

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

Université Abderrahmane Mira – Béjaia
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Organismes et Populations

MEMOIRE DE MAGISTER

Présenté par: **Fatima BENAÏSSA**

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en
ANALYSE DE L'ENVIRONNEMENT ET BIODIVERSITE

Thème

Contribution à l'évaluation des effets de la pollution atmosphérique d'origine automobile dans la wilaya de Béjaia

Soutenue le 08 juillet 2010 devant le jury composé de :

M ^{me} N. MOALI	Maître de Conférence Univ. A. Mira Béjaia	Présidente
M ^{me} A. ZEBBOUDJ	Maître de Conférence Univ. A. Mira Béjaia	Examinatrice
M ^r D. DJOUADI	Maître de Conférence Univ. A. Mira Béjaia	Examineur
M ^r R. ALKAMA	Maître de Conférence Univ. A. Mira Béjaia	Rapporteur

Remerciements

*D'abord je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mon promoteur
M^r ALKAMA pour son suivi durant ce travail.*

Je remercie les membres du jury d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

*Je remercie Mr BENYOUCEF de l'EPH de Kherrata pour l'accueil et la bonne
collaboration.*

*Que tous ceux qui m'ont aidés, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail,
trouvez ici l'expression de mes remerciements les plus chaleureux.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail:

- *À la mémoire de mon Père*
- *À ma Mère*
- *À mon très cher Dhada*
- *À mes sœurs Fadhila, Hassina, Rahma et leurs familles.*
- *À ma sœur Djeyida*
- *À tous mes amis*

Abréviations, sigles et symboles

Abréviations, sigles et symboles

ADN: Acide Désoxyribonucléique

APHEIS: Air Pollution and Health: A European Information Système

ARH: Autorité de régulation des hydrocarbures

AS PP: Admissions au service Pneumo-phtisiologie

BPCO: Broncho-pneumopathie Chronique Obstructive

C₂H₄: Ethylène

Ca (OH) ₂: Portlandite

CARB: California Air Ressources Board

CEE: Communauté économique européenne

CFD: Computational Fluid Dynamics

CITEPA: Centre Technique Interprofessionnel avec un statut d'Association

CNERITA: centre national pour l'étude et la recherche en inspection technique automobile

CO: Monoxyde de Carbone

CO₂: Dioxyde de Carbone

COV: Composés Organiques Volatils

CP: Cancer pulmonaire

CVS: Constant Volume Sample

DD: Développement Durable

D.E.G: Draa El Gaid

DPAT: Direction de Planification et d'Aménagement de Territoire

ECE: Commission économique pour l'Europe des Nations Unies

EGR: recirculation des gaz d'échappement

ENACTA: Etablissement national de contrôle technique automobile

EP: Emphysème pulmonaire

EPA: Environmental Protection Agency

EPH: Etablissement Public Hospitalier

EPSP: Etablissement Public de Santé de Proximité

ERPURS: Evaluation des Risques de la Pollution Urbaine Pour la Santé

EUDC: extraurban driving cycle as currently used for cars

FTP: Federal Test Procedure

GES: Gaz à Effet de Serre

GNV: Gaz Naturel Véhicule

GPL: Gaz Pétrole Liquéfié

HAP: Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

Hb: Hémoglobine

Hb CO: Carboxyhémoglobine

Hb O₂: Oxyhémoglobine

HC: Hydrocarbures

HCNM: Hydrocarbures Non Méthaniques

H₂: Hydrogène

HNO₃: acide nitrique

H₂ SO₄: acide sulfurique

H₂O: molécule d'eau

HCl: Chlorure d'hydrogène

HCNM: Hydrocarbures Non Méthanique

INRS: Institut National de Recherche sur le Transport

IR: Insuffisances Respiratoires

IRA: Infection Respiratoire Aiguës

LEV: Low Emission Véhicules

MATET: ministère de l'aménagement du territoire, de l'environnement et de tourisme

N₂: Azote

NMHC: Hydrocarbures imbrûlés sans méthane

NMOG: des gaz organiques sans méthane

NO: Monoxyde d'Azote

NO₂: Dioxyde d'Azote

NO₃: Acide nitrique

NO_x: Oxydes d'Azote

NTD: Nombre total de décès

O: atome d'oxygène

O₂: Oxygène moléculaire

O₃: Ozone

OAP: Otites Aigues Pulmonaires

OH: l'ion hydroxyde

OMS: Organisation Mondiale de la Santé

PAN: Peroxy-acyl-nitrates

Pb: Plomb

PbO: Monoxyde de Plomb

Pb (C₂H₃O₂)₂ 3H₂O: Ethanoate de Plomb

Pb(C₂H₅)₄: Tétréthyle de Plomb

pH: potentiel Hydrogène

PM₁: Microparticules dont le diamètre est inférieur à 1 micromètres

PM_{2.5}: Microparticules dont le diamètre est inférieur à 2,5 micromètres

PM₁₀: Microparticules dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres

PNUE: Programme des Nations Unies pour l'Environnement

Pthorax: Pneumothorax

PPA: Pneumopathies Aigues

ppb: parties par billion

ppm: parties par million

PSAS-9 : programme de surveillance air et santé- 9 villes

RN9: Route nationale n° 9

SCR: réduction catalytique sélective

S.E.L: seuil des effets létaux

S.E.I: seuil des effets irréversibles

S.E.R: seuil des effets réversibles

S.P: seuil de perception

SEMEP: Service des Epidémiologies et des maladies en prévention

SO₂: Dioxyde de Souffre

SO₃: Acide sulfurique

TLEV: Transitional Low Emission Vehicles

UE: Union Européenne

ULEV: Ultra Low Emission Vehicles

UV: Ultra Violet

USA: United Steatment Americain

VLE: Valeur Limite d'Exposition

VME: Valeur Moyenne d'Exposition

VP: Véhicule particulier

VUL: Véhicule Utilitaire Léger

ZEV: Zéro Emission Véhicules

Zn: Zinc

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : Inventaire des polluants atmosphériques, effets sur la santé et effets sur l'environnement	
<u>Introduction</u>	3
<u>I- Inventaire des polluants atmosphériques</u>	3
I-1- Définitions	3
I-2- Les polluants primaires	4
I-2-1- Monoxyde de carbone (CO)	4
I-2-2- Oxydes d'azote	5
I-2-3- Dioxyde de soufre SO ₂	6
I-2-4- Composés Organiques Volatils (COV)	7
I-2-5- Les particules	7
I-2-6- Le plomb	8
I-3- Les polluants secondaires	8
I-3-1-Ozone (O ₃)	8
I-3-2-Peroxy-acyl-nitrates (PAN)	9
I-4- Météorologie et pollution atmosphérique	10
I-4-1- Influence du vent	11
I-4-2- Influence de la température	11
I-4-3- Influence de l'humidité	12
I-5- Les échelles spatiales de la pollution atmosphérique	12
I-5-1- La micro échelle	12
I-5-2- La méso échelle (la pollution à l'échelle régionale)	13
I-5-3- La macro échelle (la pollution à l'échelle planétaire)	13
<u>II- Pollution atmosphérique et santé</u>	13
II-1- L'intensité des effets	13
II-2- Différents effets sur la santé	14
II-3- Effets des polluants sur la santé	15
II-4- Les populations sensibles	19
II-5- Différentes affections dues à la pollution atmosphérique	19
II-5-1- Les affections du système respiratoire	20
II-5-2- Affections cardiovasculaires	22
II-5-3- Effets neuropsychiques	22

II-6- Méthodes de caractérisation des effets de la pollution atmosphérique sur la santé	22
II-7- L'Organisation mondiale de la Santé et la pollution atmosphérique	23
<u>III- Pollution atmosphérique et environnement</u>	24
III-1- Effets sur la végétation	24
III-2- Effets sur les écosystèmes	25
III-2-1- Précipitations acides	25
III-2-2- Acidification des lacs et des cours d'eau	25
III-2-3- La mort des forêts	26
III-4- Effets des précipitations sur les matériaux	26
III-5- Effet sur la visibilité atmosphérique	27
III-6- Effets de quelques polluants sur l'environnement	28
<u>Conclusion</u>	31

Chapitre II

La pollution atmosphérique d'origine automobile

<u>Introduction</u>	32
<u>I- Formation des polluants d'origine automobile</u>	32
I-1- Les moteurs automobiles et la pollution engendrée	32
I-1-1- Les véhicules à essence	33
I-1-2- Les véhicules Diesel	34
I-2- Origine des polluants automobiles	34
I-2-1- Les gaz de ventilation de carter	35
I-2-2- Les pertes par évaporation	35
I-2-3- Les gaz d'échappement	35
I-3- Influence du cycle de conduite sur les émissions de polluants	36
I-3-1- Influence du cycle de conduite sur les émissions à froid	36
I-3-2- Influence du cycle de conduite sur les émissions à chaud	36
I-3-2-1- Influence de la vitesse moyenne	37
I-3-2-2- Influence de la charge	38
I-3-2-3- Émission selon la catégorie de véhicule	38
<u>II- Normes internationales Anti-pollution des Véhicules Essence et Diesel</u>	38
II-1- Procédures d'essais réglementaires	38
II-2- Normes américaines, européennes et japonaises	40

II-2-1- Législation américaine de contrôle des émissions des véhicules particuliers	40
II-2-1-1- Test d'homologation selon le cycle FTP75 (US-TEST 75) et valeurs limites des émissions	41
II-2-1-2- Introduction de valeurs limites d'émissions d'hydrocarbures imbrûlés sans méthane (NMHC) et des gaz organiques sans méthane (NMOG)	41
II-2-2- Réglementation Européenne	42
II-2-3- Réglementation japonaise	43
II-2-4- La réglementation algérienne	44
II-2-4-1- Les missions de l'ENACTA	45
II-2-4-2- Mesures lors du contrôle technique	45
II-3- Appréciation des normes antipollution	46
II-3-1- Au niveau de procédure d'essai	46
II-3-2- Appareillage de Mesure	47
II-3-3- Cycles définis dans les normes actuelles	48
<u>III- Politique de lutte contre la pollution atmosphérique due au transport</u>	48
III-1- Politiques économiques	49
III-1-1- Améliorer l'organisation et le fonctionnement du système de Transport	49
III-1-2- Réduire la consommation de carburant des véhicules	49
III-1-3- Influencer le comportement au volant	49
III-1-4- Exploiter les carburants de substitution	50
III-2- Principales techniques de réduction des émissions automobiles polluantes	52
III-2-1- Techniques appliquées en amont de la source	52
III-2-2- Techniques appliquées au niveau de la source	53
III-2-3- Techniques appliquées en aval de la source	53
III-2-3-1- La catalyse	53
III-2-3-2- Les systèmes d'adsorption	55
III-2-3-3- Les filtres à paroi céramique (ou filtres à particules)	55
III-2-3-4- Traitement des effluents gazeux par procédés plasma	56
III-2-3-5- Dépollution par précipitation électrostatique	57
III-3- Complexité de la comparaison des solutions envisagées	58
III-4- Evolution des émissions par le transport routier	58

