calciner. Divers procédés permettent d'atteindre la température voulue. En général, il s'agit d'injecter un additif en amont du filtre.

La combustion de ces suies et résidus d'huile produit une petite quantité de cendres qui doit être éliminée après une plus ou moins longue utilisation du véhicule (tous les 100.000 km par exemple).

Avec de tels filtres, la norme Euro 4 qui fixe pour les véhicules de tourisme 0,025g PM-10/km et pour les poids lourds 0,03 g/kWh , est largement satisfaite.

Pour illustrer l'impact positive d'une généralisation future des FPD's, l'Association Transport et Environnement de la Suisse estime que si tous les véhicules lourds étaient équipés de filtres à particules, on éviterait 100 décès prématurés, 1375 cas de bronchites chez les enfants et plus de 80.000 jours d'absentéisme [67].

Un autre moyen non négligeable pour réduire les suies issus du trafic routier consiste à utiliser le carburant gaz naturel (GNC) avec lequel on atteint une réduction d'émission de 98% de particules fines.

Dans plusieurs villes européennes, des flottes de bus de transport public sont équipées pour rouler au gaz naturel.

A signaler aussi dans le même contexte, les progrès réalisés dans la construction des véhicules à moteurs « hybrides » (électrique + carburant) tel qu'on le rencontre depuis quelques années sur la fameuse « Toyota Pyrius ».

### **III.3 LA SURVEILLANCE DES PARTICULES DANS L'AIR AMBIANT**

La directive européenne 1999/30/CE, adoptée le 22 avril 1999, avec une transposition dans le droit des Etats membres fixée au plus tard le 19 juillet 2001, impose la surveillance des PM-10. Elle prévoit le respect de valeurs limites par étapes, en autorisant des marges de dépassement qui se réduiront progressivement entre 2001 et 2005 [18].

La surveillance des particules fines (PM-2,5) est également envisagée par la directive : il est demandé aux Etats membres de procéder si possible à des prélèvements situés aux mêmes endroits que les points de prélèvement des PM-10 [18].

Sur cette base [50] :

- l'Union Européenne a fixé des valeurs de référence pour la qualité de l'air considérablement plus basses que les normes précédentes pour les particules (valeur limite de  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne journalière, et valeur annuelle à  $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ , et  $20\mu\text{g}/\text{m}^3$  à échéance 2010), et normalise la mesure des PM-10 ;
- l'EPA a également fixé une norme pour les particules fines ( $15\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne annuelle,  $65\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour la moyenne 24 heures) ;

la Directive Européenne du 22 avril 1999 envisage aussi de reconsidérer les normes de qualité de l'air pour les particules, à la lumière des données scientifiques récentes concernant les PM-2,5.

### **III.4 SURVEILLANCE ET NORMES DE RESTRICTION SUR LES METAUX LOURDS** **[68]**

La majorité des éléments métalliques présents dans l'atmosphère, à l'exception du mercure, est associée à des aérosols c'est-à-dire des petites particules liquides et/ou solides en suspension dans l'air.

Ces éléments métalliques sous forme particulière sont toxiques pour l'homme et l'environnement.

Aussi, les directives européennes (82/884/CE et 99/30/CE) concernant le **plomb** et la directive européenne 96-62 CE du 27 septembre 1996 pour **l'arsenic, le cadmium et le nickel** recommandent une surveillance de ces éléments dans l'atmosphère.

➤ **Traité international**

Un protocole sur les métaux lourds a été adopté et signé à Aarhus au Danemark en 1998. Son objectif est de réduire globalement les émissions de cadmium, de plomb et de mercure par rapport aux niveaux de 1990 ou de toute autre année allant de 1985 à 1995 inclus.

➤ **Valeur OMS 1996**

Actuellement, excepté pour le plomb, les seules références sont les normes OMS de 1996 (tableau N°III.1).

**Tableau N°III.1 : Valeurs guides de l'OMS de 1996 pour les métaux lourds [68 et 64].**

ELEMENT	PERIODE CONSIDEREE	VALEUR GUIDE OMS 1996
<b>Arsenic</b>	-	Risque pour une vie entière de $1,5 \cdot 10^{-6}$ d'avoir un cancer pour une exposition à une concentration de $1 \text{ ng/m}^3$
<b>Cadmium</b>	1 an	$5 \text{ ng/m}^3$
<b>Nickel</b>	-	Risque pour une vie entière de $3,8 \cdot 10^{-7}$ d'avoir un cancer pour une exposition à une concentration de $1 \text{ ng/m}^3$
<b>Plomb</b>	1 an	$500 \text{ ng/m}^3$
<b>Manganèse</b>	1 an	$0,15 \text{ } \mu\text{g/m}^3$

Pour l'arsenic et le nickel, l'OMS ne donne pas de valeur limite mais un incrément de risque d'avoir un cancer pour une exposition durant une vie entière à une concentration donnée.

➤ **Directive sur le plomb**

Les teneurs en plomb sont réglementées par une directive française. Le décret n°98-360 du 6 mai 1998 fixe une valeur limite et un objectif de qualité de l'air :

- *Valeur limite* :  $2 \mu\text{g/m}^3$  en moyenne sur une année ;
- *Objectif de qualité* :  $0,5 \mu\text{g/m}^3$  en moyenne sur une année.

➤ **Future directive européenne**

Une directive européenne est en cours d'élaboration propose les valeurs seuils (moyennes annuelles) pour As, Cd, Ni et Pb données en tableau N°III.2.

**Tableau N°III.2 : Normes de la future directive européenne relative aux métaux lourds [68].**

ELEMENT	NORME (en ng/m3)
<i>Arsenic</i>	7
<i>Cadmium</i>	5
<i>Nickel</i>	10
<i>Plomb</i>	500

## **CHAPITRE IV**

## **IV. PRINCIPALES METHODES DE MESURE ET D'ANALYSE DES PARTICULES EN SUSPENSION**

La nocivité des particules n'est pas uniquement liée à leur concentration massique mais aussi à leur granulométrie et à leur composition chimique (minérale et organique) [69].

La première nécessité est de disposer de mesures donnant des informations sur la masse des particules dans le domaine granulométrique intéressant : particules de diamètre aérodynamique respectivement inférieur à 10, à 2,5  $\mu\text{m}$  et à 1  $\mu\text{m}$  [69].

Cela implique donc de choisir des dispositifs d'échantillonnage adéquats pour la détermination des concentrations massiques des fractions correspondantes [69].

En second lieu, cette approche globale doit être complétée par la détermination des principaux constituants de l'aérosol atmosphérique urbain [69] :

- Métaux (Pb, Cd, Ni, As, ...) selon l'environnement concerné ;
- Composante acide (sulfates, ammoniums, chlorures, nitrates) ;
- Composante organique.

C'est ainsi que la caractérisation des aérosols dans l'air exige le passage par les étapes suivantes :

### **IV.1 ECHANTILLONNAGE**

Il est reconnu que l'efficacité de collecte des particules en suspension n'approche 100% que pour les tailles de particules approximativement inférieures à 3 $\mu\text{m}$ . au delà de cette dimension, cette efficacité est fortement influencée par les conditions météorologiques (vitesse du vent) et de prélèvement (débit d'aspiration, position et conception du dispositif de captation) [69].

En général, le dispositif de prélèvement est constitué [69] :

- d'une entrée d'air sommaire (entonnoir, filtre ouvert) ou plus sophistiquée (tête de prélèvement) ;
- d'un support de collecte (filtre ou plaque d'impaction) ;
- d'une pompe ;
- d'un régulateur de débit.

Généralement, l'échantillonnage se fait avec ou sans fractionnement granulométrique, ce qui donne lieu aux catégories de prélèvement suivantes :

#### **IV.1.1 Les prélèvements sans coupure granulométrique précise :**

Ils sont généralement effectués selon l'une des trois techniques suivantes [69] :

- **La méthode de mesure dite des « fumées noires »** : à faible débit d'aspiration (85 l/h) [70] privilégie la captation sur filtre des particules fines inférieures à environ 5 $\mu\text{m}$  constituants des suies imbrûlés émis par les unités de combustion fixes et mobiles.

- **Les prélèvements sur filtre ouvert de 47mm** : généralement en nitrate de cellulose de porosité  $0,8\mu\text{m}$ , à un débit relativement élevé (de 1 à  $1,5\text{ m}^3/\text{h}$ ) où les particules de diamètre supérieur à  $0,3\mu\text{m}$  sont retenues quantitativement sur le filtre.
- **Les échantillonneurs HVS (High Volume Sampler)** : à grand débit (plus de  $1\text{m}^3/\text{mn}$ ) configurés en mode TSP (Particules Totales en Suspension) dont l'efficacité de collecte des particules de grand diamètre est significative.

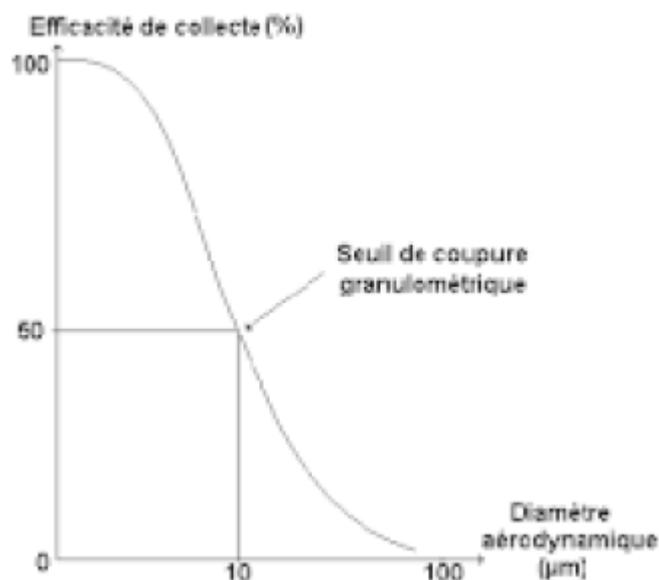
#### IV.1.2 Les prélèvements avec coupure granulométrique [69] :

Ils sont effectués à l'aide de matériels séquentiels ou automatiques équipés d'une « tête » qui, par sa conception, ne capte en théorie que des particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à une certaine valeur.

L'efficacité de collecte d'une particule varie suivant son diamètre aérodynamique comme l'indique la figure N°IV.1. Le seuil de coupure granulométrique d'une tête est la valeur du diamètre aérodynamique correspondant à une efficacité de 50%.

Aucune tête de prélèvement n'est donc strictement sélective, c'est à dire laisse passer 100% des particules inférieures à une valeur annoncée et exclut 100% des particules plus grandes que cette valeur.

Le seuil de coupure est fonction de débit d'aspiration, du colmatage du filtre et des conditions de température et de pression ambiante. Les appareils de mesures de concentration en particules doivent donc maintenir le débit d'aspiration imposé (ex :  $1\text{m}^3/\text{h}$ ) de façon à avoir un seuil de coupure constant au niveau de la tête.



**Figure N°IV.1** : Variation de l'efficacité de collecte d'une tête de prélèvement [69].

- **La tête de prélèvement française normalisée AFNOR NF X43-021 [71]** : cette tête, décrite sur la figure N°IV.2, équipait l'ensemble du parc d'appareils de type PPA60 et jauge bêta jusqu'en 1995. elle fonctionne avec un débit d'aspiration de  $1,5\text{ m}^3/\text{h}$ .

La coupure granulométrique annoncée à  $10\mu\text{m}$  serait plutôt aux alentours de  $13\mu\text{m}$  d'après les essais réalisés en Grand-Bretagne par le Warren Spring Laboratory [72], de plus, elle est fonction du vent.

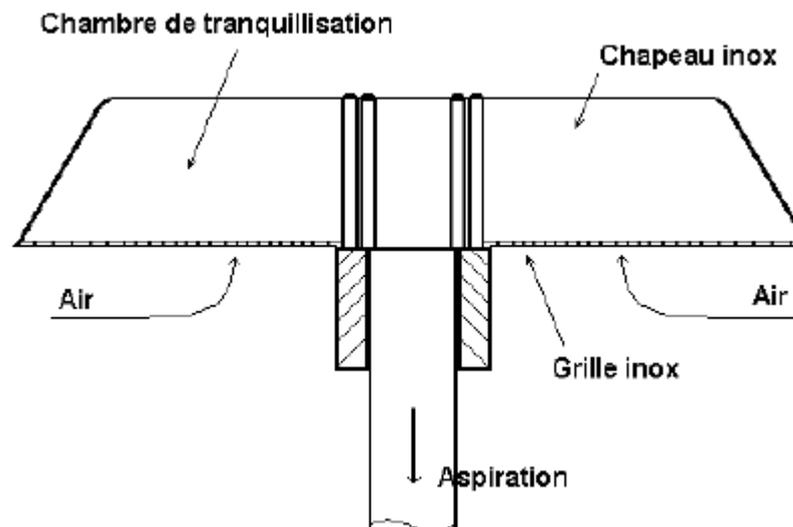


Figure N°IV.2 : Tête de prélèvement NF X 43-021 [69].

- **La tête type PM-10 d'origine américaine** : le principe de séparation de la tête PM-10, schématisée sur la figure N°IV.3, est l'impaction par effet aérodynamique induit par un système de chicanes, les particules plus grosses que le seuil de coupure percutent par inertie une surface d'impaction graissée pour éviter tout phénomène de réenvol.

Le seuil de coupure granulométrique est annoncé à  $10\mu\text{m}$  pour un débit d'aspiration fixé à  $1\text{m}^3/\text{h}$ . les caractéristiques de la tête seraient peu influencées par la vitesse du vent selon des travaux menés aux Etats-Unis [73].

Cette tête équipe l'ensemble des appareils récemment implantés dans les réseaux (jauge bêta depuis 1995, microbalance à variation de fréquence).

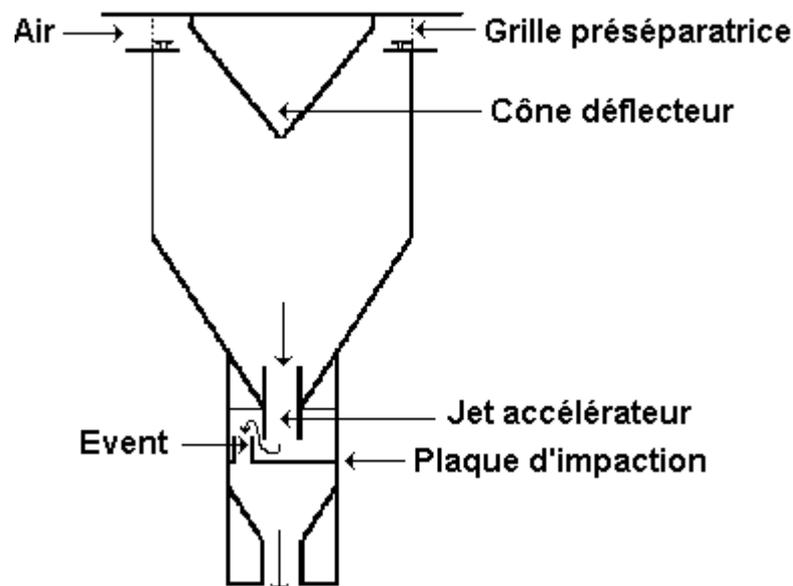
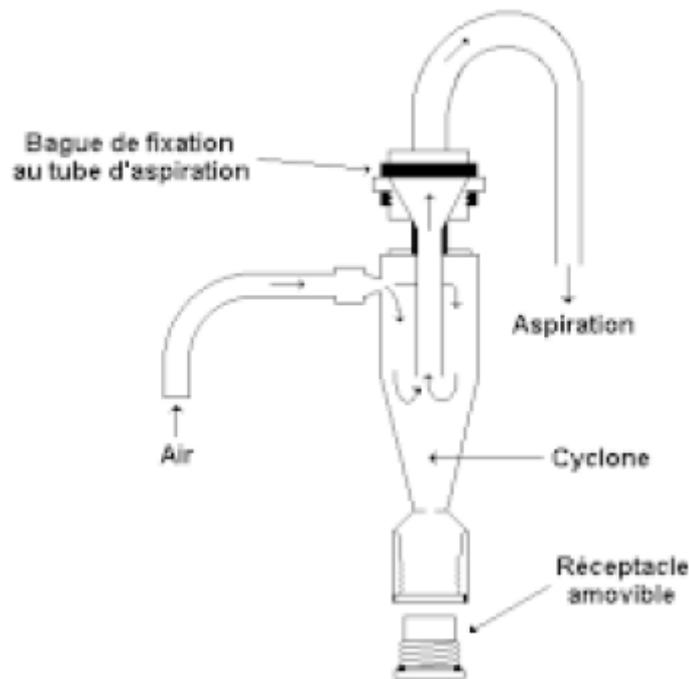


Figure N°IV.3 : Tête de prélèvement PM-10 [69].

- **La tête type PM-2,5 d'origine américaine** : cette tête représentée sur la figure N°IV.4 est proposée par les constructeurs sur des appareils tels que la microbalance à variation de fréquence.

La coupure granulométrique annoncée à  $2,5\mu\text{m}$  pour un débit d'aspiration fixé à  $1\text{m}^3/\text{h}$  est obtenue par un système de type « cyclone », les particules de diamètre supérieur étant récupérées dans un récipient amovible.

Contrairement à la tête PM-10, ce dispositif n'est pas démontable en vue d'un éventuel nettoyage.



**Figure N°IV.4** : Tête de prélèvement PM-2.5 [69].

### IV.1.3 Les prélèvements avec fractionnement granulométrique

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 [74].

Les impacteurs virtuels ou dichotomes travaillent à débit moyen ( $1,7\text{m}^3/\text{h}$ ) et permettent d'avoir deux classes granulométriques : la fraction alvéolaire ( $\varnothing < 2,5\mu\text{m}$ ) et la fraction trachéo-bronchique ( $2,5\mu\text{m} < \varnothing < 10\mu\text{m}$ ) [55].

Les impacteurs à cascades sont équipés de 5 à 7 niveaux d'impaction et permettent d'avoir 5 à 7 fractions granulométriques (de 0 à  $1\mu\text{m}$ , de 1 à  $2,5\mu\text{m}$  etc.). Ces cascadeurs travaillent à débit fort ( $30$  à  $60\text{m}^3/\text{h}$ ).

L'appareil le plus connu est le HVS-PM10 équipé d'un impacteur d'Andersen. Il est considéré comme référence par l'Agence Américaine EPA [8].

## **IV.2 LA MESURE EN TENEUR ATMOSPHERIQUE EN PARTICULES [69]**

La surveillance de la qualité de l'air est basée sur la mesure de concentrations en polluants de l'atmosphère. Cette concentration s'exprime essentiellement en unité de masse par unité de volume d'air prélevé et le plus fréquemment en microgramme de polluant par mètre cube d'air.

Les diverses techniques de mesure existantes varient selon le type de particules surveillées et débouchent sur des résultats notablement différents selon la technique utilisée.

### **IV.2.1 La méthode gravimétrique (échantillonneur à grand débit)**

Cette méthode simple consistant à peser des filtres avant et après prélèvement est cependant astreinte à des contraintes d'utilisation [75] : le relevé des filtres est manuel, les filtres empoussiérés doivent être pesés dans les mêmes conditions de température et d'humidité que les filtres vierges, sans perdre de matière lors des manipulations.

En égard aux concentrations atmosphériques urbaines (quelques dizaines de microgrammes par mètre cube d'air) la durée d'échantillonnage peut difficilement être inférieure à 24 heures. Cependant le HVS de marque Andersen équipé d'une tête PM-10 est considéré au niveau européen comme une référence pour l'échantillonnage de la fraction PM-10 des particules en suspension [76].

Les filtres en fibre de verre sont bien adaptés à la mesure gravimétrique, ils ne se colmatent pas trop vite mais ils peuvent contenir des impuretés minérales pouvant gêner des analyses chimiques ultérieures.

### **IV.2.2 La réflectométrie (indice de fumées noires) [70]**

L'air échantillonné passe au travers d'un papier filtre sur lequel se déposent les particules. L'analyse du filtre, effectuée ultérieurement par réflectométrie, consiste à éclairer le filtre par de la lumière visible et à mesurer les intensités incidente ( $I_0$ ) et réfléchie ( $I$ ). La réflectance ( $I/I_0$ ) qui varie de 100 à 0% suivant le degré de noircissement du filtre est convertie par le biais d'une courbe d'étalonnage en concentration de fumées noires par unité de surface. La connaissance du débit permet de calculer un indice de fumées noires en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La courbe d'étalonnage est établie pour un type de papier filtre et un réflectomètre donnés.

Cette technique, bien que relativement ancienne, peut être considérée comme un bon traceur de la pollution par les véhicules diesel. Cependant, elle doit être utilisée avec discernement hors des zones strictement urbaines en raison du changement de couleur des particules.

### **IV.2.3 La radiométrie (jauge bêta)**

Le principe est de mesurer en continu des PM-10 par atténuation d'un rayonnement bêta. La nature des particules n'a qu'une faible incidence. Cette technique est reconnue équivalente à une mesure pondérale [77].

La durée d'échantillonnage minimale varie entre 1 et 24 heures suivant le type d'environnement.

Il faut noter que ce type d'appareillage est soumis à de fortes contraintes administratives : (nécessité d'une autorisation de détention de sources radioactive, servitudes d'utilisation).

#### IV.2.4 La microbalance à variation de fréquence (TEOM : Tapered Element Oscillating Microbalance)

Cet appareil est un système de mesure en continu entièrement informatisé.

Il est constitué d'une tête de prélèvement, d'une microbalance à élément oscillant et d'une unité de contrôle et de commande. La tête de prélèvement de type PM-10 fonctionne à un débit d'aspiration de  $1\text{m}^3/\text{h}$ .

Un filtre est installé sur un élément oscillant à une fréquence donnée. Les particules déposées augmentent la masse du système produisant une décroissance de la fréquence est enregistrée en permanence par l'unité de contrôle, elle est ensuite convertie en masse.

Des tests ont montré que l'appareil est peu sensible aux vibrations extérieures [75].

Le pas de temps de mesure est modulable de 10 minutes à 24h comme pour un analyseur de gaz conventionnel.

#### IV.2.5 La mesure optique

C'est la mesure par diffusion lumineuse de la concentration en nombre de particules par un compteur optique.

Bien que donnant des informations intéressantes, notamment sur la taille des particules, cette méthode nécessite des études complémentaires concernant :

- l'étalonnage et son contrôle par l'utilisateur ;
- la possibilité de convertir une concentration en nombre en une concentration n masse.

L'utilisation d'appareils tels que les compteurs optiques de particules semble donc pour l'instant devoir se limiter à des mesures ponctuelles permettant par exemple de choisir un site avant l'implantation d'une station.

Nous résumons, dans le tableau IV.3, les principales méthodologies de prélèvement utilisées pour l'échantillonnage des particules en suspensions [78].

**Tableau N°IV.1 : Principales méthodes d'échantillonnage de la matière particulaire en suspension [78].**

Dispositif de prélèvement	Sélection granulométrique	Nombre de fractions	Diamètre de particules ( $\mu\text{m}$ )	Débit ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Durée d'échantillonnage (h)	Principe de la mesure	Analyse ultérieure des particules
Sans tête (fumée noire)	Non	1	0-5	<1	24 h	Réfectométrie	Non
Sans tête (TSP)	Non	1	0.1 à 20-30	1.5	24 h	Gravimétrie	Oui
HVS (TSP)	Non	1	0.1 à 20-30	66 à 100	24 h	Gravimétrie	Oui
HVS-PM 10	Oui	1	< 10	66 à 100	24 h	Gravimétrie	Oui
Jauge-bêta	Oui	1	< 10	1.5	5 mn – 24 h	Radiométrie	Non
HVS-PM 10 Impacteur à cascade	Oui	2 à 7	< 10	34 à 68	24 h	Gravimétrie	Oui
TEOM	Oui	1	< 10	1	5 mn-24 h	Fréquence de vibration	Non

### ❖ **Les filtres et membranes de rétention [74]**

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

- une efficacité de collection d'au moins 99% pour les particules de diamètre égale à 0,3 $\mu$ m et plus ;
- une hygroscopicité faible ;
- un taux d'impureté aussi faible que possible afin d'éviter les interférences dans l'analyse quantitative des composés métalliques que véhiculent les poussières.

Les filtres les plus utilisés sont :

#### ➤ **les filtres à fibre de verre :**

Ils ont une efficacité de collection de **99%** pour les particules de diamètre supérieur à **3 $\mu$ m**. cette efficacité est mesurée sur les particules d'aérosols du **dioctyl-phalate**. L'hygroscopicité de ces filtres est faible.

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 de teneurs élevées. Les filtres **Gelman type A** et **Whatman GF-A** contiennent par exemple plus de 50 $\mu$ g Zn/m<sup>2</sup>.

#### ➤ **Les filtres membranes**

Ce sont des filtres **nitro-cellulose (Sartorius et Milipore)** ou **acétate et ester de cellulose (Gelman GA-3)** qui sont solubles dans **les éthers** et **les 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 ont une porosité de l'ordre de **8 $\mu$ m**. Ces filtres sont plus hygroscopiques que les filtres en fibres de verre, mais présentent l'avantage d'avoir des teneurs extrêmement faibles en éléments métalliques.

Leur inconvénient est qu'ils présentent une forte résistance à l'écoulement de façon qu'on ne puisse pas les utiliser dans les **HVS** pour les prélèvements à fort débit.

Avec les deux types de filtres (en fibres de verre et membranes) on recueille avec une bonne efficacité même les particules très fines de 0,1 $\mu$ m de diamètre.

### **IV.3 L'ANALYSE DES PARTICULES EN SUSPENSION**

Un autre facteur qui conditionne la nocivité des particules est la nature des polluants associés (aérosol acide, HAP, métaux...). Les composantes acide et organique sont généralement associées aux particules les plus fines. Ceci montre l'intérêt d'analyses chimiques spécifiques s'ajoutant à la détermination d'indicateurs globaux [69].

C'est ainsi, qu'il existe des méthodes plus au moins développées qui permettent de déterminer certains constituants ainsi que leur concentration, après une préparation préliminaire de l'échantillon [79 et 55] :

- Les éléments métalliques sont déterminés par diverses méthodes classiques :
  - La Spectrométrie d'Adsorption Atomique (S.A.A) ;
  - L'Emission par Plasma (ICP);
  - La Fluorescence X ;
  - Les Méthodes Nucléaires.

Pour les deux dernières méthodes l'analyse peut se faire directement sur filtre.

- La composante acide est généralement déterminée par :
  - La Chromatographie Ionique ;
  - La Spectrométrie UV-Visible.
- La composante organique contenant les HAP quant à elle est déterminée par des techniques chromatographiques telles que :
  - La Chromatographie Liquide Haute Performance (C.L.H.P) équipée d'une détection par émission de fluorescence ;
  - La Chromatographie en Phase Gazeuse (C.P.G).

❖ **Les stations de mesure des polluants atmosphériques (surveillance de la qualité d'air) [68]**

Toutes les stations fixes ne sont pas identiques. Suivant leur emplacement, les polluants mesurés vont différer. Il existe 5 types de station :

➤ **Les stations urbaines denses**

Elles mesurent la pollution moyenne sur une agglomération. Elles sont situées dans des quartiers densément peuplés (entre 3000 et 4000 habitants/km<sup>2</sup>). Elles ne doivent pas être exposées directement à une source de pollution et représentent ainsi l'air inhalé par la majorité des citoyens.

Ces stations mesurent les teneurs en particules en suspension, en oxydes d'azote (NO et NO<sub>2</sub>), en ozone (O<sub>3</sub>), et en dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>).

➤ **Les stations périurbaines**

Elles sont situées en périphérie des grandes villes et ont pour rôle l'étude de l'évolution de polluants photochimiques comme l'ozone (O<sub>3</sub>).

➤ **Les stations rurales**

Le but est de mesurer les teneurs de fond en ozone (O<sub>3</sub>). Aussi, ce type de station est implanté dans des zones de population faible et éloignée de toute activité importante.

➤ **Les stations de proximité industrielle**

Elles doivent se trouver à proximité d'une source zone industrielle émettrice de polluants. Leur objectif est la mesure de l'impact d'une source ponctuelle sur la qualité de l'air.

➤ **Les stations de proximité automobile**

Elles doivent mesurer la pollution maximale respirée en ville ; aussi, elles doivent être implantées à moins de 10 m d'une route à grand trafic routier dont la densité de circulation doit être supérieure à 10 000 véhicules par jour. Sur ces stations, il est nécessaire d'utiliser un comptage des véhicules.

Les polluants mesurés sont uniquement ceux d'origine automobile : « le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO et NO<sub>2</sub>), les particules en suspension ».

Ainsi lors d'une campagne de mesure, il est important de caractériser le site de mesure et d'identifier le type de station étudiée.

# CHAPITRE V

## **V. METHODOLOGIE**

### **V.1 SITE DE PRELEVEMENT**

Pour étudier l'ampleur de la pollution de l'air par les diverses classes granulométriques des aérosols particuliers dans l'agglomération d'Alger, nous avons retenu un site qui d'après la classification européenne, constitue un site de type « station trafic » [80], c'est-à-dire un site de proximité qui est directement influencé par les émissions issues du trafic routier. Un tel site permet d'accéder aux teneurs maximales auxquelles peut être exposée une population en milieu urbain. Le site de mesure choisi est situé à l'Ecole Nationale Polytechnique à environ 10 Km à l'est d'Alger. En ce site, le poste de prélèvement est implanté à 4m d'altitude et à 9m du bord de la R.N. N°5. En 2000, cet important axe routier était fréquenté par plus de 25000 véhicules/jour dont environ 15% de bus et véhicules lourds diesel [81]. Ce site qui se caractérise par l'absence d'obstacles, fait l'objet d'une bonne ventilation naturelle. A noter aussi l'absence de sources industrielles émettrices de particules dans le voisinage du site étudié.

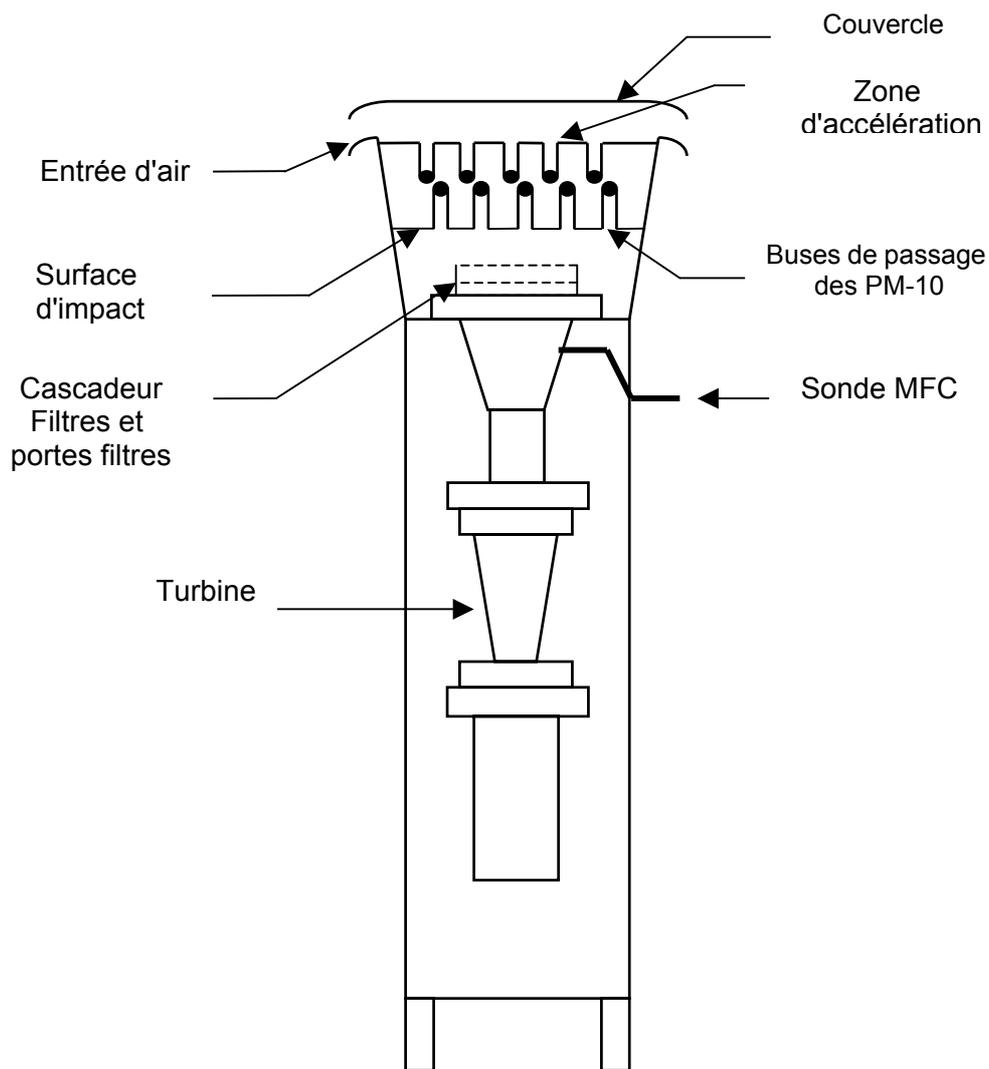
### **V.2. MODE DE PRELEVEMENT**

Pour les prélèvements par classe granulométrique, un échantillonneur à fort débit, le HVS-PM-10 équipé d'un cascadeur Sierra-Andersen (marque Graseby, USA) à 4 étages a été utilisé.

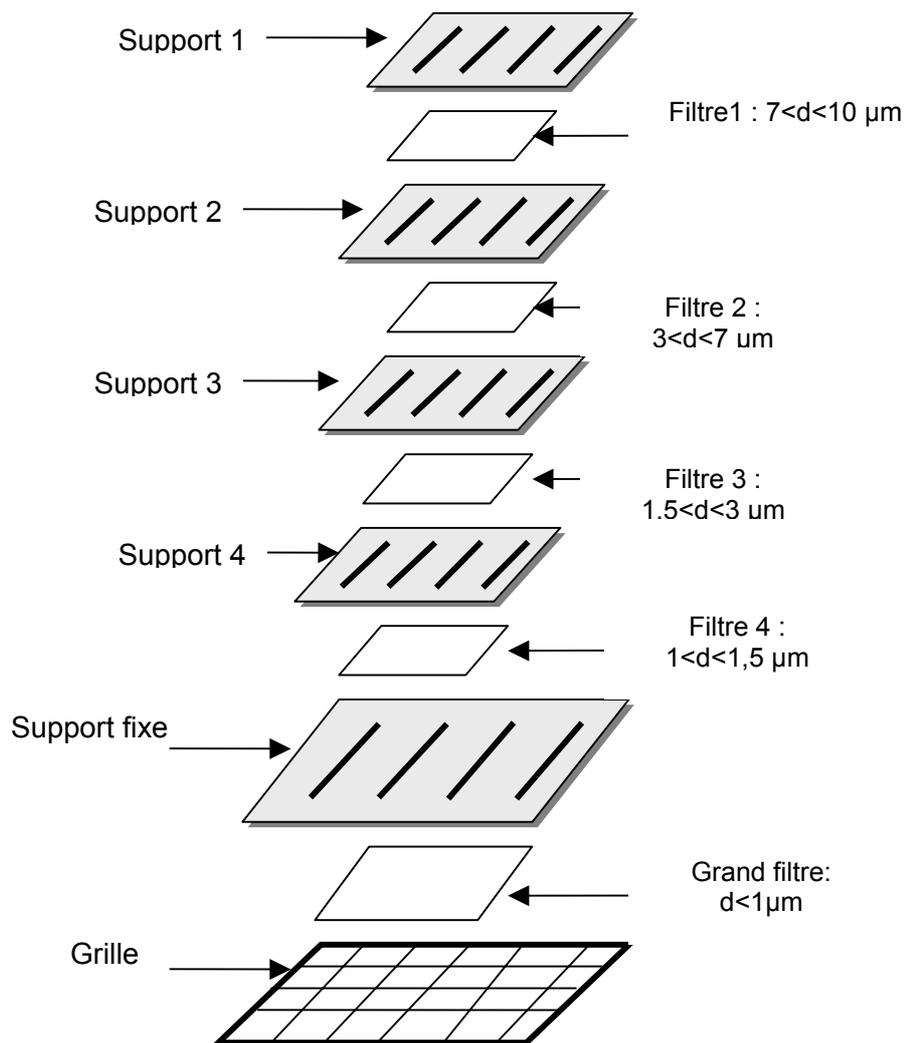
Ce dispositif illustré en figure N°V.1 est composé essentiellement de trois parties :

- Le High Volume Sampler (HVS) qui représente le corps de cet échantillonneur ; il se compose principalement :
  - D'une turbine d'aspiration d'air ;
  - Des étages de sélection qui servent de porte filtres et qui permettent le tri par impaction des particules selon leur taille ;
  - D'un contrôleur électronique de débit, le MFC (Mass Flow Controller), qui permet de maintenir constant le débit d'aspiration d'air. En cas de colmatage du média filtrant, le MFC agit sur la puissance de moteur par ajustage électronique du voltage.
- La Tête sélective PM-10 qui constitue la zone où le fractionnement à 10 µm se fait par impaction directe. Cette impaction repose sur l'effet aérodynamique induit par la présence de 9 buses circulaires placés au dessus d'une surface lisse d'impaction. Les particules inférieures au seuil de coupure de 10µm sont entraînées par le flux de l'air dans les buses et sont collectées sur le filtre. Tandis que les particules plus grosses s'écartent du flux et impactent sur la surface plane d'impaction en raison de leur inertie plus élevée. Afin d'éviter le réentraînement des particules grosses, la surface d'impaction est graissée par l'huile de silicone et nettoyée régulièrement.
- Le Cascadeur d'Anderson qui permet d'avoir un prélèvement de particules par fraction granulométrique, est équipé de quatre étages et permet d'accéder aux 5 classes granulométriques suivantes : 10 à 7 µm, 7 à 3 µm, 3 à 1,5 µm, 1,5 à 1 µm et la classe finale inférieure à 1 µm (voir figure N°V.2).

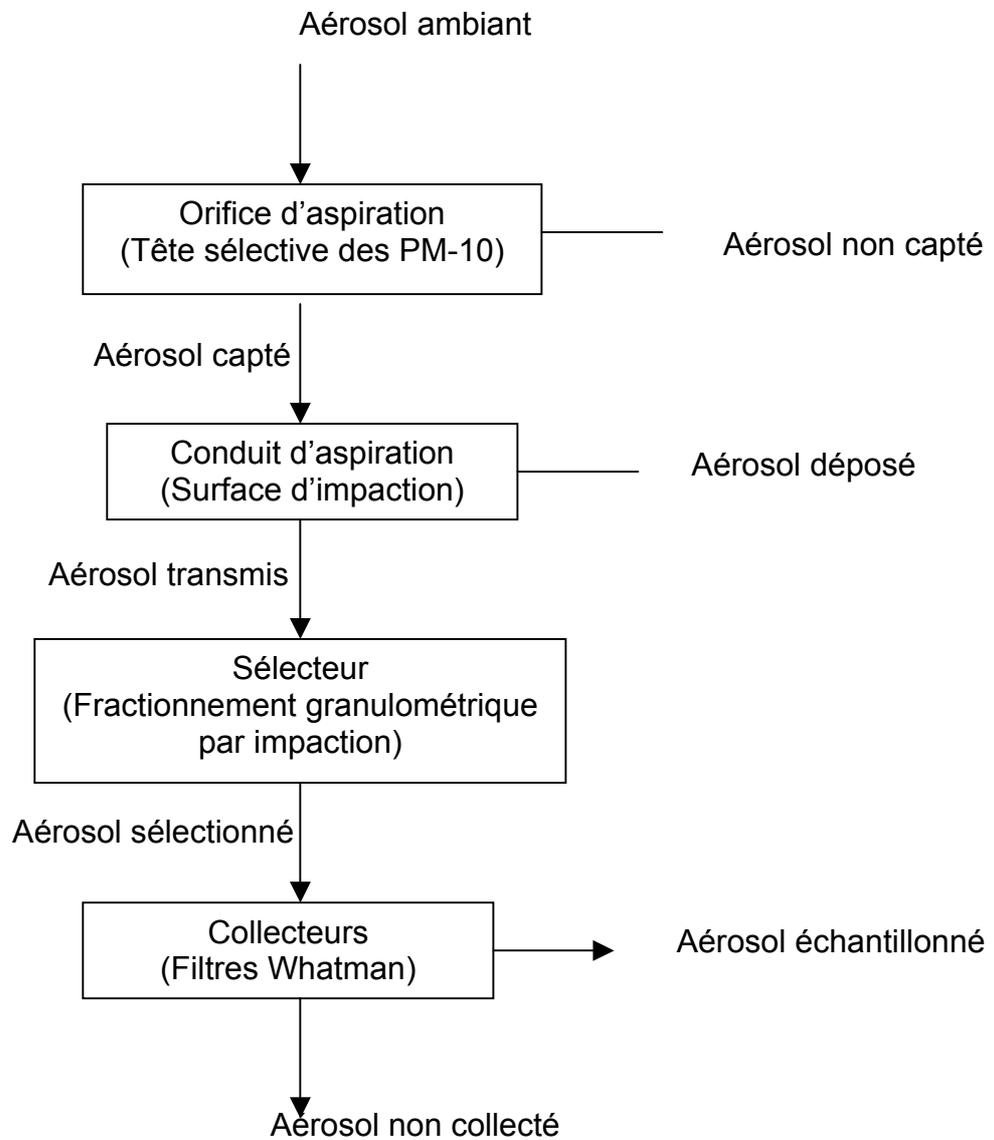
Nous présentons, en figure V.3, un schéma simplifié du mode d'échantillonnage.