<u>Conclusion</u>	60
<u>Chapitre III: Surveillance de la qualité de l'air</u>	
<u>Introduction</u>	61
<u>I- La surveillance de la qualité de l'air</u>	62
I-1- Objectifs de la surveillance de la qualité de l'air	62
I-2- Critères de choix des polluants mesurés	62
I-3- Conditions de réalisation des mesures	62
I-4- Localisation des sites de mesures	62
I-5- La mesure des polluants atmosphériques	63
I-6- Méthodes d'analyse des polluants	64
I-6-1- Le dosage des polluants atmosphériques gazeux	64
I-6-2- Le dosage des polluants atmosphériques particuliers	65
I-6-3- Quelques exemples de dosage automatique	66
I-7- La biosurveillance de la qualité de l'air	67
<u>II- La surveillance de la qualité de l'air à Alger</u>	70
II-1- L'aspect réglementaire	70
II-2- La pollution atmosphérique dans la ville d'Alger	71
II-3- Les paramètres météorologiques et la pollution atmosphérique à Alger	72
II-4- Le dioxyde d'azote NO ₂	74
II-5- Le monoxyde de carbone (CO)	75
II-6- Le dioxyde de Soufre (SO ₂)	76
II-7- Les particules	77
II-8- L'ozone O ₃	79
<u>III- Mesure de la pollution urbaine dans la ville de Bejaia</u>	81
III-1- Caractéristiques du parc automobile de Bejaia	81
III-2- Mesure de la pollution urbaine dans la ville de Bejaia	83
III-2-1- L'évolution hebdomadaire de la pollution à Bejaia	83
III-2-2- Evolution diurne	84
III-2-3- L'évolution saisonnière de la pollution à Bejaia	85
III-3- Effets des paramètres météorologiques sur la pollution de l'air dans la ville de Bejaia	
<u>Conclusion</u>	87

Chapitre IV : Etude épidémiologique des effets de la pollution atmosphérique à Bejaia	
<u>Introduction</u>	88
<u>I- L'épidémiologie et la pollution de l'air</u>	88
I-1- Difficultés des études comparatives	91
I-2- Indices de mortalité	91
I-3- Indices de morbidité	92
I-4- Méthodes statistiques	93
<u>II- Etat sanitaire des résidents de l'Est de la wilaya de Bejaia</u>	94
II-1- Matériel et méthodes	95
II-1-1- Groupe étudié	95
II-1-2- Procédure	96
II-2- Résultats et discussion	97
II-2-1- Lieu de domicile et état sanitaire des habitants	97
II-2-2- Fréquences des problèmes respiratoires à l'hôpital de Kherrata	98
II-2-3- Problème de mortalité	98
II-2-4- Problème de morbidité	99
II-2-5- Le sexe et l'âge en relation avec les IR	100
II-2-6- L'évolution saisonnière de la morbidité	102
<u>III- Etat sanitaire des résidents de la ville de Bejaia et ses environs</u>	104
III-1- Matériel et Méthodes	104
III-1-1- Groupe étudié	104
III-1-2- Procédures	105
III-2- Résultats et Discussion	106
III-2-1- Lieu de domicile et état sanitaire des habitants	106
III-2-2- Fréquences des problèmes respiratoires à l'hôpital Frantz Fanon (Bejaia)	107
III-2-3- Problème de mortalité	107
III-2-4- Problème de morbidité	108
III-2-5- Le sexe et l'âge en relation avec les IR	110
III-2-6- L'évolution saisonnière de la morbidité	112
<u>IV- Comparaison des résultats avec ceux d'autres études</u>	114
<u>Conclusion</u>	116
CONCLUSION GENERALE	117

Liste des figures

Figure I.1: Représentation schématique de la formation d’ozone et de composés PAN dans le smog photochimique.....	10
Figure I-2: Pyramide des effets associés à la pollution atmosphérique.....	14
Figure I.3: Les principaux effets des polluants atmosphériques chez les végétaux- Interférence de divers paramètres.....	24
Figure II.1: Emission de gaz en fonction de la vitesse (Royaume Uni 2005).....	37
Figure II.2: Schéma de principe d’une installation de contrôle des polluants.....	39
Figure II.3: Evolution de la législation américaine fédérale (49 états) (a) et californienne (b) pour les véhicules légers essences et diesels.....	41
Figure II.4: Valeurs limites d’émissions des polluants des véhicules légers suivant l’essai du type I Cycle ECE départ à froid Directive 88/76/CEE (a) <i>Moteurs Essence</i> , (b) <i>Moteurs Diesel</i>	42
Figure II.5: Evolution des normes d’émissions des NO _x –PM au Japon.....	43
Figure II.6: Spécimens de résultats obtenus au niveau de la station de contrôle technique automobile de Bejaia.....	46
Figure II.7: Fonctionnement du filtre à NO _x et à particules en fonction du mode de fonctionnement moteur.....	56
Figure II.8: Variation des émissions en fonction de kilométrage et de nombre véhicule à Genoa (ville en Italie).....	59
Figure III.1: Schéma d’une équipe interdisciplinaire expérimentée.....	61
Figure III.2: Présentation des différents concepts de la biosurveillance de la qualité de l’air en fonction des niveaux d’organisation biologique et de lisibilité des effets.....	67
Figure III.3: Photos des 4 stations SAMASAFIA installées à Alger.....	72
Figure III.4: Répartition des concentrations d’ozone en liaison avec la vitesse du vent durant l’été 2007 au niveau de la station de BEN AKNOUN.....	73
Figure III.5: Evolution annuelle des concentrations de Dioxyde d’azote dans l’agglomération d’Alger.....	74
Figure III.6: Profil moyen journalier des teneurs en Dioxyde d’azote (NO ₂) pour l’ensemble du réseau durant le mois de janvier 2008.....	75
Figure III.7: Profil moyen journalier des teneurs en monoxyde de carbone pour l’ensemble du réseau durant le mois de janvier 2008.....	76
Figure III.8: Profil moyen horaire des teneurs en dioxyde de soufre à la station du 1er MAI durant le mois de janvier 2008.....	77

Figure III.9: Évolution des teneurs en PM ₁₀ , PM ₃ et PM ₁ mesurées à Alger.....	78
Figure III.10: Comparaison des PM ₁₀ par apport aux normes.....	79
Figure III.11: Variation des maxima horaires en ozone en 2004 à Alger.....	80
Figure III.12: Courbe de régression entre le CO et le nombre de véhicule à Bejaia.....	83
Figure III.13: Evolution mensuelle de la pollution dans la ville de Bejaia.....	84
Figure III.14: Evolution diurne de la pollution dans la ville de Bejaia.....	84
Figure III.15: Variations journalières dans les concentrations des trois polluants (CO, SO ₂ et NO) dans la ville de Bejaia pour 2006.....	85
Figure III.16: Courbes de corrélation-régression entre les concentrations des polluants (CO, NO et SO ₂) et la température ambiante l'humidité relative.....	86
Figure IV.1: Les polluants de l'air et les façades du tunnel de Kherrata.....	94
Figure IV.2: Effet de la pollution atmosphérique sur le Pin d'Alep à Kherrata.....	95
Figure IV.3: Répartitions des malades hospitalisés suite à une infection respiratoire reçu par l'EPH de Kharrata selon leurs communes de domicile pour 4 ans (de 2005 à 2008).....	97
Figure IV.4: Répartitions des malades hospitalisés suite à une infection respiratoire reçu par l'EPS de Kherrata selon les pathologies pour 2008.....	98
Figure IV.5: Fréquentations mensuelles par un échantillon de quatre malades admis à l'EPH de Kherrata pour 2008.....	100
Figure IV.6: Nombre des adultes hospitalisés suite à une infection respiratoire reçu par l'EPS de Kherrata selon l'année de recueil et le sexe.....	100
Figure IV.7: Nombre d'enfants hospitalisés suite à une infection respiratoire reçu par l'EPS de Kherrata selon l'année de recueil et le sexe.....	101
Figure IV.8: Répartitions des malades hospitalisés suite à une infection respiratoire reçu par l'EPS de Kharrata selon les groupes d'âge pour 4 ans (de 2005 à 2008).....	102
Figure IV.9: Evolution saisonnière des cas reçus par le service pneumologie à Kherrata...	103
Figure IV.10: Evaluation de la morbidité par IRA; nombre de consultations dans les unités périphériques et l'Hôpital du secteur de Kherrata pour 2005.....	103
Figure IV.11: Répartitions des malades hospitalisés suite à une infection respiratoire reçu par l'EPH de Frantz Fanon (Bejaia) selon leurs communes de domicile pour 6 ans (de 2003 à 2008).....	106
Figure IV.10: Répartitions des malades hospitalisés suite à une infection respiratoire reçu par l'EPS de Bejaia selon les pathologies pour 2003 à 2008.....	107

Figure IV.11: Répartitions des malades hospitalisés suite à une infection respiratoire reçu par le service pneumo-physiologie à Bejaia selon les groupes d'âge pour la période de 2003 à 2008.....	110
Figure IV.12: Nombre d'enfants hospitalisés suite à une infection respiratoire à l'Hôpital Tharga Ouzemour (Bejaia) selon l'année de recueil et le sexe.....	111
Figure IV.13: Nombre d'adultes hospitaliers suite à une infection respiratoire à l'Hôpital Frantz Fanon (Bejaia) selon l'année de recueil et le sexe.....	112
Figure IV.14: Evaluation saisonnière de la morbidité par pathologies cardiorespiratoires au niveau des Hôpitaux Frantz Fanon et Tharga Ouzemour (Bejaia) pour la période 2003-2008.....	113
Figure IV.15: Concentration en CO observées à Bejaia pendant 2006 et estimées pour 2007.....	113
Figure IV.16: Evaluation saisonnière de nombres de consultations dans les unités périphériques et l'hôpital du secteur sanitaire de Bejaia pour 2008.....	114

Liste des tableaux

Tableau I.1: Valeurs de VME et VLE pour quelques COV usuels.....	17
Tableau I.2: Principaux polluants atmosphériques, leurs sources et effets	30
Tableau II.1: Composition des gaz d'échappement des véhicules routiers.....	36
Tableau II.2: Paramètres comparés des cycles de conduite.....	40
Tableau II.3: Normes européennes appliquées à la composition des carburants.....	43
Tableau II.4: Normes américaine, européennes et japonaise appliquées aux émissions automobiles.....	44
Tableau III.1: Liste des plantes utilisables en biosurveillance active de la pollution atmosphérique.....	68
Tableau III.2: Utilisation actuelle des végétaux supérieurs, des bryophytes et des lichens en biosurveillance de la qualité de l'air.....	69
Tableau III.3: Normes sur la qualité de l'air en Algérie.....	70
Tableau III.4: Véhicules immatriculés à Bejaia au 31 décembre 2009.....	81
Tableau III.5: Parc automobile en circulation.....	82
Tableau III.6 : Emissions mesurées (en g/km) des véhicules diesel et essence en fonction de l'année de mise en circulation.....	82
Tableau IV.1: Répartition de la population bénéficiant de secteur sanitaire de Kherrata, selon la commune de résidence.....	95
Tableau IV.2: La mortalité par maladies respiratoire à l'hôpital de Kherrata pour les femmes (F), hommes (H) et enfants (E) pendant 4 ans (de 2005 à 2008).....	99
Tableau IV.3: Nombre de consultants 0 à 4 ans pour IRA par rapport au nombre de consultants 0 à 4 ans toutes causes confondues pour les unités périphériques et l'Hôpital du secteur de Kherrata pendant le mois de Juin 2005.....	104
Tableau IV.4: Répartition de la population bénéficiant de secteur sanitaire de Bejaia, selon la commune de résidence.....	105
Tableau IV.5: La mortalité par maladies respiratoire à l'hôpital de Bejaia pour les adultes (A) et enfants (E) pendant 6 ans (de 2003 à 2008).....	108
Tableau IV.6: Taux morbidité par infections respiratoire (IR) à l'Hôpital Frantz Fanon (Bejaia) pour la période de 2004 à 2009.....	108
Tableau IV.7: Taux morbidité par infections respiratoire (IR) à l'Hôpital Tharga Ouzemour (Bejaia) pour la période de 2003 à 2008.....	109

Tableau IV.8: Taux de consultations pour Infections Respiratoire Aiguës (IRA) dans les unités périphériques et l'hôpital du secteur sanitaire de Bejaia en 2008.....109

Tableau IV.9: Comparaison des résultats obtenus avec ceux d'autres études.....115

Annexes

Annexe IV.I: Fiche d'évaluation de la morbidité par IRA au SEMEP de Kherrata, en juin 2005, concernant le sous secteur " Amridj"

Annexe IV.II: Fiche d'évaluation de la morbidité par IRA au service pédiatrie à l'hôpital de Tharga Ouzemour en mars 2008

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Chaque organisme produit des déchets dont il se débarrasse dans son biotope. Ces déchets ne polluent pas la communauté biologique, parce qu'ils sont incorporés dans des cycles sans cesse renouvelés des substances et de l'énergie présente dans la communauté même. Le déchet d'un organisme devient la nourriture d'un autre. Mais l'homme, surtout l'homme industriel, a introduit des facteurs nouveaux dans le système de la nature.

La révolution urbaine, il y a environ 5000 ans, apporta des changements dans les rapports de l'homme avec les communautés biologiques: Ce fut le début des cités et de la civilisation. Le changement clé est alors la découverte de méthodes d'emménagement et de transport de la nourriture et d'autres substances, ceci à son tour amena le développement de grandes voies de commerce et des échanges de marchandises. Dès lors la biosphère se mit à devenir, au lieu d'un système en lui-même, un champ de ressources pour l'un de ses composants, *Homo sapiens*. Ceci crée de nombreux problèmes pour la biosphère et pour *Homo sapiens*.

Le problème de la pollution atmosphérique est l'un des plus graves du siècle dernier.

Depuis le début du siècle dernier l'accroissement démographique et le développement industriel sont à l'origine d'importantes émissions de gaz et d'aérosols. Les modifications de la constitution de l'atmosphère qui en découlent, peuvent avoir des répercussions aussi bien à l'échelle locale (conséquences sur la santé humaine, les végétaux ou les matériaux) qu'à l'échelle planétaire (modification du climat : effet de serre, diminution de la couche d'ozone stratosphérique). À moins que l'homme n'apprenne à gérer cette pollution, il lui faudra continuer à vivre avec, ce qui pourrait fort bien avoir pour sa santé et celle de ses descendants des conséquences malheureuses.

Les rejets automobiles sont reconnus comme source de pollution de l'air vers 1915. Cependant, ce n'est que vers 1945 que le premier problème de la pollution de l'air en milieu urbain, attribué aux émissions automobiles, est apparu à Los Angeles.

À la fin du XX^e siècle, la problématique de la pollution atmosphérique était plutôt dominée par la persistance de la pollution automobile, en regard de la diminution progressive des émanations industrielles.

Le transport routier est devenu la principale source de pollution en milieu urbain, la contribution des véhicules motorisés à la pollution peut dépasser 90 %. Les véhicules à moteur rejettent dans l'atmosphère des quantités importantes de monoxyde de carbone (CO), d'hydrocarbures (C_xH_x), d'oxydes d'azote (NO_x), de particules fines, de dioxyde de soufre

(SO₂), de plomb et favorisent la formation de l'ozone (O₃). Ces polluants sont nuisibles à la santé humaine.

À côté des polluants classiquement mesurés, la recherche en matière de pollution atmosphérique se doit de prendre aujourd'hui en compte de « nouveaux » polluants tels certains Composés organiques volatils (COV) et les polluants particulaires.

Au plan épidémiologique, de nombreuses enquêtes ont recherché les relations qui lient l'exposition chronique aux polluants atmosphériques et les symptômes asthmatiques [1][2][3][4].

L'épidémiologie a beaucoup progressé et recentré les débats sur la relation linéaire sans seuil; il n'en demeure pas moins que l'effet des faibles doses est aujourd'hui pris en compte. De même les effets à long terme sur la santé des pollutions de tous les jours sont maintenant étudiés de plus près, au-delà des seuls effets à court terme liés aux pics de pollution.

Ces dernières années ont montré une augmentation de prise de conscience concernant la qualité de l'air.

L'étude que nous allons présenter répond à la nécessité d'évaluer l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique à Bejaia.

Dans le premier chapitre, seront présentés les principaux polluants de l'air, leurs sources, leurs effets sur la santé et sur l'environnement. Les échelles et la dispersion de la pollution atmosphérique ainsi que les limites d'exposition seront abordées.

Le deuxième chapitre traite de la pollution d'origine automobile depuis la formation des polluants, le cycle de conduite jusqu'aux essais et normes imposées aux constructeurs automobiles. Un intérêt particulier sera accordé aux différentes techniques utilisées pour réduire les émissions des véhicules.

Le troisième chapitre est consacré à la surveillance de la qualité de l'air par des mesures basées sur des techniques physicochimiques appropriées et par la biosurveillance. Des résultats de mesures à Alger et à Béjaia seront exploités et présentés.

Au quatrième chapitre seront présentés les résultats pratiques d'études épidémiologiques effectuées à Kherrata et Béjaia principalement les taux de morbidité et de mortalité en relation avec les infections respiratoires.

CHAPITRE I

Pollution atmosphérique: sources, dispersion et effets

Introduction

Le fait de respirer de l'air pur est considéré comme une condition essentielle de la santé et de bien être de l'homme. Cependant, la pollution de l'air continue de faire peser une menace importante sur le plan sanitaire partout dans le monde. Selon une évaluation de la charge de morbidité due à la pollution de l'air effectuée par l'OMS, plus de deux (2) millions de décès prématurés peuvent chaque année être attribués aux effets de la pollution de l'air extérieur dans les villes et de la pollution de l'air à l'intérieur des habitations. Plus de la moitié de cette charge de morbidité est supportée par la population des pays en développement.

La pollution de l'air par les émissions industrielles ou par les transports représente une nuisance pour les citoyens mais aussi une source de dégradation de l'environnement (végétation, nappes phréatiques, cours d'eau, monuments...).

Ce chapitre a pour but d'apporter une vision d'ensemble des questions touchant la pollution atmosphérique. Il commence par une présentation des différents polluants considérés comme responsables de la pollution atmosphérique en insistant sur les polluants automobile et en cherchant à définir leurs sources. Puis il présentera leurs impacts sur la santé humaine d'une part, et sur l'environnement d'autre part.

I- Inventaire des polluants atmosphériques

Avant de citer les caractéristiques des principaux polluants incriminés dans la pollution de l'air, qui sont les oxydes de carbone, d'azote ou de soufre, l'ozone, les composés organiques volatils (COV) ou les particules en suspension, nous allons d'abord définir cette pollution.

I-1- Définitions

La pollution de l'air (ou pollution atmosphérique) est un type de pollution défini par une altération de la pureté de l'air, par une ou plusieurs substances ou particules présentes à des concentrations et durant des temps suffisants pour créer un effet toxique ou écotoxique.

On considère comme polluant toute substance ajoutée au milieu en concentration suffisante pour produire un effet mesurable sur l'homme, les animaux, la végétation ou les matériaux de construction.

Les polluants atmosphériques comprennent donc toutes les substances naturelles ou artificielles susceptibles d'être aéroportées: il s'agira de gaz, de particules solides, de gouttelettes liquides ou de différents mélanges de ces formes [5].

L'identification et la classification de la pollution sont des éléments importants lorsqu'il s'agit de comprendre une situation donnée et de prendre des dispositions pour y remédier.

Les contaminants de l'atmosphère peuvent être classés selon la nature de la matière ou leur origine.

Par la nature de la matière on désigne l'état physique du polluant qui est soit gazeuse ou particule solide:

- Gazeuse: en font partie les vrais gaz (SO₂, NO_x, O₃, CO, etc.), les vapeurs, la plus part des solvants chimiques, différents agents de nettoyage; on estime que les gaz représentent 90% des masses globales de polluants rejetés dans l'air.
- Particules solides (ou aérosols): solides ou liquides finement divisés (poussières, fumées); cela représente environ 10% restants.

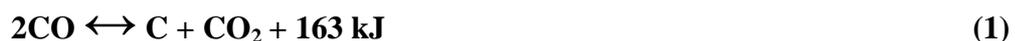
Selon leur origine, on peut considérer deux classes de polluants:

- Les polluants primaires sont les différents polluants introduits dans l'atmosphère directement ou comme conséquence de la modification des émissions naturelles de la biosphère.
- Les polluants secondaires sont produits dans l'atmosphère par l'interaction entre différents polluants primaires ou réaction entre polluants et constituants normaux de l'atmosphère, avec ou sans activation photochimique [6].

I-2- Les polluants primaires

I-2-1- Monoxyde de carbone (CO)

À la température ambiante, le monoxyde de carbone (CO) est un gaz incolore, inodore et sans goût. Il est très peu soluble dans l'eau. Son poids moléculaire est de 28,01g. Sa densité par rapport à l'air est 0,97, ce qui explique sa rapide diffusion à partir du moment où il est émis. La molécule de CO est stable au-dessus de 1000° C. En dessous de cette température, elle peut se décomposer selon l'équilibre réversible de la réaction (1).



Le monoxyde de carbone provient de la combustion incomplète des produits carbonés. Actuellement, comme à Beijing (Ville chinoise), par tout dans le monde, il est majoritairement émis par le trafic automobile [7] mais aussi par diverses activités industrielles (la production de l'énergie thermique et électrique), par la nature (la fermentation qui a lieu dans la biosphère, les volcans, les feux de végétation) et par le chauffage collectif [8].

En 1990, en France, l'automobile est la source de 80% de monoxyde de carbone présent dans l'atmosphère. Aux Etats-Unis, on évalue à 66% vers 1983 et on estime que la part du transport dans les émissions de CO en Allemagne est de 73% pour 1989 [5].

La responsabilité des transports routiers, bien qu'ayant baissé de 1990 à 1998, est largement prépondérante et représente un peu moins de 50% des émissions totales depuis 1997 en France. Entre 1990 et 1998, on observe que les émissions dues aux transports routiers ont diminués d'environ 45% [8].

La répartition sectorielle des sources d'émissions de CO en France pour l'année 2001 est faite comme suit [9]:

- Energie: 41%
- Transport: 42%
- Procédés industriels: 12%
- Autres: 5%

Le monoxyde de carbone est avant tout un problème du milieu urbain puisqu'il a surtout une influence en proximité routière. Dès que l'on s'éloigne de la source, il se dilue et se transforme en gaz carbonique (CO₂) [10].