**Figure N°V.1** : L'échantillonneur HVS PM-10 avec cascadeur d'Andersen pour la collecte des PM-i.



**Figure N°V.2** : Etages du cascadeur d'Andersen et classes granulométriques recueillies [82].



**Figure N°V.3 :** Schéma simplifié du mode d'échantillonnage [43].

Le débit de prélèvement est fixé à  $1\text{m}^3/\text{mn}$ . La durée de prélèvement est de 24 heures.

Les particules sont collectées sur des filtres membranes en fibre de verre de type Whatman de dimension 20 x 25 cm pour le filtre final et 10 x 12 cm pour les filtres des étages du cascadeur.

Pour la détermination de la teneur en PM-i, les filtres de chaque étage granulométrique sont pesés avant et après collecte à 0.1 mg près. La teneur atmosphérique en PM-i est alors exprimée en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### **V.3 ANALYSE DES METAUX LOURDS**

Afin d'analyser, par classe granulométrique, les métaux lourds qui sont véhiculés par les aérosols particulaires, une minéralisation des fractions de particules collectées sur les différents étages de l'impacteur est effectuée. La minéralisation acide à lieu conformément à la norme ISO 9885 [83]. Le filtre chargé de particules subit une double minéralisation dans l'acide nitrique 2N et quelques gouttes de  $\text{HClO}_4$ . Le minéralisât est ensuite filtré sur un filtre Whatman pour éliminer les résidus insolubles (carbone noir, silicates, etc.).

Une solution témoin est préparée en minéralisant dans les mêmes conditions un filtre en fibre de verre vierge.

Les métaux lourds Fe, Pb, Cu, Ni, Mn, Co et Cd, qui du point de vue sanitaire ont une incidence importante, sont alors analysés par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA) sur un appareil de type PYE UNICAM SP9, avec une flamme air/acétylène.

# CHAPITRE VI

## **VI. RÉSULTATS ET DISCUSSION**

### **VI.1 ETUDE DES NIVEAUX DE POLLUTION PAR LES AEROSOLS PARTICULAIRES**

L'étude des particules fines a été effectuée sur une durée globale de une année (de juillet 2002 à juin 2003) à raison d'une moyenne de 6 prélèvements journaliers par mois.

Chaque prélèvement compte normalement 5 fractions de particules correspondant aux cinq étages. Dans certains cas, et pour économiser la consommation des filtres, nous avons utilisé seulement 3 à 4 étages avec des seuils de coupure granulométrique alternés. Nous avons ainsi réalisé 75 prélèvements journaliers qui nous ont permis d'accéder à la collecte de plus de 240 fractions granulométriques à partir desquelles les teneurs des différentes classes PM-i ont été calculées.

Qualitativement, on constate que les filtres chargés sont de couleur noire, ce qui signifie que ces particules sont essentiellement constituées de suies et d'imbrûlés issus des émissions du trafic routier.

Les deux photos données en figures N°VI.1 et VI.2 illustrent la charge et la couleur des filtres après échantillonnage.

#### **VI.1.1 Evolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-i**

L'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM-i (i = 10 ; 7 ; 3 ; 1,5 et 1  $\mu\text{m}$ ) est illustrée en figures N°VI.3a, b, c, d et VI.4. Les teneurs moyennes, les valeurs extrêmes et les écarts types ainsi que les rapports PM-i/PM-10 sont résumées en tableau N° VI.1.

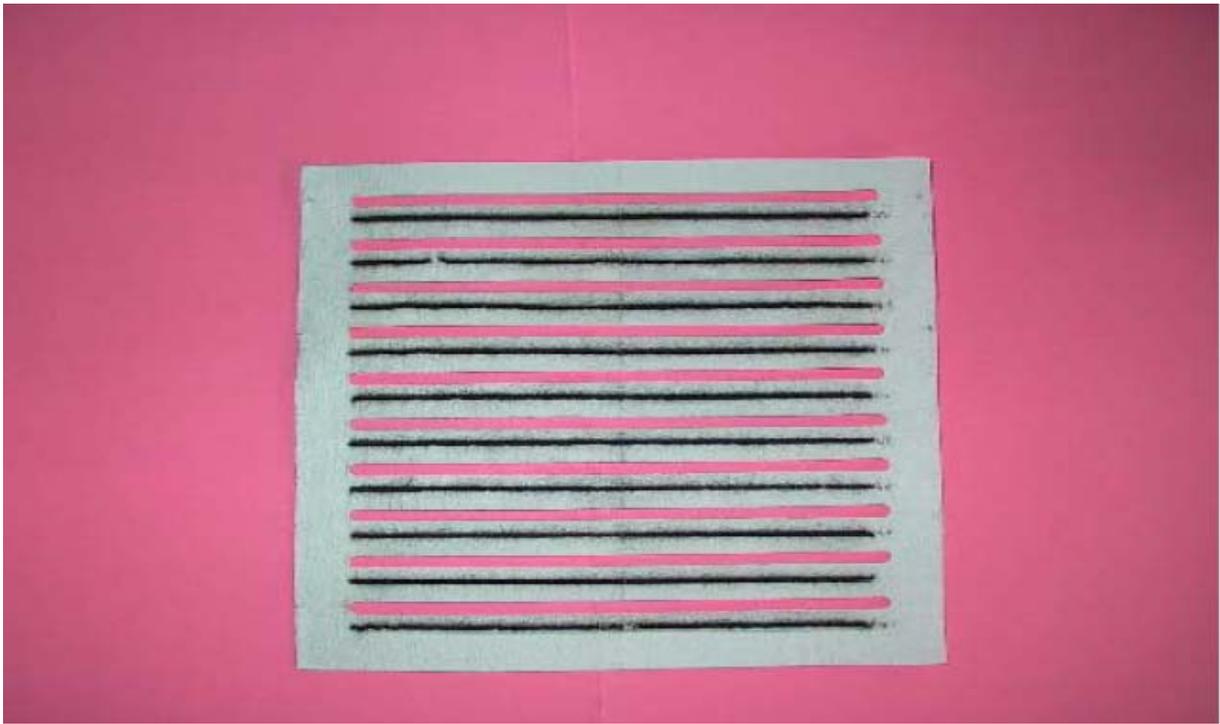
Pour les PM-10, les teneurs mesurées oscillent entre 37  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et 133,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La teneur moyenne annuelle s'élève à 75,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Les teneurs moyennes annuelles des particules respirables PM-3 et des particules très fines PM-1 s'élèvent respectivement à 40,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et 25,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Tableau N°VI.1 : Teneurs moyennes et extrêmes en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  des PM-i mesurées à l'ENP (Alger).**

<b>PM-i</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Maximum</b>	<b>Minimum</b>	<b>Ecart type</b>	<b>Rapport PM-i/PM-10</b>
<b>PM-1</b>	25,9	54,0	7,71	09,8	0,34
<b>PM-1.5</b>	32,3	51,0	11,2	11,2	0,43
<b>PM-3</b>	40,3	74,5	10,3	13,6	0,54
<b>PM-7</b>	63,5	114,1	34,0	19,3	0,84
<b>PM-10</b>	75,2	133,8	37,0	22,9	1

Les résultats montrent qu'il existe, comme c'est souvent le cas en pollution de l'air, une importante fluctuation temporelle. Ces fluctuations dépendent souvent aussi bien des variations dans les activités humaines que de l'influence des facteurs météorologiques (direction et vitesse du vent).



**Figure N°VI.1** : Photo d'un filtre de fractionnement granulométrique chargé par les PM-3.



**Figure N°VI.2** : Photo d'un filtre de l'étage terminal chargé par les PM-1.

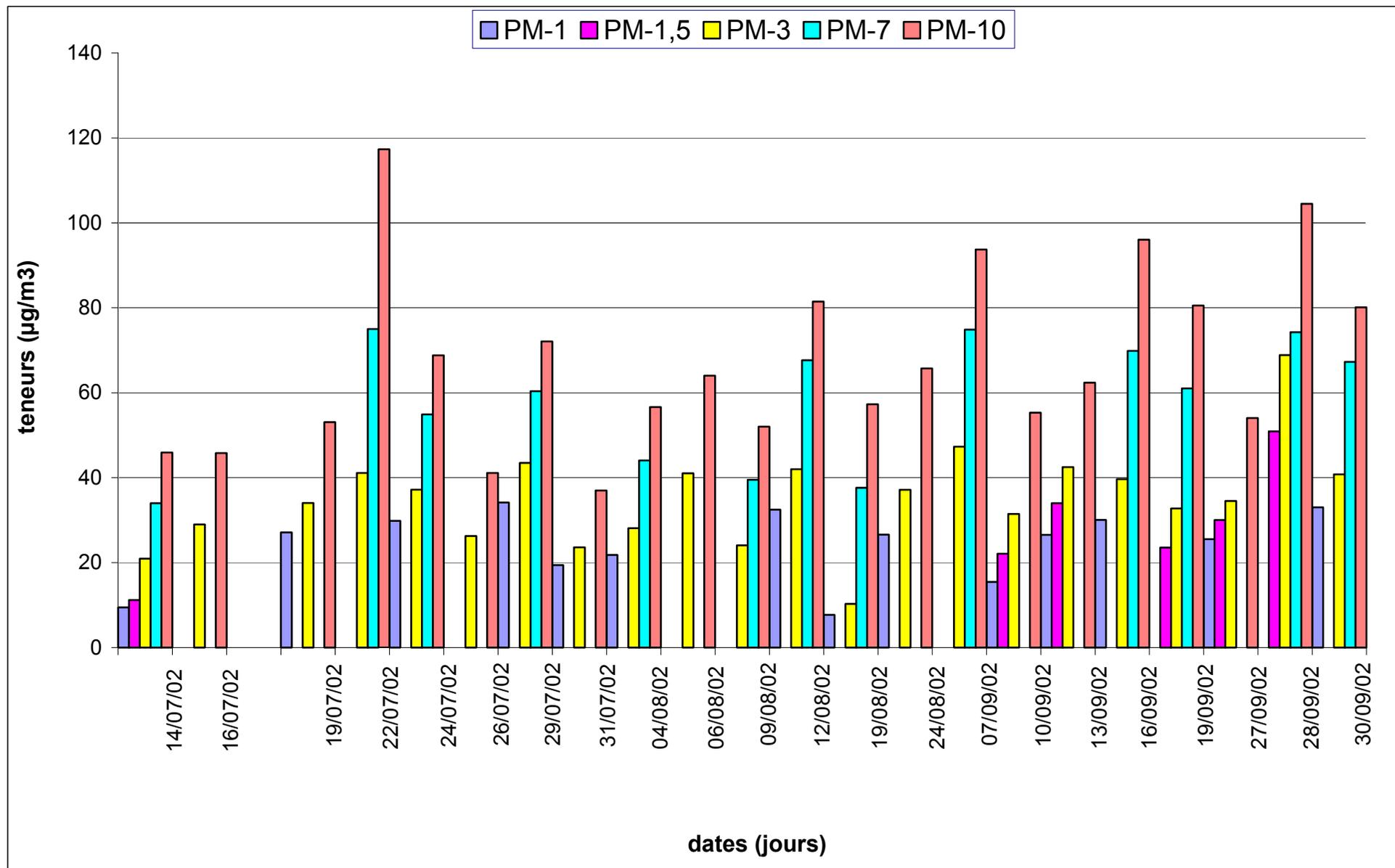
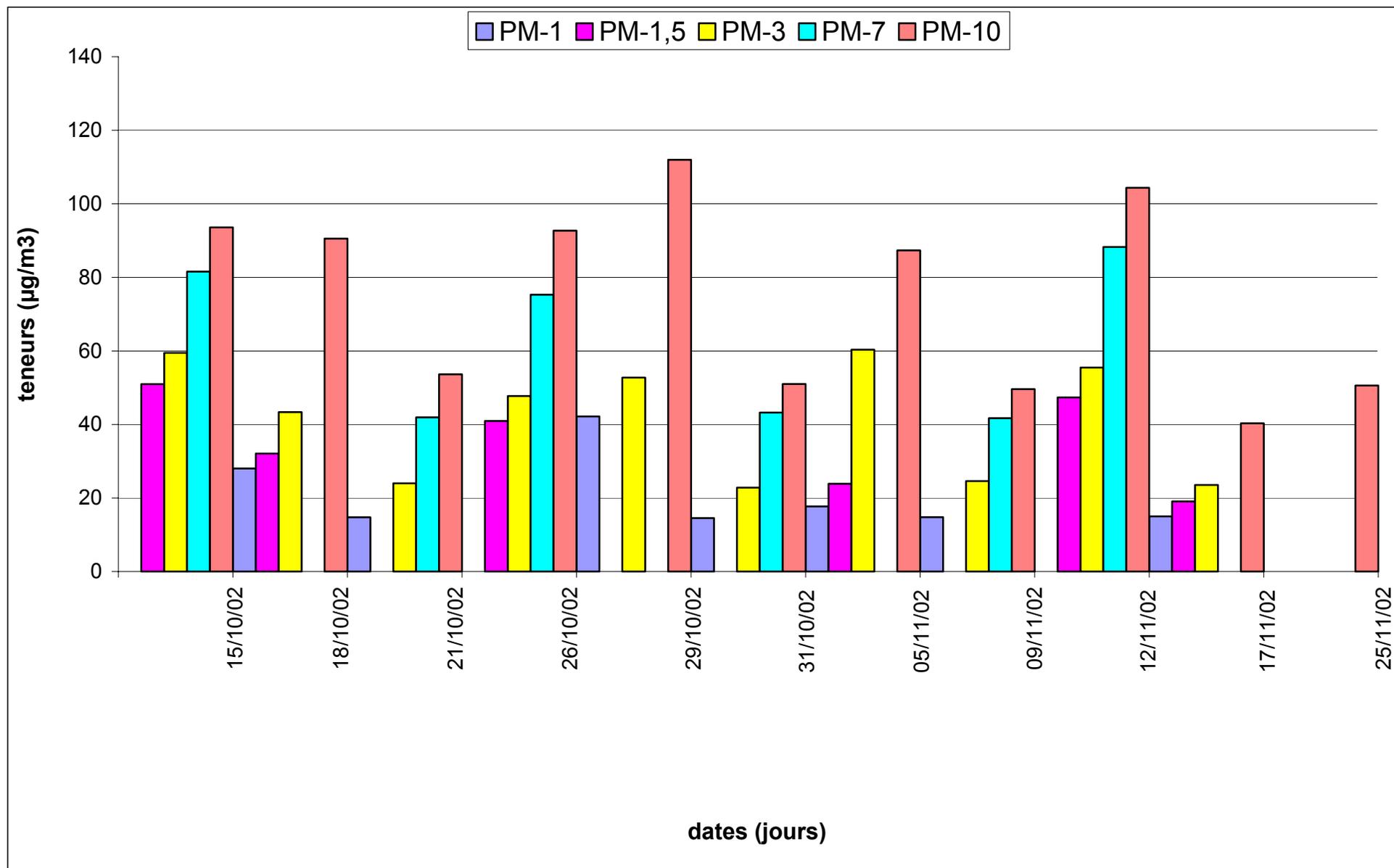


Figure N°VI.3a : Evolution des teneurs atmosphériques en PM-i mesurées à l'ENP (Alger).



**Figure N°VI.3b** : Evolution des teneurs atmosphériques en PM-i mesurées à l'ENP (Alger).

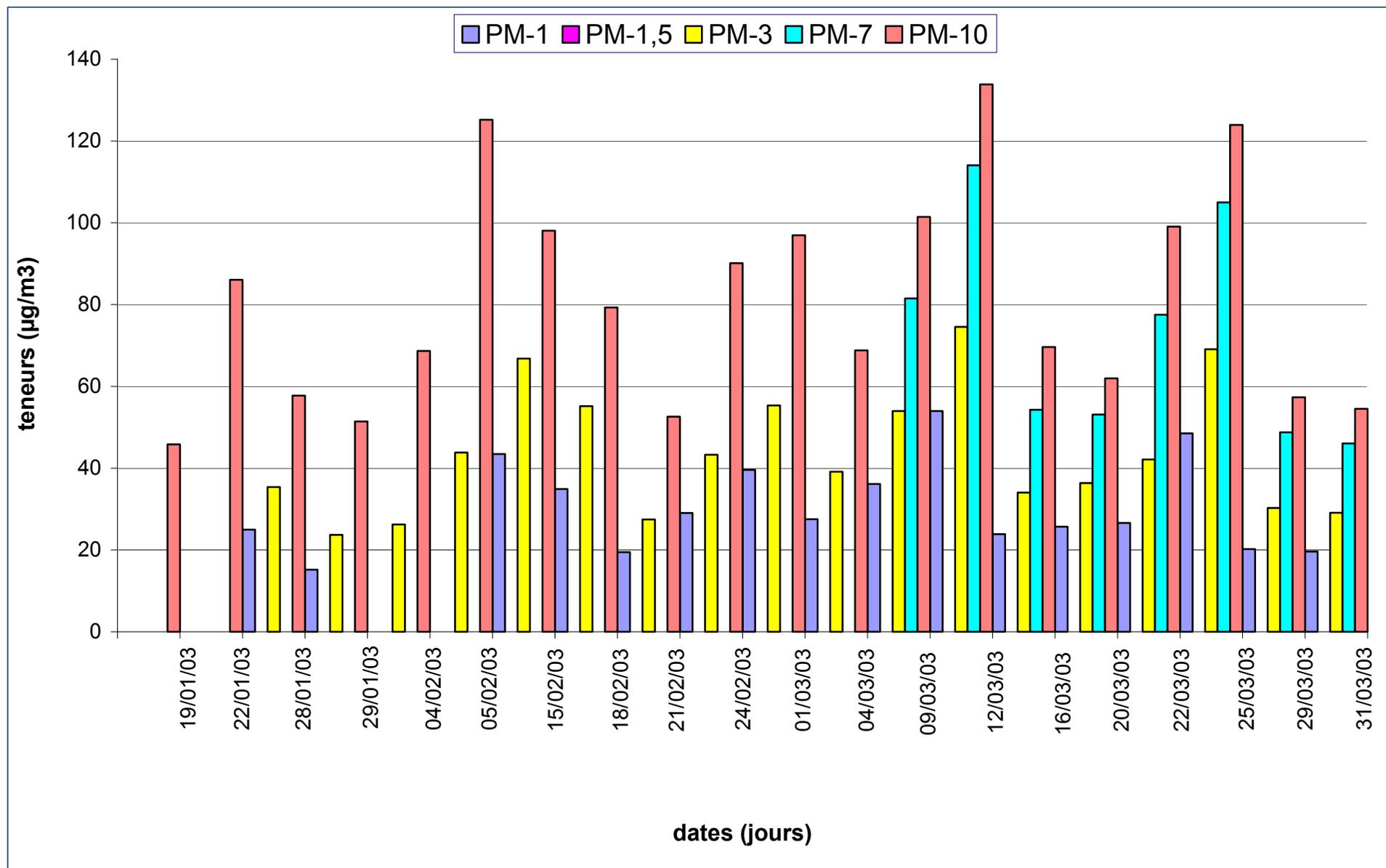


Figure N°VI.3c : Evolution des teneurs atmosphériques en PM-i mesurées à l'ENP (Alger).

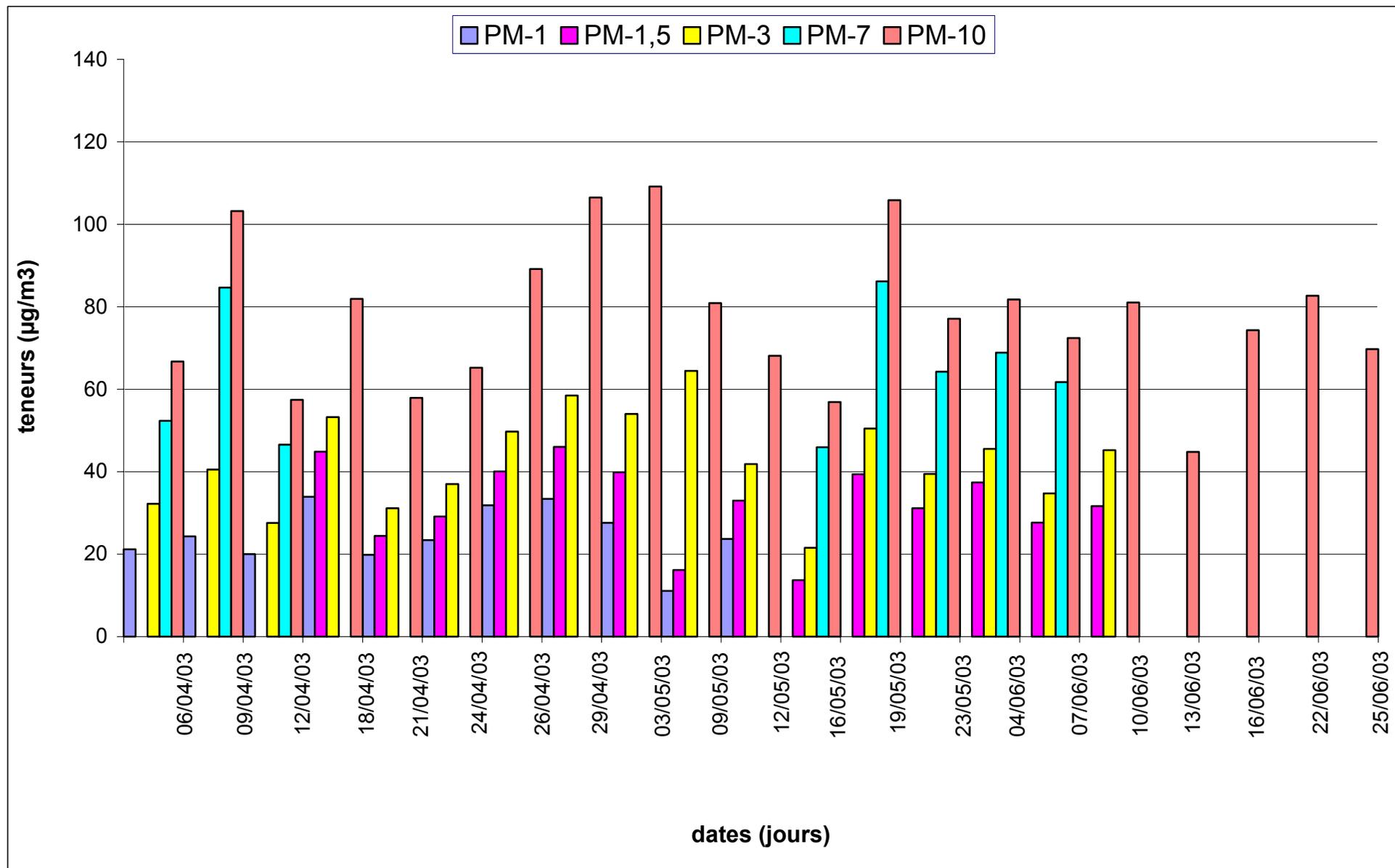
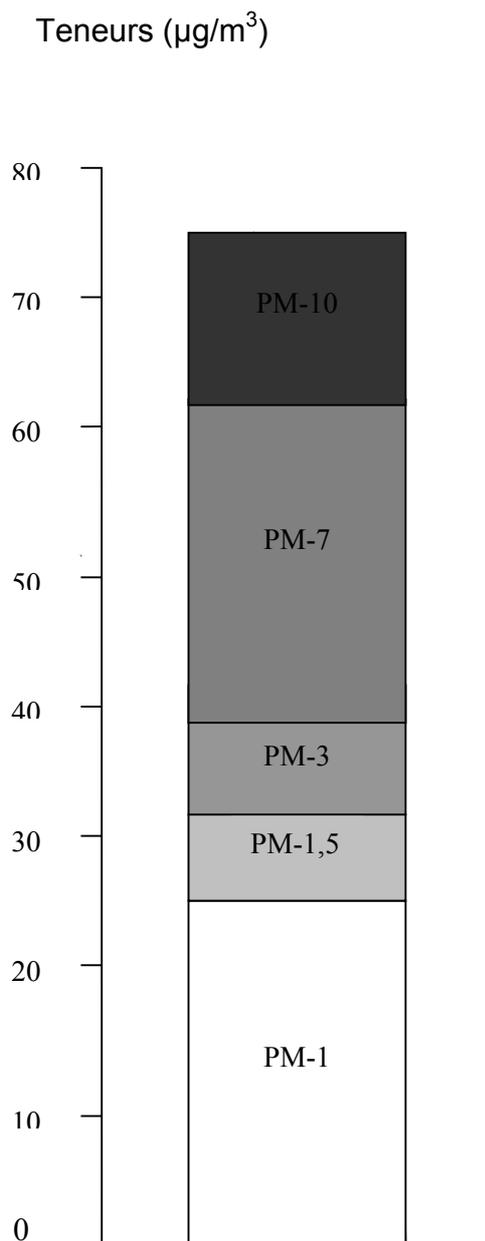


Figure N°VI.3d : Evolution des teneurs atmosphériques en PM-i mesurées à l'ENP (Alger).



**Figure N°VI.4 :** Teneurs moyennes des PM-i.

L'examen des variations saisonnières montre que durant cette étude, les teneurs les plus élevées sont observées en hiver, les plus faibles en été. Les teneurs moyennes en PM-10, PM-3 et PM-1 sont en hiver (janvier, février et mars 2003) environ 15% plus élevées qu'en été (juillet, août et septembre 2002) (tableau N° VI.2).

**Tableau N°VI.2 :** Variations saisonnières des teneurs atmosphériques en particules.

PM-i	Moyenne Été 2002 (juillet, août et septembre)	Moyenne Hiver 2003 (janvier, février et mars)
PM-10	67,50	77,31
PM-3	38,71	43,66
PM-1	24,23	27,43

Cette diminution ne semble pas être due à l'influence de la direction et vitesse du vent. En effet, en supposant que les données météorologiques relevées à la station de Dar-El-Beida sont valables pour le site étudié, on constate que :

- Tous les vents dominants N, N-E et S-W que subit le site en été et en hiver (tableau N° VI.3) entraînent les émissions du trafic routier vers le poste de mesure.
- Les vitesses de vent qui influent sur la dispersion et donc sur la réduction des niveaux de pollution sont pour les deux saisons (tableau N°VI.4) du même ordre de grandeur (2,8 m/s en été et 3,1 m/s en hiver)

**Tableau N°VI.3 :** Directions des vents dominants (%) mesurées à la station métrologique de Dar-El-Beida [84].

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>2002</b>	6,9 <i>W</i>	11,6 <i>N</i>	12,5 <i>S-W</i>	16,7 <i>N</i>	16,1 <i>W</i>	22,9 <i>N</i>	25 <i>N</i>	20,6 <i>N</i>	14,6 <i>N-E</i>	14,1 <i>S-W</i>	20,4 <i>S-W</i>	20,6 <i>S-W</i>
<b>2003</b>	28,6 <i>S-W</i>	24,6 <i>S-W</i>	15,7 <i>N-E</i>	19,2 <i>N</i>	18,1 <i>N</i>	21,3 <i>N</i>	19,4 <i>N-E</i>	21,8 <i>N</i>	21,3 <i>N</i>	13,3 <i>S-W</i>	17,9 <i>S-W</i>	17,3 <i>S-W</i>

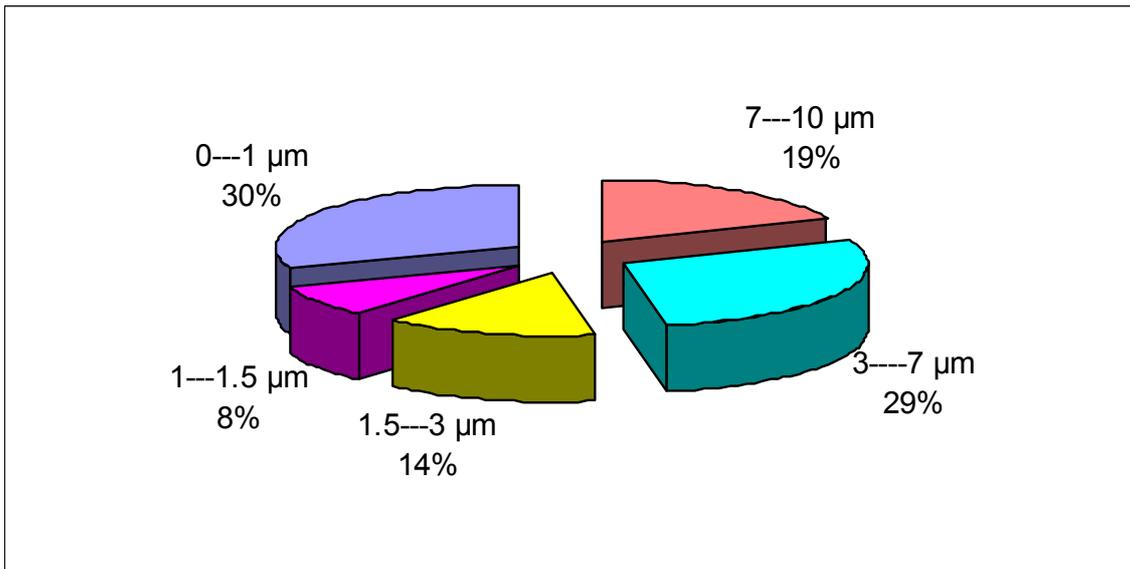
**Tableau N°VI.4 :** Moyenne mensuelle des vitesses de vent (en m/s) mesurées à la station métrologique de Dar-El-Beida [84].

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Annuel
<b>2002</b>	1,5	2,0	2,8	2,7	3,1	3,1	3,1	2,4	2,9	2,4	3,0	2,8	<b>2,7</b>
<b>2003</b>	4,0	3,2	2,0	2,7	2,5	2,9	2,6	2,5	2,4	2,0	2,6	3,3	<b>2,7</b>

Aussi, cette diminution en période estivale des teneurs en particules atmosphériques est probablement due au ralentissement des activités socioéconomiques et donc à une réduction du trafic routier en période de congé et de vacances scolaires et universitaires. On constate d'ailleurs à vue d'oeil qu'en été les embouteillages au carrefour de « Cinq Maisons » sont sensiblement moins intenses que durant le reste de l'année.

La contribution, en pourcentage massique, des différentes classes granulométriques à l'ensemble des particules inhalables est illustrée en figure N°VI.5. Cette répartition montre que ce sont surtout la fraction des particules très fines ( $d < 1\mu\text{m}$ ) et à un degré moindre la fraction des particules moyennement grossières ( $3 < d < 7\mu\text{m}$ ), qui accusent les fractions massiques les plus élevées, soit 30 et 29 % respectivement.

On relève par ailleurs que plus de la moitié des PM-10 (52%) sont des particules alvéolaires d'un diamètre inférieur à  $3\mu\text{m}$  et qu'un peu moins du tiers des PM-10 est constitué de particules très fines de diamètre inférieur à  $1\mu\text{m}$ .



**Figure N°VI.5 :** Répartition massique des particules collectées par classe granulométrique.

### VI.1. 2 Calcul du diamètre médian $d_{50}$ et des PM-2,5

A partir des données expérimentales, il est possible de déterminer :

- Le diamètre médian  $d_{50}$  de la masse médiane qui correspond au diamètre de la fraction granulométrique ayant 50% de la masse des PM-10. Ce paramètre est important dans la caractérisation des particules inhalables et permet parfois, par comparaison avec les données recueillies en divers sites, de retrouver le type de source émettrice de particules.
- La teneur atmosphérique en particules respirables, les PM-2,5. Dans le cas de notre échantillonneur, cette fraction n'est pas accessible directement par voie expérimentale puisque le cascadeur ne donne que la fraction PM-3 qui est naturellement très proche de la fraction PM-2,5. Cette fraction est importante à déterminer car elle permet d'effectuer des études comparatives et d'avoir exactement le niveau de la pollution qui atteint les sites alvéolaires du système respiratoire.

#### a) **Diamètre médian « $d_{50}$ » :**

La détermination du diamètre  $d_{50}$  peut se faire graphiquement en portant sur un diagramme log-probabilité, le diamètre des particules (axe des ordonnées à échelle logarithmique) et le pourcentage de la masse cumulée des particules ayant un diamètre  $\leq d_i$  (axe des abscisses à échelle probabilité). Cette représentation résulte de l'interprétation mathématique du fractionnement des particules par dimension. On montre en effet que la densité de probabilité est une distribution log-normale entre le diamètre des particules et la distribution de leur masse [85et 86].

La figure N°VI.6 illustre le graphe log-probabilité (100- masse cumulée en % en fonction du diamètre de l'étage) que nous avons obtenu en exploitant les données recueillies par fractionnement granulométrique (tableau N° VI.5).

Le diamètre aérodynamique moyen  $d_{50}$  tiré à partir de la droite du graphe s'élève à 2,6  $\mu\text{m}$ . En d'autres termes 50% de la masse des particules PM-10 ont un diamètre inférieur à 2,6  $\mu\text{m}$ . Ce diamètre est relativement élevé et montre que le parc automobile algérien qui n'est pas fortement diésélisé, n'est pas à l'origine de fortes émissions de particules très fines. Dans plusieurs villes européennes à fort taux de diésélisation, le  $d_{50}$  est en général en dessous de la valeur de 2 [87].

**Tableau N°VI.5 :** Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique.

Etage Enersen	Masse collectée par étage (mg)	Masse cumulée* (mg)	% massique cumulé	100-% massique	Diamètre de l'étage ( $\mu\text{m}$ )
1	25,1	25,1	22,8	77,2	7,00
2	30,0	55,1	50,0	50,0	3,00
3	15,1	70,2	63,7	36,3	1,50
4	12,0	82,2	74,6	25,4	1
5	27,9	110,1	100	0	0,01

(\*) Masse des particules de diamètre supérieur au diamètre de l'étage.

#### **b) Teneur atmosphérique en PM-2,5 :**

A partir du diagramme log-probabilité de la figure N°VI.6, on obtient pour les PM-2,5 une teneur atmosphérique de 36,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Le rapport PM-2.5/ PM-3 s'élève à 0,90.

Ainsi la teneur en PM-2,5 s'élève à 90% de la teneur en PM-3 mesurée expérimentalement. La mesure des teneurs en PM-3 constitue donc une bonne approximation des teneurs en PM-2,5 et permet d'accéder à celles-ci lorsqu'on ne dispose pas d'une tête de prélèvement sélective des PM-2,5.

En résumé les niveaux de pollution atteints durant la période étudiée sont :

- Particule inhalables PM-10 = 75,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ;
- Particules respirables PM-2.5 = 36,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , soit 48% des PM-10 ;
- Particules très fines PM-1 = 25,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , soit 34% des PM-10.

La figure N° VI.7 résume les teneurs moyennes des PM-i et leur contribution massique aux PM-10.

Cette figure montre qu'environ 48 % des particules inhalables peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires et qu'environ un tiers se dépose et se fixe de manière irréversible sur les tissus alvéolaires en provoquant l'apparition de plusieurs maladies respiratoires. De plus, ce sont ces particules très fines qui véhiculent les composés les plus toxiques tels que les métaux lourds, les HAP, les nitrates et les sulfates.

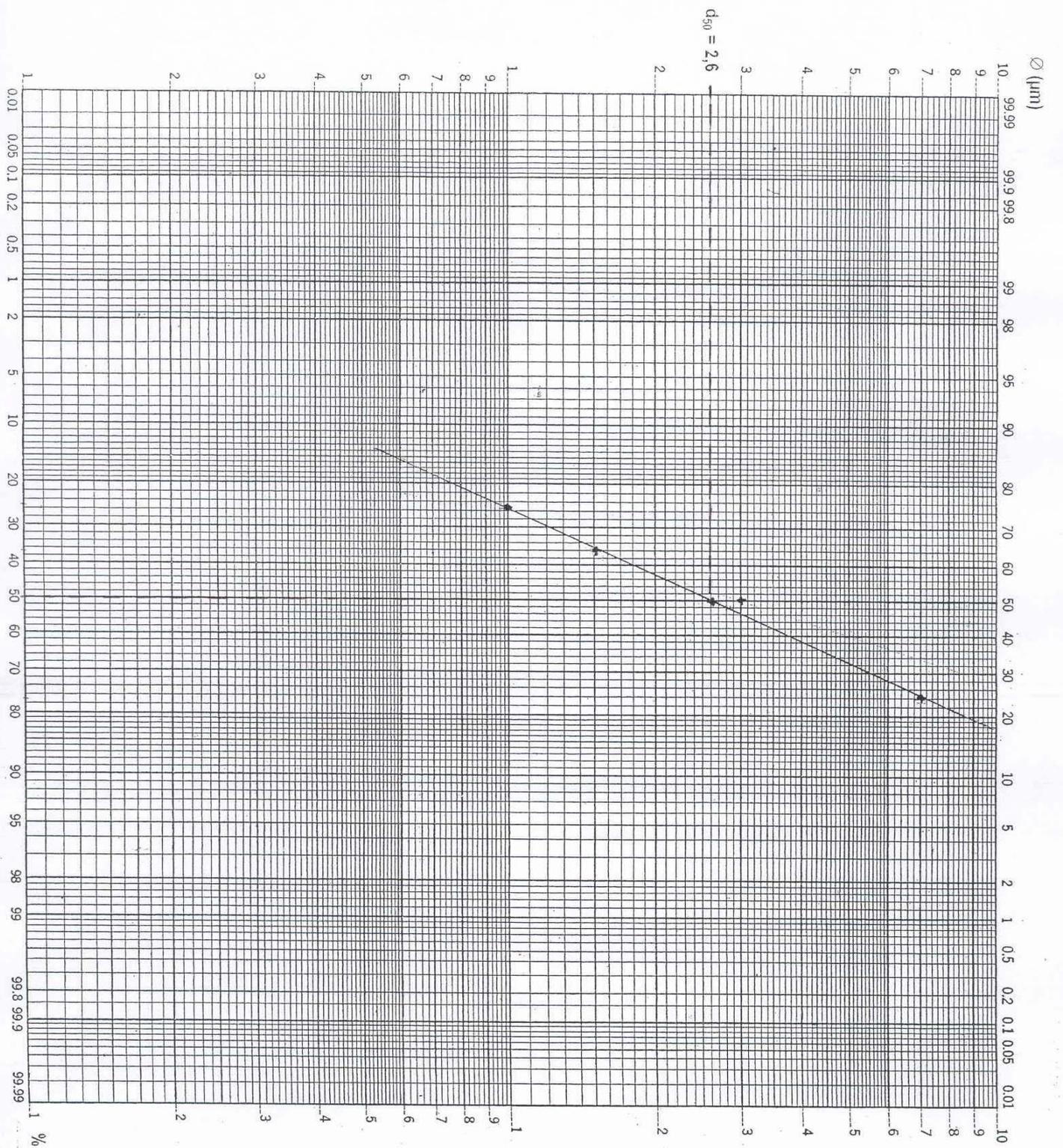
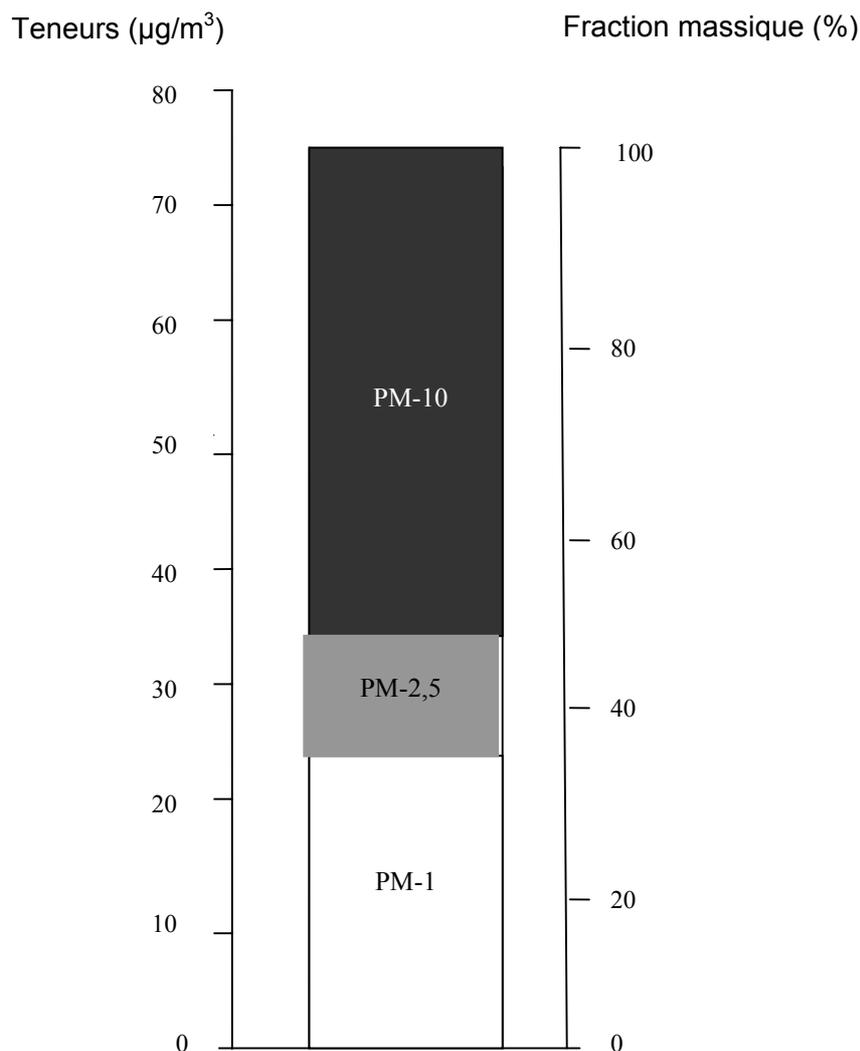


Figure N°VI.6 : Diagramme log-probabilité de la masse cumulée des particules en fonction du diamètre.



**Figure N°VI.7 :** Teneurs moyennes en PM-i et contribution (en % massique) aux PM-10.

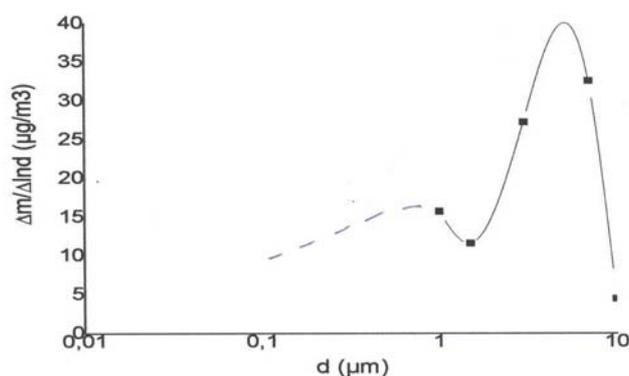
### VI.1.3 Etude de la distribution modale des particules atmosphériques

Plusieurs études ont montré que les aérosols atmosphériques étudiés par classe granulométrique présentent une courbe de distribution bimodale, voire trimodale [89, 90 et 91]. Le type de distribution apparaît lorsqu'on construit le graphe ( $\Delta m / \Delta \ln d$ ) en fonction du diamètre des particules  $d_i$  (en  $\mu\text{m}$ ).  $\Delta m$  représente la masse des particules retenues sur un étage et  $\Delta \ln d$  est calculé selon  $\Delta \ln d = \ln d_{(\text{étage } i+1)} - \ln d_{(\text{étage } i)}$  [86].

L'exploitation des résultats obtenus dans notre étude est résumée dans le tableau N°VI.6. Dans ce tableau, l'étage au diamètre de  $10\mu\text{m}$  correspond à la fraction comprise entre les TSP et les PM-10. Les TSP ont un diamètre supposé égale à  $30\mu\text{m}$  et leur masse mesurée au site de l'ENP s'élève à  $79,9\mu\text{g}/\text{m}^3$  [10]. A partir de ces données on obtient le graphe de distribution illustré en figure N°VI.8. Il en résulte ainsi une courbe de distribution bimodale des particules fines étudiées à Alger qui est centrée autour des diamètres de  $6$  et  $0,8 \mu\text{m}$ . Certaines études mentionnent des distributions similaires alors que d'autres travaux qui ont étudiés un grand nombre de classes granulométriques, en particulier dans le domaine compris entre  $0$  et  $1 \mu\text{m}$ , aboutissent à une distribution trimodale où le troisième mode apparaît vers  $0,1 \mu\text{m}$  [87, 88 et 89]. Il est clair que plus on dispose d'étages dans le cascadeur, plus on a de détails sur la distribution.

**Tableau N°VI.6 :** Calcul de la distribution modale des particules.

Diamètre de l'étage (µm)	$\Delta \ln d$	$\Delta m$ (µg/m <sup>3</sup> )	$\Delta m / \Delta \ln d$ (µg/m <sup>3</sup> )
10,00	1,100	4,900	4,45
7,00	0,357	11,700	32,77
3,00	0,847	23,145	27,32
1,50	0,693	8,035	11,59
1	0,406	6,380	15,71
0,01	4,600	25,940	5,64



**Figure N°VI.8 :** Distribution bimodale des particules.

#### VI.1.4 Corrélations entre les PM-1, PM-3 et PM-10

La figure N°VI.9 retrace l'allure de l'évolution temporelle des trois classes granulométriques PM-10, PM-3 et PM-1 prélevées simultanément. On constate que les PM-10, PM-3 et PM-1 suivent une évolution similaire. C'est particulièrement le cas des PM-1 et PM-3 qui varient dans le même sens. Cette similitude dans l'évolution suggère que ces particules atmosphériques ont en grande partie la même origine.

L'étude des corrélations mathématiques entre les trois classes de particules montre qu'on a une bonne corrélation linéaire uniquement entre les PM-1 et PM-3 (figure N°11). Ce résultat signifie que les particules fines PM-1 et PM-3 sont issues de la même source, en l'occurrence le trafic routier et les particules secondaires qui en découlent (surtout les particules secondaires de nitrates issues de la transformation dans l'atmosphère des NO<sub>x</sub>) et présentent le même comportement dynamique du point de vue agrégation de particules submicroniques, dispersion et déplacement sous l'action des vents, séjour dans l'atmosphère, etc. Entre les PM-10 d'une part et les PM-1 et PM-3 d'autre part (figure N°10 et 12), on ne relève pas de corrélation significative ( $R^2$  est égale respectivement à 0,6088 et 0,6636).

Ainsi par exemple, une forte teneur en PM-10 n'induit pas automatiquement une forte teneur en PM-1. Ceci s'explique par le fait qu'une partie importante des PM-10 est constituée de particules grossières qui proviennent de l'érosion des sols et qui de ce fait n'a pas de lien avec les émissions du trafic routier.

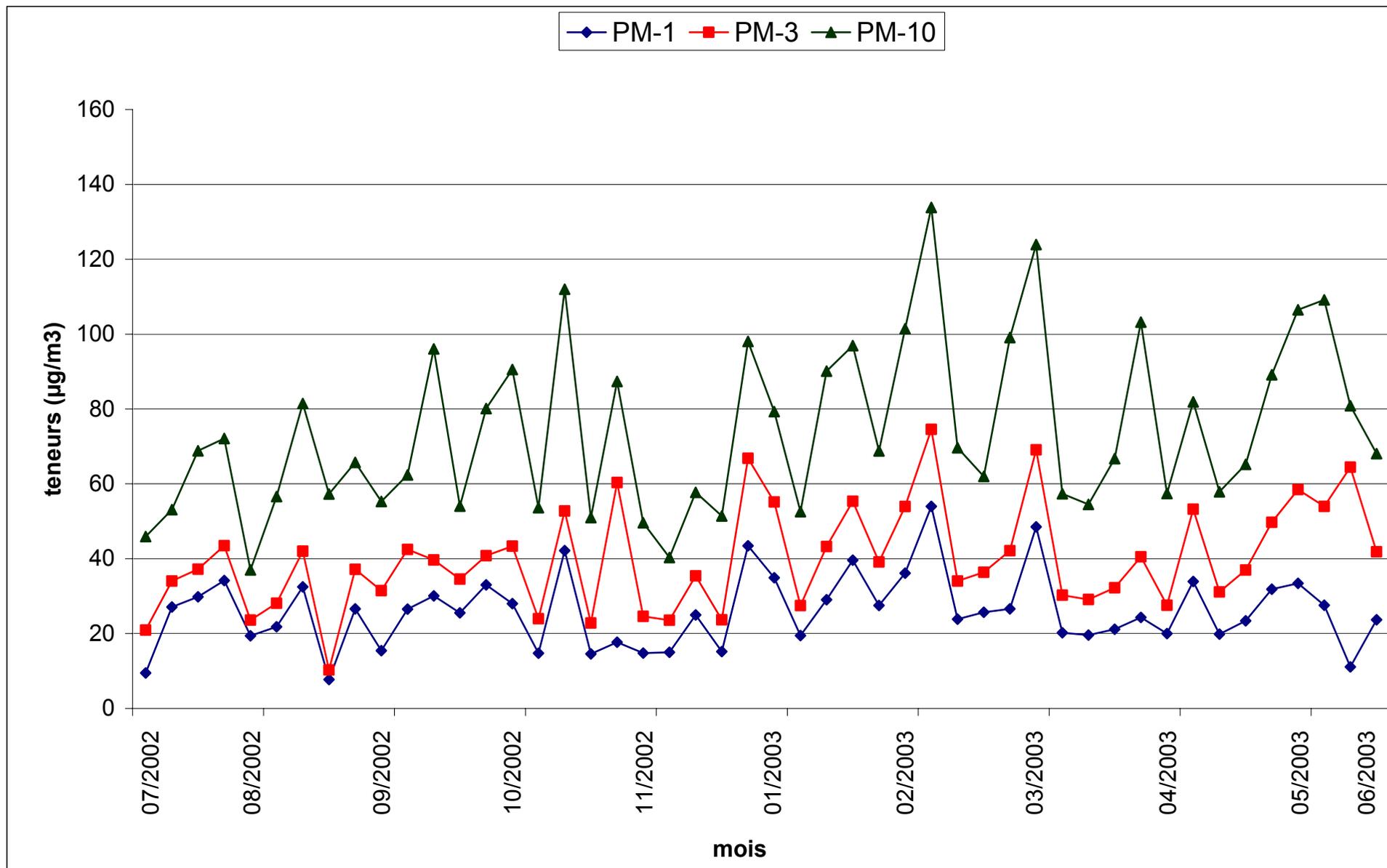


Figure N°VI. 9 : Évolution des teneurs en PM-1, PM-3 et PM-10 mesurées à Alger.

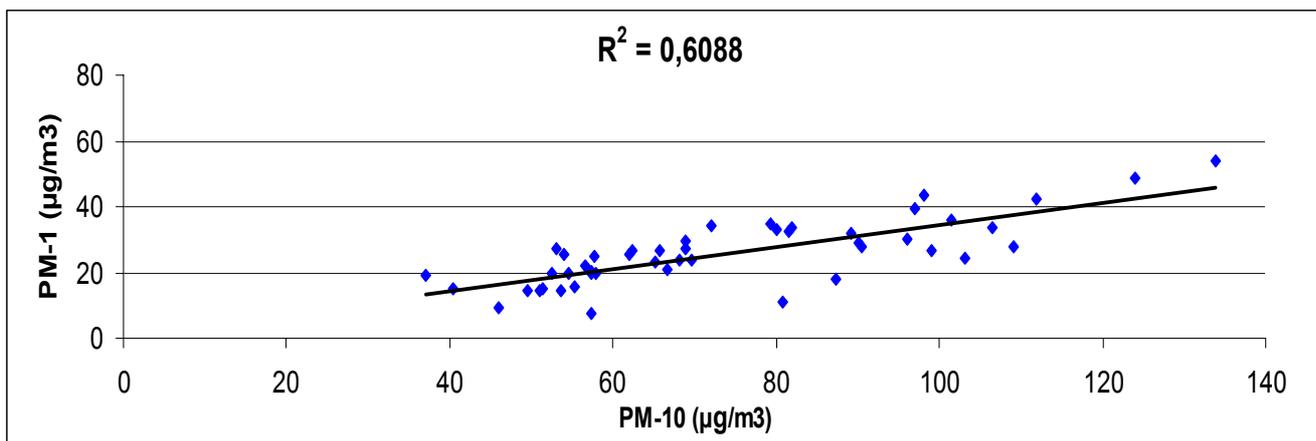


Figure N°VI.10 : Corrélation entre les teneurs en PM-1 et PM-10.

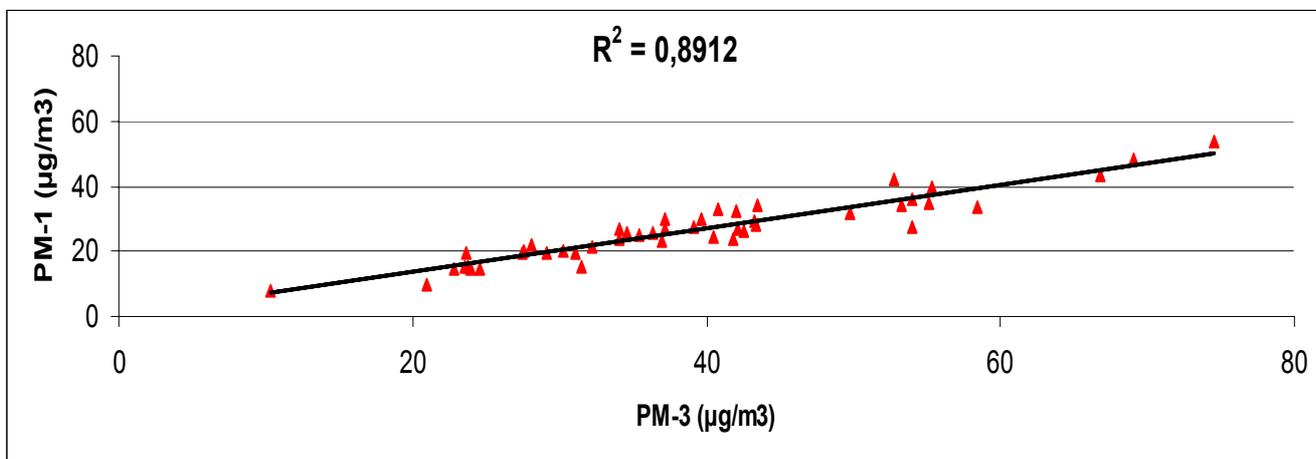


Figure N°VI.11 : Corrélation entre les teneurs en PM-1 et PM-3.

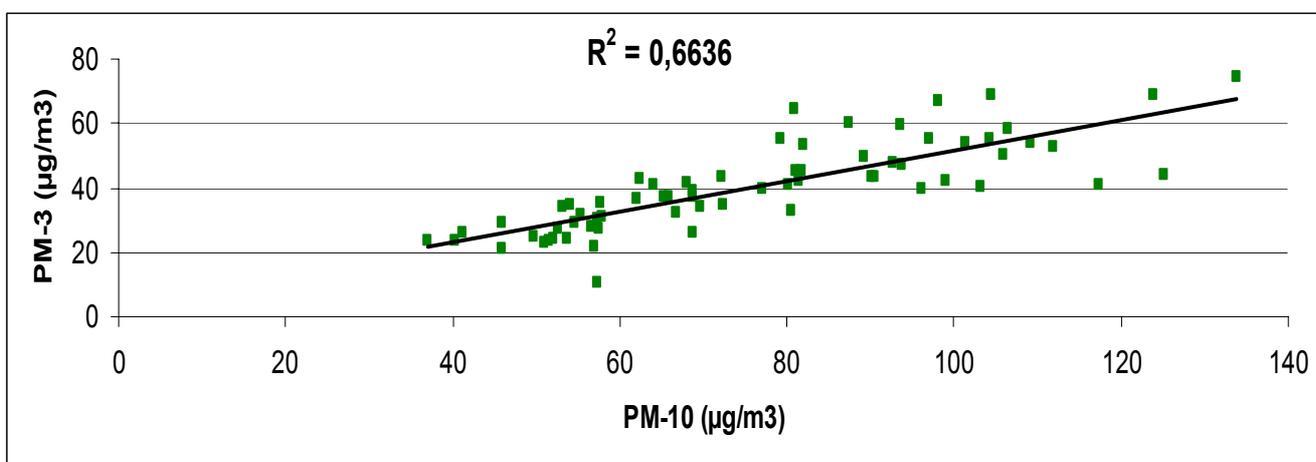


Figure N°VI.12 : Corrélation entre les teneurs en PM-3 et PM-10.

### VI.1.5 Ampleur de la pollution : comparaison aux normes et situation par rapport à d'autres pays

Pour situer l'ampleur de la pollution de l'air par les particules fines mesurée à Alger, Il est utile de comparer les niveaux observés aux normes et valeurs guides internationales.

La réglementation sur les PM-10 est assez récente et n'existe que dans un nombre restreint de pays. Elle tend de plus en plus à remplacer l'ancienne réglementation qui régissait les TSP (particules totales en suspension). En ce qui concerne les PM-2,5 qui ne font l'objet d'études que depuis quelques années et pour lesquelles il n'existe pas un historique de mesures, les seuils admissibles sont à l'état de projet et n'ont été définitivement adoptés qu'aux USA.

Le tableau N°VI.7 résume les normes et valeurs guides des PM-10 en vigueur dans certains pays.

L'OMS qui a toujours considéré qu'il n'y a pas un seuil de sécurité en de ça du quel, il n'y aurait pas d'effets sur la santé [16], vient de promulguer de nouvelles recommandations dans sa très récente révision des normes [90]. Chose intéressante ces nouvelles directives s'adressent à toutes les régions du monde, alors que traditionnellement l'OMS établit des recommandations uniquement pour les pays d'Europe.

Pour l'Algérie qui a promulgué en 2006 un décret fixant les normes en matière de pollution atmosphérique (CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> et particules en suspension), le législateur utilise le terme vague de particules fines en suspension sans préciser s'il s'agit des particules totales en suspension (TSP de diamètre < 30µm) ou de PM-10. Dans ce décret on retrouve un objectif de qualité de 50µg/m<sup>3</sup> et une valeur limite de 80µg/m<sup>3</sup> en moyenne annuelle [91].

Parallèlement à ces normes, Airparif, l'organisme français qui gère le vaste réseau de mesure de Ile de France, recommande les limites d'exposition suivantes [6] :

PM-10: 25 - 40 µg/m<sup>3</sup>

PM-2,5: 15 – 25 µg/m<sup>3</sup>

Les normes américaines relatives aux PM-2.5 qui ont été adoptées en 1977 sont plus complexes et s'énoncent comme suit [92] :

- 15 µg/m<sup>3</sup> : moyenne sur trois années des moyennes spatiales annuelles (c'est la moyenne des moyennes d'une zone à plusieurs stations de mesure) ;
- 65 µg/m<sup>3</sup> : valeur limite journalière (moyenne sur trois années des percentiles P 98).

**Tableau N°VI.7 : Normes et valeurs guides régissant les PM-10.**

<b>Pays</b>	<b>Valeur limite en <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math></b>		<b>Réf.</b>
<b>Etats-Unis</b>	150	Maximum journalier (P99 sur 3 ans)	[93]
	50	Moyenne annuelle de teneurs journalières (sur 3 ans)	
<b>Union Européenne :</b>			
- Jusqu'à 2005	50	Limite journalière à ne pas dépasser plus de 25 fois par an	[94 et 92]
	30	Moyenne annuelle	
- Jusqu'à 2010	50	Limite journalière à ne pas dépasser plus de 7 fois par an.	
	20	Moyenne annuelle	
<b>Suisse</b>	50	Moyenne sur 24 heures	[35]
	20	Moyenne annuelle	
<b>Suède</b>	100	P98 de moyennes sur 24h	[35]
- PM-10	50	Moyenne sur 24 heures	[90]
<b>OMS :</b>	20	Moyenne annuelle	
- PM-2,5	25	Moyenne sur 24 heures	
	10	Moyenne annuelle	
<b>Algérie</b>	80	Valeur limite (moyenne annuelle pour particules fines en suspension)	[91]
	50	Objectif de qualité	

Par rapport à ces normes, on constate qu'à Alger, la pollution par les PM-10 est très élevée. Les seuils limites annuels préconisés par les pays occidentaux sont largement dépassés. La même constatation est faite pour les particules respirables (PM-2,5) dont les niveaux moyens dépassent aussi bien les deux directives de l'OMS (le court terme et le long terme) que les normes américaines ou les recommandations d'Airparif. Le niveau de pollution en PM-10 reste toutefois légèrement inférieur à la norme algérienne relative aux particules fines en suspension.

La comparaison entre les teneurs en PM-10 et PM-2.5 mesurées à Alger et celles relevées dans certaines villes (tableau N°VI.8), montre aussi qu'Alger accuse, en site influencé par le trafic routier, des niveaux de pollution très élevés en particules inhalables (PM-10) et alvéolaires (PM-2.5). En l'absence de données publiées sur des villes de la rive sud de la Méditerranée qui du point de vue, infrastructure, parc automobile et climat se rapprochent le plus d'Alger, nous avons essayé d'inclure dans cette comparaison des villes de pays dits émergents tels que Mexico, Marketa Domasova (Tchéquie) et Tirgu Mures (Roumanie) et des villes de la rive nord de la Méditerranée telles que Marseille et Barcelone. Cette comparaison montre aussi qu'Alger est confronté aux mêmes problèmes de pollution par les particules que les villes européennes de l'ex-Block de l'Est. Ces derniers, tout comme l'Algérie, accusent un large déficit dans la prise en charge des aspects environnementaux. Ce tableau montre par ailleurs que nous n'avons pas atteint la situation dramatique qui prévaut au Caire.

Signalons enfin que les PM-10, mesurées dans cette étude à l'ENP, sont du même ordre de grandeur que celles relevées au même site en 2000 [40] et sont légèrement supérieures à celles enregistrées par le réseau de mesure de la qualité de l'air d'Alger, SAMASAFIA, à Bab-El-Oued et à la place du 1<sup>er</sup> Mai (tableau N°VI.8) [95].

**Tableau N°VI.8 : Teneurs atmosphériques en PM-10 et PM-2,5 mesurées dans certaines villes.**

Pays - Villes	PM-10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM-2,5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Année	Remarques	Références
Bulgarie (4 villes)	72	44	11/1995 au 09/1996	Site urbain	[96]
République Tchèque (4 villes)	75	52			
Hongrie (5 villes)	60	40			
Pologne (4 villes)	74	55			
Roumanie (4 villes)	70	43			
Slovaquie (4 villes)	49	34			
Barcelone (Espagne)	49,80	35	06/1999 au 06/2000	Site urbain	[7]
Mexico		96,4	1995	Site de proximité (mesure sur 2 mois)	[97]
Le Caire (Egypte)	220 142	135 48	Hiver 1999 Eté 2002	Site de proximité Site urbain résidentiel	[98]
Marseille	29	-	1999	Site urbain	[99]
Rennes	24	-	1999	Teneur relative au PM-3 Site de proximité	[99]
Paris	22	-	2000	Site urbain	[100]
Strasbourg	20	-	2000	Site urbain	[100]
Lyon	23	-	2000	Site urbain	[100]
Berne (Suisse)	39,6	24,1	2001	Site de proximité	[101]
Arnheim (Hollande)	74,5	42,9	1994	Moyenne sur un mois mesurée à 1m de la route	[102]
Londres City	35	22	2003	Site de proximité (80.000 Veh/j route à 6 voies)	[103]
USA	45	-	2001	Site urbain	[104]
Montréal	28 - 45	16 - 30	1996	Teneur dépendant du site	[105]
Hong-Kong	69,5	47	2001	Site urbain	[106]
Alger (sites Place du 1 <sup>er</sup> Mai et Bab-El-Oued)	60 - 66	-	2003	Sites urbains influencés par le trafic routier	[95]
Alger (site ENP)	74	-	1999 -2000	Site de proximité	[107]
Alger (site ENP)	75,20	36,10	2002-2003	Site de proximité	Présente étude [108 et 109]

Ainsi, les émissions du trafic routier, la mauvaise combustion du parc automobile qui est très âgé, ainsi que les émissions naturelles de l'érosion terrestre (nudité des sols, aridité du climat, poussières diverses) contribuent fortement à la pollution de l'air par les particules dans l'agglomération d'Alger.

## **VI.2 ETUDE ET AMPLEUR DES MÉTAUX LOURDS ASSOCIÉS AUX PARTICULES FINES**

### **VI.2.1 Niveaux de pollution par les métaux lourds**

L'étude des métaux lourds (Fe, Mn, Pb, Cu, Ni, Co et Cd) véhiculés par les différentes classes granulométriques des particules fines a porté sur 70 échantillons, soit environ 200 fractions granulométriques.

Les figures N°VI.13a à 19d représentent l'évolution des teneurs atmosphériques mesurées pour chaque métal dans les fractions PM-1, PM-1,5, PM-3, PM-7 et PM-10.

Le tableau N°VI.9 et la figure N°VI.20 résument les teneurs moyennes des métaux lourds. Leur distribution massique selon la classe granulométrique est résumée en tableau N°VI.10 et illustrée en figure N°VI.21.

Les résultats obtenus montrent que dans toutes les fractions, le fer, parmi les éléments étudiés est le plus abondant. Avec une teneur moyenne de l'ordre de  $639,8 \text{ ng/m}^3$ , il représente environ 1 % de la masse des particules des PM-10. Ce résultat était attendu du fait de son abondance dans la croûte terrestre.

Le plomb, dans son abondance, suit le fer. Dans les PM-10 on enregistre une teneur de  $299,3 \text{ ng/m}^3$  correspondant à une fraction massique d'environ 0,4%. Ces teneurs en plomb sont relativement élevées. Elles dépassent la nouvelle norme européenne de  $0,2 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  et sont légèrement inférieures à la norme OMS qui est de  $0,5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  [110].

L'examen des fractions massiques montre que les métaux lourds sont enrichis de manière inégale dans les différentes classes granulométriques (tableau N°VI.10 et figure N°VI.21). Le plomb, le cadmium et à un degré moindre le nickel et le cobalt sont plus abondants dans les particules fines (en passant des PM-1 au PM-10, la fraction massique diminue). Le plomb, par exemple accuse une fraction massique de 0,58 % dans les PM-1, alors qu'il n'est présent qu'à hauteur de 0,4 % dans les PM-10. A l'inverse, le fer, le manganèse et le cuivre qui sont majoritairement issus de l'écorce terrestre, sont plus enrichies dans les PM-10 que dans les particules très fines PM-1 (La fraction massique augmente des PM-1 au PM-10).

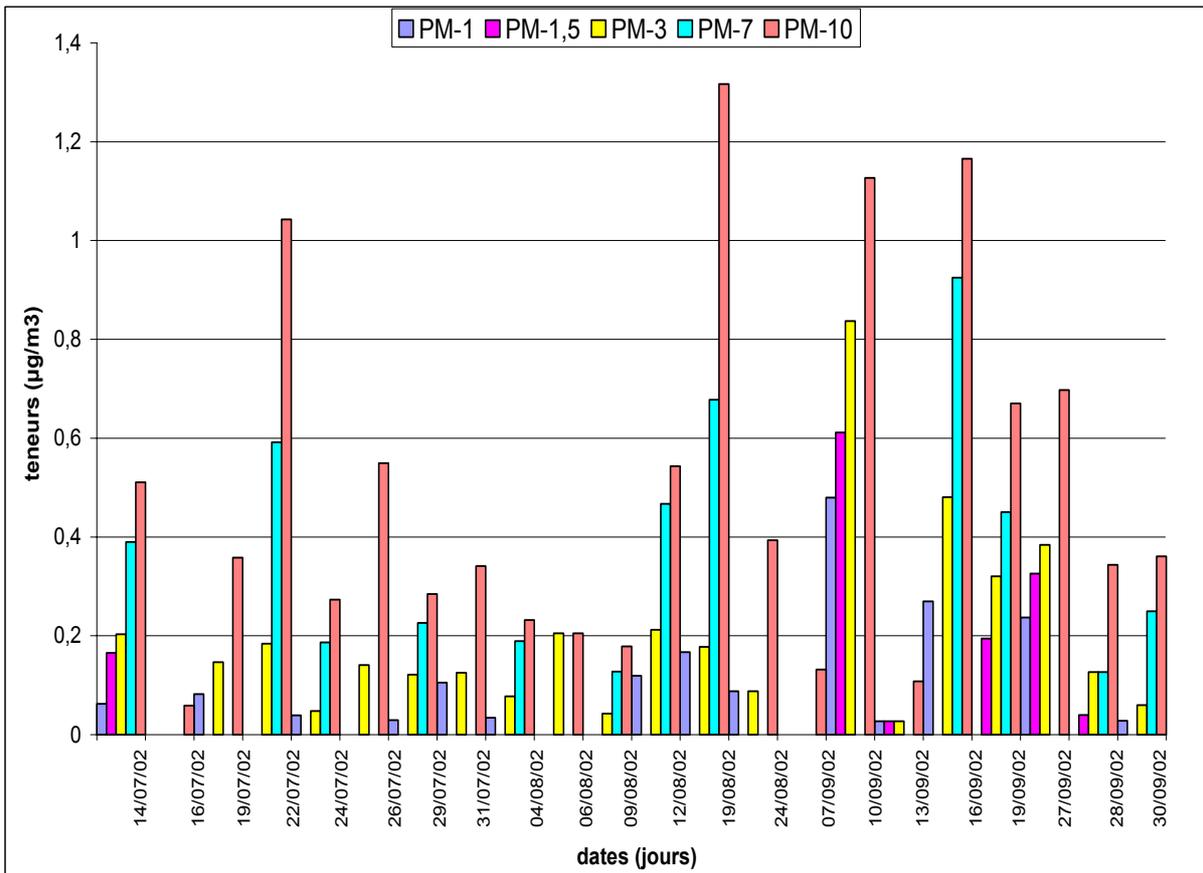


Figure N°VI.13a : Evolution des teneurs atmosphériques en Fe mesurées à l'ENP (Alger).

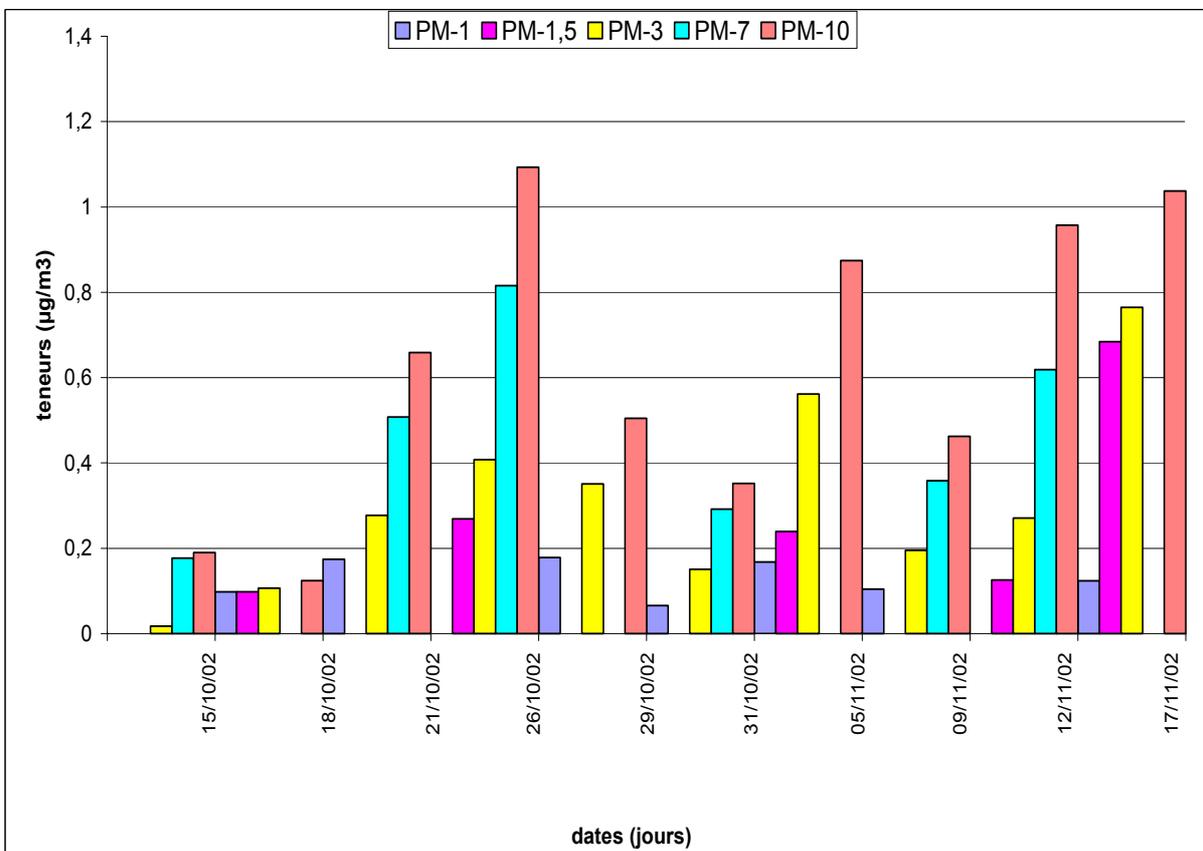


Figure N°VI.13b : Evolution des teneurs atmosphériques en Fe mesurées à l'ENP (Alger).

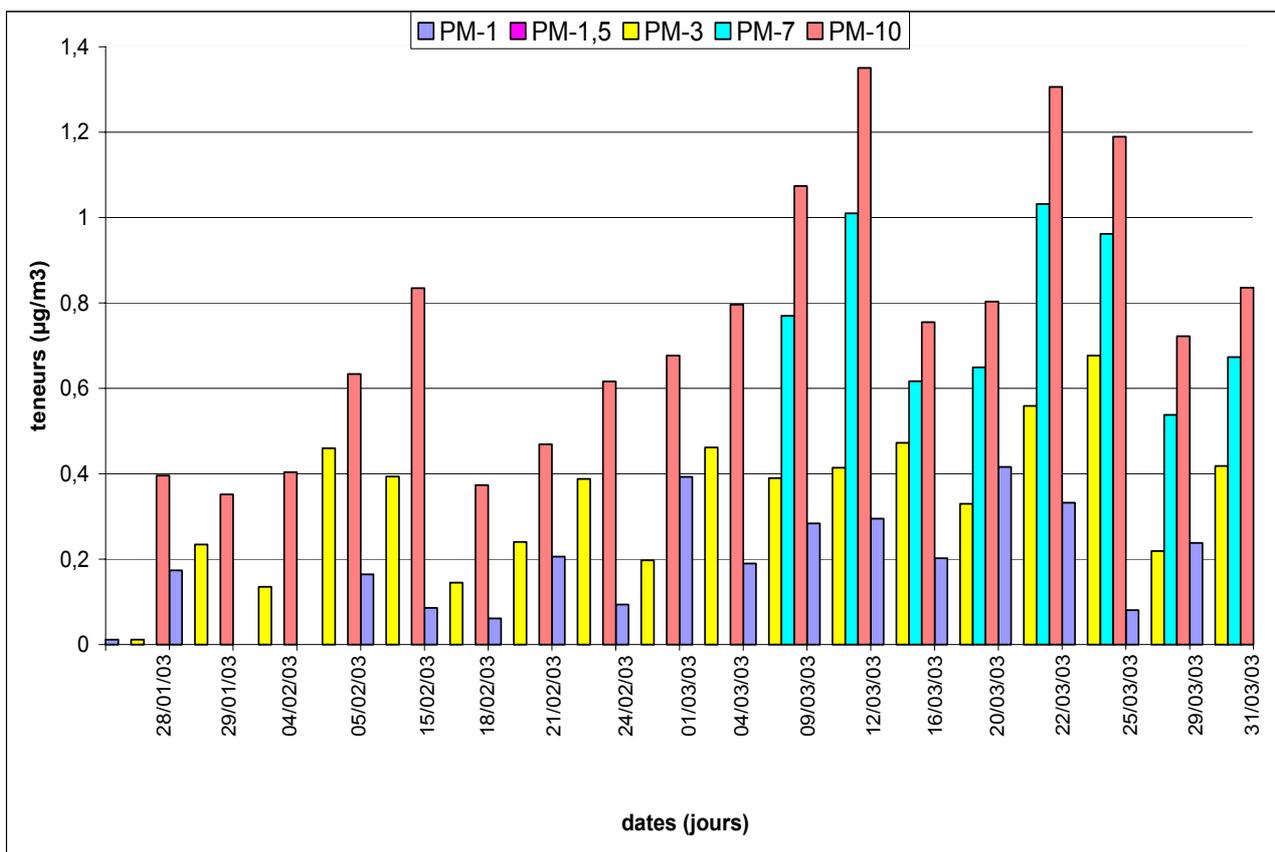


Figure N°VI.13c : Evolution des teneurs atmosphériques en Fe mesurées à l'ENP (Alger).