I-2-2- Oxydes d'azote

Le monoxyde NO et le dioxyde d'azote NO₂ sont la plus part du temps étudiés simultanément et exprimés sous la forme de NO_x. Le NO est un gaz incolore, légèrement soluble dans l'eau [11].

Dans l'atmosphère, en présence de photons de lumière $h\nu$, le NO se combine rapidement avec l'ozone pour former le NO₂ suivant la réaction (2) [12].



Les NO_x sont des bons indicateurs de la pollution automobile. Ces polluants sont émis en 2005 pour environ 75 % par les véhicules à moteur [13].

Le NO est le plus abondant des dérivés nitrés présents dans l'atmosphère, il présente environ 95 % des émissions NO_x automobiles.

La principale source de NO est l'azote moléculaire de l'air, utilisé comme comburant alimentant le moteur. La formation de NO dépend très fortement de la température et du degré d'avancement de la réaction (3).



Elle dépend également fortement de la concentration en oxygène: haute température et concentration élevée en oxygène entraînent donc de grandes quantités de NO produites.

NO est aussi émis directement par l'activité bactérienne des sols. Les flux estimés en Allemagne sont de 0,09 g/m²/an exprimé en Azote.

La source principale de NO₂ est l'oxydation de NO. Cependant NO₂ peut provenir directement des moteurs de véhicules à essence et la fumée de tabac.

Directement ou indirectement les oxydes d'azotes ont comme sources: gaz d'échappement, production de chaleur et d'électricité; acide nitrique; explosifs; usines d'engrais [5].

En 2001, en France, la répartition sectorielle des sources d'émission des NO_x est la suivante [9]:

- Energie: 45%
- Transport: 52%
- Procédés industriels:1%
- Autres: 2%.

I-2-3-Dioxyde de soufre SO₂

Appelé aussi Anhydride sulfureux, le dioxyde de soufre SO₂ est un gaz incolore plus lourd que l'air, inflammable, soluble dans l'eau avec une odeur piquante [11]. C'est le polluant classique par excellence, car l'un des mieux étudiés. Il a été pris comme témoin de la pollution atmosphérique depuis de nombreuses années. Dans les grandes villes industrielles, il se lie aux particules pour former les "complexes- SO₂ ". En présence d'humidité et d'oxydants, il se transforme en acide sulfurique [9].

Toutes les combustions de produits contenant du soufre émettent du SO₂ et les combustions fossiles sont donc à l'origine de la majeure partie du SO₂ atmosphérique. La part du transport est essentiellement due aux moteurs diesel utilisant du gazole ou du fuel oil domestique à 0,3% ; les essences contiennent en général au maximum 0,08%. En 1988, en France, le transport a une part de 10% dans les émissions de SO₂ [1]. En 2001, cette part n'est que 5% [9].

SO₂ est également produit par la métallurgie des métaux non ferreux (Pb, Zn,...) et le grillage des pyrites. Il provient aussi de sources naturelles : les volcans; oxydation des sulfures des océans, des marécages et rizières) [5].

En 2001, en France, les sources d'émissions de SO₂, par secteurs d'activité économique sont [9]:

- Energie: 93%
- Transport: 4%
- Procédés industriels:2%

- Autres: 1%.

I-2-4- Composés Organiques Volatils (COV) :

Est défini comme COV, suivant les propriétés physicochimiques, tout composé qui, à l'exclusion du méthane, contient du carbone et de l'hydrogène, l'oxygène, le soufre, l'azote ou le phosphore, à l'exception des oxydes de carbone et des carbonates. Ces composés se trouvent à l'état de gaz ou de vapeur dans les conditions normales de température et de pression. Selon cette définition, les hydrocarbures liés ou non à d'autres composés atmosphériques y sont des COV.

Les sources importantes des émissions des COV sont les solvants industriels et les véhicules. Mais aussi ils proviennent de la nature, des solvants non industriels, de la pétrochimie [12]. En Europe, en 1990, la part du transport dans ce genre d'émission est de 41,45% des émissions totales pour la même année.

Pour 2001, les émissions des COV par secteur d'activité en France sont [9]:

- Energie: 19%
- Transport: 25%
- Procédés industriels:4%
- Utilisation des solvants: 29%
- Agriculture: 1%
- Autres: 22%

I-2-5- Les particules

Le terme "particules" concerne, en général, les aérosols créés par la dispersion dans l'air de solides et de liquides atomisés, poudres ou gouttelettes et implique donc les termes de poussières, fumées, suies, brumes, brouillard, smog [6]. Les particules fines de différentes classes granulométriques PM_{10} , $PM_{2.5}$ et PM_1 constituent un important facteur de pollution de l'air, particulièrement en milieu urbain où le trafic routier est dense.

Les particules en suspension dans l'atmosphère sont engendrées par une grande variété de processus physiques (condensation de vapeurs saturées, érosion mécanique de matériaux) et chimiques. Elles sont émises dans l'atmosphère à partir de sources nombreuses, parmi lesquelles les combustions, les procédés industriels (sidérurgies, charbonnages cimenteries, etc) et les phénomènes naturels (volcans et feux de forêts).

Parmi les véhicules à moteur, les véhicules Diesel sont les principaux émetteurs de particules (suies et fines). Elles contiennent des substances toxiques comme des métaux lourds ou des hydrocarbures [13].

Une étude faite en 1995 sur le parc automobile de la ville de Marseille a montré la répartition suivante des sources d'émissions de particules d'origine automobiles [14]:

- ✓ 87% pour les véhicules diesel,
- ✓ 12% pour les véhicules essence sans catalyseur,
- ✓ 1% pour les véhicules essence avec catalyseur

I-2-6- Le plomb

Il est de nature métallique et peut exister dans des composés chimiques variés avec différentes caractéristiques. Connue depuis le début des temps, le plomb a beaucoup d'usages industriels (batteries, alliages, pigments, etc) et est utilisé comme agent antidétonant pour l'essence. Il est utilisé sous formes de monoxyde de plomb ou litharge (PbO), d'éthanoate de plomb ($\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) et de tétraéthyle de plomb ($\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$) [15].

Le plomb existe dans l'atmosphère sous forme de vapeurs, de gaz ou de particules [16].

Dans les conditions naturelles, le plomb est émis dans l'atmosphère principalement par volcanisme ($16 \cdot 10^3$ t/an) et dans une moindre mesure l'érosion éolienne ($5 \cdot 10^3$ t/an), les autres sources surtout feux de végétation et embruns marins prises ensemble étant inférieures à 10^3 t/an [17]. Les sources anthropogéniques de ce métal sont les gaz d'échappement et les fonderies. Les véhicules automobiles surtout à essence sont la principale source de ce polluant [10].

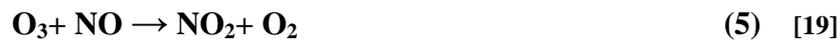
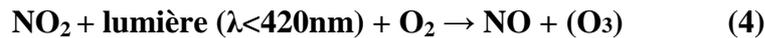
I-3- Les polluants secondaires

I-3-1-Ozone (O_3)

L'ozone est une molécule d'oxygène hautement réactive contenant trois atomes d'oxygène O. C'est un gaz bleu pâle, peu soluble dans l'eau, instable, odeur douceâtre. L'ozone est l'indicateur majeur de la pollution photochimique qui se forme dans l'air sous l'effet du rayonnement solaire à partir des composés organiques volatils, des oxydes d'azote et de monoxyde de carbone émis par les rejets d'effluents industriels et automobiles [18].

Dans la troposphère, l'ozone, dit troposphérique, présent en faibles quantités, se forme par combinaison de dioxygène et d'un atome d'oxygène provenant de la dissociation du dioxyde d'azote sous l'effet de rayonnement de longueur d'onde inférieur à 400 nm, selon la

réaction chimique (4). Le cycle est bouclé par la réaction de monoxyde d'azote sur l'ozone précédemment produit (5). Donc le monoxyde d'azote limite la formation de l'ozone. C'est la raison pour laquelle les niveaux d'ozone mesurés à proximité immédiate des infrastructures routières sont souvent très inférieurs aux valeurs limites. On en trouve toutefois en agglomération, dans des zones à faible trafic ou en périphérie. Il s'agit donc d'un problème urbain et interurbain, puisque des infrastructures urbaines comme des autoroutes sont susceptibles de générer de l'ozone à plusieurs kilomètres de distance.



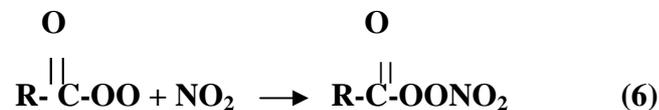
Les sources naturelles d'ozone jouent un rôle généralement marginal dans les épisodes de pollution photochimique des régions industrialisées. La réduction de la pollution photochimique ne peut donc être obtenue que par la diminution des précurseurs émis par les activités humaines.

I-3-2-Peroxy-acyl-nitrates (PAN)

Le *smog* photochimique est produit en été dans les régions de fort ensoleillement, à partir des polluants primaires que sont les NO_x et les hydrocarbures (HC). Ces éléments appelés précurseurs donnent naissance aux polluants secondaires appelés oxydants photochimique dont le nitrate de peroxyacyle (PAN) est un exemple.

Le PAN fut le premier composé hautement redoutable détecté dans l'atmosphère alors qu'il n'y avait pas été émis et dont la formation est directement liée à un désordre manifeste de la photochimie atmosphérique.

En présence de faibles concentrations de NO les radicaux peroxyacyles réagissent avec NO₂ pour former un nitrate de peroxyacyle (PAN) suivant la réaction (6).



Son temps de résidence dans l'atmosphère varie très fortement avec la température: à 25-30°C sa thermolyse est très rapide et la durée de vie de ce composé est de l'ordre de l'heure.

Ce processus ayant une très forte énergie d'activation, sa vitesse décroît très rapidement avec la température. En dessous de 0°C elle devient négligeable et la durée de vie de PAN dans l'atmosphère est alors limitée par la réaction, (7), lente de faible énergie d'activation.



Le temps de résidence du PAN est alors de l'ordre de 20 à 30 jours. En conséquence dans la haute troposphère, où l'hiver aux latitudes moyennes ou dans les zones polaires le PAN joue un rôle de réservoir de NO_x pouvant transiter sur de longues distances.

La photolyse mythylglyoxal et du biacétyle produit des radicaux acétyles qui en présence d'oxydes d'azote donne du PAN. Compte tenu de l'abondance des précurseurs, cette voie de formation du PAN est peut être aussi importante que celle précédemment identifiée à savoir la formation d'acétaldéhyde par oxydation de certains alcanes et alcènes suivie de l'attaque par les radicaux OH ou NO_3 de cet aldéhyde [12].

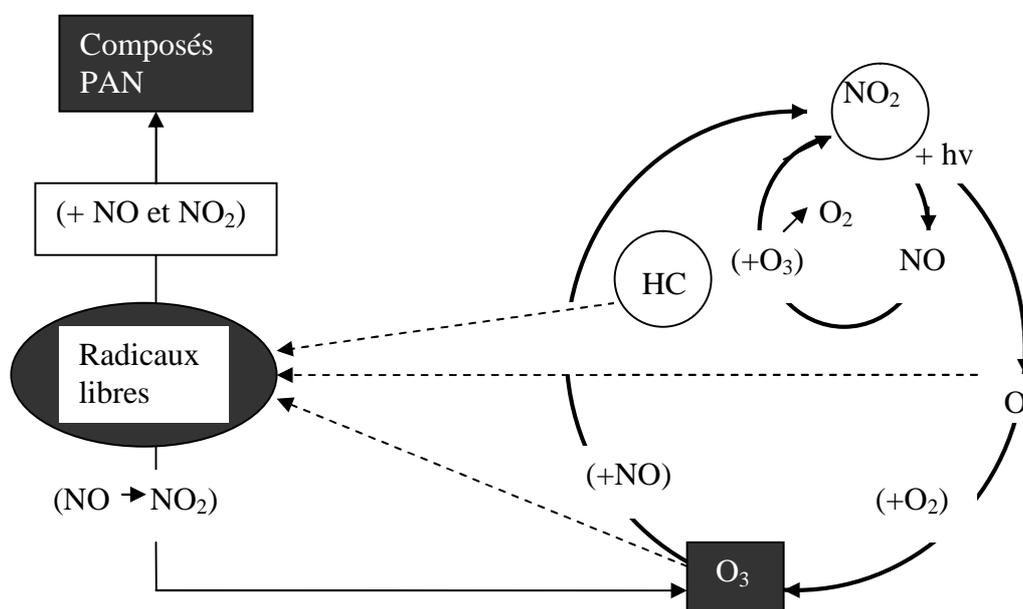


Figure I.1: Représentation schématique de la formation d'ozone et de composés PAN dans le smog photochimique. On peut distinguer une voie NO_2 -ozone et une voie HC-PAN [20].

I-4- Météorologie et pollution atmosphérique

Le déplacement des polluants depuis leur source, c'est-à-dire leur dispersion, est un facteur déterminant de leur accumulation ou leur dilution dans l'atmosphère.

La dispersion dépend de plusieurs paramètres dont les conditions météorologiques, la topographie locale (altitude, relief, cours d'eau, etc.) mais aussi les réactions chimiques.

Il y a une forte corrélation entre les concentrations en composés polluants (en nombre et en masse) lorsque l'on se trouve en milieu confiné dans des conditions où la chimie atmosphérique ne peut se produire avec des cinétiques analogues à celles observées en milieux ouverts [21].

On peut citer plus d'une douzaine de facteurs météorologiques qui interviennent soit directement, ou indirectement dans le transport et la dispersion des polluants. Mais le vent, la température et l'humidité sont les trois facteurs dominants.

I-4-1- Influence du vent

La vitesse du vent est un facteur important dans les variations des concentrations des polluants. Cependant, les vents plus forts provoquent une grande dilution des polluants et, par conséquent, des concentrations très faibles [22] [23].

Le vent tend à disperser la pollution surtout en l'absence de relief. En zone montagneuse, si les polluants rencontrent une barrière montagneuse, la pollution peut alors retourner en arrière et revenir sur son site d'origine ; c'est plutôt l'accumulation. C'est le cas des villes situées dans des cuvettes en montagne [9].

La direction du vent est un facteur clé dans la détermination de la destination des polluants [24].

I-4-2- Influence de la température

Toute différence de température dans un gaz modifie sa densité, un mouvement se produisant alors au sein du fluide du fait de la poussée d'Archimède. C'est le mouvement de brassage (convection), dans lequel les parties les plus chaudes du fluide ont tendance à s'élever et les parties froides et denses à descendre [11].

Dans la troposphère la convection a lieu lorsque la surface de la terre se réchauffe par les rayonnements solaires: l'air chaud, chargé de polluants locaux, au niveau du sol devient moins dense et plus léger, il se lève. Cependant, si les températures s'inversent, celle du sol est plus basse que celles des couches supérieures, les polluants restent piégés proches de la surface terrestre. C'est alors la réduction de la dispersion verticale des polluants [25].

Les épisodes de forte pollution dans plusieurs villes d'Europe en janvier 1985 et 1987, par exemple, ont été favorisés par ce facteur climatique. La présence d'une masse d'air froid hivernal a provoqué un blocage des mouvements au voisinage du sol. L'effet d'îlot de chaleur a contribué à la formation des dômes de polluants au-dessus de ces agglomérations. La persistance de ces dômes a entraîné une élévation rapide de la pollution de l'air et la formation de smog [20].

I-4-3- Influence de l'humidité

L'humidité capte les particules polluantes. Ainsi la condensation de vapeurs saturées engendre la formation de particules en suspension dans l'atmosphère [5].

Elle favorise le déroulement de certaines réactions chimiques dans l'atmosphère telles celles qui contribuent aux acides nitriques (8) et sulfuriques (9):



Ces acides créés par la combinaison de l'humidité atmosphérique avec les émissions de gaz polluants sont à l'origine des pluies acides.

La réaction (10) montre que son contact avec le monoxyde de carbone (CO) favorise la formation de dioxyde de carbone (CO₂) [20].

**I-5- Les échelles spatiales de la pollution atmosphérique**

Nombreux et divers sont les problèmes liés à la pollution atmosphérique. Ils ont des caractéristiques d'espace et de temps bien spécifiques. Trois types d'échelles sont couramment distingués: la micro échelle, la méso échelle et la macro échelle.

I-5-1- La micro échelle

À cette échelle, on parle de la pollution locale (en milieu urbain). Elle est constatée à proximité immédiate des sources de pollution. Elle correspond à la pollution localisée par exemple sur une rue mal ventilée, une artère très fréquentée à l'heure de pointe, ou dans un quartier à l'intérieur d'une même agglomération; l'espace concerné est de l'ordre d'une dizaine de km² et dans le temps, les processus sont étudiés pendant des périodes variant de l'heure à l'année [20]. Les polluants en jeu sont principalement le monoxyde de carbone (CO), l'ozone (O₃) produite par les oxydes d'azote (NO_x), les hydrocarbures non méthaniques (HCNM) et les composés organiques volatils (COV). La transformation photochimique de ces gaz en ozone est plus ou moins accentuée selon la situation géographique (vallée encaissée), la situation climatique (ensoleillement, la vitesse du vent) ou encore les activités industrielles. Tous ces gaz sont principalement émis par les véhicules automobiles. Les particules émises surtout par les moteurs diesel sont une autre source de pollution localisée [9]. Par rapport à d'autres échelles, l'échelle urbaine nécessite un traitement spécifique tenant compte du bâti.

I-5-2- La méso échelle (la pollution à l'échelle régionale)

Les polluants émis par les différentes sources locales sont, dans certaines conditions climatiques, déplacés plus haut dans l'atmosphère, réduisant ainsi leur concentration sur le site même. Ces polluants peuvent ensuite être transportés sur de grandes distances (plusieurs milliers de kilomètres) et provoquer des effets nocifs dans des régions très éloignées de leur lieu d'émission [9]. Les processus engagés ont des temps d'action qui s'étendent sur plusieurs années [20]. Les pluies acides sont un exemple de phénomènes regroupés dans le terme de cette échelle.

L'action de cette pollution dépend largement du régime météorologique (précipitation au sol par la pluie, dispersion par le vent...). Les fortes pollutions au niveau d'une grande agglomération sont essentiellement liées à la présence d'ozone (et donc à la production de NO_x) et d'hydrocarbures non méthaniques [12].

I-5-3- La macro échelle (la pollution à l'échelle planétaire)

Elle correspond à une pollution à l'échelle de la planète. Les polluants responsables de la pollution à très grande échelle, différents de ceux cités précédemment, sont ceux qui dégradent la couche d'ozone à haute altitude et le CO₂, responsable à plus de 90% de l'effet de serre. Ce dernier touche nombreux secteurs comme le cycle de carbone, le système climatique, le système agricole, les océans, la planification énergétique et les comportements sociaux et économiques. Ici la dimension temporelle porte sur plusieurs siècles [20].

Il n'existe pas vraiment de délimitation nette entre ces échelles. Alors cette classification reste relative, mais utile pour la reconnaissance des priorités, pour le choix des méthodes, pour la modélisation et l'appréciation des résultats (degré de résolution). Ainsi, un cas de pollution de quartier ne s'étudie pas avec la même optique qu'un cas de pollution dans une vallée.

II- Pollution atmosphérique et santé

Même à des niveaux faibles, la pollution a des effets néfastes sur notre santé. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, "trois millions de personnes meurent chaque année sous l'effet de la pollution atmosphérique, soit 5% des 55 millions de décès annuels dans le monde.

II-1- L'intensité des effets

Les polluants peuvent être de différentes natures. Il peut s'agir de gaz ou de particules ayant des propriétés irritantes pour l'appareil respiratoire. Les fréquences des conséquences et

leurs délais d'apparition varient en fonction de la durée d'exposition, du type de polluant, de la sensibilité du sujet et de nombreux autres facteurs.

Les conséquences vont d'une baisse de la capacité respiratoire à une incidence sur la mortalité à plus ou moins long terme (figure I-2).

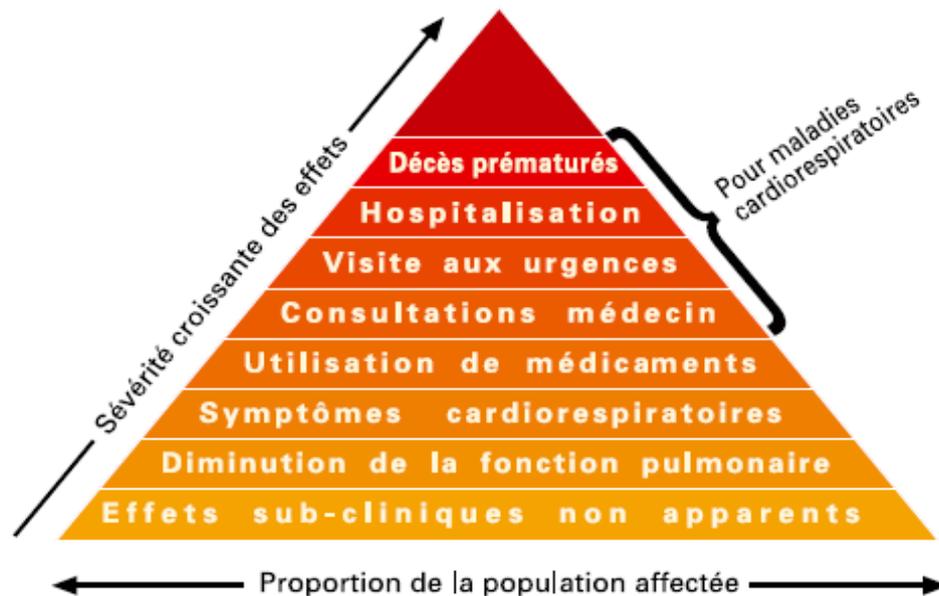


Figure I-2: Pyramide des effets associés à la pollution atmosphérique [13].

II-2- Différents effets sur la santé

Les effets néfastes de la pollution atmosphérique urbaine ont été mis en évidence par des études épidémiologiques. Ils sont cohérents avec les travaux toxicologiques, même si l'ensemble des phénomènes physiopathologiques n'est pas encore expliqué. Les effets sont classés en deux groupes :

- **Les effets à court terme** qui sont les manifestations cliniques, fonctionnelles ou biologiques survenant dans des délais brefs (quelques jours ou semaines) suite aux variations journalières des niveaux ambiants de pollution atmosphérique.