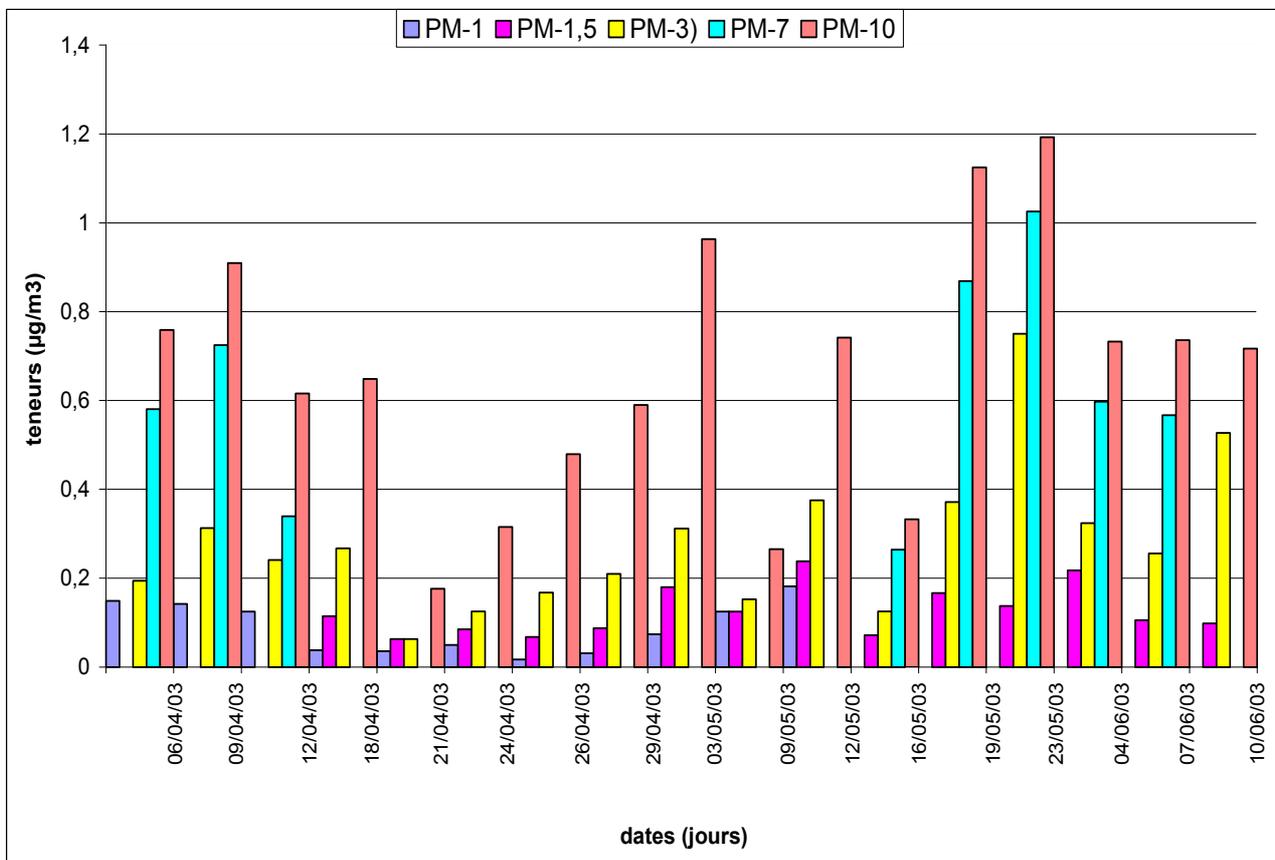


Figure N°VI.13d : Evolution des teneurs atmosphériques en Fe mesurées à l'ENP (Alger).

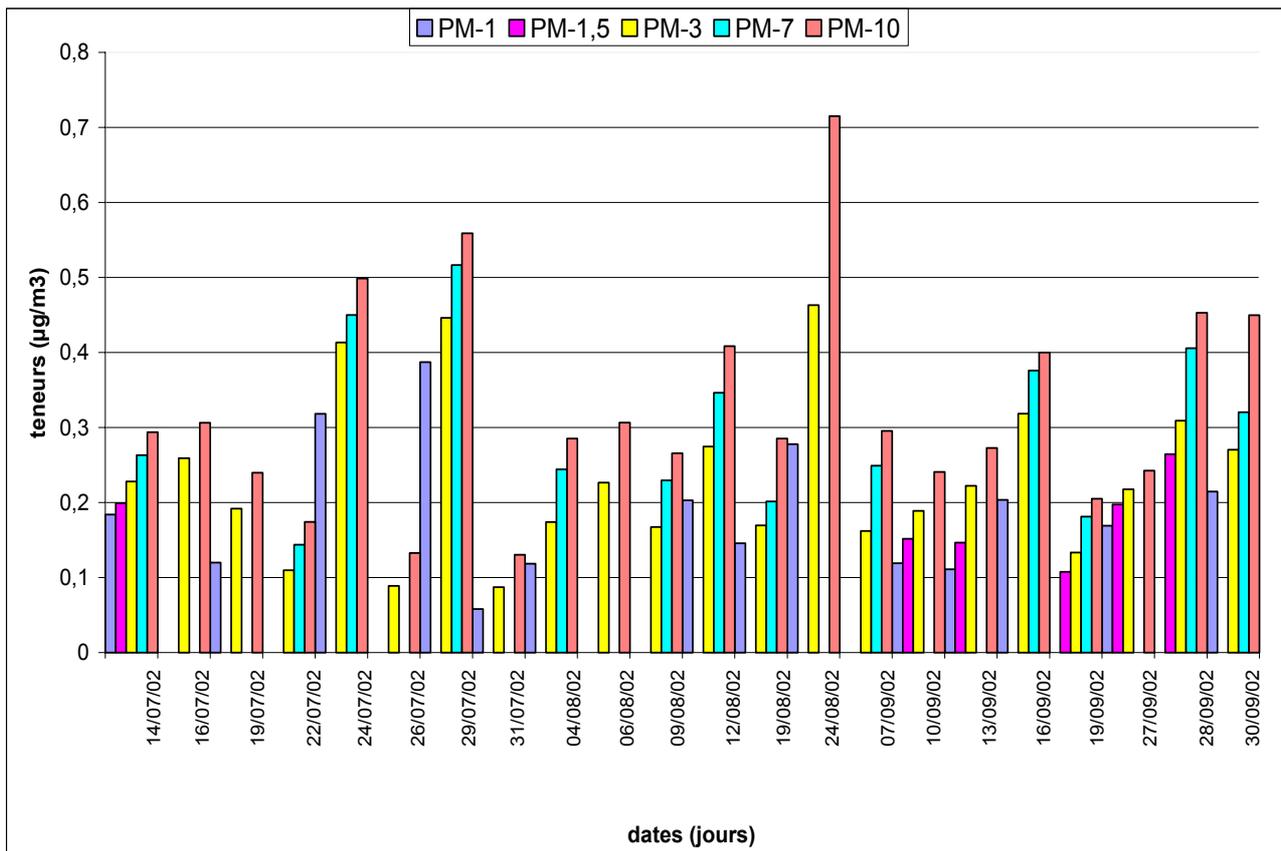


Figure N°VI.14a : Evolution des teneurs atmosphériques en Pb mesurées à l'ENP (Alger).

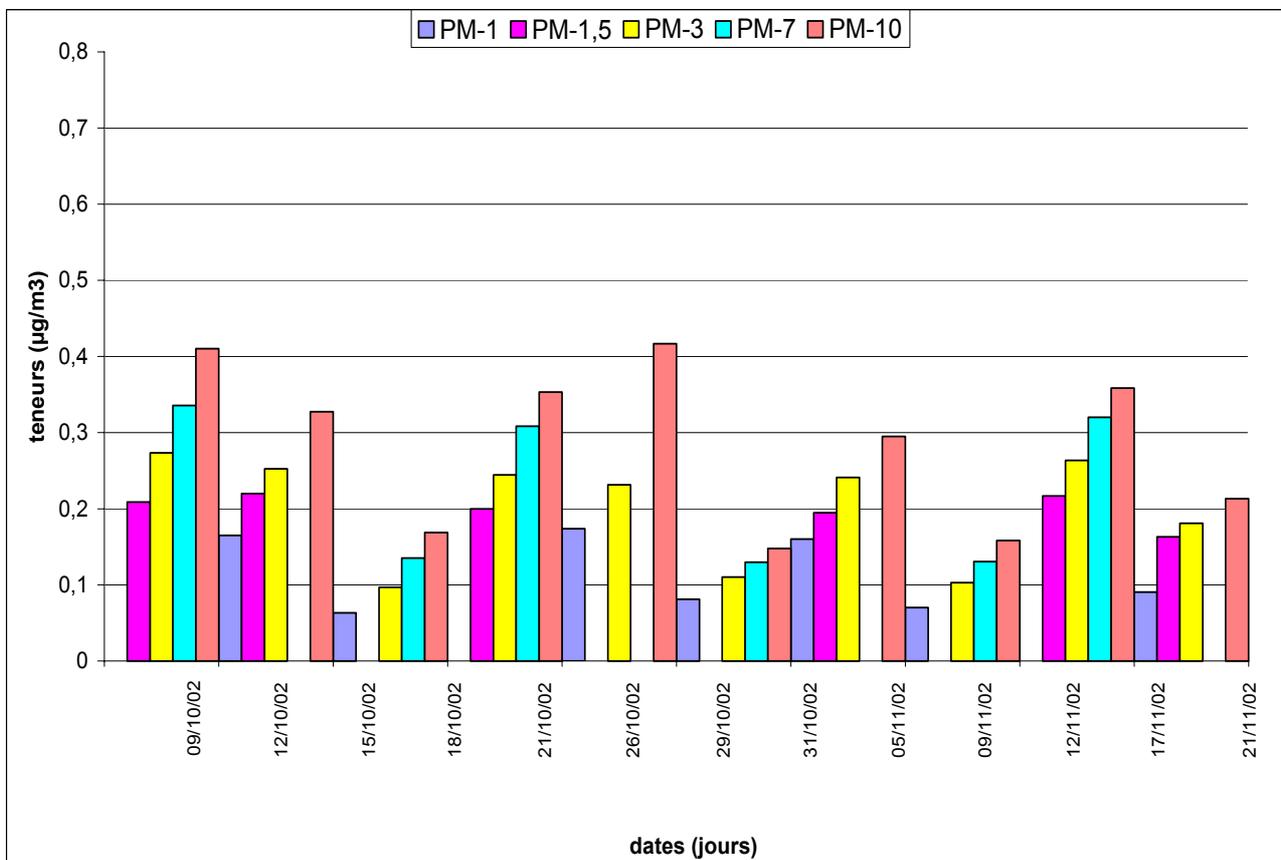


Figure N°VI.14b : Evolution des teneurs atmosphériques en Pb mesurées à l'ENP (Alger).

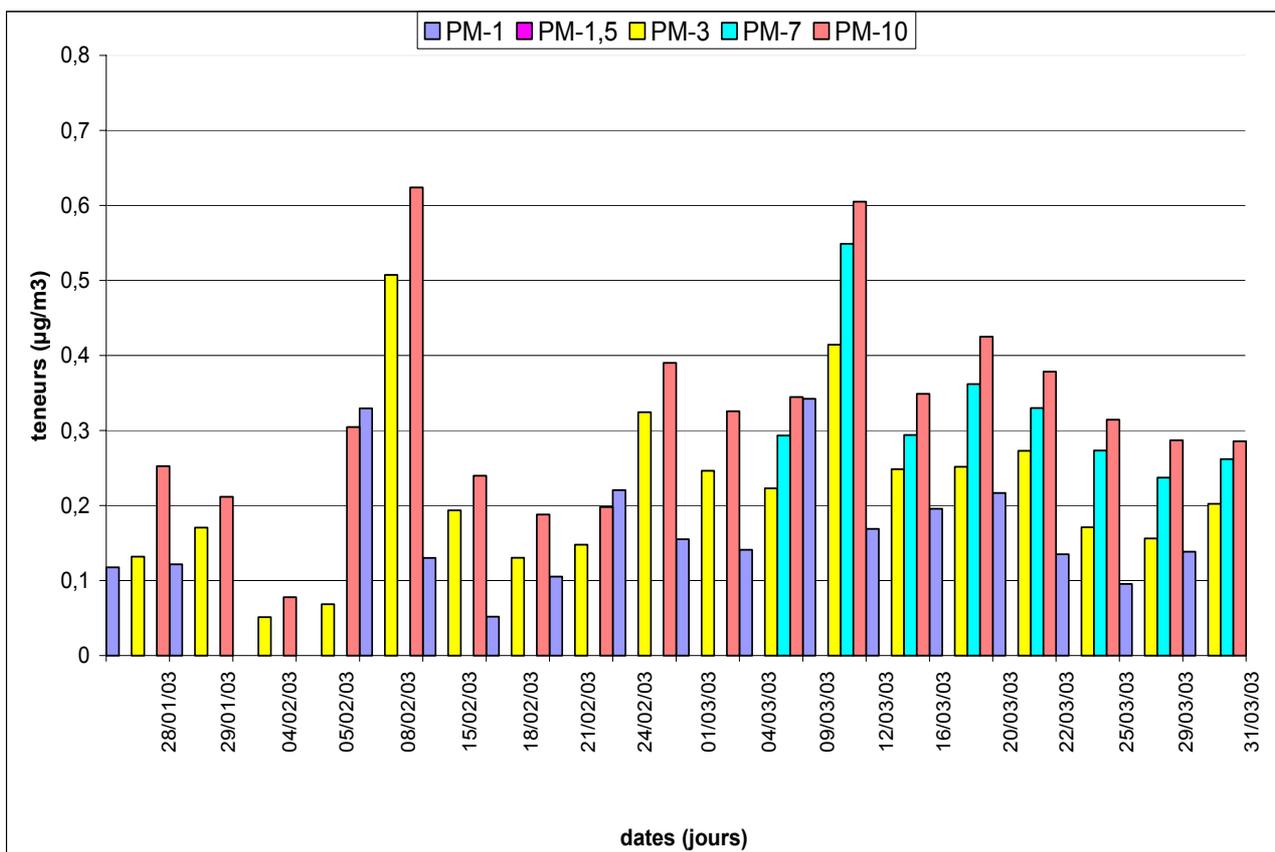


Figure N°VI.14c : Evolution des teneurs atmosphériques en Pb mesurées à l'ENP (Alger).

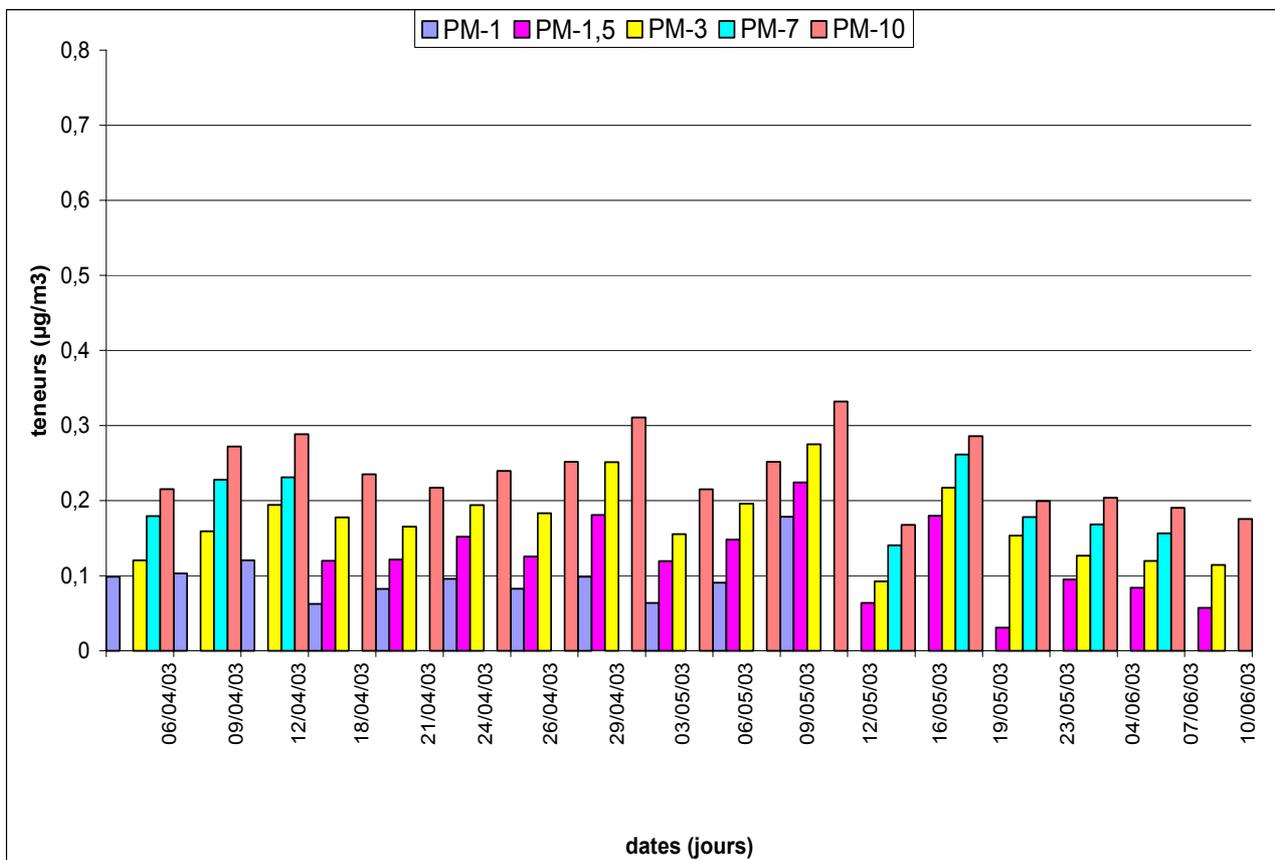


Figure N°VI.14d : Evolution des teneurs atmosphériques en Pb mesurées à l'ENP (Alger).

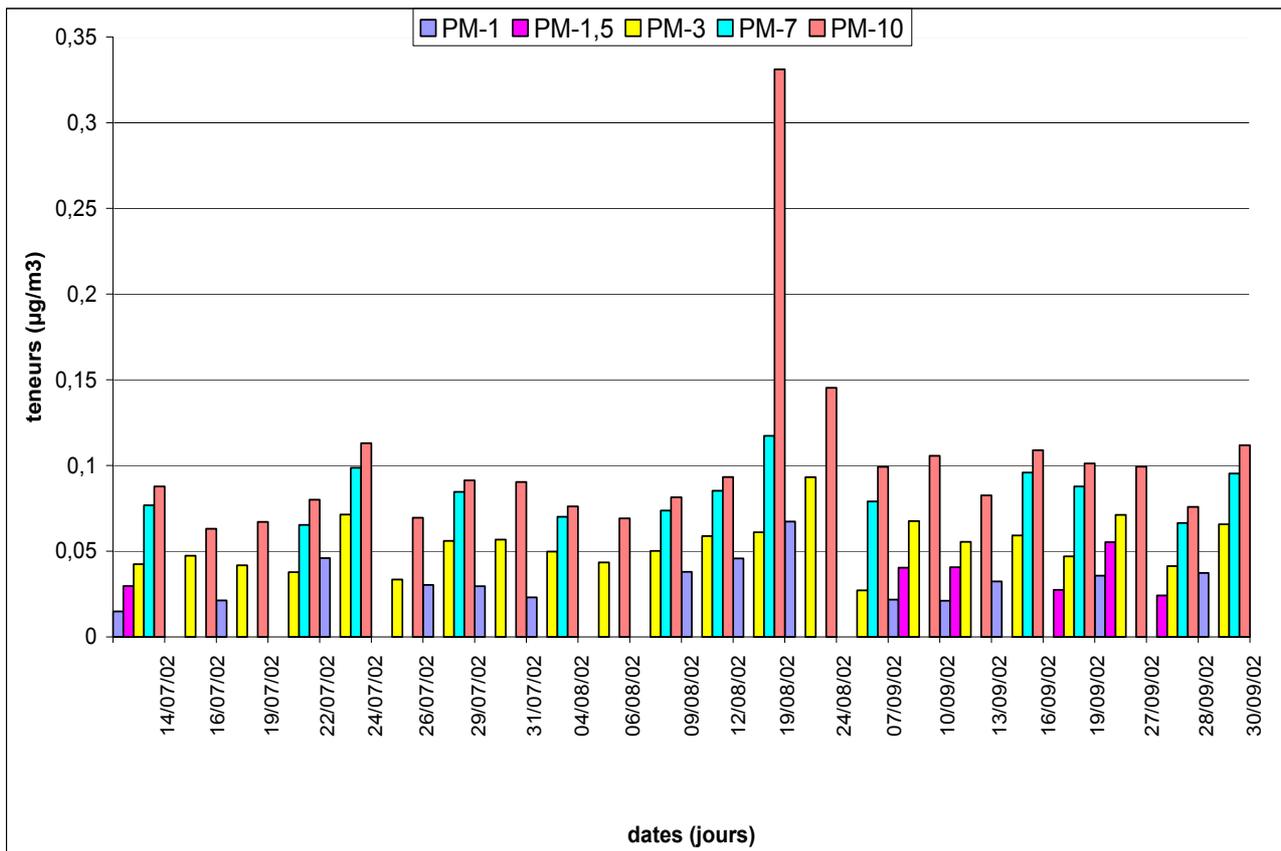


Figure N°VI.15a : Evolution des teneurs atmosphériques en Cu mesurées à l'ENP (Alger).

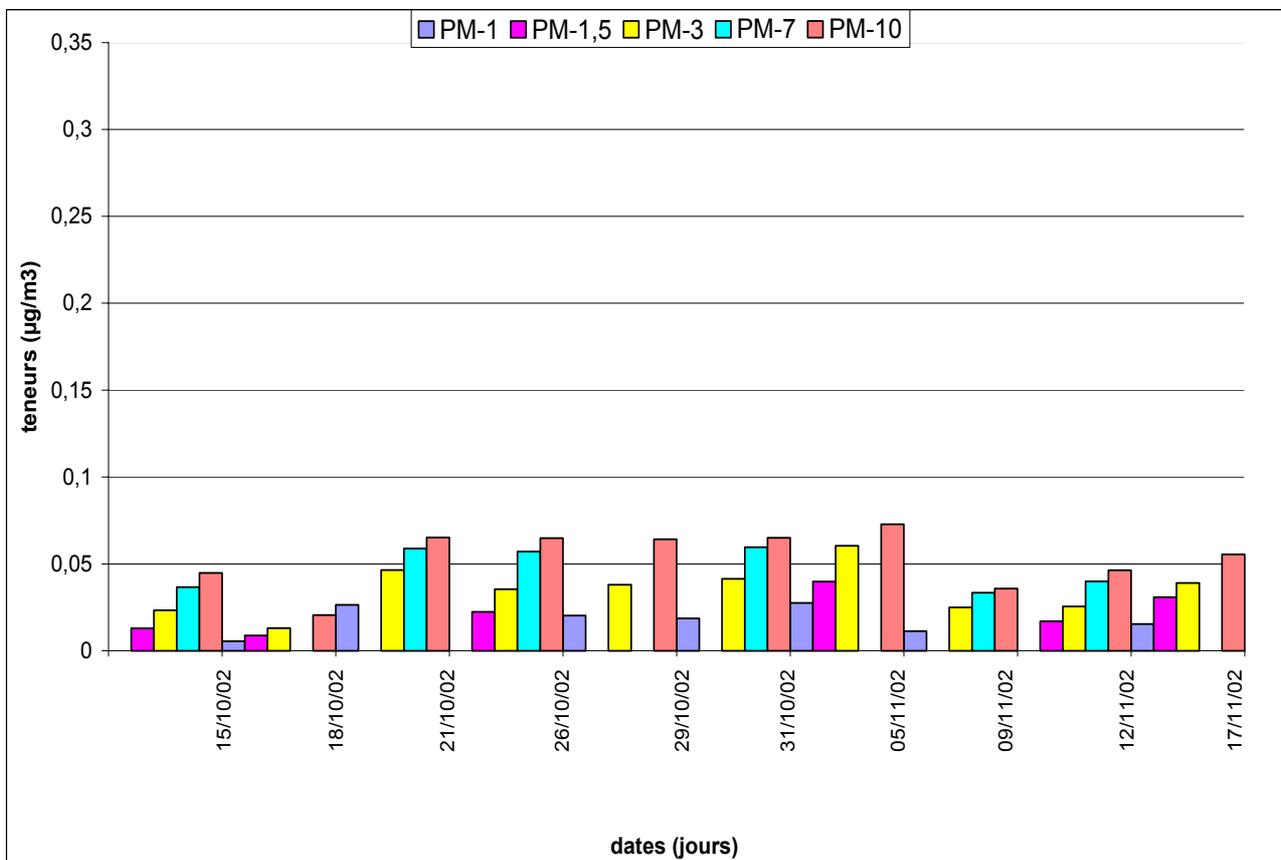


Figure N°VI.15b : Evolution des teneurs atmosphériques en Cu mesurées à l'ENP (Alger).

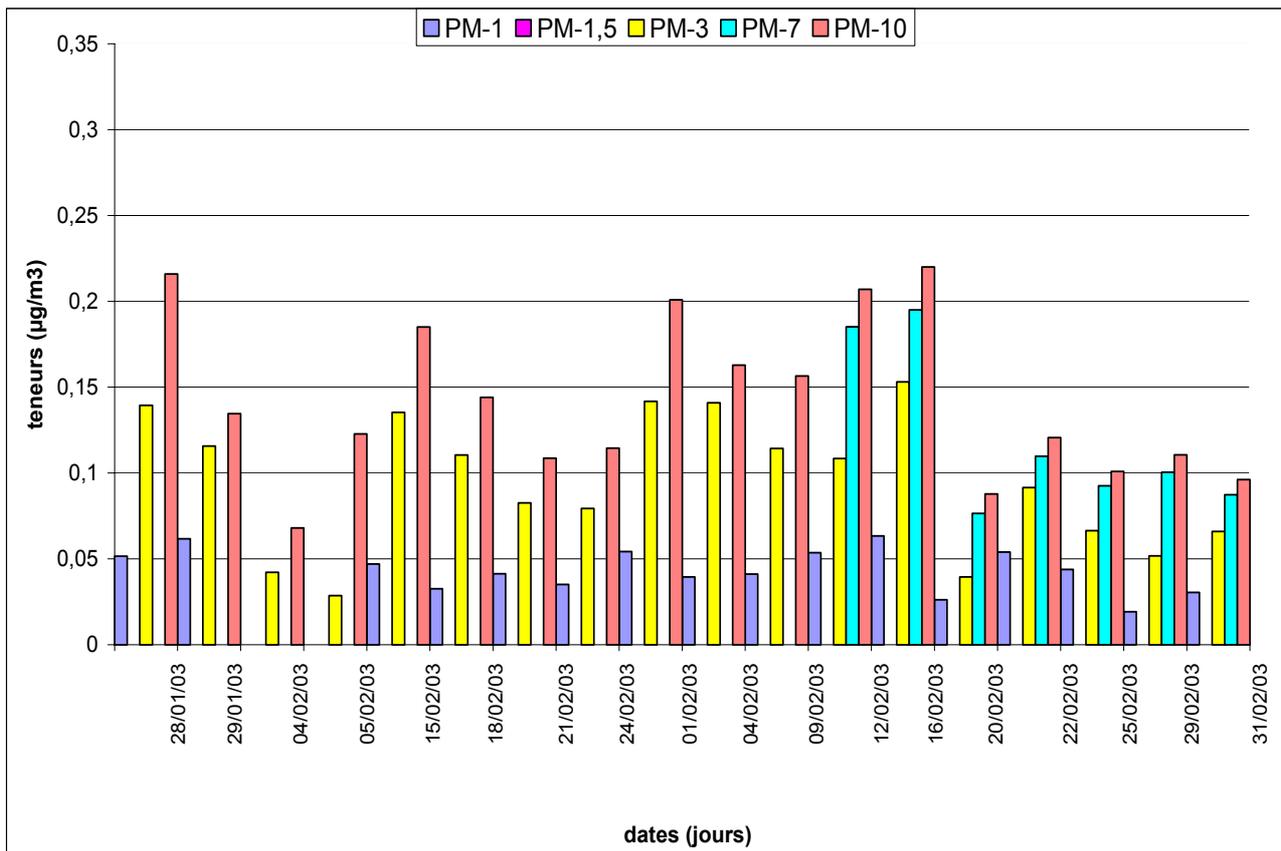


Figure N°VI.15c : Evolution des teneurs atmosphériques en Cu mesurées à l'ENP (Alger).

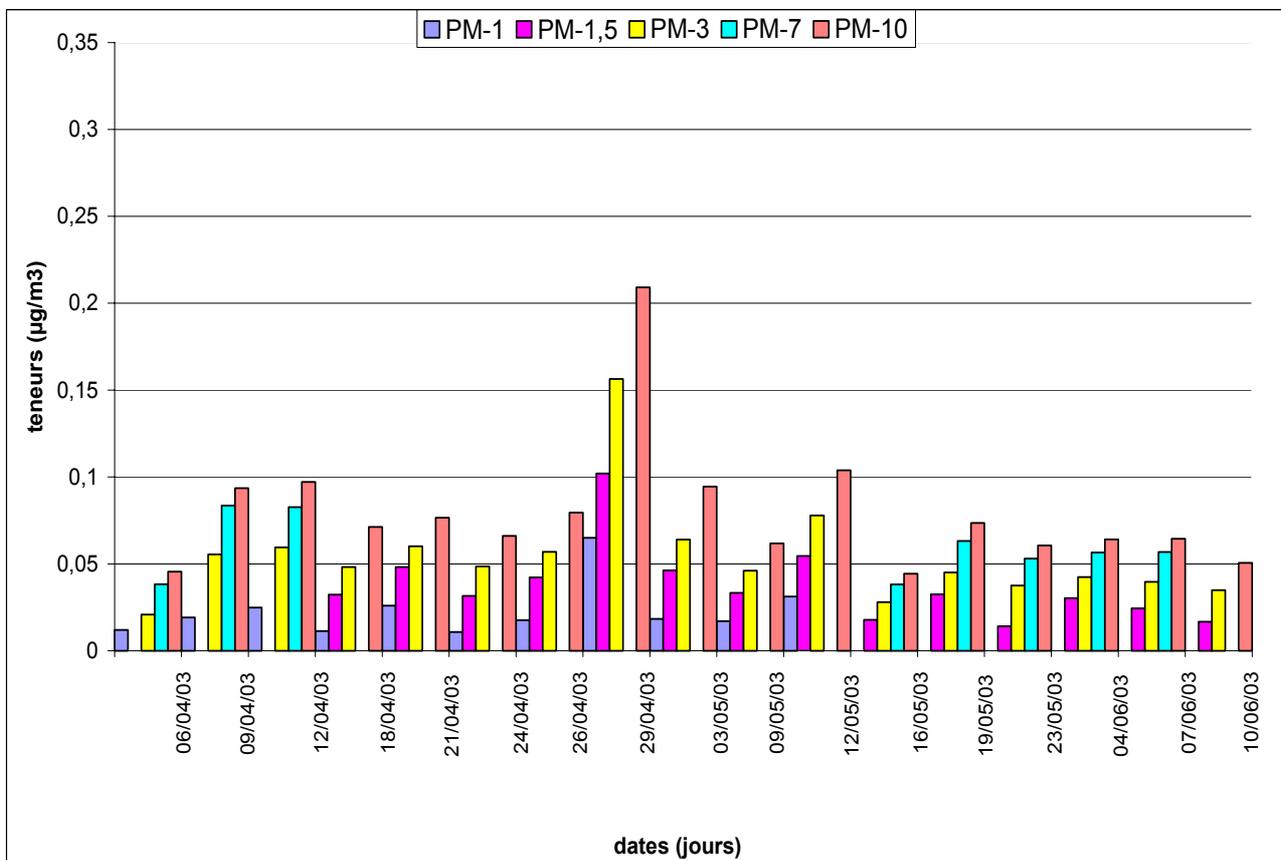


Figure N°VI.15d : Evolution des teneurs atmosphériques en Cu mesurées à l'ENP (Alger).

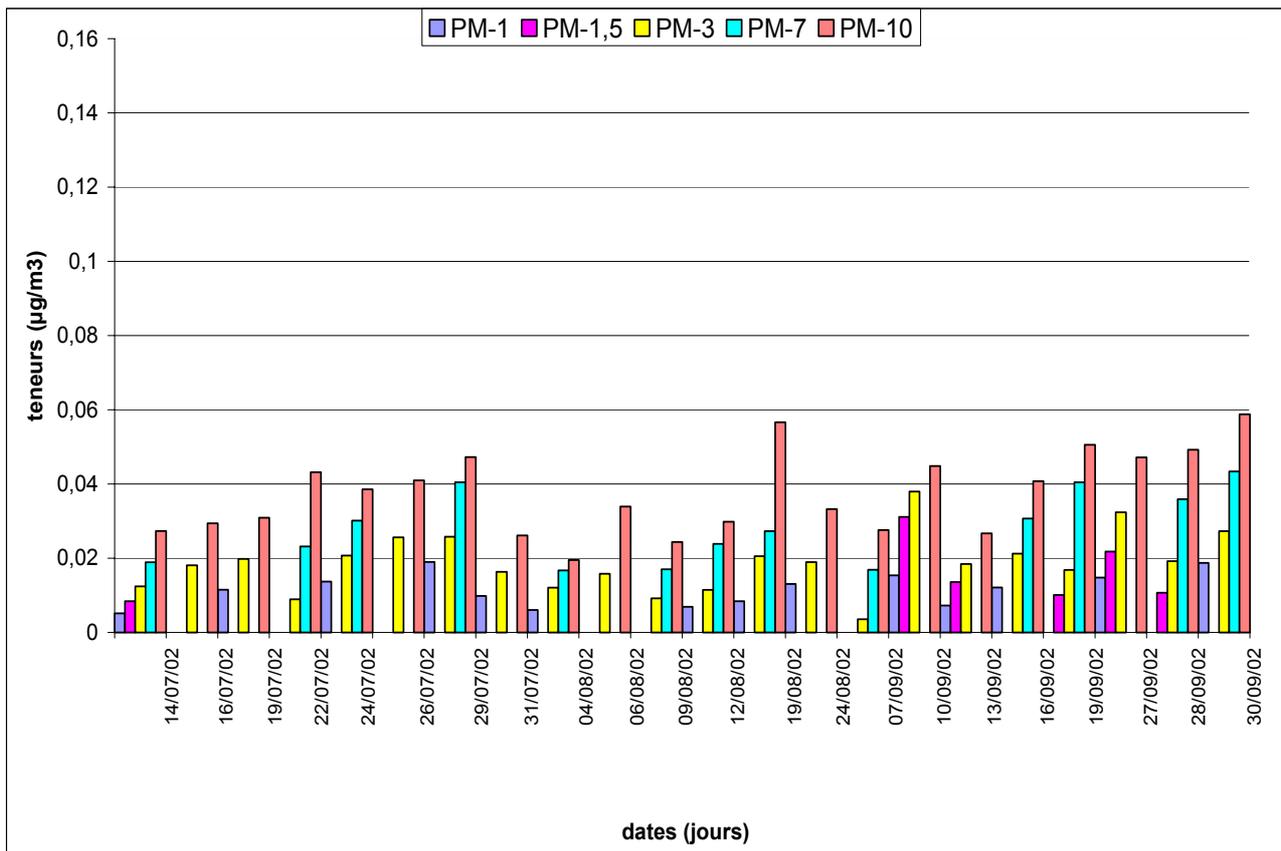


Figure N°VI.16a : Evolution des teneurs atmosphériques en Mn mesurées à l'ENP (Alger).

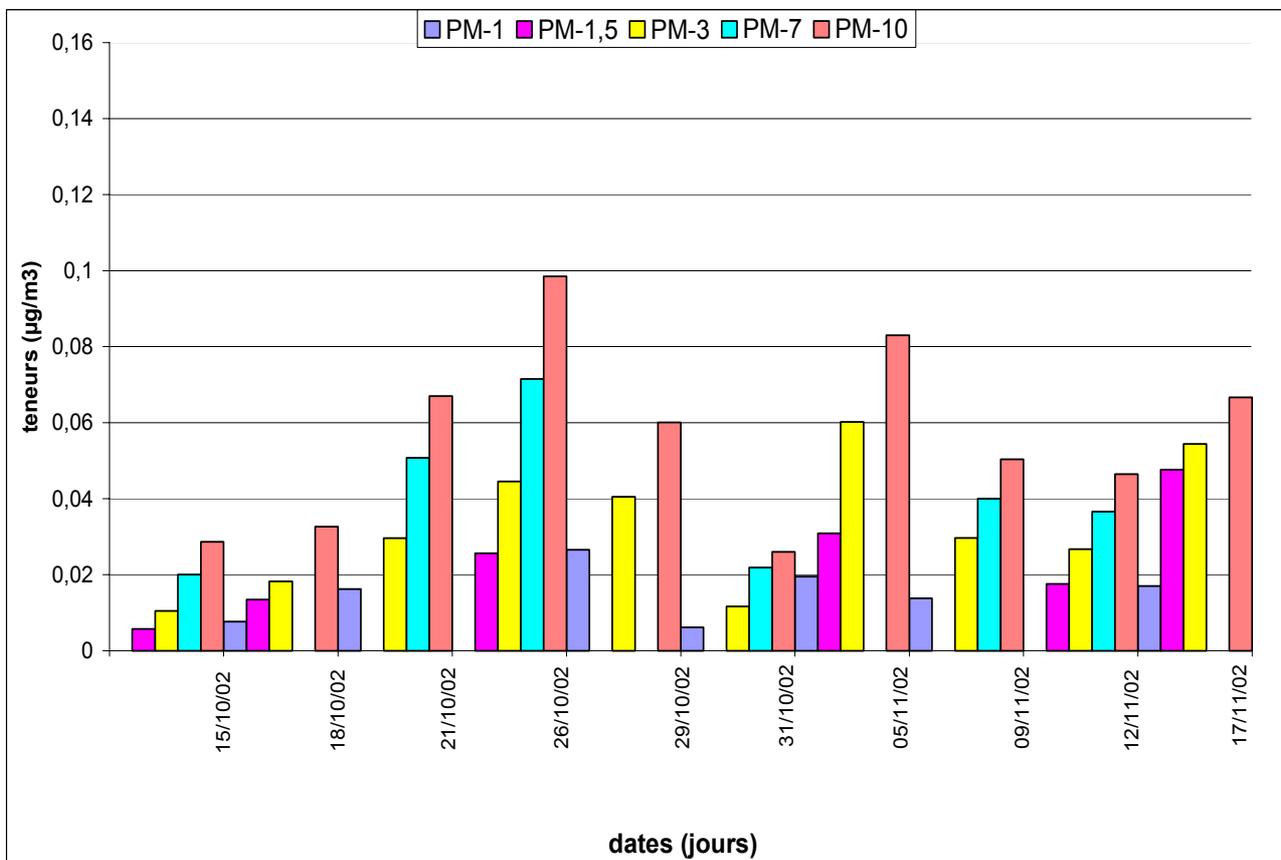


Figure N°VI.16b : Evolution des teneurs atmosphériques en Mn mesurées à l'ENP (Alger)

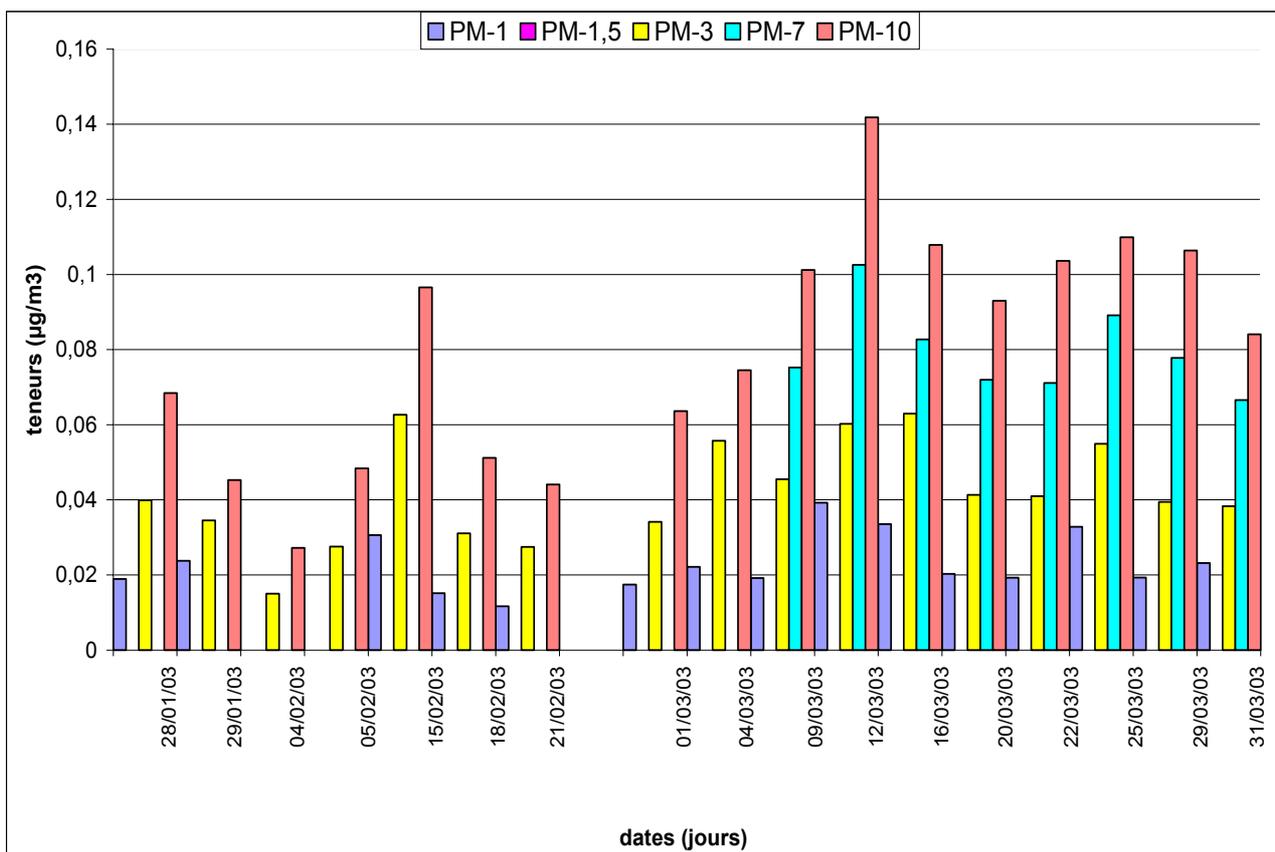


Figure N°VI.16c : Evolution des teneurs atmosphériques en Mn mesurées à l'ENP (Alger).