- **Les effets à long terme** qui peuvent survenir après une exposition chronique (plusieurs mois ou années) à la pollution atmosphérique et qui peuvent induire une surmortalité et une réduction de l'espérance de vie. Les effets à long terme restent mal connus car difficiles à évaluer. Cependant, certaines études américaines comparant les indices de mortalité des villes

ayant la meilleure qualité d'air avec les plus polluées semblent confirmer l'action néfaste de la pollution [26].

II-3- Effets des polluants sur la santé

➤ Effets du monoxyde de carbone (CO)

Les effets du monoxyde de carbone sur l'organisme humain dépendent de sa durée d'action et de sa concentration. Sa toxicité tient essentiellement à sa très grande affinité pour l'hémoglobine du sang avec laquelle il forme un composé relativement stable: la carboxyhémoglobine (Hb CO) suivant la réaction (11).



Le monoxyde de carbone est même capable de déplacer l'oxygène de sa combinaison avec l'hémoglobine (l'oxyhémoglobine (Hb O₂)) d'après la réaction (12).



La symptomatologie de l'intoxication oxycarbonée se traduit principalement par des céphalées, des vertiges et des troubles digestifs (nausées, vomissements). L'OMS a fixé les valeurs guides, ci- après, établies sur des critères strictement sanitaires:

- ✓ 100 mg/m³ pour une exposition de 15 minutes;
- ✓ 60 mg/m³ pour une exposition de 30 minutes;
- ✓ 30 mg/m³ pour une exposition de 1heure;
- ✓ 10 mg/m³ pour une exposition de 8 heures [8].

➤ Effets du monoxyde d'azote (NO):

Le NO est en lui-même peu toxique, les effets soupçonnés concernent sa fixation sur l'hémoglobine (la liaison est 1000 fois plus forte que dans le cas de CO). L'effet essentiel du NO tient à son rôle de précurseur du NO₂. Ce dernier est un gaz irritant pouvant pénétrer profondément dans les poumons, l'inhalation de fortes concentrations de NO₂ provoque surtout des lésions des bronchioles terminales et des alvéoles (pouvant amener de l'Emphysème). Il altère l'activité respiratoire et augmente les crises chez les asthmatiques. Chez les plus jeunes, il favorise des infections microbiennes des bronches [5].

L'OMS fixe les valeurs limites de 40 µg/m³ pour une durée d'exposition de 8 heures et 200 µg/m³ pour une durée d'exposition d'un an. [27].

➤ Effets d'anhydride sulfureux (SO₂)

L'anhydride sulfureux (SO₂) est un gaz irritant. Le mélange acido-particulaire peut, selon les concentrations des différents polluants, déclencher des effets bronchospamiques chez l'asthmatique, augmenter les symptômes respiratoires aigus chez l'adulte (toux, gêne respiratoire, excès de toux ou de crise d'asthme). Ce paramètre ne peut être dissocié de la pollution acido-particulaire qui est un mélange complexe; la limite en atmosphère de travail est fixée à 2 ppm [28].

Une augmentation de 50 µg/m³ de SO₂ ou de particules en hiver provoque une augmentation de 30% de crises d'asthme [26].

Les valeurs limites indiquées par l'OMS pour le SO₂ sont: 25 µg/m³ pour une durée d'une année d'exposition, 50 µg/m³ pour 24 heures d'exposition, 350 µg/m³ pour une heure d'exposition et 500 µg/m³ pour 10 minutes [27].

➤ Effets du plomb

Après absorption pulmonaire ou digestive, le plomb passe dans le sang où il se répartit entre une forme fixée aux hématies (95%) non diffusible et une forme plasmatique qui sera stockée dans les tissus ou éliminée dans les urines.

Les principaux effets du plomb sont les suivants:

- effets hématologiques: un des effets classiques du plomb est l'anémie.
- effets sur le système nerveux périphérique: l'exposition à des niveaux très élevés (plombémie à 1200 µg/l) peut provoquer des paralysies partielles, en particulier au niveau des membres supérieurs.
- effet sur le système nerveux central.
- effet sur la reproduction.
- effets rénaux.
- effets sur le système cardio-vasculaire [14].

Les limites admissibles des concentrations du plomb sont: 10 mg/m³ pour 8 heures d'exposition et 5 10⁻⁴ mg/m³ pour 1 an d'exposition.

➤ Effets des COV

La pollution due aux émissions de COV peut être approchée de manière globale suivant ses effets directs ou indirects (photo oxydation) sur l'homme et sur le milieu environnant récepteur.

Les effets sont très divers selon les polluants. Ils vont de la simple gêne olfactive à une irritation (aldéhydes), à une diminution de la capacité respiratoire jusqu'à des risques d'effets mutagènes et cancérigènes (benzène). C'est une contamination majeure de l'habitat. Des études de toxicologie ont montré le rôle que pourraient jouer dans les processus de cancérogenèse différents HAP [29].

Le benzène est un toxique qui peut avoir des effets sur le système nerveux, les globules et les plaquettes sanguins pouvant provoquer une perte de connaissance.

C'est également un agent cancérigène, capable d'induire une leucémie.

Les effets directs peuvent être:

- ✓ des irritations cutanées,
- ✓ des irritations des yeux et des organes de respiration;
- ✓ des troubles cardiaques, digestifs, rénaux et hépatiques;
- ✓ des maux de tête; des troubles du système nerveux, des actions cancérigènes et mutagènes.

Les COV ont des effets indirects du fait qu'ils participent à des réactions chimiques complexes se déroulant dans l'atmosphère telle celle qui favorise l'augmentation de l'ozone troposphérique.

Le tableau I.1 donne des valeurs de VME et VLE pour quelques COV usuels: La valeur moyenne d'exposition (VME) est la teneur pondérée pour 8h/j d'exposition recommandée par L'INRS, en France, pour les COV. La valeur limite d'exposition (VLE) est la teneur maximale ne pouvant être dépassée pendant plus de 15 minutes [12].

Tableau I.1: Valeurs de VME et VLE pour quelques COV usuels

Composé	VME (ppm)	VLE (ppm)
Acétaldéhyde	100	-
Benzène	5	25
Formaldéhyde	0,5	1
Toluène	100	150
Naphtalène	10	-
Méthyl éthyl cétone (butane)	200	-

➤ **Effets des particules**

Sur le plan sanitaire, elles représentent un indicateur majeur de la qualité de l'air [30]. Les particules fines peuvent pénétrer profondément dans les alvéoles pulmonaires et avoir des conséquences graves sur la santé humaine [5].

Les particules diesel agissent sur le système immunitaire de l'asthmatique en induisant une activation Th1 et Th2 des lymphocytes T spécifiques de l'allergène [31][32]. D'autres études ont montré que les particules diesel entraînent une modification du stress oxydant et de la balance protéases/antiprotéases des cellules épithéliales alvéolaires et des macrophages alvéolaires, de même qu'une altération de la réponse proliférative des cellules musculaires lisses bronchiques [33] [34].

Les valeurs limites recommandées par l'OMS sont:

Particules PM_{2,5}: 10 µg/m³ moyenne annuelle et 25 µg/m³ moyenne sur 24 heures.

Particules PM₁₀: 20 µg/m³ moyenne annuelle et 50 µg/m³ moyenne sur 24 heures [27].

➤ **Effets d'ozone**

L'ozone est un gaz soluble dans l'eau et dans les sécrétions bronchiques, capable de pénétrer profondément dans les voies respiratoires: 40% au niveau nasopharyngé et 60% au niveau des voies aériennes distales. C'est un gaz oxydant qui, au niveau cellulaire et biochimique, entraîne une réaction inflammatoire avec libération de divers médiateurs pro-inflammatoires tels que les radicaux libres qui peuvent engendrer des effets délétères dans les tissus pulmonaires.

La toxicité de l'ozone se traduit, aux seuils d'information et d'alerte à la population, par l'apparition, principalement à l'effort, d'altération significative de la mécanique de ventilation, d'inconfort thoracique, d'essoufflement ou encore de douleur à l'inspiration profonde. Peuvent apparaître également comme symptômes, une irritation nasale et de la gorge, de la toux ou une irritation de l'œil [18]. Ses conséquences sur la santé sont d'autant plus graves chez les asthmatiques, les enfants et les personnes âgées, notamment durant les jours de forte chaleur et en l'absence de vent [12].

Une concentration standard d'ozone recommandée dans l'air doit être inférieure à 100 µg/m³ durant 8 heures et une autre de 150 µg/m³ pour une heure d'exposition [27].

➤ **Effets de PAN**

Il représente un peu la synthèse de tous les polluants gazeux, en ce qui concerne les effets sur la santé. En effet il représente tous les inconvénients possibles:

- action sur les voies respiratoires
- action cutanée
- troubles sensoriels et céphalées
- irritations des yeux
- propriétés cancérogènes

A l'heure actuelle ce polluant est encore peu étudié, notamment en ce qui concerne l'évaluation des doses critiques. Il semble seulement, qu'aux concentrations urbaines (10-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), les problèmes d'irritation des yeux et les vertiges soient très fréquents [10].

Il agit à faible dose sur les muqueuses animales [20].

II-4- Les populations sensibles

Dans le domaine de la pollution atmosphérique, toute la population, dans son ensemble, est concernée.

Notamment, la pollution atmosphérique peut affecter la santé des adultes bien portants lorsqu'ils y sont plus particulièrement exposés (conducteurs, agents de la circulation...), pratiquent une activité physique en zone polluée ou sont fumeurs.

En tout état de cause, les résultats des études expérimentales et épidémiologiques ont permis d'identifier clairement les populations sensibles suivantes :

- Jeunes enfants : immaturité des voies respiratoires et des défenses immunitaires
- Personnes âgées : existence de pathologies chroniques cardio-respiratoires, diminution des défenses respiratoires
- Femmes enceintes et leurs foetus
- Pathologies cardio-vasculaires et respiratoires: cardiaques, asthmatiques, bronchitiques chroniques
- Diabétiques (mécanismes inflammatoires sur le système cardiovasculaire)
- Fumeurs
- Exposés professionnellement aux produits chimiques
- Personnes pratiquant une activité physique : l'exercice augmente la ventilation respiratoire et donc la dose reçue [26].

II-5- Différentes affections dues à la pollution atmosphérique

Ouvert sur l'extérieur par les différents orifices et voies d'entrée et de sortie des éléments dont il a besoin, le corps humain est très vulnérable; il est menacé par toutes les

agressions et pollutions. Il est donc sujet de multiples pathologies causées par son exposition aux polluants atmosphériques surtout celles liées au système respiratoire.

II-5-1- Les affections du système respiratoire

Les polluants véhiculés par l'air inspiré peuvent agresser les tissus du système respiratoire, et les rendre plus vulnérables aux pathologies microbiennes ou inhiber totalement ou partiellement les mécanismes de défense, facilitant ainsi les affections.

Les atteintes du système pulmonaire se caractérisent par une diminution des performances fonctionnelles pulmonaires: capacité respiratoire.