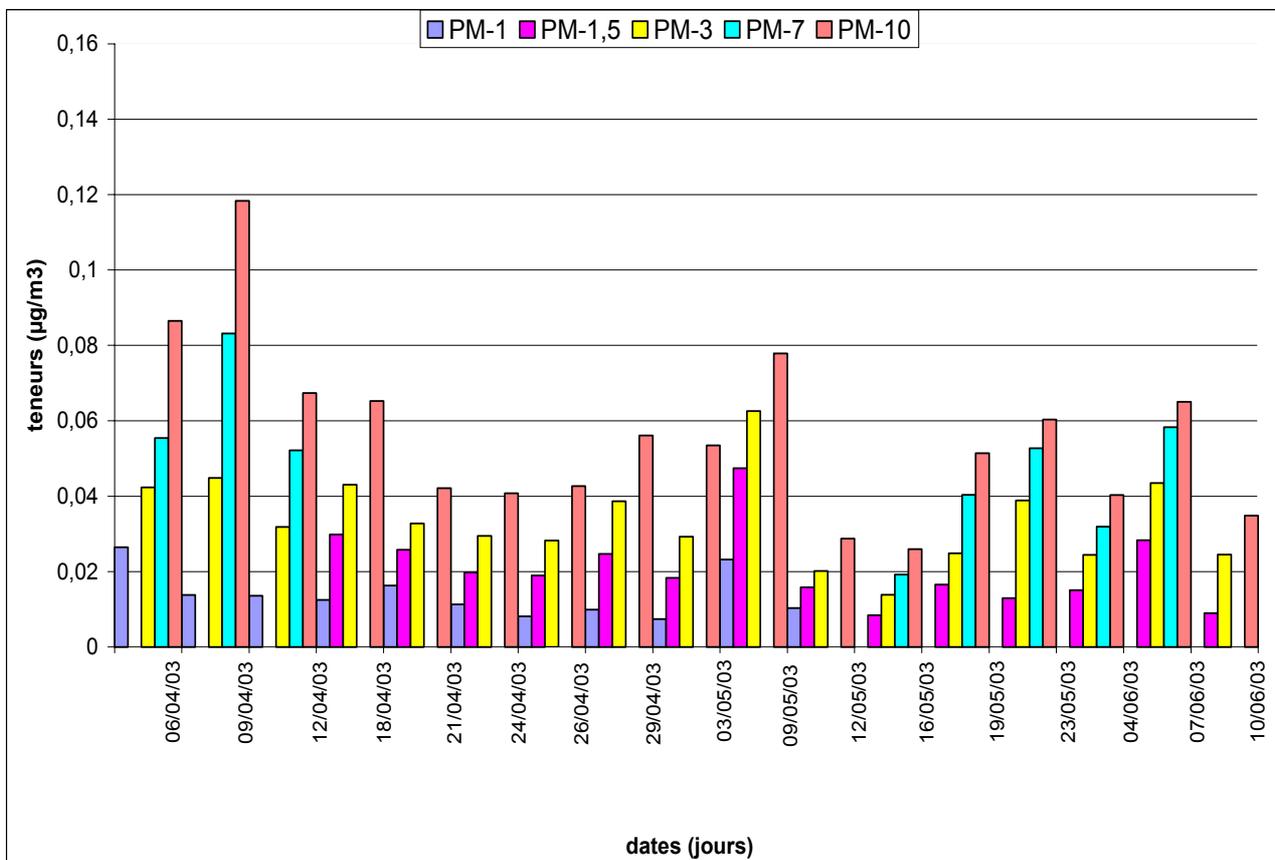


Figure N°VI.16d : Evolution des teneurs atmosphériques en Mn mesurées à l'ENP (Alger)

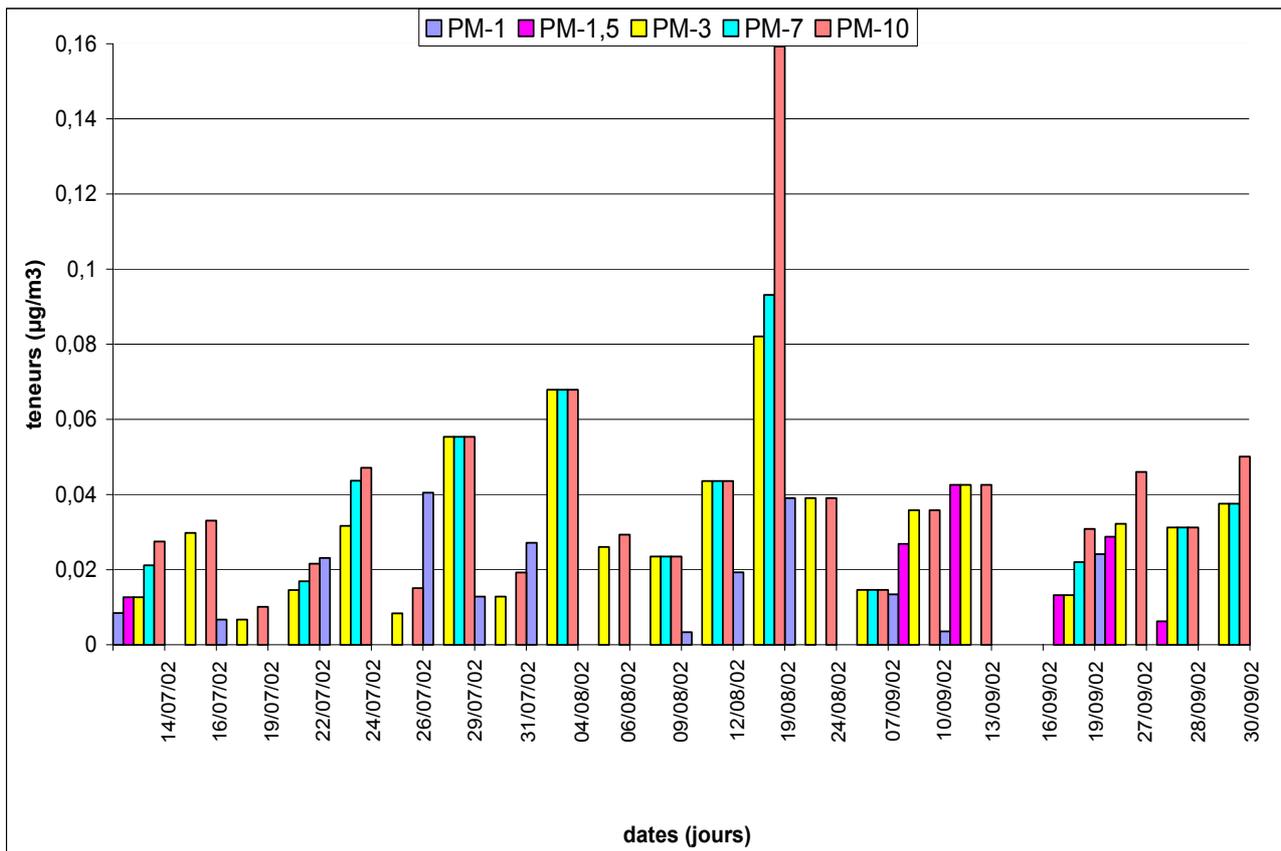


Figure N°VI.17a : Evolution des teneurs atmosphériques en Ni mesurées à l'ENP (Alger).

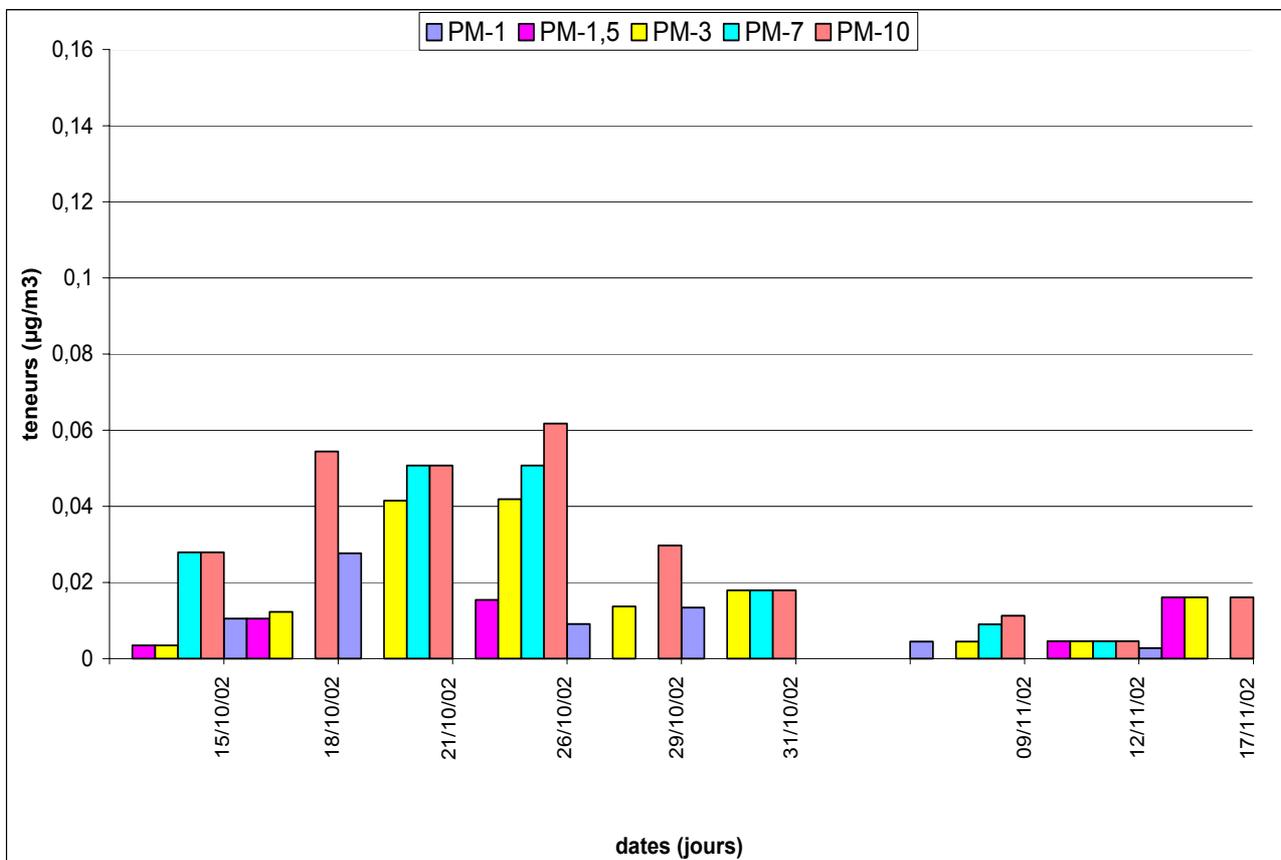


Figure N°VI.17b : Evolution des teneurs atmosphériques en Ni mesurées à l'ENP (Alger).

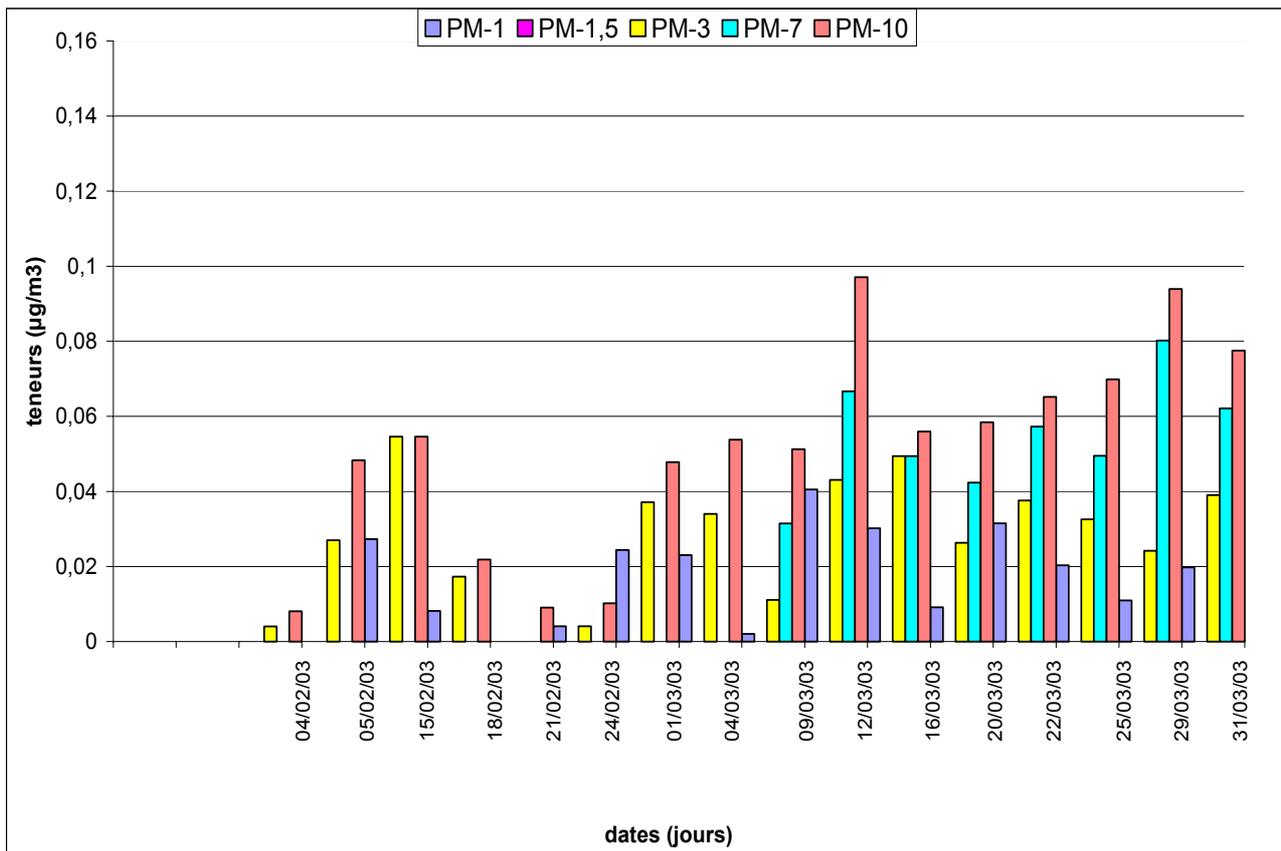


Figure N°VI.17c : Evolution des teneurs atmosphériques en Ni mesurées à l'ENP (Alger).

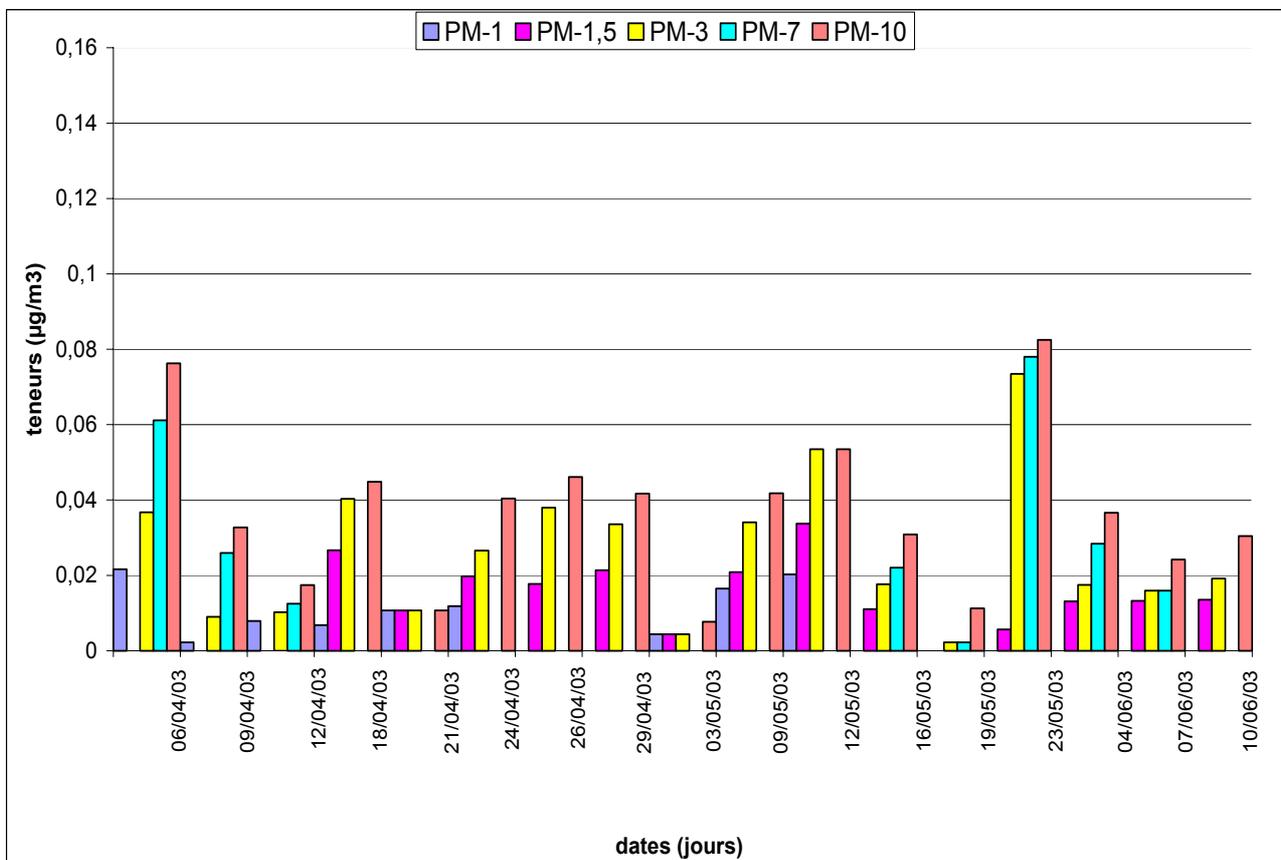


Figure N°VI.17d : Evolution des teneurs atmosphériques en Ni mesurées à l'ENP (Alger).

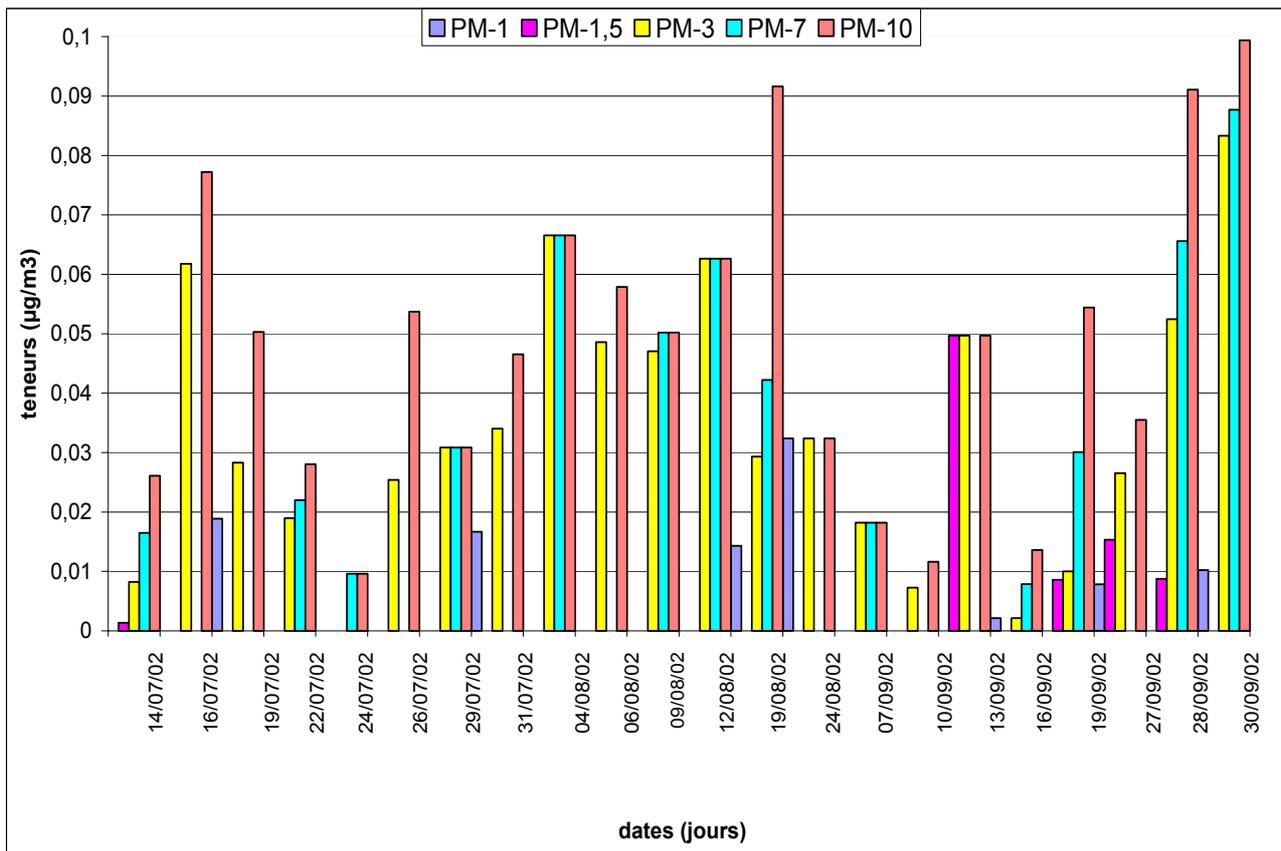


Figure N°VI.18a : Evolution des teneurs atmosphériques en Co mesurées à l'ENP (Alger).

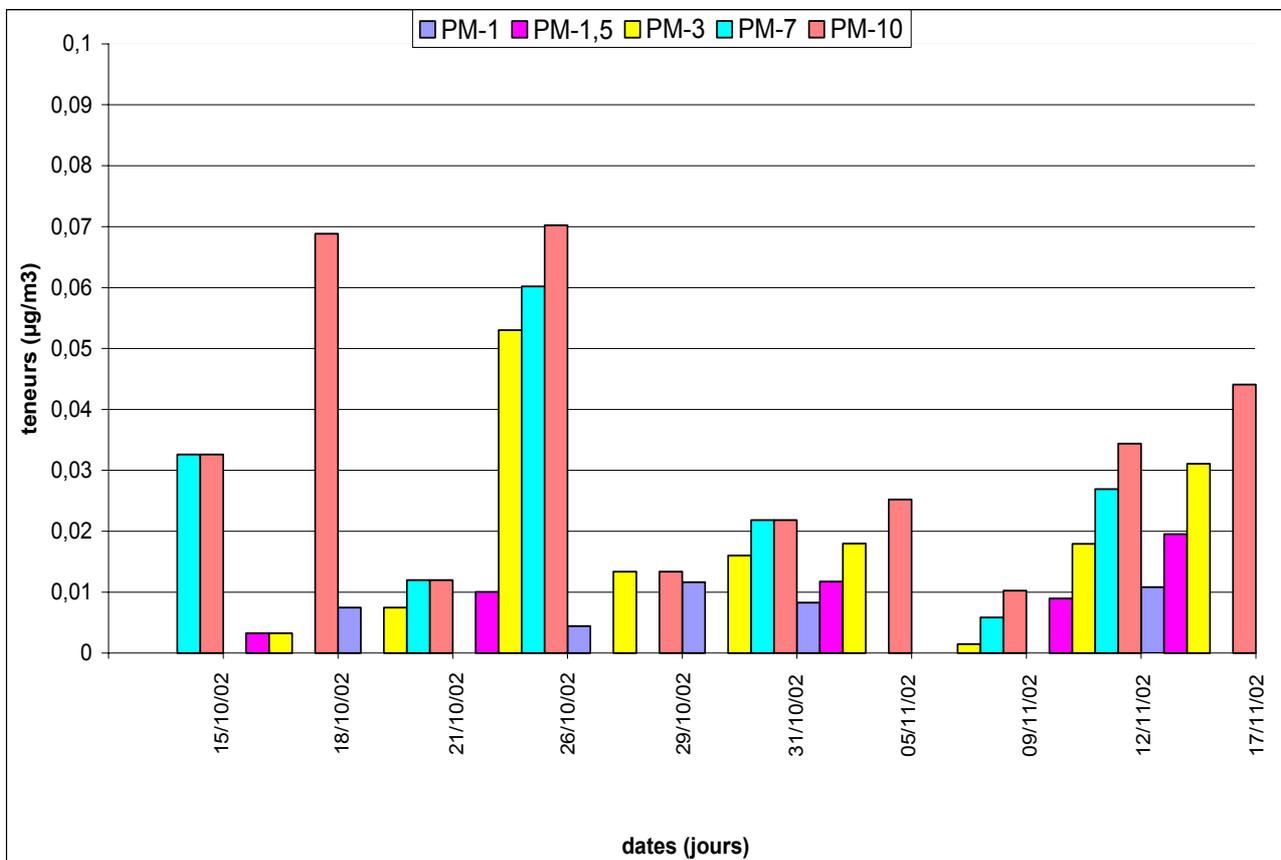


Figure N°VI.18b : Evolution des teneurs atmosphériques en Co mesurées à l'ENP (Alger).

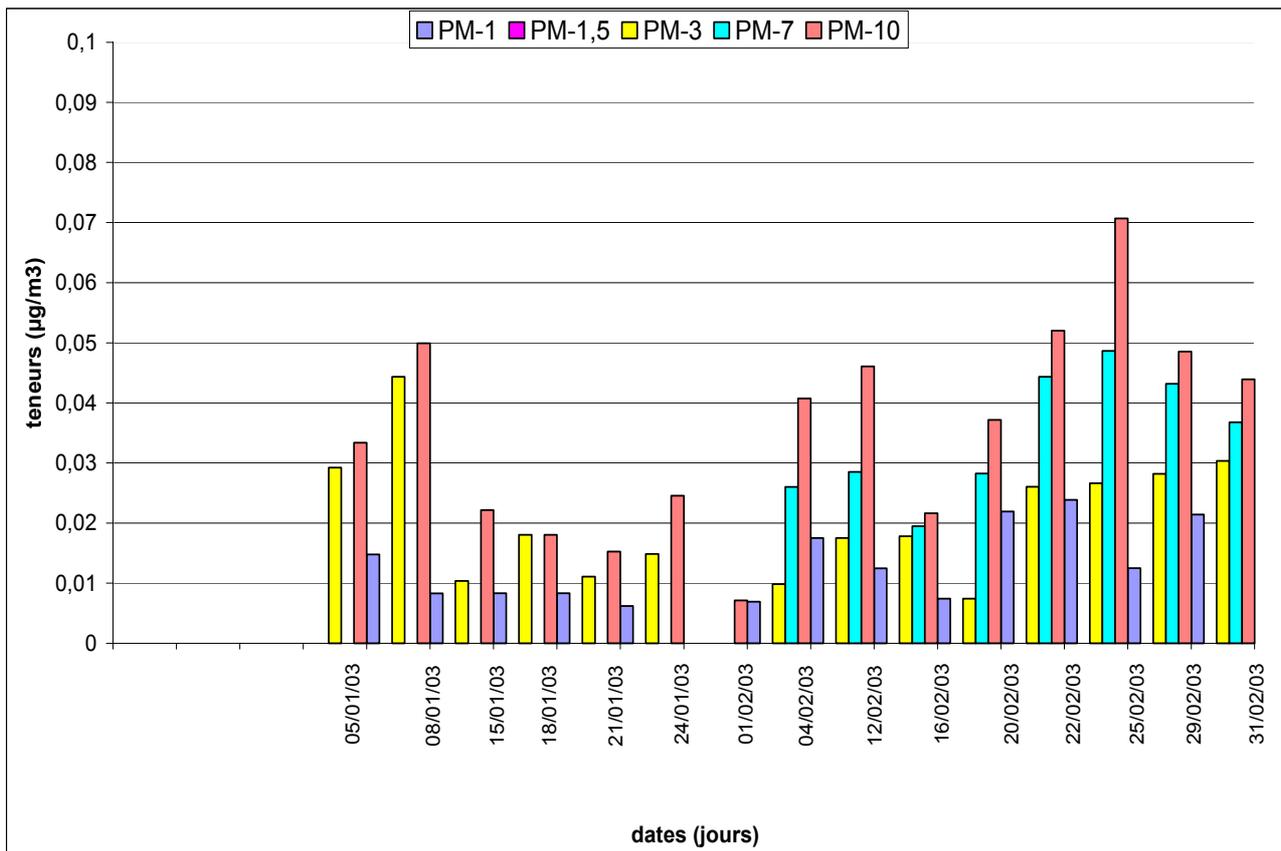


Figure N°VI.18c : Evolution des teneurs atmosphériques en Co mesurées à l'ENP (Alger).

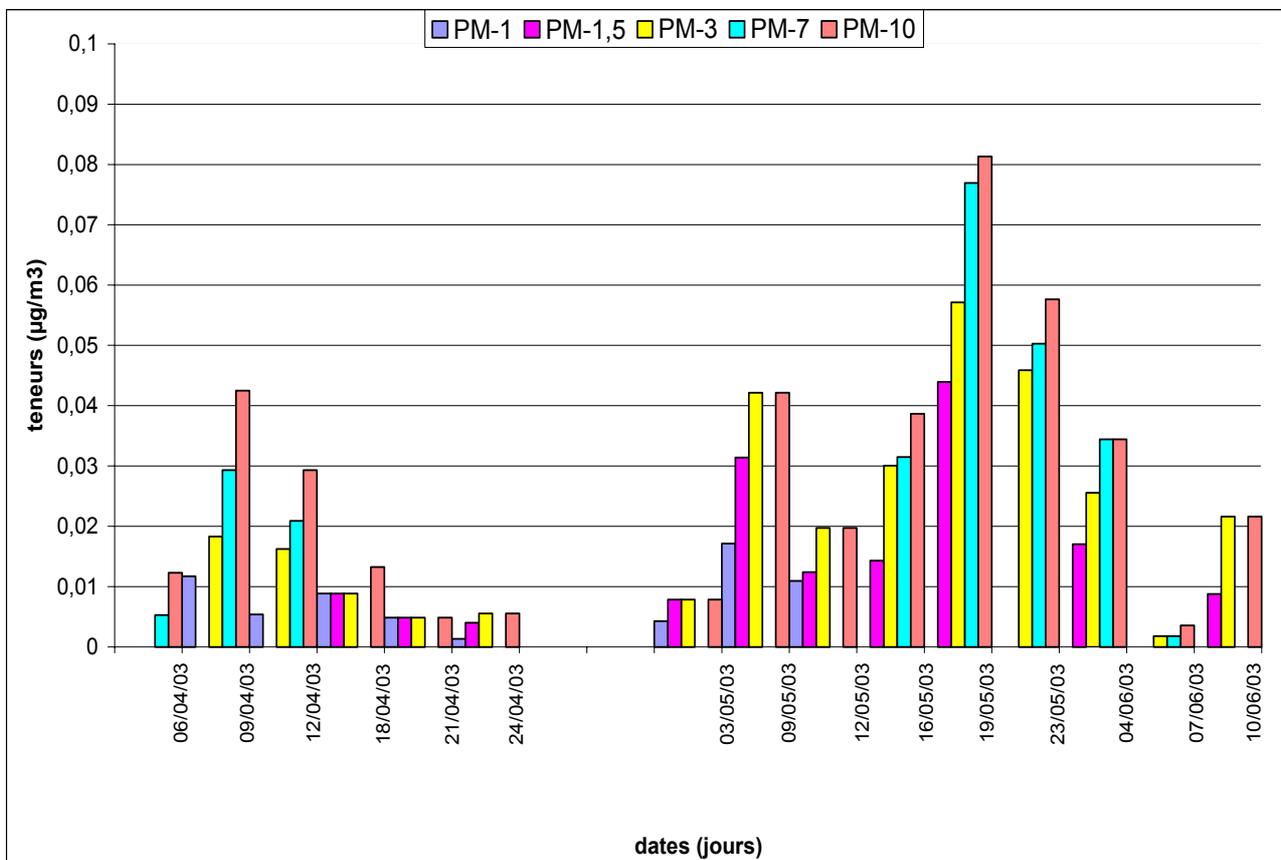


Figure N°VI.18d : Evolution des teneurs atmosphériques en Co mesurées à l'ENP (Alger).

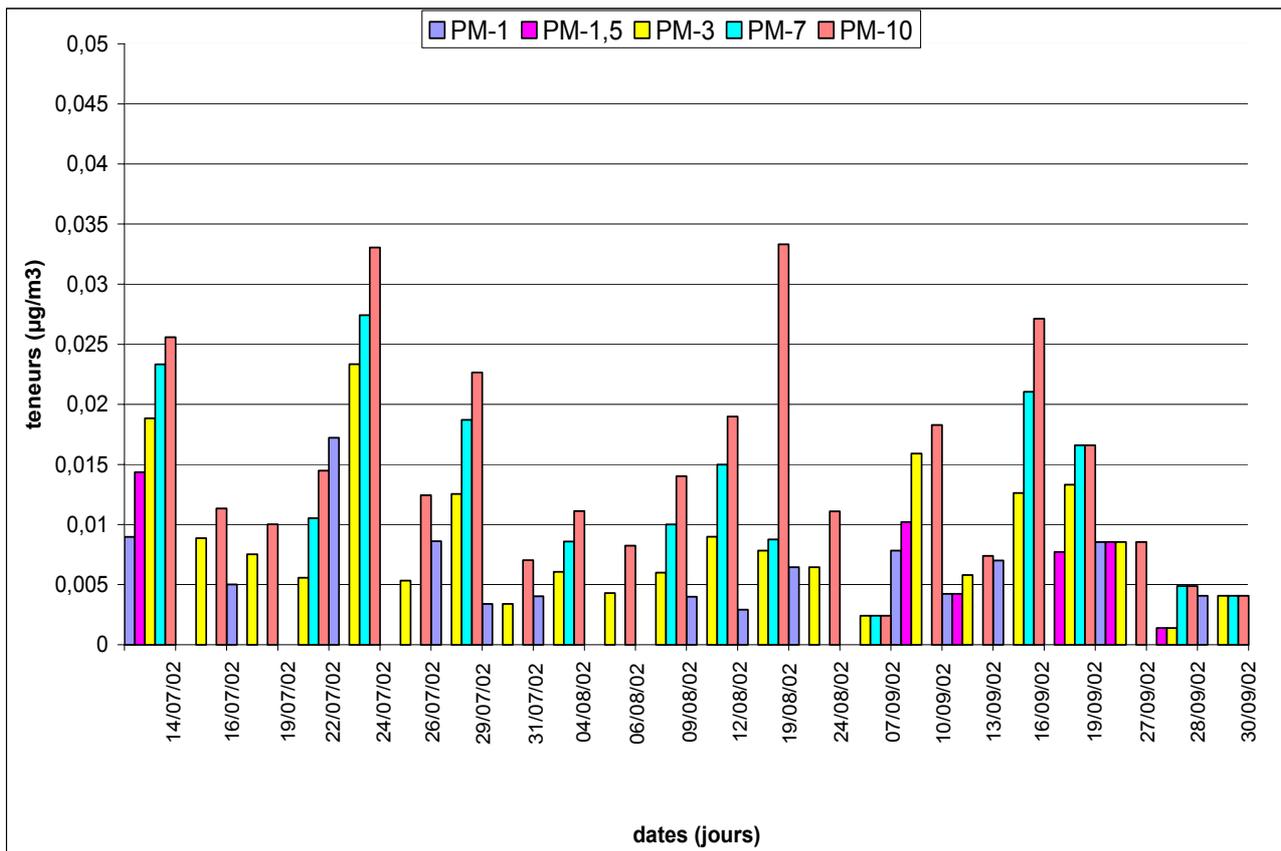


Figure N°VI.19a : Evolution des teneurs atmosphériques en Cd mesurées à l'ENP (Alger).

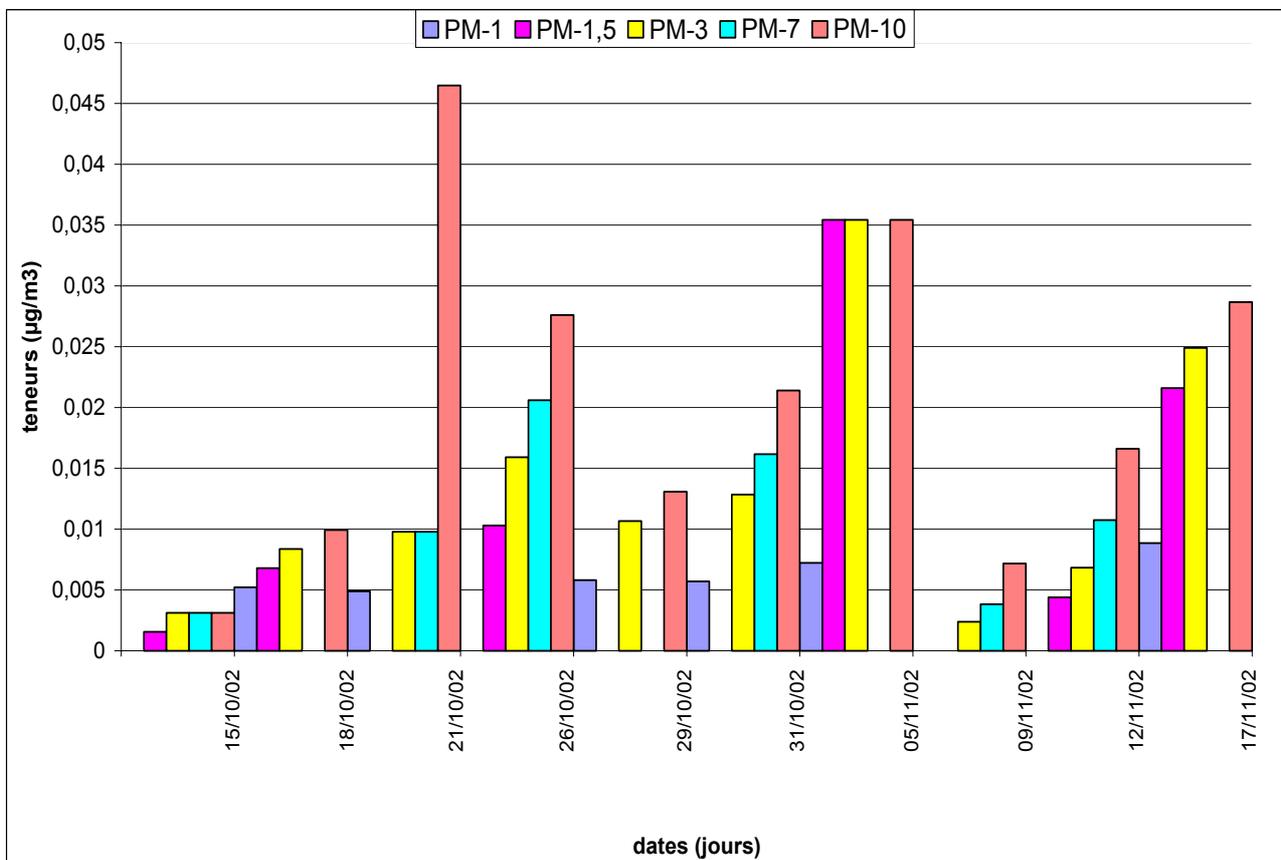


Figure N°VI.19b : Evolution des teneurs atmosphériques en Cd mesurées à l'ENP (Alger).