➤ Bronchite chronique

La bronchite chronique est une inflammation des bronches et des bronchioles. Le symptôme qui définit à lui seul la maladie est une toux qui dure trois mois dans l'année, deux années de suite. La toux provient d'un excès de sécrétion de la muqueuse des bronches, et s'accompagne en général de crachats. La gravité de cette affection fréquente est due à son caractère irréversible et à son évolution vers l'insuffisance respiratoire. La bronchite chronique peut être entretenue par des irritations chimiques causées principalement par la fumée de cigarette et certains polluants atmosphériques.

➤ Broncho-pneumopathie Chronique Obstructive (BPCO)

La broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO) est une pathologie pulmonaire invalidante, ayant une composante bronchique et une composante alvéolaire. Le tabac est le principal facteur de risque de la BPCO, et des facteurs liés à l'environnement, tels la pollution de l'air, et notamment la pollution particulaire, semblent jouer un rôle essentiel dans l'aggravation de la BPCO, sans que les mécanismes impliqués soient élucidés.

➤ Emphysème pulmonaire

L'emphysème est une maladie respiratoire évolutive caractérisée par une toux, des difficultés respiratoires et une respiration sifflante, évoluant vers une insuffisance respiratoire et aboutissant parfois à la mort. C'est chez les gros fumeurs, en particulier ceux qui sont exposés à un air pollué, qu'on observe le nombre de cas le plus élevé. Les enfants atteints de bronchite ou d'asthme sont également sensibles à cette affection. Au cours de la maladie, les canaux desservant les sacs alvéolaires des poumons se rétrécissent. L'air est emprisonné dans ces sacs et le tissu pulmonaire perd son élasticité

naturelle et subit des dommages irréversibles. La maladie progressant, le volume d'air résiduel emprisonné dans les poumons augmente et le volume de chaque respiration diminue. La taille des poumons s'accroît et, dans les cas graves, le patient présente un « thorax en tonneau » caractéristique. Les poumons ne peuvent plus fournir suffisamment d'oxygène aux tissus. Cette réduction de l'absorption d'oxygène oblige le cœur à faire circuler le sang plus vite.

Il est indispensable pour le patient d'arrêter de consommer du tabac ; un changement de profession ou de lieu d'habitation peut être nécessaire, si la pollution de l'air ou la pollution due à la profession aggrave son état.

➤ **Cancer pulmonaire**

Le cancer se caractérise par un développement anarchique de certaines cellules ayant échappé aux mécanismes de contrôle de l'organisme. Les cancérogènes chimiques produisent différents dommages à l'ADN: cassure de chromosomes, décalage de séquences des bases organiques, addition ou suppression de certains segments de la séquence, l'inversion des segments de la séquence, échange de séquences entre différents chromosomes.

Broncho-pulmonaire, cancer, tumeur maligne affectant les poumons, le cancer bronchique est la première cause de mortalité par cancer chez l'homme.

Le cancer broncho-pulmonaire à petites cellules représente 25 % des cas de cancers bronchiques. Sa spécificité réside dans le temps de dédoublement rapide : de 1 à 4 mois. Le pronostic est très mauvais : 5 à 10 % seulement des malades peuvent être guéris. Le potentiel de produire des métastases est élevé [5].

➤ **Asthme**

L'asthme est une affection chronique des voies respiratoires. Les symptômes de cette affection sont caractérisés par des sifflements respiratoires, une dyspnée, une oppression respiratoire et la présence d'une toux sèche persistante. Ces symptômes, souvent nocturnes, sont réversibles spontanément ou sous l'effet d'un traitement. L'aggravation brutale des symptômes entraîne la survenue de crises d'asthme, en général de courte durée [35].

Un des types d'asthme résulte de manifestations allergiques. Il n'est cependant pas toujours facile d'établir des relations directes entre les recrudescences de crises d'asthme et les épisodes de pollution atmosphérique.

La maladie asthmatique est caractérisée par l'afflux au niveau bronchique de lymphocytes Th-2 responsables de la réaction chronique inflammatoire [31].

II-5-2- Affections cardiovasculaires

Le franchissement de l'interface pulmonaire par les polluants atmosphériques, en particulier par le CO, est connu, chez les fumeurs de cigarettes, pour provoquer le développement de l'athérosclérose et des affections cardiovasculaires coronariennes. Le CO atmosphérique accroît le taux de mortalité des patients atteints d'angine de poitrine.

II-5-3- Effets neuropsychiques

Des affections sensorielles peuvent résulter d'expositions à des polluants aériens: effets lacrymogènes des irritants comme les aldéhydes et l'ozone, migraines provoquées par faibles teneurs de CO, perte d'attention et de vertiges dangereuses pour les conducteurs de véhicules, les odeurs désagréables du type diesel, véhiculés par l'air, entraînent aussi une gêne sensorielle [5].

II-6- Méthodes de caractérisation des effets de la pollution atmosphérique sur la santé

Les méthodes pour mettre en évidence les effets de la pollution atmosphérique sont :

- l'expérimentation *in vitro* sur les cultures de cellules en laboratoire ;
- l'expérimentation *in vivo* sur des sujets sains que l'on expose à des quantités connues de polluants. Cette approche reste limitée à cause de problème d'éthique ;
- l'expérimentation animale avec des doses d'exposition souvent très élevées pour une mise en évidence plus facile des effets, mais des difficultés pour ensuite extrapoler à l'homme et aux faibles doses les résultats observés ;
- les études épidémiologiques qui, grâce aux lois de la statistique, essaient de mettre en relation des effets et des expositions à la pollution. On peut comparer des populations soumises à des niveaux de pollution différents, ou établir sur de longues périodes des corrélations dans une population donnée entre les effets sur la santé et les expositions à la pollution, c'est-à-dire à des concentrations de polluants mesurés dans les réseaux de surveillance, en faisant l'hypothèse que l'exposition est directement reliée aux concentrations mesurées. Les corrélations sont étudiées en considérant séparément les polluants, qui sont considérés alors comme indicateurs de la pollution. Les effets de synergie des différents polluants ne sont pas encore connus. Dans les réseaux de surveillance, quelques polluants

primaires sont mesurés, comme le dioxyde de soufre, les oxydes d'azotes, les particules, le monoxyde de carbone [28].

II-7- L'Organisation mondiale de la Santé et la pollution atmosphérique:

L'OMS s'est penchée relativement vite sur la question de la pollution de l'air puisque, en 1957, son comité d'experts traitant d'assainissement y consacrait une réunion. En 1961, elle faisait paraître un ouvrage collectif important sur le sujet, puis en 1962 un rapport sur l'épidémiologie de la pollution de l'air.

En 1972, elle a pris une part active à la conférence des Nations Unies sur l'environnement à Stockholm.

Elle a mis sur pied de nombreux groupes de travail et comités d'experts et a mis plus de trente publications en rapport avec la pollution atmosphérique. En 1982, son bureau régional de l'Europe patronnait, avec l'international Institute for Applied Systems Analysis, un atelier sur la pollution atmosphérique ambiante, ses effets sanitaires et sa gestion.

En collaboration avec le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), l'OMS organise l'élaboration et la publication de rapports techniques détaillés destinés aux professionnels concernés, sous le titre Critères d'hygiène de l'environnement. Plus de 60 titres parus entre 1976 et 1988 (le plomb, par exemple, est le titre n° 3) [20].

En 1987, le bureau régional de l'Europe annonçait la publication d'un ensemble de directives sur la qualité de l'air qui visent à offrir des indications sur la façon de réduire les effets sanitaires de la pollution de l'air. Elles ont pour but d'informer les responsables de l'élaboration de politiques, qui envisagent diverses possibilités de gestion de la qualité de l'air des différentes parties du monde, des cibles à atteindre [27]. Basées sur un examen des données scientifiques accumulées, les valeurs indicatives concernant les polluants de l'air sont applicables dans toutes les régions de l'OMS

Ces directives relatives à la qualité de l'air sont mises à jour en 1997 puis en 2005 lors de la réunion qui s'est tenue à Bonn, du 18 au 20 octobre 2005.

En l'état actuel des connaissances, les liens observés à court terme entre la pollution atmosphérique et la santé, lors des études internationales, donnent des indications précieuses, mais il faut être prudent quand il s'agit de transposer quantitativement les résultats obtenus par les études réalisées à d'autres niveaux de pollutions et à d'autres situations caractérisées par des sources de pollutions différentes, des facteurs environnementaux spécifiques ou des populations différentes par leurs modes de vie et leurs comportements [20].

III- Pollution atmosphérique et environnement

Outre les effets sur la santé humaine, la pollution atmosphérique intervient dans la physiologie des végétaux et dans les phénomènes de corrosion qui affectent les minéraux constitutifs des constructions humaines.

III-1- Effets sur la végétation

Les végétaux sont exposés de manière durable à la pollution atmosphérique. Ils peuvent être l'objet d'atteintes aiguës telles que nécroses et d'atteintes chroniques telles que troubles de croissance [36]. La figure I.3 schématise les principaux effets des polluants atmosphériques chez les végétaux.