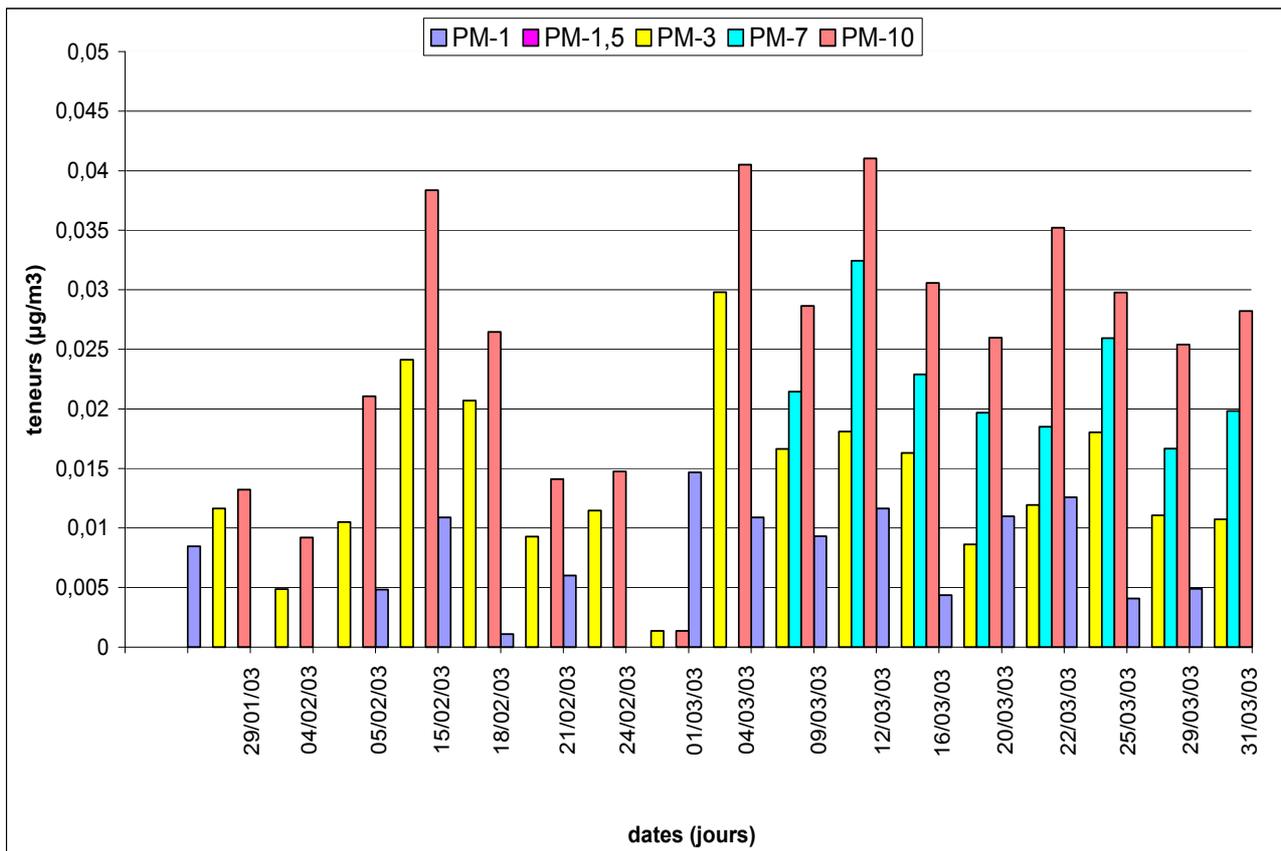


Figure N°VI.19c : Evolution des teneurs atmosphériques en Cd mesurées à l'ENP (Alger).

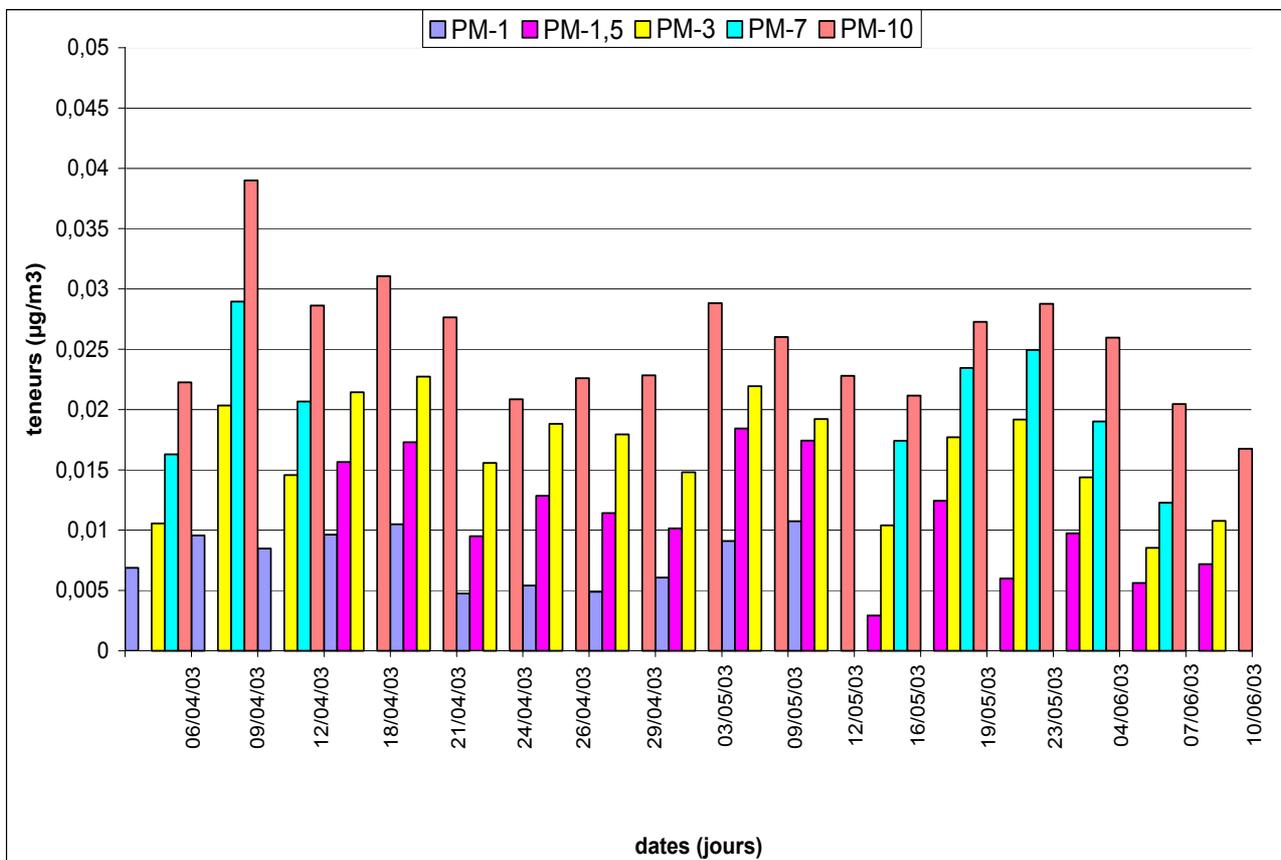


Figure N°VI.19d : Evolution des teneurs atmosphériques en Cd mesurées à l'ENP (Alger).

Tableau N° VI.9 : Teneurs atmosphériques moyennes des métaux lourds mesurées à Alger.

Fractions Granulométriques	Teneurs en métaux lourds (ng/m <sup>3</sup> )							
	Fe		Pb		Cu		Mn	
	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Max
PM-1	149,0	479,6	151,7	387,2	32,7	67,3	16,8	39,2
PM-1.5	195,1	684,5	150,8	264,6	35,2	102,1	21,2	47,6
PM-3	282,9	837,0	208,9	507,6	63,2	156,4	31,2	62,9
PM-7	553,0	1031,5	273,4	549,0	81,5	195,1	48,2	102,6
PM-10	639,8	1350,4	299,3	715,2	102,8	331,1	57,8	141,8
	Ni		Co		Cd			
	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Max
PM-1	16,5	40,5	11,8	32,4	7,4	17,2		
PM-1.5	17,0	42,6	16,1	49,7	11,3	35,4		
PM-3	28,1	82,1	26,2	83,3	12,8	35,4		
PM-7	39,7	93,1	35,2	87,7	16,3	32,4		
PM-10	42,4	159,3	37,7	99,4	21,2	46,5		

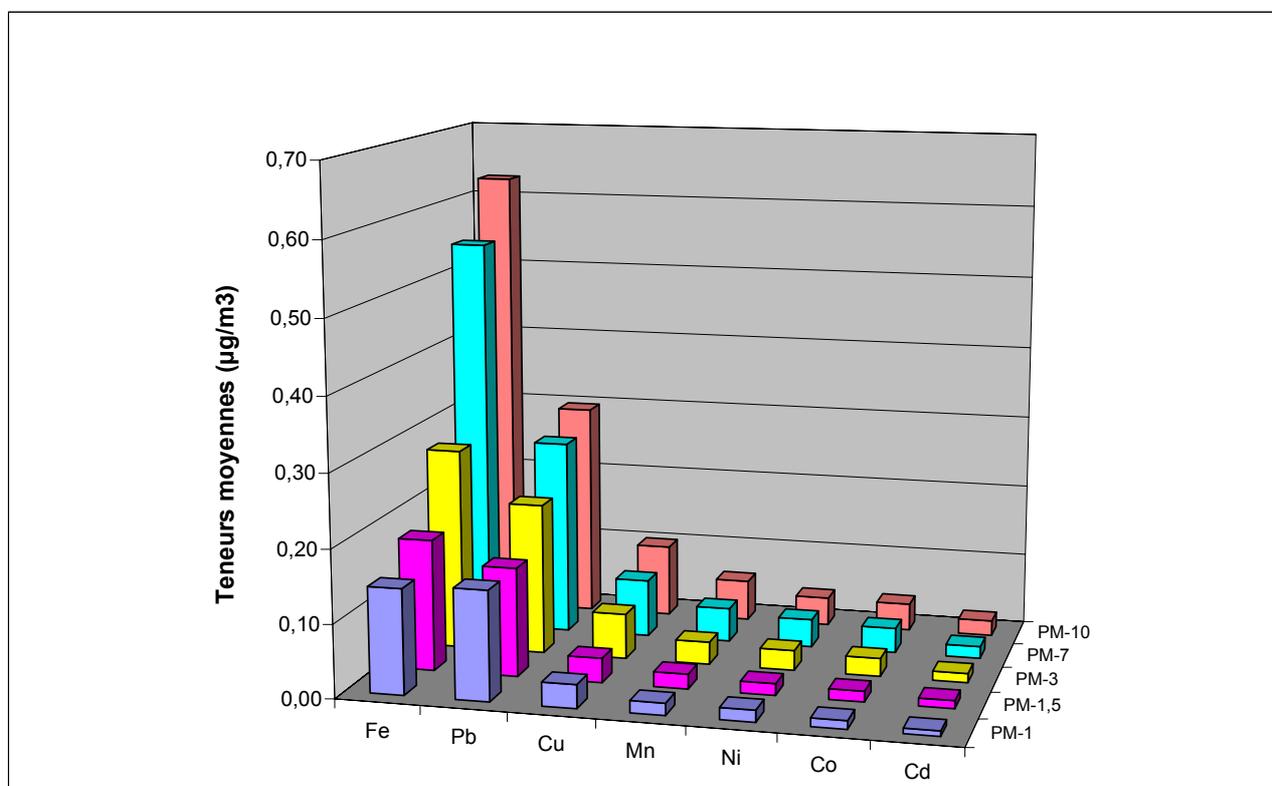
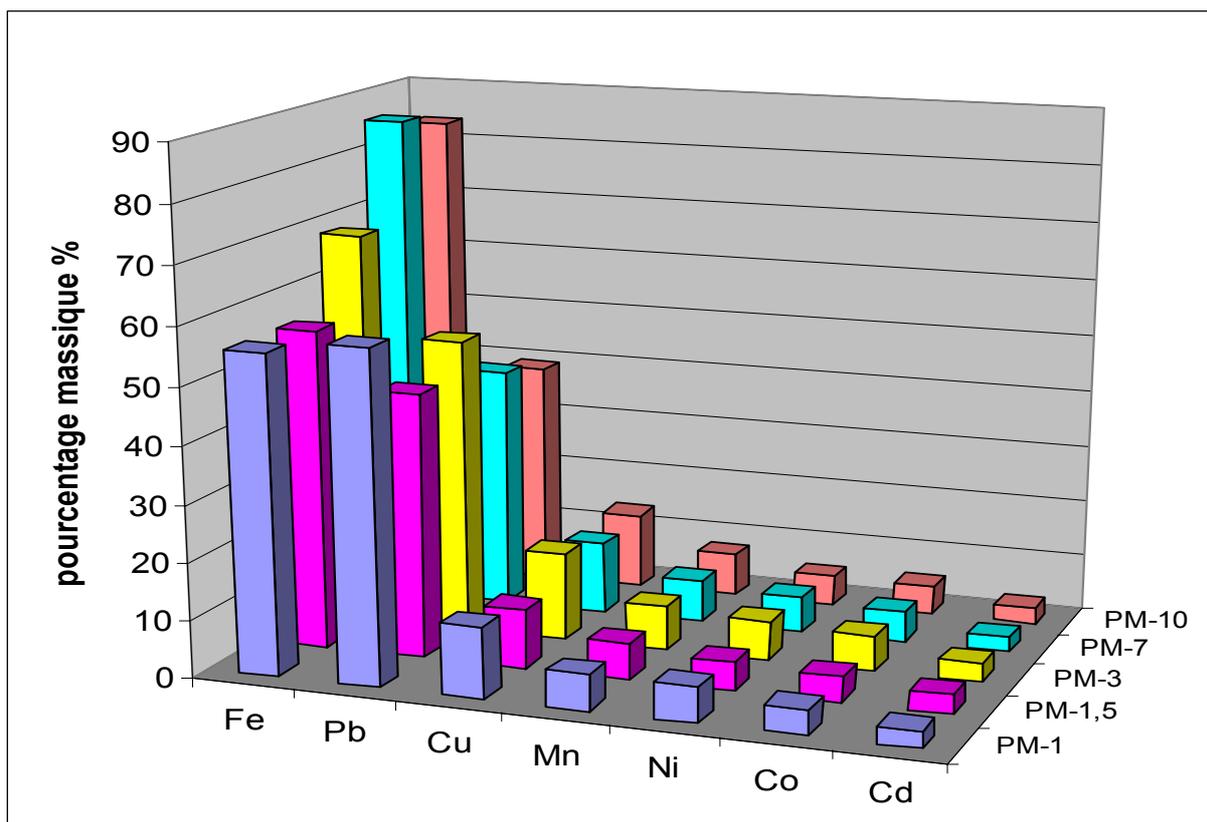


Figure N° VI.20 : Distribution des teneurs atmosphériques moyennes des métaux dans chaque classe granulométrique.

**Tableau N° VI.10** : Distribution des fractions massiques moyennes des métaux lourds selon la classe granulométrique.

Fractions Granulométriques	Fractions massiques moyennes des métaux lourds						
	Fe	Pb	Cu	Mn	Ni	Co	Cd
PM-1	0,56	0,58	0,12	0,06	0,06	0,04	0,03
PM-1.5	0,56	0,46	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03
PM-3	0,69	0,52	0,15	0,08	0,07	0,06	0,03
PM-7	0,86	0,42	0,13	0,07	0,06	0,05	0,03
PM-10	0,83	0,39	0,13	0,07	0,05	0,05	0,03



**Figure N° VI.21** : Pourcentage massique moyen des métaux dans chaque classe granulométrique.

Globalement, à part le plomb, les autres métaux lourds n'atteignent pas des teneurs inquiétantes et sont caractéristiques d'un milieu urbain qui n'est pas exposé à des émissions industrielles. Le plomb provient naturellement de l'utilisation encore majoritaire de l'essence plombée. Une généralisation de l'essence non plombée réduirait fortement, comme c'est le cas en Europe, cette forme de pollution.

Il est par ailleurs important de noter que les métaux lourds se distribuent différemment sur les différentes classes granulométriques. En effet, l'examen des rapports (concentration du métal dans la classe PM-i / concentration du métal dans la classe PM-j) donnés dans le tableau N° VI. 11 montre que 50% du plomb global se trouve dans la fraction très fine des particules, les PM-1 et 70 % dans les PM-3.

Dans la fraction PM-3, on relève que 71% du plomb accuse un diamètre inférieur à 1µm. De la même manière, on observe que les métaux Cu, Co et Ni sont aussi majoritairement distribués sur la fraction respirable, les PM-3. Le fer et le manganèse se caractérisent par

contre par une granulométrie plus élevée que 3µm, on constate en effet que seul 22% du fer global et 33 % de manganèse ont une granulométrie inférieure à 1µm.

Ainsi les métaux lourds émis par le trafic routier (Pb, Cd, Ni) sont associés aux particules très fines et ceux liée à la pollution naturelle (Fer, Mn) sont associés aux particules grossières (de 3 à 10 µm).

Une telle distribution granulométrique des métaux lourds a été aussi observée dans des villes européennes et américaines [87, 88 et 101].

**Tableau N° VI.11 : Distribution granulométrique des métaux lourds.**

Rapport	Fractions massiques moyennes des métaux lourds (%)						
	Fe	Pb	Cu	Mn	Ni	Co	Cd
[métal lourd] PM-1 / [métal lourd] PM-10	22	50	30	33	50	25	50
[métal lourd] PM-1 / [métal lourd] PM-3	50	71	50	67	67	33	58
[métal lourd] PM-3 / [métal lourd] PM-10	44	70	60	50	75	75	50

### VI.2.2 Corrélation entre les métaux lourds

Afin de vérifier, dans quelle mesure certains métaux lourds présentent des corrélations entre eux, nous avons comparés les teneurs des métaux lourds par couple dans les fractions granulométriques PM-10, PM-3 et PM-1.

A titre d'exemple nous présentons respectivement en figures N°VI.22, 23 et 24 les corrélations Fe/Mn et Fe/Pb dans les PM-10, les corrélations Fe/Mn, Fe/Cd et Pb/Cd dans les PM-3 et les corrélations Pb/Mn, et Pb/Cd dans les PM-1.

Les figures illustrant l'ensemble des corrélations obtenues pour les autres couples de métaux lourds sont données en annexe.

La matrice donnant l'ensemble des facteurs des corrélations  $R^2$  est présentée en tableaux N°VI.12, VI.13 et VI.14.

A partir de ces résultats, on constate :

- Dans les PM-10, les corrélations les plus élevées et donc les plus significatives sont observées entre le Fe et Mn et à un degré moindre dans les couples Fe/Cu et Mn/Cu.
- Dans les PM-3, en plus des corrélations liant le Fe, Mn et Cu, on retrouve de bonnes relations linéaires entre Pb, Cd et Ni.
- Dans les particules très fines PM-1, les corrélations les plus significatives sont relevées entre le Pb, Cd et Ni.

On peut aussi classer les métaux lourds en deux groupes :

- Le Pb, Cd et Ni dont les teneurs sont étroitement liés surtout dans les particules très fines (PM-1 et PM-3). Ces éléments lourds ont probablement la même source d'émission qui est le trafic routier.
- Les éléments Fe, Mn et Cu qui dans la fraction moins fine sont étroitement liés. Ces éléments appartiennent à une source d'émission autre que le trafic routier. Ils proviennent de l'érosion terrestre.

Ces résultats confirment les données présentées dans les paragraphes précédents relatives à l'enrichissement du Pb et Cd dans la fraction très fine des particules et la présence majoritaire du Fe et Mn dans les particules grossières.

**Tableau N° VI.12** : Facteurs de corrélation entre les métaux lourds dans les PM-10.

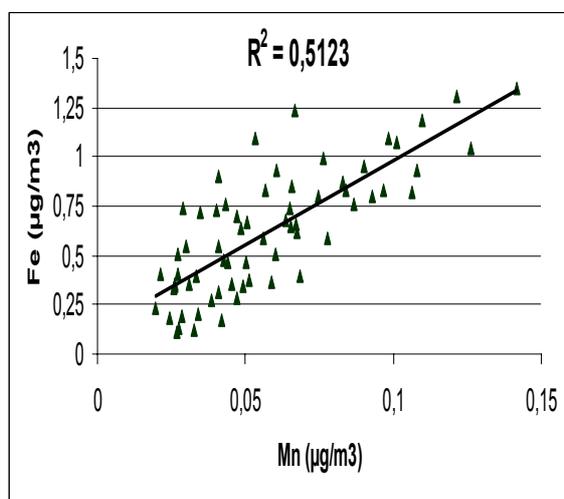
	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>
<b>Fe</b>	1	<b>0,51</b>	<b>0,23</b>	0,18	0,12	0,00	0,16
<b>Mn</b>		1	<b>0,27</b>	0,15	0,17	0,07	0,18
<b>Cu</b>			1	0,13	0,09	0,03	0,10
<b>Pb</b>				1	0,23	0,02	0,14
<b>Cd</b>					1	0,07	0,14
<b>Co</b>						1	0,13
<b>Ni</b>							1

**Tableau N° VI.13** : Facteurs de corrélation entre les métaux lourds dans les PM-3.

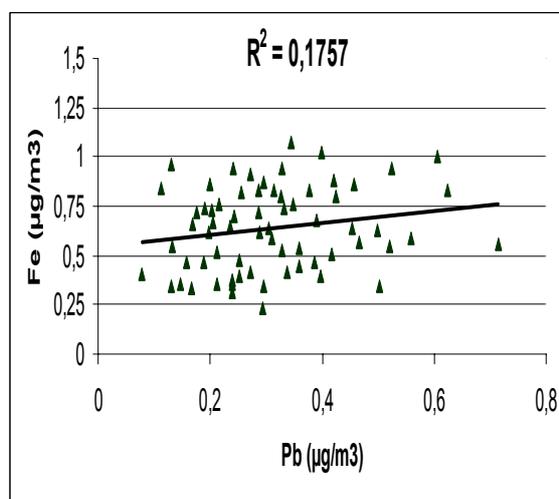
	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>
<b>Fe</b>	1	<b>0,50</b>	<b>0,21</b>	0,11	0,10	0,01	0,01
<b>Mn</b>		1	<b>0,23</b>	0,09	0,17	0,07	0,02
<b>Cu</b>			1	0,15	0,09	0,08	0,11
<b>Pb</b>				1	<b>0,53</b>	0,21	<b>0,40</b>
<b>Cd</b>					1	0,14	0,10
<b>Co</b>						1	0,18
<b>Ni</b>							1

**Tableau N° VI.14** : Facteurs de corrélation entre les métaux lourds dans les PM-1.

	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>
<b>Fe</b>	1	<b>0,35</b>	0,16	0,02	0,11	0,04	0,10
<b>Mn</b>		1	0,12	0,07	0,11	0,06	0,13
<b>Cu</b>			1	0,18	0,15	0,16	0,14
<b>Pb</b>				1	<b>0,41</b>	0,17	<b>0,42</b>
<b>Cd</b>					1	0,18	0,28
<b>Co</b>						1	0,20
<b>Ni</b>							1

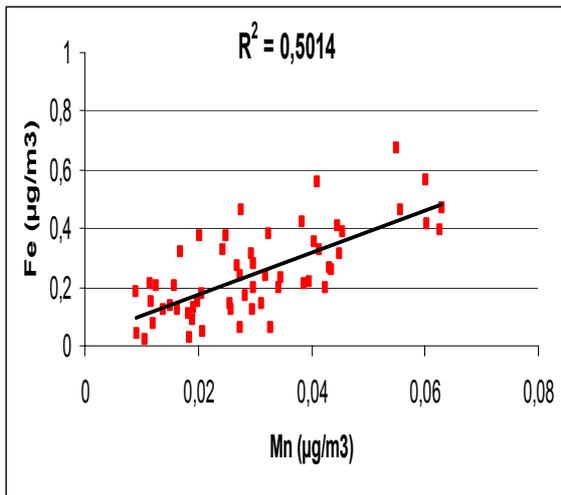


Corrélation entre le **Fe** et le **Mn**

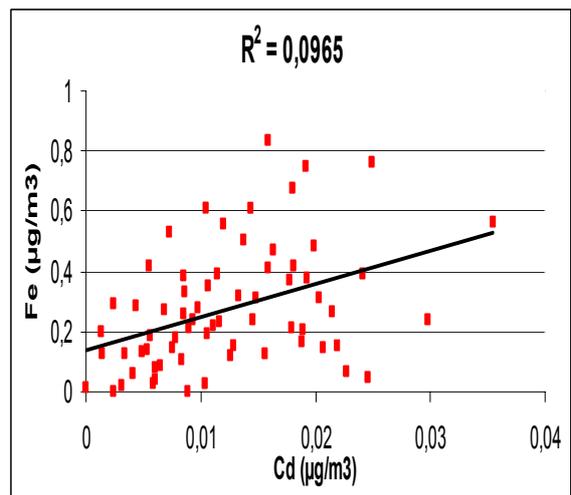


Corrélation entre le **Fe** et le **Pb**

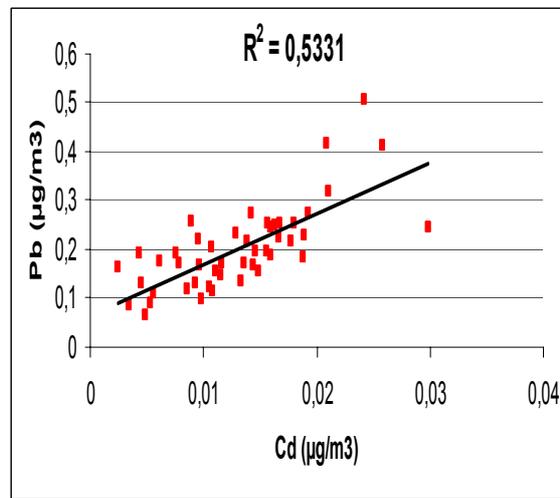
**Figures N°VI.22** : Corrélation des métaux lourds dans les PM-10.



Corrélation entre le **Fe** et le **Mn**

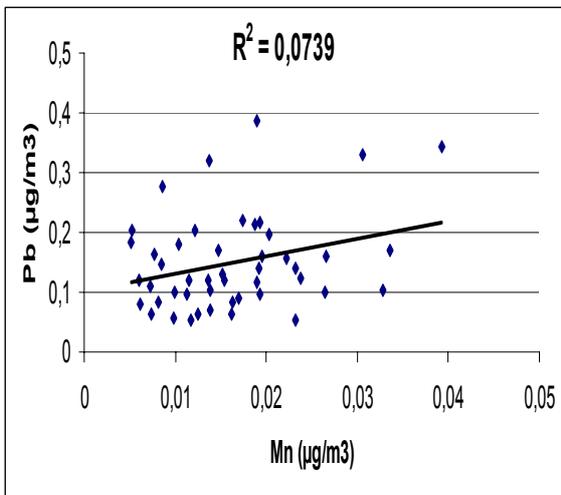


Corrélation entre le **Fe** et le **Cd**

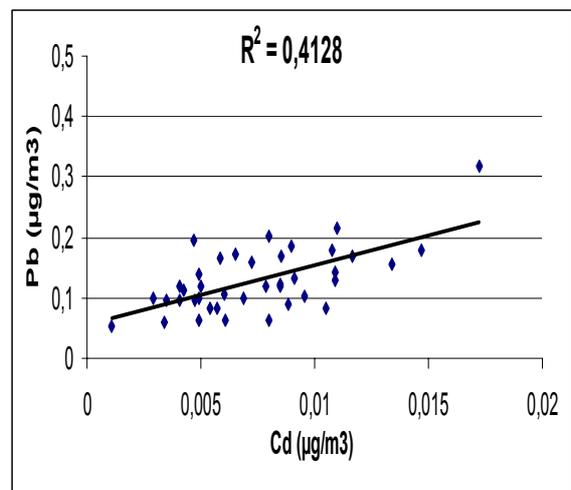


Corrélation entre le **Pb** et le **Cd**

**Figures N°VI.23** : Corrélation des métaux lourds dans les PM-3.



Corrélation entre le **Pb** et le **Mn**



Corrélation entre le **Pb** et le **Cd**

**Figures N°VI.24** : Corrélation des métaux lourds dans les PM-1.

### VI.2.3 Exploitation statistique des teneurs atmosphériques en métaux lourds

#### a) Diagramme log /probabilité : Détermination du $d_{50}$

Comme dans le cas des PM-10, nous avons déterminé le diamètre aérodynamique moyen  $d_{50}$  des deux métaux lourds Fe et Pb qui sont respectivement représentatifs des sources naturelles et des sources entropiques (trafic routier).

**Tableau N° VI.15** : Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique pour le Fe.

Etage Enersen	Masse collectée par étage (mg)	Masse cumulée* (mg)	% massique cumulé	100-% massique	Diamètre de l'étage ( $\mu\text{m}$ )
1	9,4	9,4	24,1	75,9	7,00
2	13,0	22,4	57,3	42,7	3,00
3	5,0	27,5	70,1	29,9	1,50
4	2,0	29,4	75,1	24,9	1
5	9,7	39,1	100	0	0,01

(\*) Masse des particules de diamètre supérieur au diamètre de l'étage.

**Tableau N° VI.16** : Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique pour le Pb.

Etage Enersen	Masse collectée par étage (mg)	Masse cumulée* (mg)	% massique cumulé	100-% massique	Diamètre de l'étage ( $\mu\text{m}$ )
1	2,2	2,2	12,3	87,7	7,00
2	2,9	5,1	28,5	71,5	3,00
3	1,7	6,8	37,9	62,1	1,50
4	1,0	7,8	43,5	56,5	1
5	10,2	18,0	100	0	0,01

(\*) Masse des particules de diamètre supérieur au diamètre de l'étage.

La représentation graphique log-probabilité des données issues des tableaux N° VI.15 et N° VI.16 illustrée en figure N°VI.25 donne pour :

- Fe :  $d_{50} = 3 \mu\text{m}$  ;
- Pb :  $d_{50} = 0,88 \mu\text{m}$ .

Ce résultat, confirme, que le Pb est associé aux particules très fines et que le fer est prépondérant dans les particules grossières (particules trachéobronchiques).

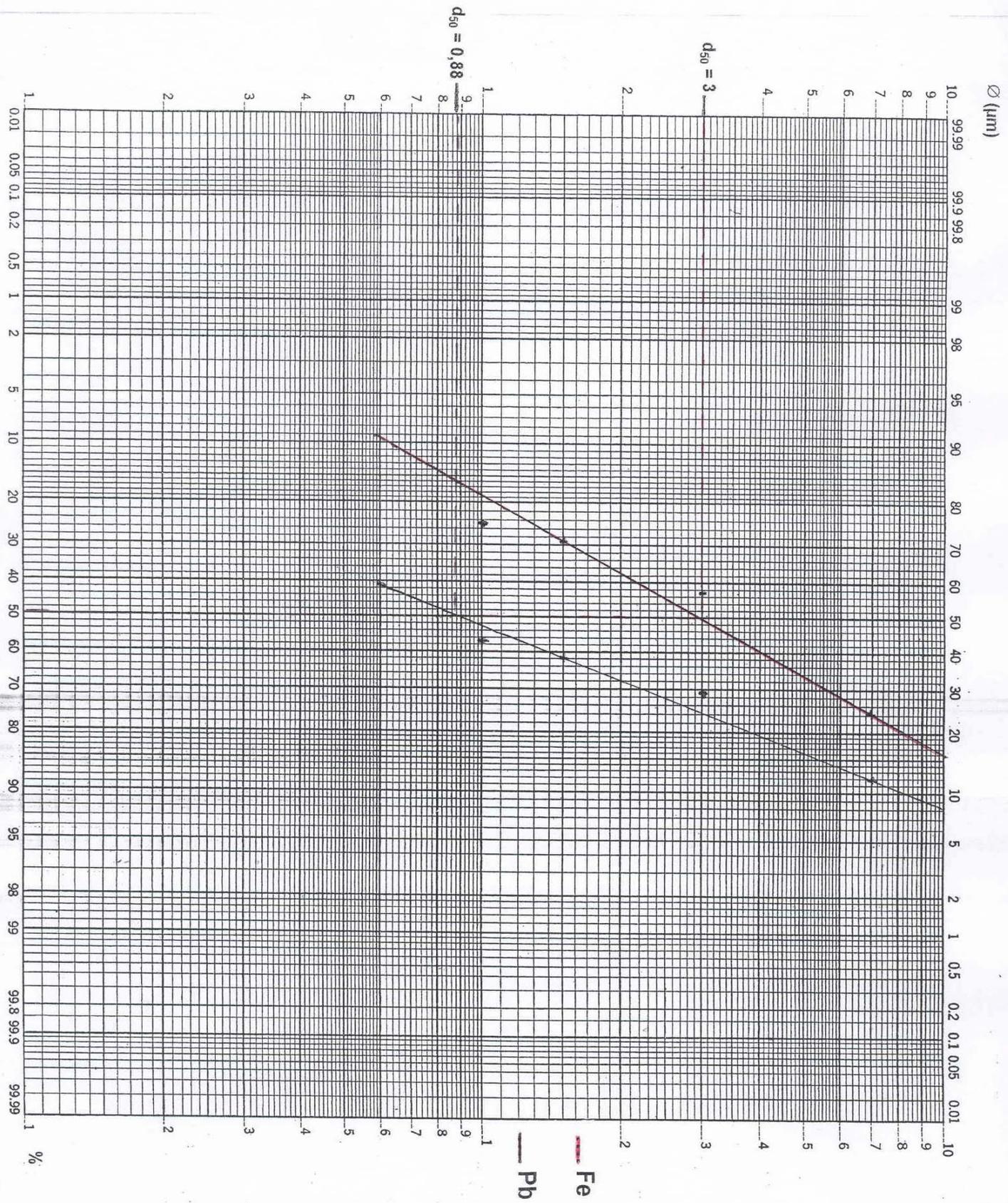


Figure N°VI.25 : Diagramme log-probabilité de la masse cumulée du Fe et du Pb en fonction du diamètre des particules collectées.

### b) Distribution modale du Fe et du Pb

Les différences dans les tailles des particules métalliques et les différences d'origine ou de sources peuvent être aussi visualisées par les courbes de distribution modale (voire paragraphe IV.1.3). En figure N°VI.26, nous illustrons pour le fer et le plomb les graphes ( $\Delta m / \Delta \ln d$ ) en fonction du diamètre des particules  $d_i$  (en  $\mu\text{m}$ ).  $\Delta m$  représente la masse du métal retenue sur un étage et  $\Delta \ln d$  est calculé selon  $\Delta \ln d = \ln d_{(\text{étage } i+1)} - \ln d_{(\text{étage } i)}$ .

Les courbes de distribution ainsi obtenues sont aussi bien pour le fer que pour le plomb de type monomodal. Les deux courbes montrent toutefois un certain décalage l'une par rapport à l'autre, en ce sens que celle du plomb est centrée autour de  $2 \mu\text{m}$  et celle du fer autour de  $4 \mu\text{m}$ . Le fer se caractérise ainsi par une granulométrie moins fine que celle du plomb. L'étude des autres métaux montre que le manganèse se comporte comme le fer. Des résultats similaires ont été par exemple obtenus dans la caractérisation des métaux lourds associés aux particules urbaines de Los Angeles [111].

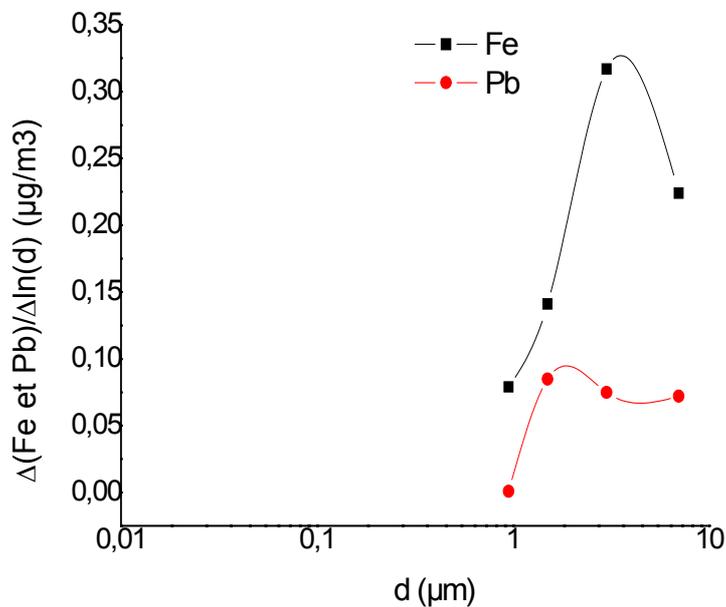


Figure N°VI.26 : Courbes de Distribution du Fer et du Plomb.

# **CONCLUSION**

## CONCLUSION

Cette étude a permis d'évaluer pour la première fois en Algérie les niveaux de pollution atteints par les différentes classes granulométriques des particules fines. Les résultats montrent qu'en site urbain de proximité, les teneurs atmosphériques en PM-10, PM-2,5 et PM-1, qui en moyenne annuelle s'élèvent respectivement à 75,2, 36,1 et 25,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , sont excessives et dépassent largement les normes en vigueur dans certains pays. Ces particules sont d'autant plus nocives que plus de 50% des PM-10 sont des particules respirables. L'exploitation des résultats montre que la courbe de distribution des PM-10 est bimodale et qu'il existe une corrélation linéaire entre les PM-1 et les PM-3.

L'étude des métaux lourds (Fe, Pb, Cu, Ni, Mn, Co et Cd) qui sont véhiculés par les différentes fractions granulométriques des particules étudiées montre que parmi ces métaux, le plomb est, après le fer, l'élément le plus abondant. Comparée à d'autres pays, ou une réglementation stricte a été appliquée, la pollution par le plomb reste élevée. La distribution granulométrique des métaux lourds montre que les composés de la croûte terrestre (Fe et Mn) se répartissent majoritairement sur la classe des particules grossières (entre 3 et 10 $\mu\text{m}$ ), les métaux lourds les plus toxiques, comme le Pb et le Cd, se retrouvent par contre le plus dans la fraction respirable (< 3 $\mu\text{m}$ ). Leur pouvoir toxique est ainsi plus accentué. Les courbes de distribution tracées à partir des résultats obtenus montrent clairement la différence entre les métaux lourds d'origine naturelle et ceux issues du trafic routier.

A la lumière de ces résultats, on peut affirmer que l'Algérie présente la particularité d'être un pays qui n'est pas fortement motorisé, mais qui présente une pollution particulière plus importante que dans les pays développés, où le trafic routier est bien plus intense.

L'ampleur de cette pollution résulte sans doute de la mauvaise combustion d'un parc automobile qui n'est pas fortement dieselisé, mais âgé, mal entretenu, dépourvu quasi totalement de pots catalytiques et roulant dans sa presque totalité à l'essence plombée.

Une certaine amélioration de la situation peut être atteinte par des actions telles que le rajeunissement du parc automobile, la généralisation du contrôle technique des véhicules, l'utilisation accrue de la bicarburation GPL/essence, voire le gaz naturel pour les flottes de bus, etc.

Une réduction de la pollution nécessite certainement aussi une étude plus approfondie sur les systèmes de transport, impliquant :

- une stratégie et mode de transport appropriés ;
- une fluidité du transport ;
- une mobilité du transport.

Une meilleure fluidité du trafic engendre une réduction des émissions.

De même, une meilleure utilisation des infrastructures existantes, la création de roades de contournement des centres villes et zones habitées contribuent à la diminution de l'exposition des populations à la pollution..

Une meilleure maîtrise du trafic passe également par davantage de complémentarité entre les modes de transports. On peut faciliter les transferts entre voiture individuelle et transport en commun par la création de parcs relais.

Il faut que l'état au côté d'urbanistes, d'architectes, d'économistes, de sociologues, et d'environnementalistes réfléchissent à une amélioration de la mobilité en sachant que le « tout automobile », comme le « tout transport en commun » possèdent leurs limites.

# **REFERENCES BIBIOPGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

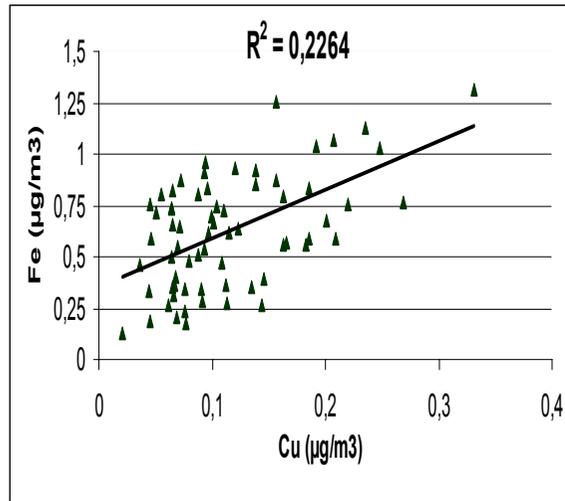
- 1 : Schroeder W.H. et al.: Toxic trace elements associated with airborne particulate matter, a review. JAPCA, Vol 37, N°11, 1987, pp. 1267 – 1285.
- 2 : Janssen N. A. H., D. F.M. Van Mansom, K. Van Der Jagd, H. Harsema and G. Hoek : Mass concentration and elemental composition of airborne particulate matter at street and background locations. Atm. Env., Vol. 31, N°8, 1997, pp. 1185-1193.
- 3 : Chiron M., P. Quenel et D. Zmirou : La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique. Poll. Atm., Janvier - Mars, 1997, pp 41-52.
- 4 : Dockery D.W., C.A. Pope, X. Xu, J.D. Spengler, M.E. Ware, B.G. Fay, Jr. Ferris and F.E. Speizer : An association between air pollution and mortality in six US cities. N. Eng. J. Med., N°329, 1993, pp. 1753 –1759.
- 5 : Pope C.A., M.J. Thun, M. Namboodira, D.W. Dockery, J.S. Evans, F.W. Speizer and Jr. C. W. Heath: Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults. Am. J. Respir. Crit. Care Med., Vol. 151, N°3, 1995, pp 669-674.
- 6 : Airparif, Surveillance de la qualité de l'air de l'Île de France, Les particules très fines, une pollution qui a pris du poids, Actualité n°1, Avril, 1998.
- 7 : Xavier Q., A. Alastueya, S. Rodriguez et al : PM10 and PM2.5 source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain, Atm. Env., Vol 35, 2001, pp. 6407–6419.
- 8 : Kerbachi R., M. Boughedaoui, N. Koutai et T. Lakki : La pollution par les oxydes d'azote et l'ozone dans la ville d'Alger. Poll. Atm., Avril - Juin, 1998, pp 89-101.
- 9 : Kerbachi R., M. Boughedaoui, L. Bounoua et M. Keddou : Ambient air pollution by aromatic hydrocarbons in Algiers, Atm. Env., N°40, 2006, pp.3995-4003.
- 10 : Boughedaoui M., R. Kerbachi et R. Joumard : Mesure de la pollution plombifère dans l'air ambiant d'Alger, Poll. Atm., N°121, 2004, pp.105-111.
- 11 : Kerbachi R., M. Boughedaoui, Y. Kerchich et R. Joumard : Evaluation de la pollution de l'air par les PM-10 à Alger. Int. Symp, Transport and Air Pollution, Avignon, France, 5-2 Juin, 2000.
- 12 : Herrebaut L. et J. Beguin : Mesure des pollutions particulaire et gazeuse, Mesure – Analyse - Contrôle, Nuisance et Environnement, France, Mai 1976, pp. 24-26.
- 13 : Ontario : Particules en suspension, Qualité de l'air, Ministère de l'Environnement et de l'Energie, Canada, Mai 2000.
- 14 : Magdelaine C. : Les PM10 : Des particules de diamètre > 2,5 microns, Les particules atmosphériques, 2001-2002. [webmaster@notre-planete.info](mailto:webmaster@notre-planete.info)
- 15 : Detrie J.P. : La pollution atmosphérique, Edition Dunod, Paris, 1969.
- 16 : Renoux A. : Ce qu'il faut savoir sur l'aérosol atmosphérique, Poll. Atm., Janvier – Mars, 1990, pp. 10-16.
- 17 : Stern A. C. and Boubel R. W.: Fundamentals of air pollution, Academic Press, 2<sup>ème</sup> édition, London, 1984.
- 18 : Mohamedou B. et J. Colosio : Qualité de l'air : une surveillance accrue des particules, mais des concentrations à réduire d'ici l'an 2005, Les données de l'environnement, IFEN, N°58, France, Septembre 2000.
- 19 : Martin J et L.Y. Masteyer : Santé et pollution de l'air, Presses Polytechniques, Vol. 145, Romandes, Suisse, 1988, pp. 46-59.
- 20 : Barnea M., P. Ursu : Pollution de l'atmosphère et protection d'écologie, Edition Eyrolles, Paris, 1974.
- 21 : Kerbachi R. : Cours de pollution atmosphérique 5<sup>ème</sup> année, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2005.
- 22 : Dang C., T. P. Fontelle et R. Leygonie : Les émissions de poussières et généralités sur leur mesure à l'émission. Poll. Atm., Janvier-Mars, 1990, pp. 38-46.
- 23 : Brumer P. H : Approche globale des problèmes d'environnement liés à l'incinération d'ordures ménagères. Poll. Atm., Juillet-Septembre, 1988, pp. 301-308.
- 24 : Magdelaine C. : Les particules inférieurs à 2,5 microns (PM2,5), Les particules atmosphériques, 2001-2002. [webmaster@notre-planete.info](mailto:webmaster@notre-planete.info)

- 25 : Leygonie R. : Les métaux lourds dans l'air : source, émission, mesures et effets, Poll. Atm., Juillet-Septembre, 1993, pp. 63-74.
- 26 : National Center for Environmental Assessment : Information about particulate, Particule matter, Environmental Protection Agency, U. S., 2003. [www.epa.org](http://www.epa.org)
- 27 : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie : La qualité de l'air en France en 1995-1996, Editions ADEME, Paris, 1998.
- 28 : kleeman M. J., J. P. Schauer et G. R. CASS: Size and composition distribution of fine particulate matter emitted from motor vehicles. Env. Sc. Tech, Vol 34, N°7, 2000.
- 29 : Dore C.J., J.W.L. Goodwin, J.D. Watterson, T.P. Murrels, N.R. Passant, M.M. Hobson, K.E. Haigh, S.L. Baggot, S.T. Pye, P.J. Coleman, and K. R. King : UK émission of air pollutants 1970 to 2001, Report [www.naei.org.uk/reports.php](http://www.naei.org.uk/reports.php), 2003.
- 30 : Degobert P. : Origine et réduction des émissions au niveau moteur, Pollution Atmosphérique, Technique de l'Ingénieur, B2710, France, 1994, pp. 1-15.
- 31 : Chiron M., P. Quenel et D. Zmivan : Pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique, Poll. Atm., Janvier – Mars, 1997, pp. 41-52.
- 32 : CITEPA : L'émission annuelle des PM-10 due au trafic routier en France en 2000, France, Décembre 2001. [www.citepa.org](http://www.citepa.org).
- 33 : CITEPA : Emissions dans l'air en France métropolitaine – particules en suspension, Paris, France, Avril 2004. [www.citepa.org](http://www.citepa.org).
- 34 : Ramade F. : Elément d'écologie, Action de l'homme sur la biosphère, MC Graw Hill, Paris, 1982.
- 35 : Ikawa. K. O.: Trace analysis atmospheric, John Wiley et Sons, London, 1997.
- 36 : Detrie J. P. : La pollution atmosphérique, Edition Dunod, Paris, 1990.
- 37 : Zannetti P.: Air pollution modelling theories, computational methods and available software, computational mechanics publication, 1990.
- 38 : Arthur C., Stern: Air pollution, Air pollutants, Their transformation and transport, Academic Press, Newyork, 1976.
- 39 : Hinds W. C.: Aerosol technology, Wiley Interscience, London, 1982.
- 40 : Masplet P. et I. Cachier: L'aérosol atmosphérique, Analysis Magazine, Vol. 26, N°09, 1998, pp. 11-17.
- 41 : Colls J. : Air pollution, An introduction, Eddition E et FN SPON, London, 1997.
- 42 : Ronneau J.C. : Les particules atmosphériques, Conférences données à l'Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 1992.
- 43 : Bitouche A. : Etude de la pollution de l'air à Alger par les particules fines (PM-10, PM-2,5 et PM-1) et évaluation de l'aérosol acide, Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique, 2002.
- 44 : Renoux A. et D. Borlaud : les aérosols « physique et méthodologie », Techniques et documentation, Paris, 1998.
- 45 : Achtiouane H. : Etude des particules en suspension en milieu urbain, Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 1996.
- 46 : Hamidi I : Etude de la pollution de l'air par les particules fines, les PM-10 à Alger, Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 1999.
- 47 : Badj S. : Evaluation de la pollution atmosphérique par les particules fines en site urbain à Alger, Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique, 2005.
- 48 : Colosio J. : Définition et explication des phénomènes lies à la pollution atmosphérique, 2002. [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- 49 : ORAMIP : Air et polluants : la météo, Toulouse, France, 2004. [www.oramip.org](http://www.oramip.org)
- 50 : Politique publique, pollution atmosphérique et santé : poursuivre la réduction des risque, Juin 2000.
- 51 : Lazaridis M., M. D. Broday, Q. Hov, and P. G. Georgopoulos : Deposition of inhaled particles in the human respiratory tract, Env. Sc. Tech, Vol. 35, N°3727-3734, 2001.
- 52 : Brochard D. et al. : Aérosol et santé « Déposition et épuration des particules inhalées », Poll. Atm., Avril - Juin, 1999, pp. 178-182.
- 53 : Strunski V. et B. Benabes : Pathologie respiratoire liée à la pollution externe, Centre Hospitalier d'Amiens, Revue OPA Pratique, N°123, France, Février 1999.
- 54 : Bignon J. : Cibles cellulaires et réponses pathologiques aux aérosols inhalés, Poll. Atm., Avril - Juin, 1999, pp. 132-135.
- 55 : Klassen et al : Casarett and doll's toxicology, The basic science of poisons, 3<sup>ème</sup> Édition, 1986, pp. 343.

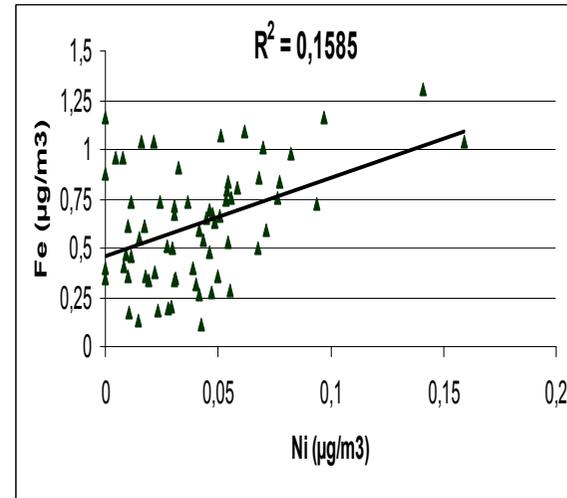
- 56 : OMS : Update and revision of air quality guidelines for Europe, WHO Regional Publications, European, Serien, Copenhagen, 1997.
- 57 : Ackermann Liebrich U.: Effects of long term exposure to air pollution on lung function, SAPALDIA-Study, Am. J. Resp. Crit. Care Med., 149/4, A662, 1994.
- 58 : Zemp E. and al : Long term ambient air pollution and chronic respiratory symptoms, Sapaldia Study, Atm. J. Resp. Crit. Care Med, 149/4, A 662, 1994.
- 59 : Braun C., Fahriand and al: Respiratory symptoms and exposure to long term air pollution and climate in Swiss schoolchildren, Atm. J. Resp. Crit. Care Med, 1996.
- 60 : Doker D. W. Y and al : Effects of inhaled particles on respiratory head of children, Am. Rev. Resp. Dis, 138, 1989, pp. 587-594.
- 61 : Environnement Canada, Les particules de l'air ambiant « vue d'ensemble », Québec, Février, 1998.
- 62 : Fiala J. : Qualité de l'air en milieu urbain, Naturopa, N°94, 2000, pp. 10.
- 63 : Elichegaray C. : Aérosols et visibilité, Aérosols et climat, Poll. Atm, Janvier-Mars, 1990, pp. 7-9.
- 64 : ORAMIP : Air et polluants : Les polluants, Toulouse, France, 2004. [www.oramip.org](http://www.oramip.org)
- 65 : Robert R. Lauwerys : Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles, Edition Masson, 3<sup>ème</sup> Edition, Paris, Milan, Barcelone, Bonn, 1992.
- 66 : MIQUEL G. : Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé, Office Parlementaire d'Évaluation des choix scientifiques et technologiques, France, Avril 2001.
- 67 : Association Transport et Environnement : Politique des transports, Suisse, 2005-2006. [www.ate.org](http://www.ate.org).
- 68 : Boutonnet F. : Etude des métaux lourds dans l'air ambiant en région centre, 2003-2004.
- 69 : Mathé F., J.L. Houdret, J.C. Galloo et R. Guillermo : La mesure des particules en suspension dans l'air ambiant : Applications dans les réseaux français de surveillance de la qualité de l'air, EDP Sciences, Wiley-VCH, Analisis Magazine, V°26, N°9, France, 1998.
- 70 : AFNOR : Détermination d'un indice de fumées noires, Norme NF X 43-057, Paris, 1977.
- 71 : AFNOR : Prélèvement sur filtre des matières particulaires en suspension dans l'air ambiant – Appareillage automatique séquentiel, Norme AFNOR X43-021, Paris, Décembre 1984.
- 72 : Ralph M. O., C. F. Barrett and S. L. Upton : Further wind tunnel measurements of the inlet efficiency of the Environnement SA type PPA60 suspended particle sampler, Warren Spring Laboratory Laboratory Report, Department of industry, Stevenage (UK), 1983.
- 73 : Mc Farland A. R. and C. A. Ortiz : Characterization of Sierra-Andersen PM-10 inlet Air Quality Laboratory Report, Civil Engineering Department Texas University, College Station USA, 1983.
- 74 : Hatem N. : Contribution à l'étude par classe granulométrique des aérosols particulaires et des métaux lourds qui leurs sont associés à Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2003.
- 75 : Mathé F. and S. Sauvage : Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (L.C.S.Q.A.) – École des Mines de Douai, Rapport final d'activités, Convention Ministère de l'Environnement, N°17/96, Novembre 1997.
- 76 : CEN : Field test procedure to demonstrate reference equivalence of sampling methods for the PM-10 fraction of suspended particulate matter, Norme européenne EN 12341, Bruxelles, 1997.
- 77 : AFNOR : Mesure de la concentration des matières particulaires en suspension dans l'air ambiant – Méthode par absorption de rayons bêta, Norme NF X 43-017, Paris, Juillet 1984.
- 78 : Wadge A. and M. Hutton: The cadmium and lead content of suspended particulate matter from a UK refuse incinerator, Sci. Tot. Env., Vol. 67, 1987, pp. 91-95.
- 79 : Ramade F. : Eléments d'écologie, Action de l'homme sur la biosphère, MC Graw Hill, Paris, 1982.
- 80 : ADEM : Classification et critères d'implantation des stations de surveillance de la qualité de l'air, ADEME Edition, Paris, 2002.
- 81 : Kerchiche Y. : Etude de la pollution de l'air par les particules fines (les PM-10) et les métaux lourds qui leurs sont associés à Alger, Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2003.
- 82 : Boumechhour F. : Contribution à l'étude de la pollution de l'air par les acides véhiculés par les particules inhalables et respirables à Alger, Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2004.
- 83 : Norme ISO 9855 : Air ambiant, dosage du plomb dans les particules d'aérosols collectées sur les filtres, France, 1993.
- 84 : Office National Météorologique de Dar El Beida : Rapport interne, Alger, 2004.
- 85 : Techniques de l'Ingénieur, Traité d'analyse chimique « caractérisation, spectrométrie d'émission des rayons X et fluorescence X ».

- 86 :** Zhuyun Xu., M. Gautam and S. Mehta, Cumulative frequency fit for particle size distribution, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, Vol. 17, N°8, 202, pp. 538-542.
- 87 :** Butler J. D.: *Air pollution chemistry*, Academic Press, London, 1979.
- 88 :** Linda Y. and M. Hooper: Size-resolved airborne particles and their morphology in central Jakarta, *Atm. Env.*, Vol. 31, 1997, pp. 1167–1172.
- 89 :** Tuomo A., P. Risto, E. Hillamo and P. Keronen : Sources and physico-chemical characteristics of the atmospheric aerosol in southern Norway, *Atm. Env.*, Vol. 30, 1996, pp. 1391–1405.
- 90 :** OMS: *Air quality guidelines for particulate matters, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*, Global Update, Genève, 2005.
- 91 :** Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire, Décret exécutif N°06-02 du 7 Janvier 2006 définissant les valeurs limites, qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique, J. O., N°1, 2006.
- 92 :** Schroder. W., M. Dobson, D.M. Kane et N. D. Johnson : Toxic trace elements associated with airborne particulate matter, *A. Review. J. Air Poll. Control Ass*, Jacarta, 1987, pp. 1267.
- 93 :** Shaw. W. : La pollution par les particules atmosphériques, *Pour la Science*, Octobre, 1987, pp. 22-31.
- 94 :** Madelain. G. : *Métrologie des aérosols*, *Poll. Atm.*, Janvier -Septembre, pp. 270-274.
- 95 :** Kerbachi R., M. Boughedaoui et R. Jourmard : Etude des PM-10 dans l'agglomération d'Alger, 9<sup>th</sup> Colloque International Transport and Air Pollution, 5-7 juin 2000, Avignon, France.
- 96 :** Houthuijsa D., O. Breugelmansa and G. Hoekb : PM10 and PM2.5 concentrations in Central and Eastern Europe "results from the Cesar study", *Atm. Env.*, Vol 35, 2001, pp. 2757–2771.
- 97 :** Vega. E., I. Garcia et al: Application of a chemical mass balance receptor model to respirable particulate matter in Mexico –Cities, *J. A. W. M. A*, Vol.47, 1997, pp.524-529.
- 98 :** Gerther A. W., M. Abu-Allaban and D. H. Lowenthal : The mobile source contribution to observed PM-10, PM-2,5 and VOCs in the greater Cairo area, 2<sup>nd</sup> Conf. Environment an transport, Proceedings N°107, Vol.1, Inrets Ed., France, 12-14 juin 2006, pp. 263-269.
- 99 :** Rapport du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement Bilan chiffré de la qualité de l'air dans les grandes agglomérations, Paris, France, 2000.
- 100 :** Association de Surveillance de la Qualité de l'Air (ASQ), France, 2000.
- 101 :** Gehrig R., Ch. Huglin et P. Hofer : Contributions of Road Traffic to Ambient PM-10 and PM-2,5 Concentrations, 1<sup>er</sup> Swiss Transport Research Conference, Monte Verila/Ascona, March 1-3, 2001.
- 102 :** Jansen N. A. H, D. F. M. Van Mansom, K. Van Der Jagd, H. Harsema and G. Hoek : Mass concentration and elemental composition of airborne particulate matter at street and background locations, *Atm. Env.*, Vol. 31, N°8, 1997, pp. 1185-1193.
- 103 :** Charron A. and R. M. Harisson, 2<sup>nd</sup> Conf. Environment an transport, Proceedings N°107, Vol.1, Inrets Ed., France, 12-14 juin 2006, pp. 255-262.
- 104 :** ICP, EHAZ 94 05/PBOL, Regional office of Europe, Word Heath Organisation, Copen-Hagen, 1995.
- 105 :** Cheng L. et al: Characteristics of inhalable particulate matter in Alberta cities, *Atm. Env.*, Vol. 32, 1998, pp. 3835-3844.
- 106 :** Christopher Y., C. Kelvin and K. Wong: Residential indoor PM10 and PM2.5 in Hong Kong and the elemental composition, *Atm. Env.*, Vol 36, 2002, pp. 265–277.
- 107 :** Réseau de Surveillance de la qualité de l'air d'Alger SAMASAFIA, Rapport annuel sur la qualité de l'air, MATE, Alger, 2003.
- 108 :** Oucher N. et R. Kerbachi : Etude de la pollution de l'air par les particules fines et les métaux lourds qui leurs sont associés à Alger, 1<sup>er</sup> Séminaire International sur l'Environnement et ses Problèmes Connexes (SIEPC'2005), Bejaia, 5-7 Juin, 2005.
- 109 :** Kerbachi R., M. Boughedaoui, F. Boumechhour et N. Oucher : Etude de la pollution de l'air par les particules fines (PM-10, PM-2,5 et PM-1) et évaluation de l'aérosol acide à Alger, 12<sup>th</sup> Colloque Internationale Transport and Air Pollution, Proceedings INRETS, Vol. 2, N°92, Avignon, France, 15-17 juin, 2003, pp.93-98.
- 110 :** WHO: Updating and revision of the air quality guidelines for Europe, Classical air pollutants EUR/ICP "EHAZ 94 05/PB01", Regional office for Europe, World Health Organisation, Copenhagen, 1995.
- 111 :** J. M. Lyons, C. Venkataraman, H. Hafner Main et S. K. Friedlanger: Size Distributions of trace metals in the Los Angeles atmosphere, *Atm. Env.*, Vol.27B, N°2, 1993, pp.237-249.

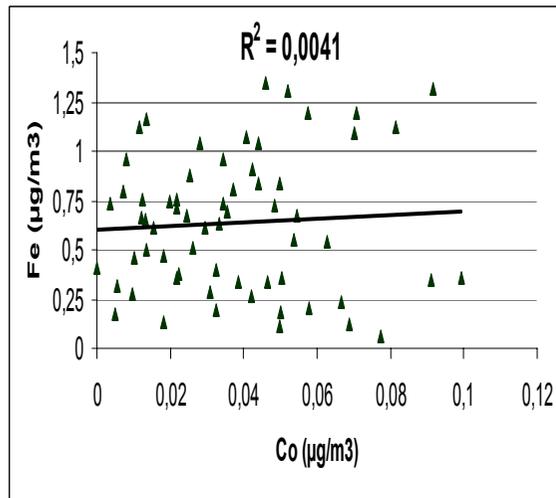
# **ANNEXE**



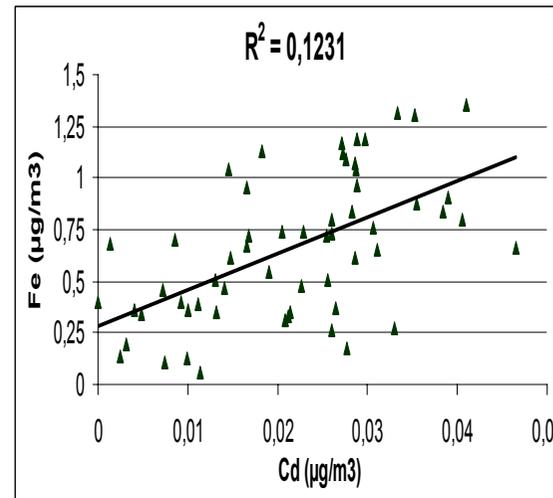
Corrélation entre le **Fe** et le **Cu**



Corrélation entre le **Fe** et le **Ni**

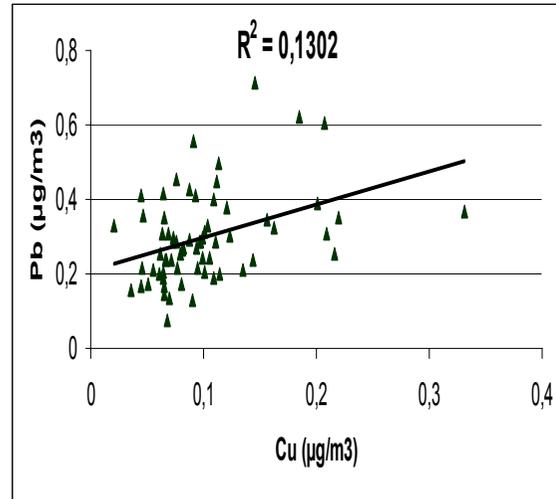


Corrélation entre le **Fe** et le **Co**

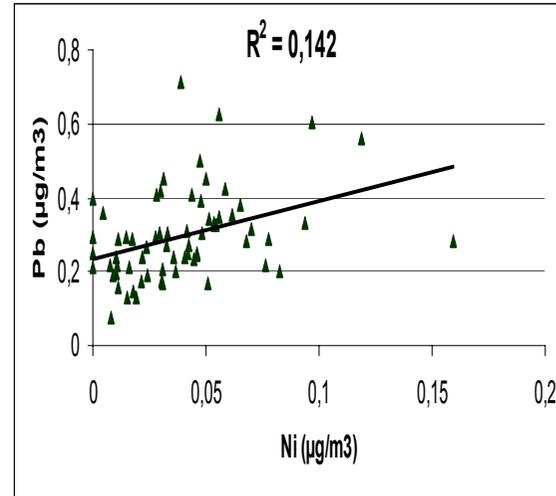


Corrélation entre le **Fe** et le **Cd**

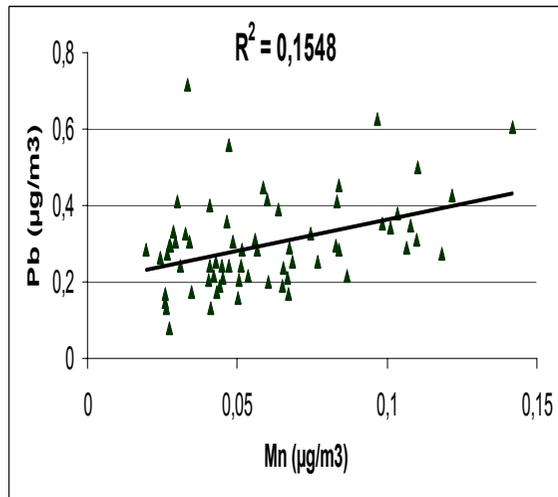
Figures N°VI.22 Bis-a : Corrélation des métaux lourds dans les PM-10.



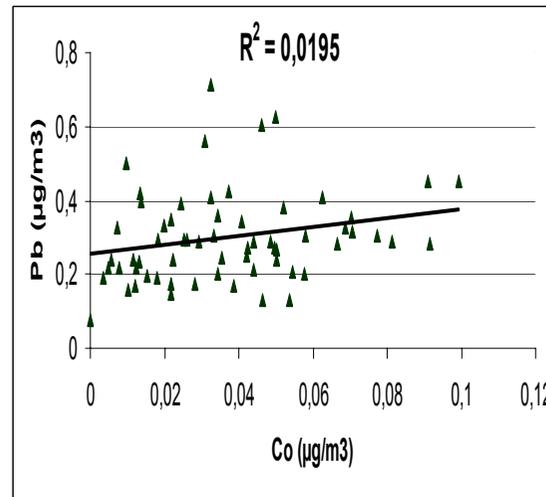
Corrélation entre le **Pb** et le **Cu**



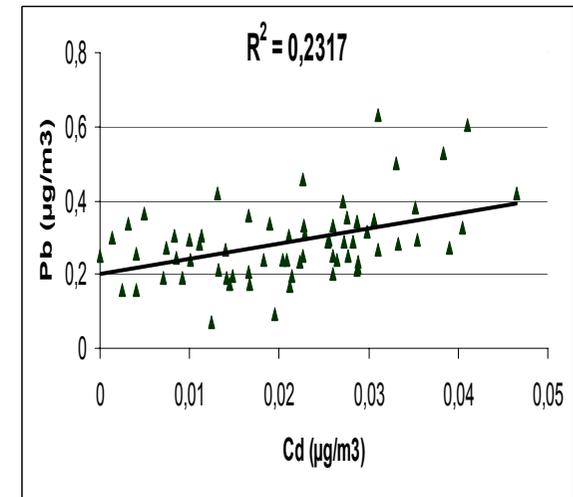
Corrélation entre le **Pb** et le **Ni**



Corrélation entre le **Pb** et le **Mn**

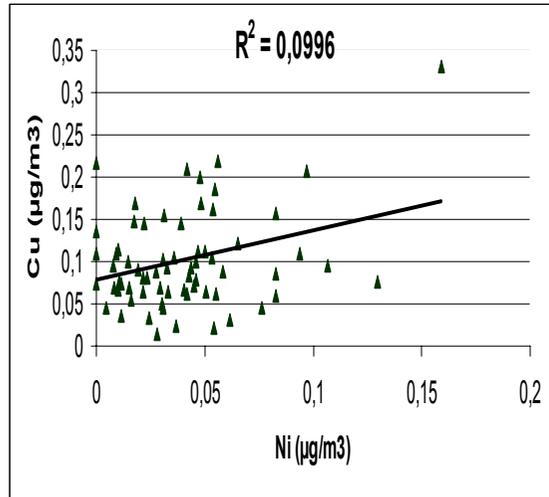


Corrélation entre le **Pb** et le **Co**

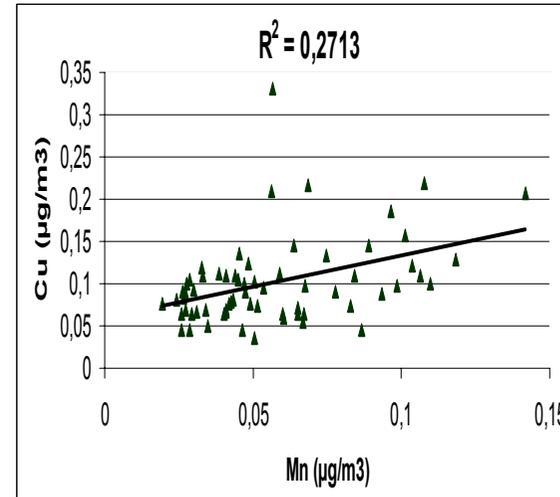


Corrélation entre le **Pb** et le **Cd**

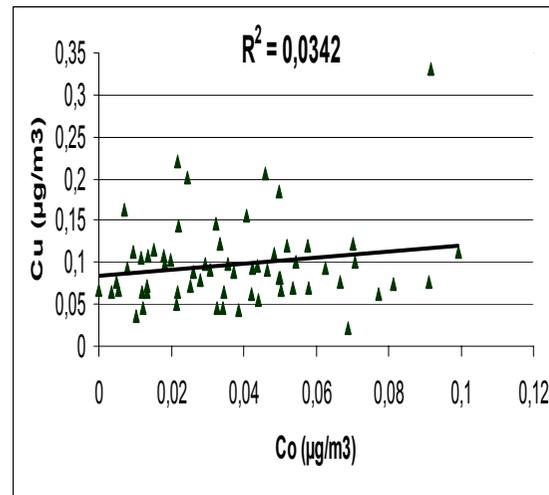
Figures N°VI.22 Bis-b : Corrélation des métaux lourds dans les PM-10.



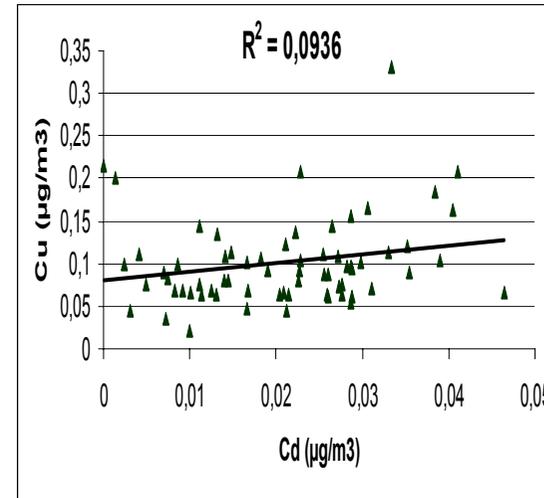
Corrélation entre le **Cu** et le **Ni**



Corrélation entre le **Cu** et le **Mn**

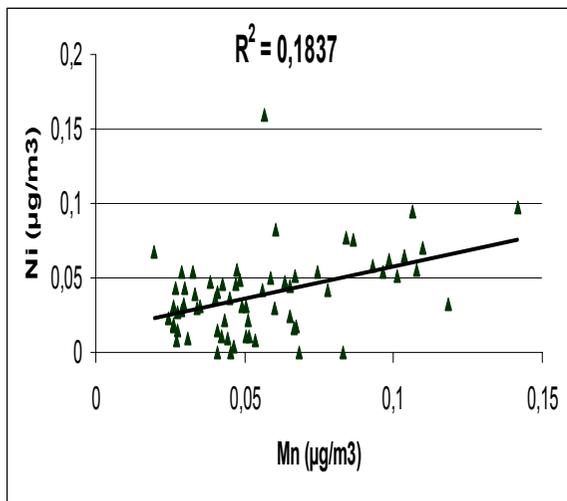


Corrélation entre le **Cu** et le **Co**

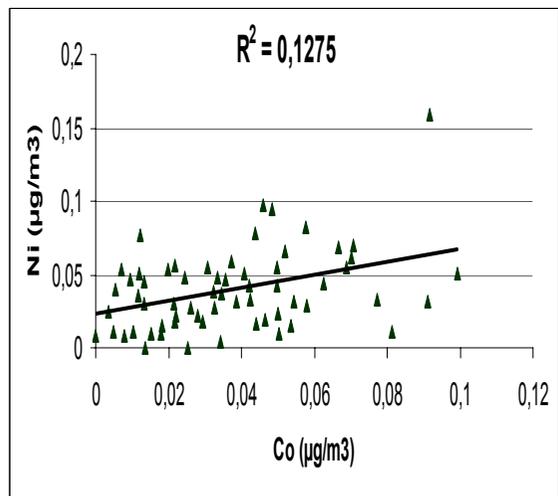


Corrélation entre le **Cu** et le **Cd**

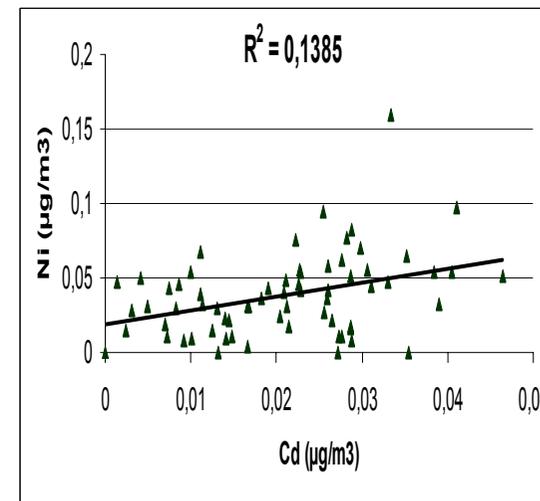
Figures N°VI.22 Bis-c : Corrélation des métaux lourds dans les PM-10.



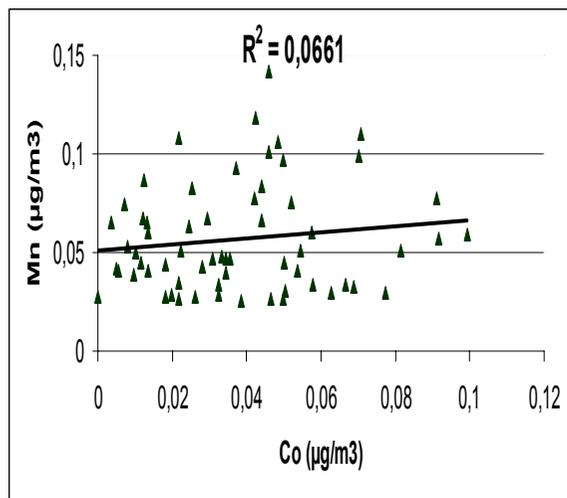
Corrélation entre le **Ni** et le **Mn**



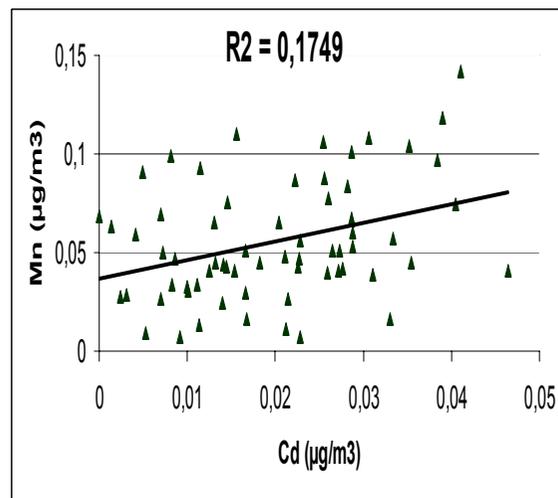
Corrélation entre le **Ni** et le **Co**



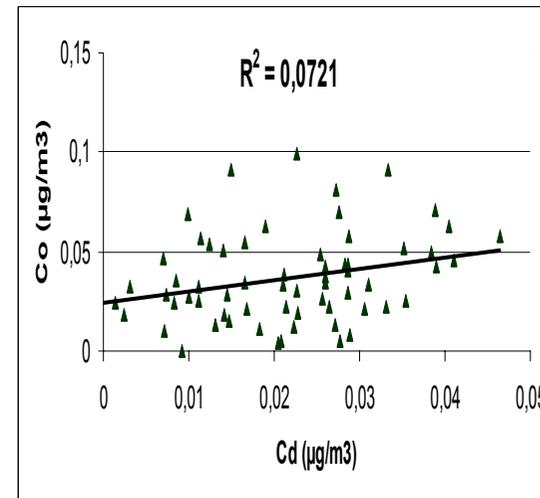
Corrélation entre le **Ni** et le **Cd**



Corrélation entre le **Mn** et le **Co**

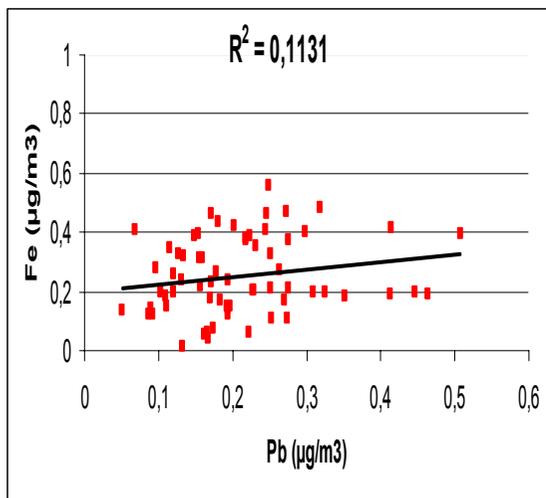


Corrélation entre le **Mn** et le **Cd**

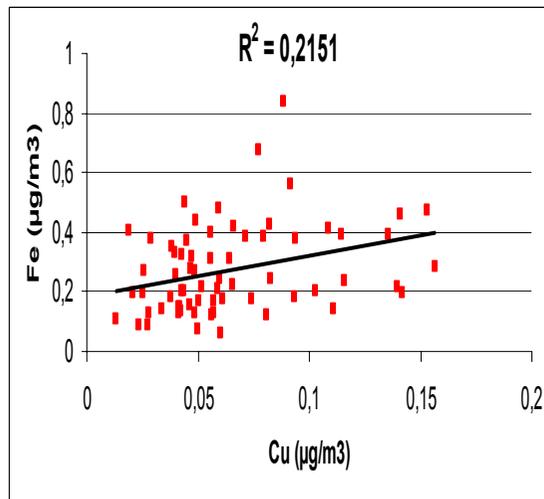


Corrélation entre le **Co** et le **Cd**

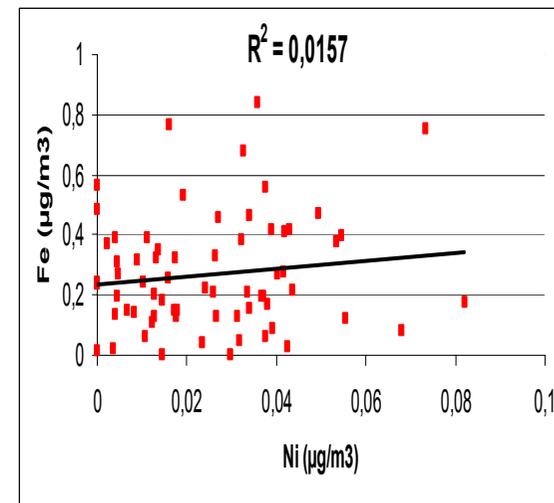
Figures N°VI.22 Bis-d : Corrélation des métaux lourds dans les PM-10.



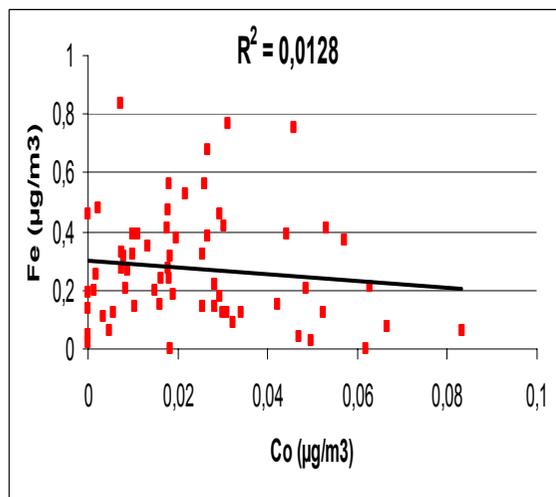
Corrélation entre le **Fe** et le **Pb**



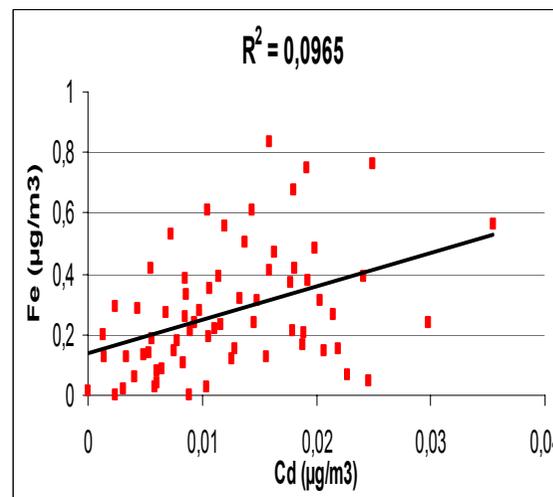
Corrélation entre le **Fe** et le **Cu**



Corrélation entre le **Fe** et le **Ni**

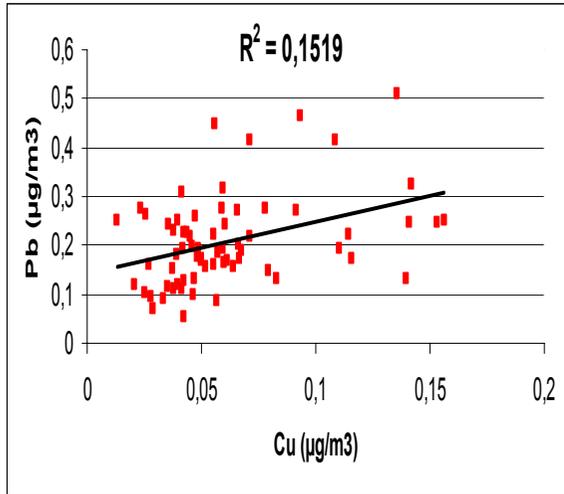


Corrélation entre le **Fe** et le **Co**

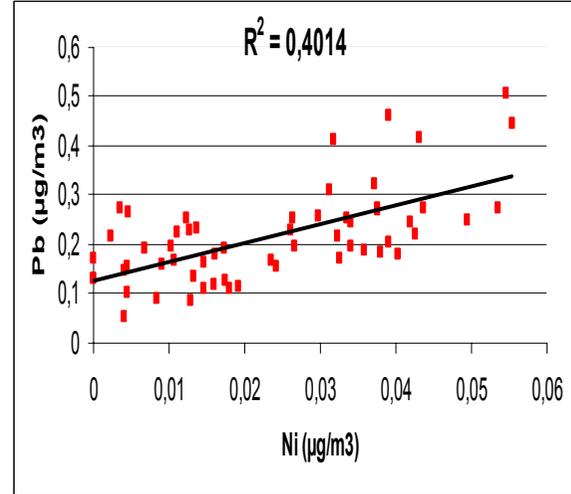


Corrélation entre le **Fe** et le **Cd**

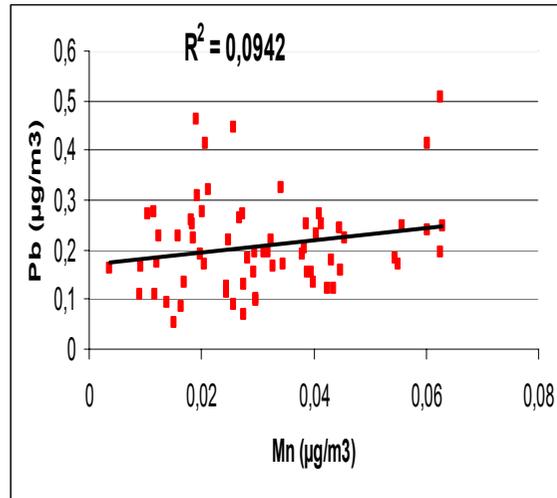
**Figures N°VI.23 Bis-a** : Corrélation des métaux lourds dans les PM-3.



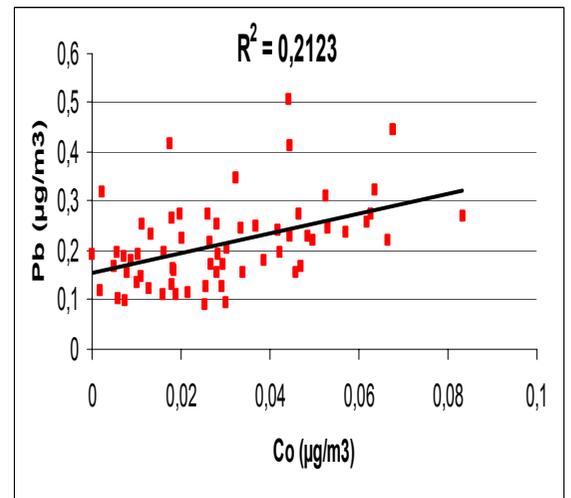
Corrélation entre le **Pb** et le **Cu**



Corrélation entre le **Pb** et le **Ni**

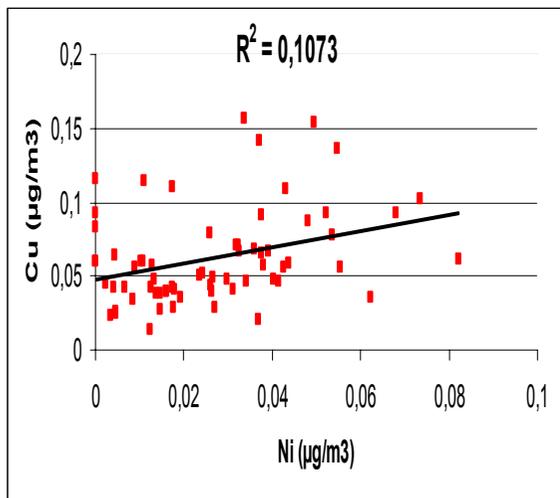


Corrélation entre le **Pb** et le **Mn**

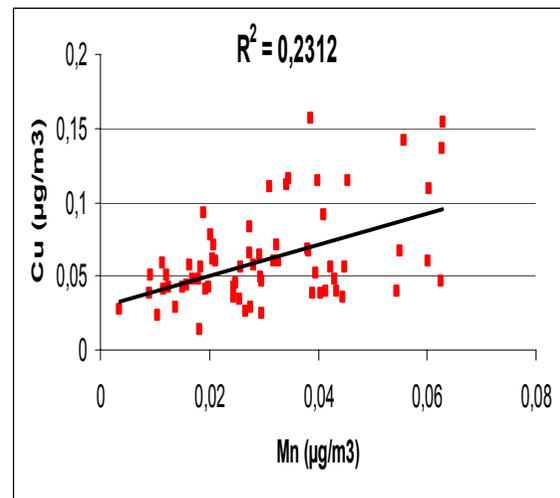


Corrélation entre le **Pb** et le **Co**

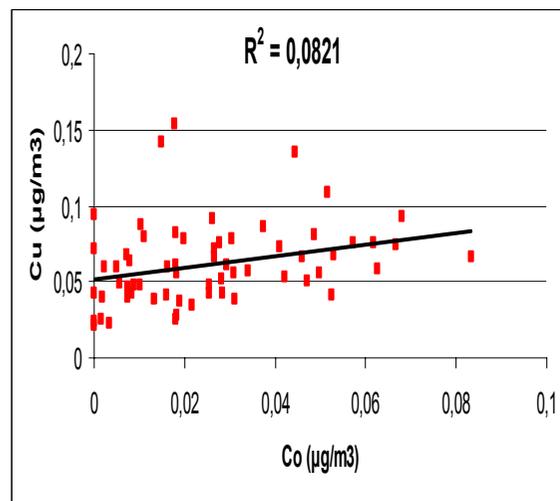
**Figures N°VI.23 Bis-b** : Corrélation des métaux lourds dans les PM-3.



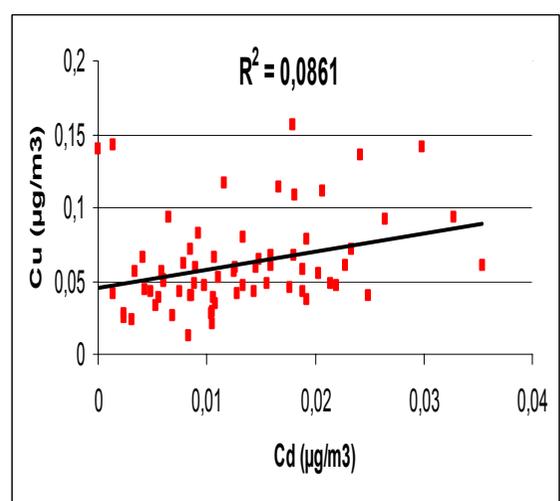
Corrélation entre le **Cu** et le **Ni**



Corrélation entre le **Cu** et le **Mn**

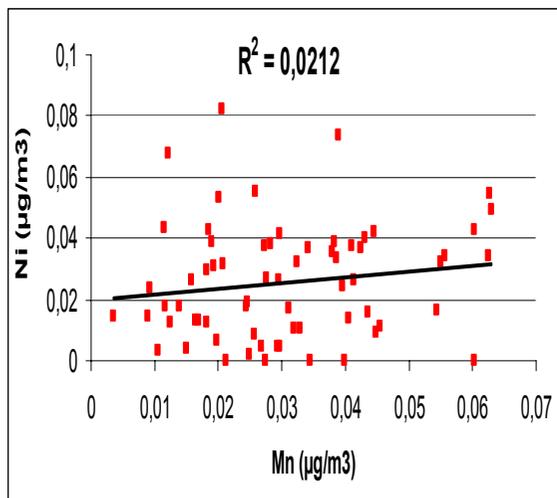


Corrélation entre le **Cu** et le **Co**

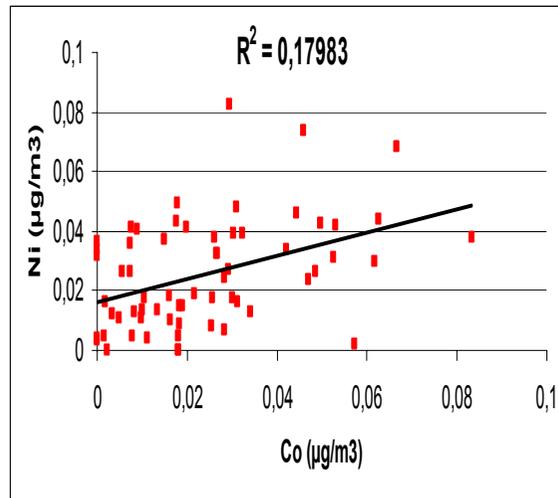


Corrélation entre le **Cu** et le **Cd**

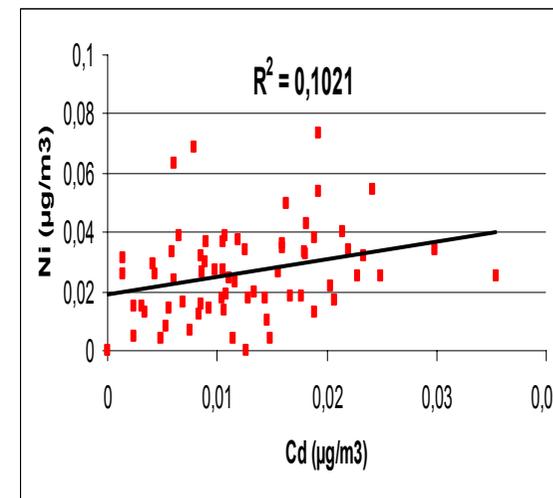
**Figures N°VI.23 Bis-c** : Corrélation des métaux lourds dans les PM-3.



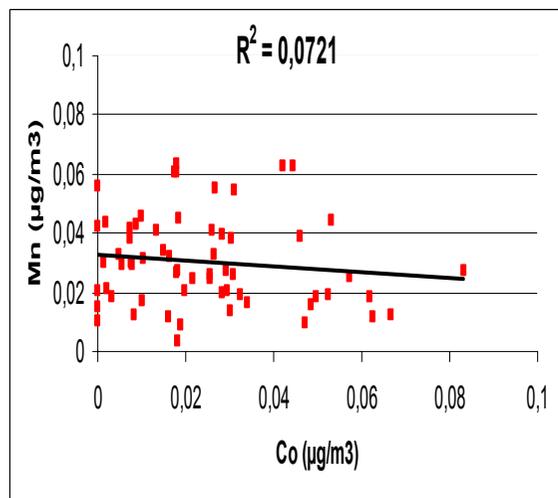
Corrélation entre le **Ni** et le **Mn**



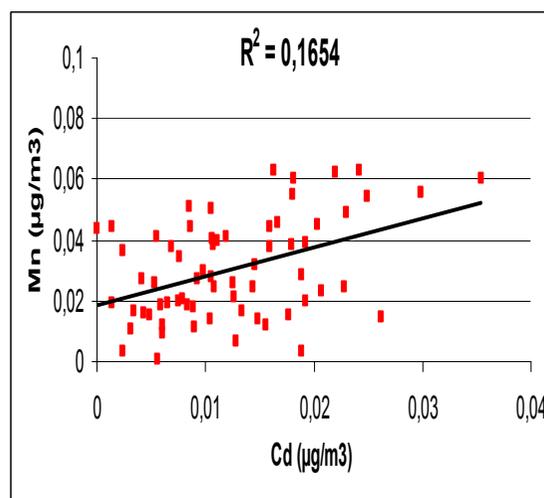
Corrélation entre le **Ni** et le **Co**



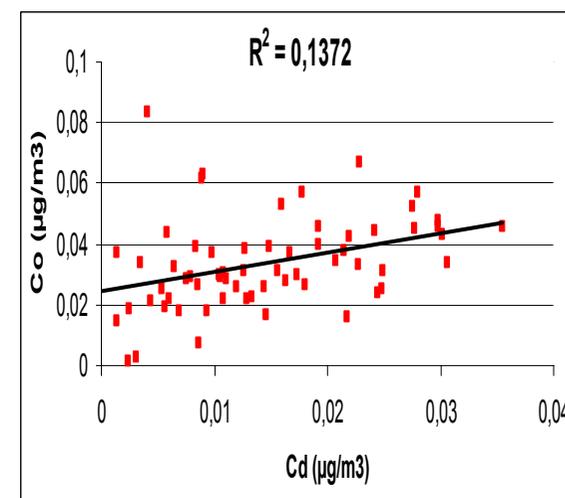
Corrélation entre le **Ni** et le **Cd**



Corrélation entre le **Mn** et le **Co**

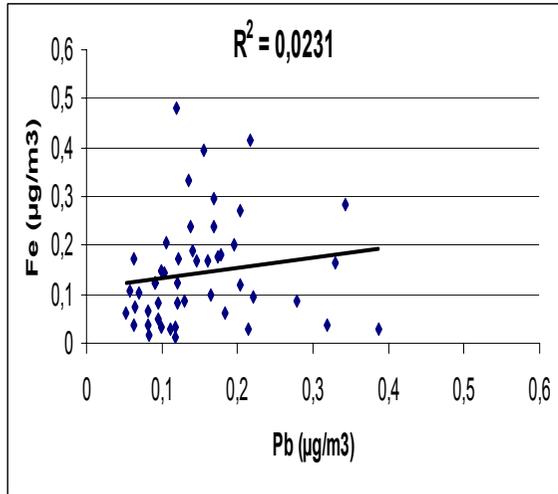


Corrélation entre le **Mn** et le **Cd**

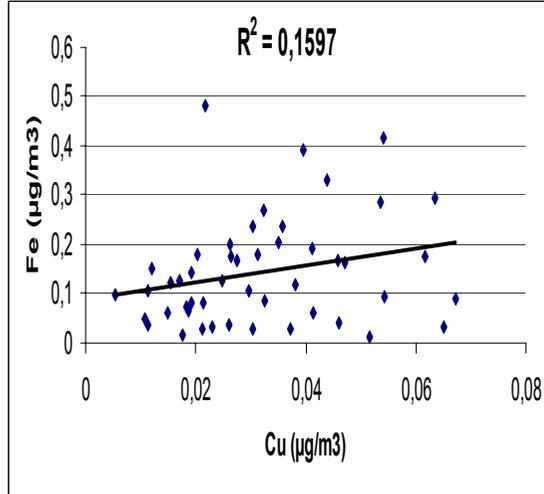


Corrélation entre le **Co** et le **Cd**

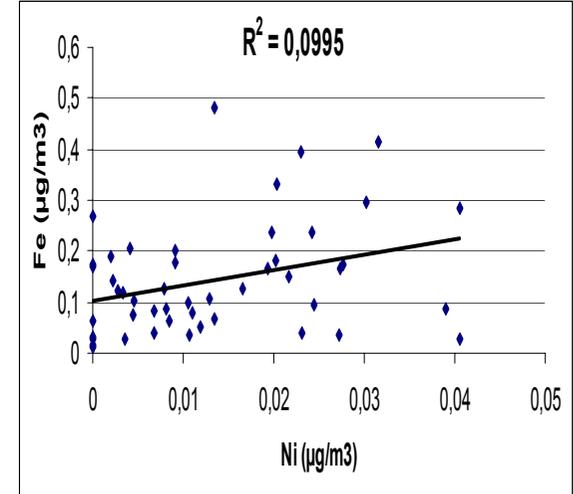
Figures N°VI.23 Bis-d : Corrélation des métaux lourds dans les PM-3.



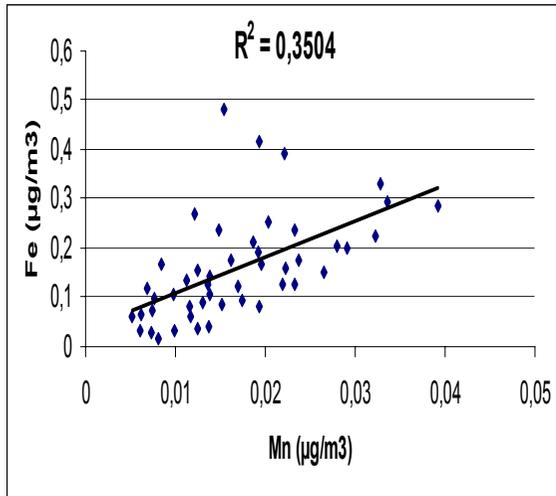
Corrélation entre le **Fe** et le **Pb**



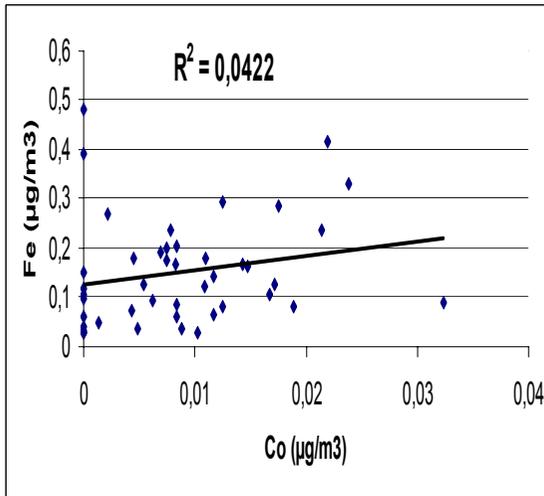
Corrélation entre le **Fe** et le **Cu**



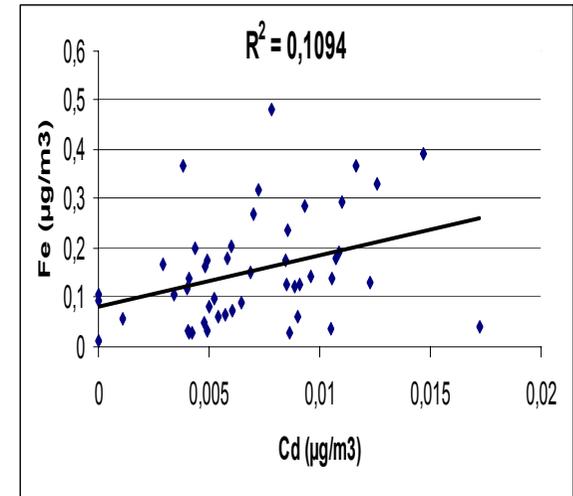
Corrélation entre le **Fe** et le **Ni**



Corrélation entre le **Fe** et le **Mn**

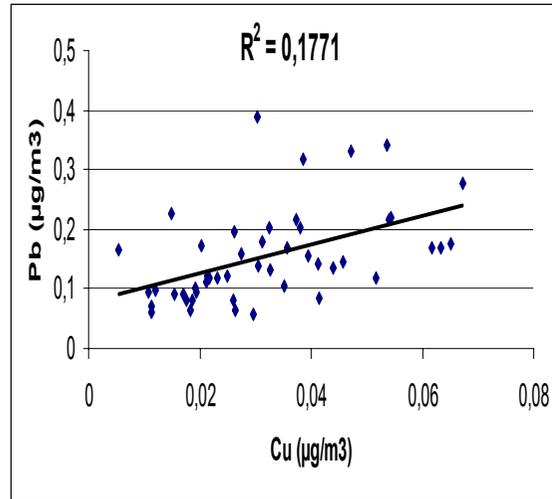


Corrélation entre le **Fe** et le **Co**

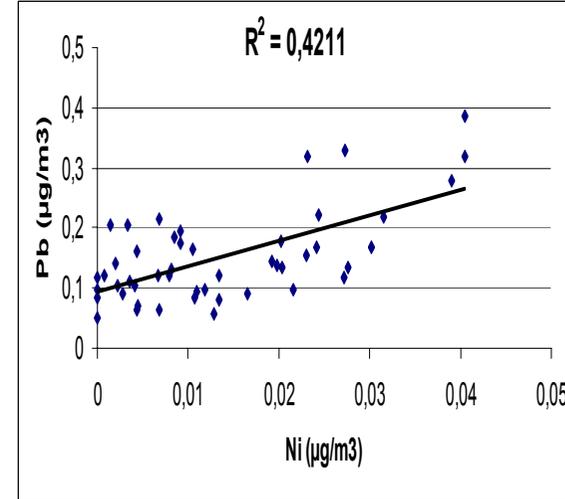


Corrélation entre le **Fe** et le **Cd**

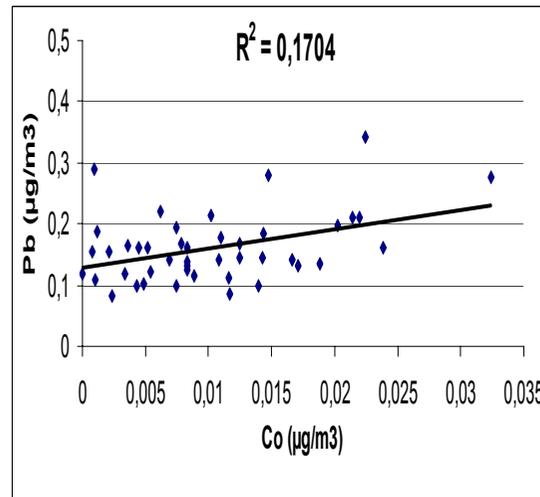
Figures N°VI.24 Bis-a : Corrélation des métaux lourds dans les PM-1.



Corrélation entre le **Pb** et le **Cu**

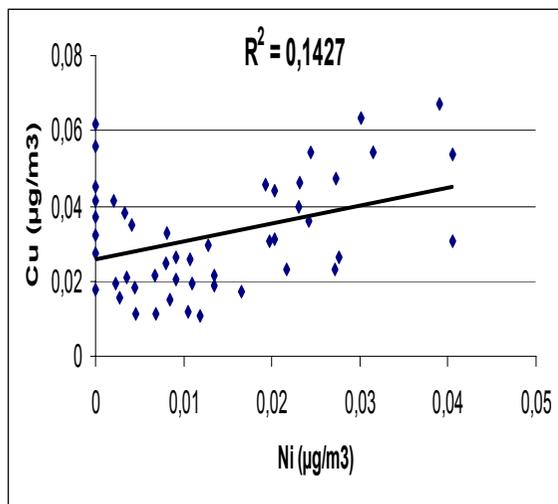


Corrélation entre le **Pb** et le **Ni**

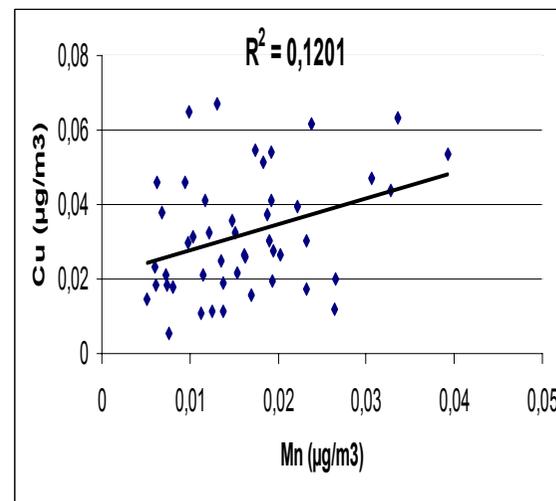


Corrélation entre le **Pb** et le **Co**

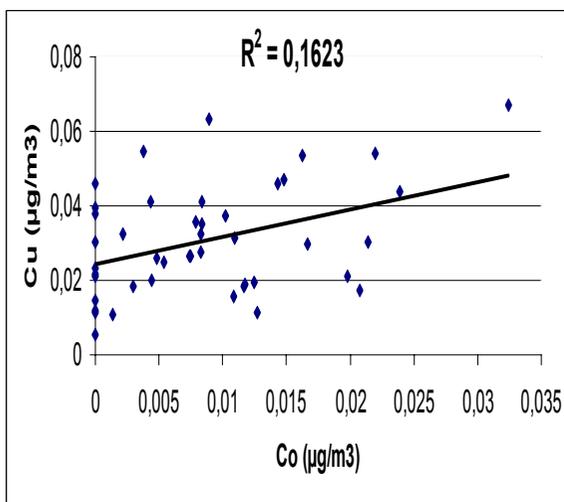
Figures N°VI.24 Bis-b : Corrélation des métaux lourds dans les PM-1.



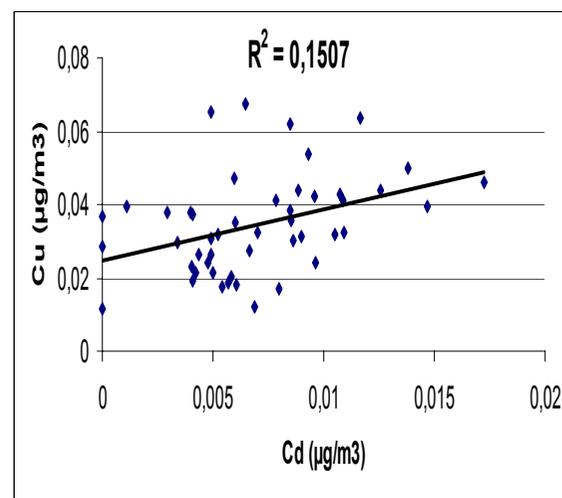
Corrélation entre le **Cu** et le **Ni**



Corrélation entre le **Cu** et le **Mn**

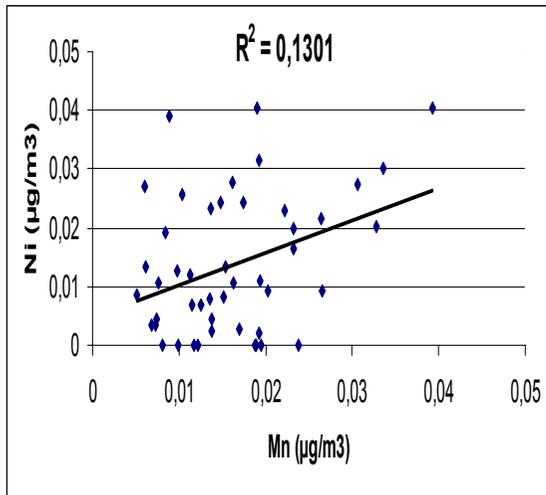


Corrélation entre le **Cu** et le **Co**

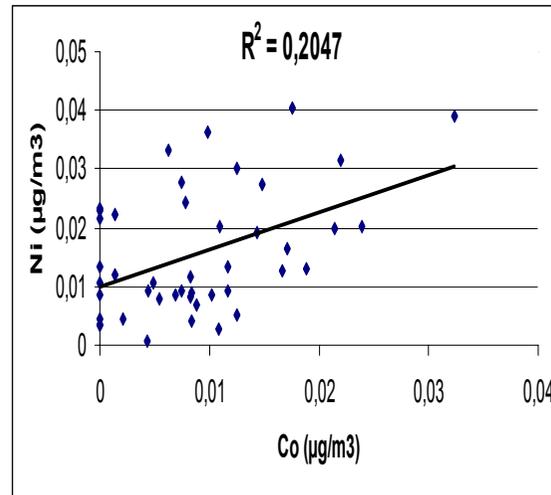


Corrélation entre le **Cu** et le **Cd**

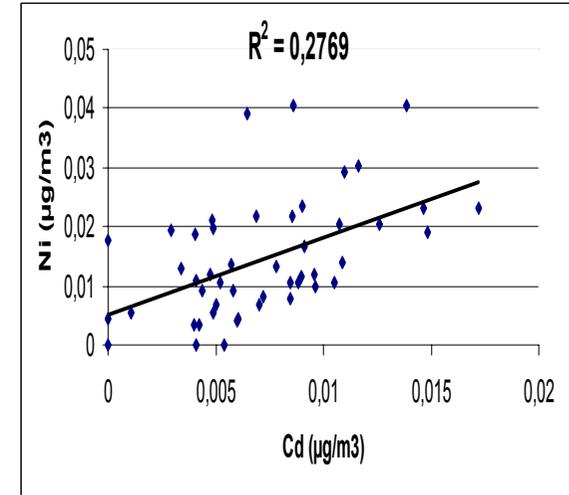
**Figures N°VI.24 Bis-c** : Corrélation des métaux lourds dans les PM-1.



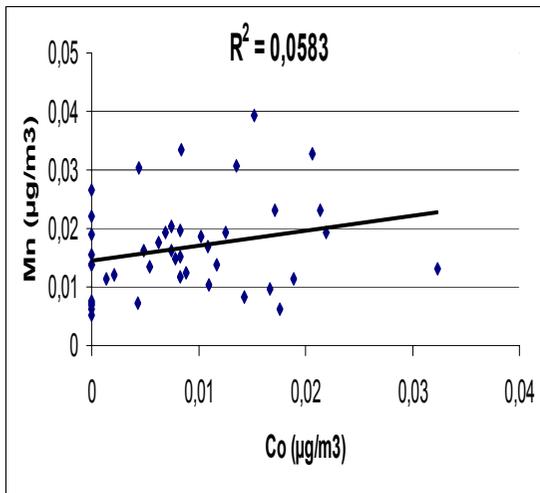
Corrélation entre le **Ni** et le **Mn**



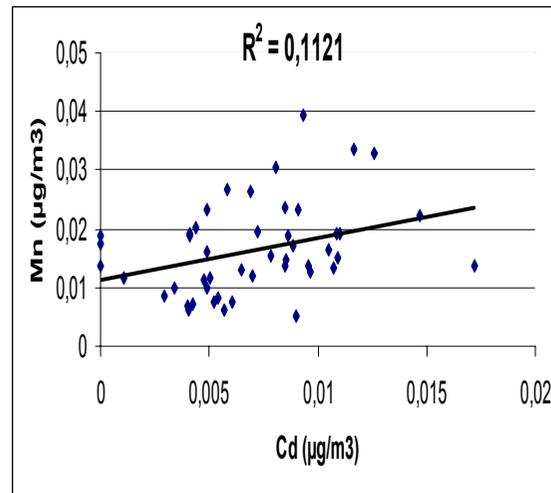
Corrélation entre le **Ni** et le **Co**



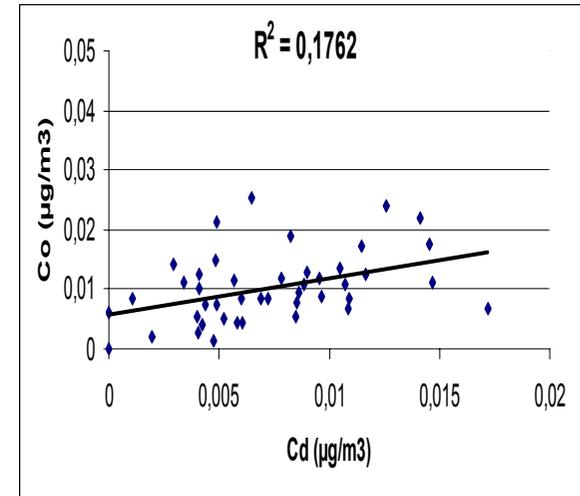
Corrélation entre le **Ni** et le **Cd**



Corrélation entre le **Mn** et le **Co**



Corrélation entre le **Mn** et le **Cd**



Corrélation entre le **Co** et le **Cd**

Figures N°VI.24 Bis-d : Corrélation des métaux lourds dans les PM-1.

## المخلص

تنص هذه الأطروحة على دراسة مستوى تلوث الهواء عن طريق المركبات الجزيئية بمنطقة مؤثرة بتسربات حركة المرور بالضاحية الشرقية للجزائر. أخذت العينات بواسطة جهاز أخذ العينات ذو تدفق قوي HVS-PM-10 المزود بجهاز التجزئة حسب الأقطار. النتائج المحصل عليها تظهر أن تلوث الهواء بواسطة الجزيئات PM-10, PM-2,5, PM-1 مرتفع جدا. الكمية المتوسطة لـ PM-10 ترتفع إلى  $75,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  مع كمية  $36,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  لـ PM-2,5. PM-10 يمثلون 48% من PM-10. نسجل من طرف آخر أن أكثر من 1/3 من PM-10 مكونة من الجزيئات الدقيقة PM-1. نظهر من طرف آخر أن PM-10 يتبعون توزيع بمودي وأنه يوجد تناسق بين الجزيئات الدقيقة و الجزيئات المستنشقة. تحليل المعادن الثقيلة (Fe, Pb, Cu, Mn, Ni, Co et Cd) من طرق المركبات الجزيئية، تبين أن مستويات الرصاص تبلغ مستويات مرتفعة على المعايير المتعامل بها في بعض الدول. الدراسة عن طريق التجزئة حسب الأقطار تبرز أن معادن القشرة الأرضية (Fe et Mn) توجد الأكثر في القسم (3-10  $\mu\text{m}$ ). المعادن الثقيلة الأكثر خطورة (Pb et Cd) هم على العكس موزعون غالبا في القسم الدقيق و المستنشق (> 3  $\mu\text{m}$ ).

الكلمات المفاتيح: تلوث الهواء ، حركة المرور ، التركيبية الجزيئية PM-10, PM2,5, PM1 المعادن الثقيلة ، الرصاص.

## RESUME

L'étude porte sur l'évaluation de la pollution de l'air par les aérosols particulaires en un site influencé par les émissions du trafic routier à l'est d'Alger. Les prélèvements, par classe granulométrique, sont effectués à l'aide d'un échantillonneur HVS-PM-10 équipé d'un cascadeur d'Andersen à quatre étages. Les résultats obtenus montrent que la pollution de l'air par les particules inhalables (PM-10), les particules respirables (PM-2,5) et les particules très fines (PM-1) est très élevée. La teneur moyenne en PM-10 s'élève à  $75,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Avec une teneur de  $36,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , les particules respirables PM-2,5 constituent en masse environ 48% des PM-10. On relève par ailleurs que plus du 1/3 des PM-10 est constitué par la fraction très fine des PM-1. On montre par ailleurs que les PM-10 suivent une distribution bimodale et qu'il existe des corrélations entre les particules très fines et les particules alvéolaires.

L'analyse des métaux lourds Fe, Pb, Cu, Mn, Ni, Co et Cd véhiculés par les aérosols particulaires montre que les teneurs en plomb atteignent souvent des niveaux supérieurs aux normes en vigueur dans certains pays. L'étude par classe granulométrique révèle que les métaux de la croûte terrestre Fe et Mn se trouvent le plus dans la classe granulométrique 3 à 10  $\mu\text{m}$ . Les métaux lourds les plus toxiques Pb et Cd sont par contre, distribués majoritairement dans la fraction fine et respirable (<3 $\mu\text{m}$ ).

**Mots-clefs :** pollution de l'air, trafic routier, aérosols particulaires, PM-10, PM-2,5, PM-1, métaux lourds, plomb.

## ABSTRACT

The study is about the evaluation of the air pollution by the aerosol particles in a site influenced by the emissions of the road traffic in the East of Algiers. The measures, by size distribution, are done using a HVS-PM-10 sampler equipped of cascade impactors of Andersen in four floors. The results show that the air pollution by the inhalable particles (PM-10), the respirable particles (PM-2,5) and the very fine particles (PM-1) is very high. The average content in PM-10 rises to  $75,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . With a content of  $36,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , the respirable particles PM-2,5 constitute in mass about 48% of the PM-10. One raises otherwise that more of the 1/3 of the PM-10 are constituted by the very fine fraction of the PM-1. One shows otherwise that the PM-10 follows a bimodal distribution and that some correlations exist between the very fine and respirable particles.

The analysis of the trace metals Fe, Pb, Cu, Mn, Ni, Co and Cd transported by the aerosol particles shows that the atmospheric lead contents often reach some levels superior to the norms in force in some countries. The study by size distribution reveals that the metals of the terrestrial crust Fe and Mn are the more in the fraction 3 - 10  $\mu\text{m}$ . The most toxic trace metals Pb and Cd are on the other hand, majority distributed in the fine and respirable fraction (<3 $\mu\text{m}$ ).

**Key-words:** air pollution, road traffic, particulates matters, PM-10, PM-2,5, PM-1, heavy metals, lead.