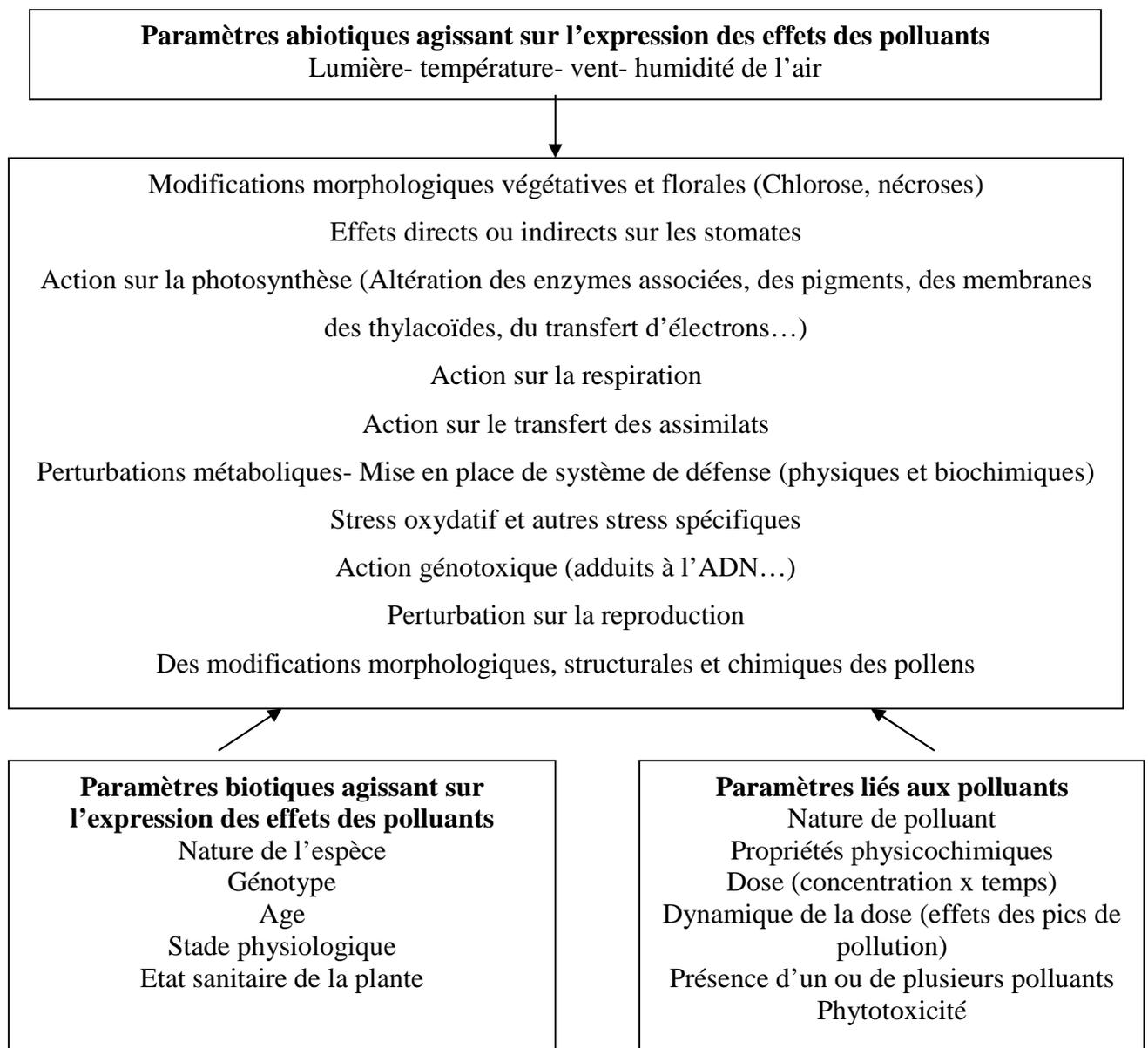


Figure I.3: Les principaux effets des polluants atmosphériques chez les végétaux- Interférence de divers paramètres [36].

III-2- Effets sur les écosystèmes:

Concurremment aux causes naturelles, les pollutions atmosphériques d'origine anthropogénique sont accusées d'être responsables de l'acidification des lacs et de phénomène des "précipitations acides" en Amérique du Nord et en Scandinavie et de "la mort des forêts" en Allemagne et en Europe Centrale.

III-2-1- Précipitations acides

Ce problème connu depuis les années 50 environ, a tout d'abord touché les pays scandinaves. Les gaz acides, SO₂, NO_x et HCl, émis par les sources de polluants atmosphériques, se transforment dans l'atmosphère par oxydation en polluants secondaires, acides sulfuriques, et nitriques, qui, solubilisés dans la pluie, la neige, le brouillard ou la rosée, retombent et se déposent sur la végétation, les sols, les matériaux des monuments et des constructions [37].

Les pluies acides ont des effets sur les eaux, le sol, la végétation et les matériaux. Le PH d'une eau de pluie pure est de 5,6 environ; celui mesuré dans les pluies acides européennes est compris entre 4 et 4,5.

III-2-2- Acidification des lacs et des cours d'eau

L'acidification des pluies est apparue comme un phénomène très variable dans le temps et dans l'espace; on constate, dans les pays dont les sols granitiques et siliceux d'origine primaire sont peu épais et à réaction essentiellement acides (Scandinaves, Canada, Ecosse, etc.), une chute du pH des cours d'eau et des lacs. Les zones concernées sont souvent relativement éloignées des sources de polluants, il s'agit donc de transport de pollution à très longues distances.

L'acidification des eaux continentales se traduit par un abaissement de leur pH. Ceci engendre des perturbations de l'écosystème aquatique. Les symptômes les plus souvent signalés sont les suivants:

- Appauvrissement des lacs en plantes et animaux aquatiques
- Prédominance de quelques espèces acidophiles
- Disparition progressive, voire complète des poissons (truites et saumons en particulier)
- Réduction ou disparition des amphibiens
- Modification du phytoplancton et du zooplancton ainsi que les communautés benthiques

- Substitution de champignons aux bactéries de décomposition

Un abaissement brutal de PH se produisant à l'époque de reproduction des poissons et des amphibiens (stades vulnérables: œufs et embryons), entraîne leurs mort ou des déformations du squelette chez les poissons et les amphibiens.

III-2-3- La mort des forêts:

Si c'est l'acidification des lacs et cours d'eau qui a mis en lumière le problème des transports de polluants à longue distance, les dommages forestiers ont été à l'origine d'une prise de conscience généralisée et médiatique du problème de la pollution atmosphérique. Les dégâts apportés aux forêts par la pollution industrielle ne sont pas un phénomène nouveau: à proximité des usines chimiques de la Maurienne dans les Alpes et de Pierrefitte dans les Pyrénées, les dégâts apportés à la flore par les émissions d'acide fluorhydrique provenant du traitement des minerais d'aluminium ont été constatés depuis longtemps. De même en Bohême, dans le sud de la Pologne où des lignites à fortes teneurs en soufre alimentent les centrales industrielles, des forêts entières ont disparu (plus de 500000 hectares en Tchécoslovaquie).

Cependant, des atteintes aux arbres se sont manifestées sur des forêts très éloignées des sources émettrices d'atmosphères polluées, industrielles ou urbaines, à tel point que les arbres poussant en ville se trouvent en meilleur santé que les forêts des massifs montagneux de l'Europe Occidentale et Centrale (Forêt noire, Vosges, Harz, etc.). Comme pour l'acidification des lacs, les transports des polluants ont été mis en cause.

En forêts, l'action des retombées est fortement augmentée par l'effet de filtre qui retient les polluants et provoque ainsi une accumulation de produits toxiques dans le feuillage et dans le sol. L'eau de pluie ruisselant à l'intérieur des forêts présente un pH inférieur à celui des pluies en terrain découvert. La base du tronc est ainsi fortement atteinte. L'augmentation de l'acidité des sols peut entraîner des lésions aux racelles et se répercuter sur l'activité des micro-organismes. 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; le cas des abricotiers est bien connu.

III-4- Effets des précipitations sur les matériaux

Les bâtiments et leurs matériaux constructifs ont de tout temps subi les outrages du temps et les conditions atmosphériques, liées à la fois à l'état physique de l'atmosphère et sa composition chimique. Les poussières sont un facteur physique de dégradation des

monuments; les salissures appliquées sur les façades proviennent des particules transportées par l'air et déplacées par le trafic. Dans les grandes métropoles, les moteurs Diesel sont aujourd'hui les sources premières des particules salissantes. La nature huileuse et adhésive de ces particules Diesel accroissant leur pouvoir salissant.

Les salissures ont aussi un pouvoir de rétention des polluants apportés par les pluies, ce qui favorise ainsi les attaques chimiques.

Bien que les phénomènes de corrosion des pierres d'œuvre apparaissent également dans les climats secs, se sont surtout les effets physiques de l'eau qui sont amplifiés lorsqu'elle est acidifiée par les polluants NO_2 et SO_2 [5].

Le calcaire se transforme en sulfates de calcium ou en nitrates; ces composés plus solubles dans l'eau que le carbonate de calcium de départ, migrent en surface à la faveur des dissolutions- cristallisations [38]. Par mélange avec des silicates, se forment en surface des couches plus dures qui adhèrent mal au support sous- jacent. Ces croûtes de "calcin" finissent par tomber.

Dans le cas de béton, c'est la dissolution de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ par la pluie acide qui intervient pour former des efflorescences. Le CO_2 atmosphérique transforme peu à peu l'hydroxyde en carbonate et réduit la résistance du béton aux effets acides.

III-5- Effet sur la visibilité atmosphérique:

Le dernier effet de la pollution atmosphérique sur l'environnement concerne les conséquences sur la visibilité. C'est un constat qu'il est aujourd'hui pratiquement impossible d'apercevoir la Voie Lactée dans le ciel des grandes villes.

La visibilité est en relation directe avec la clarté de l'atmosphère et sa décroissance tend à mettre en péril nombre de sites touristiques.

Même si des causes naturelles peuvent réduire la visibilité, leurs effets ne sont pas permanents comme tendent à l'être les causes d'origine anthropogène.

Les industries émettrices de poussière (sidérurgie, cimenteries, centrales thermiques, etc) contribuent à la charge atmosphérique en particules diffractant la lumière, le trafic Diesel est également un facteur important d'obscurcissement.

Aussi, la pollution photochimique contribue aux baisses de la visibilité dans l'atmosphère par les particules fines qu'elle génère [18].

III-6- Effets de quelques polluants sur l'environnement

➤ Effet du CO sur l'environnement

La réactivité atmosphérique du CO évite son accumulation au cours du temps: les radicaux OH- l'oxydent en CO₂ suivant la réaction (13).



La libération de CO dans l'atmosphère appauvrit donc celle-ci en OH, le principal agent purifiant l'atmosphère. Aussi, il contribue au phénomène de l'effet de serre en participant au mécanisme de formation de CO₂ [10].

➤ Effet des oxydes d'azote sur l'environnement

Les gaz acides comme les oxydes d'azote se transforment dans l'atmosphère par l'oxydation en polluants secondaires, acides nitriques (NO₃), qui, solubilisés dans la pluie (l'acidification des pluies), la neige, le brouillard ou la rosée, retombent et se déposent sur la végétation, les sols et les matériaux des monuments et des constructions. Le NO₂ intervient également dans la formation d'ozone et de PAN [5].

➤ Effet de SO₂ sur l'environnement

L'anhydride sulfureux pénètre dans les feuilles principalement par les stomates. Il peut occasionner des blessures. Les symptômes se manifestent sous forme de lésions apparentes sur les deux faces des feuilles, habituellement entre les nervures et occasionnellement sur le pourtour des feuilles.

En dehors de sa toxicité proprement dite, le SO₂ est surtout nocif en tant que précurseur du SO₃ et de H₂SO₄ dans les interactions atmosphériques. Ainsi le SO₂ est le facteur majeur responsable des précipitations acides [17].

➤ Effets des COV

Les effets toxiques et les nuisances qui résultent des COV atmosphériques varient considérablement en fonction de leur nature et de leurs concentrations, des conditions d'exposition et des cibles biologiques concernées. Il s'agit d'effets létaux ayant pour conséquence la disparition brutale de populations. Le plus souvent des effets sublétaux sont observés (inhibition de la croissance, inhibition de la reproduction, perturbation du comportement, effets génotoxiques) conduisant à des modifications progressives de la structure et du fonctionnement de l'exposition.

Pour les COV, la surface foliaire est un bio-accumulateur de ce type de produit. Ainsi des méthodes par bio-indicateur, comme l'espèce de lichens (*Parmelia sulcata*) utilisée dans la région grenobloise, sont mises au point, pour estimer l'impact de ces pollutions aux abords d'autoroutes, d'aérodromes et de stations service [12].

➤ **Effets des particules**

Pour l'environnement, les particules contribuent aux salissures des édifices et des monuments. Pour la visibilité atmosphérique et le climat, les particules contribuent à l'augmentation et de la diffusion de la lumière solaire incidente et l'absorption de rayonnement (tendance au réchauffement) [9].

➤ **Effet du plomb**

Le plomb se dispose sur les plantes, y provoquant ainsi des nécroses, défoliations et même la mort des plantes [5].

➤ **Effet de l'ozone**

Les dommages causés par une concentration excessive d'ozone sur la végétation se matérialisent par des perturbations du métabolisme et de la photosynthèse des plantes, des rendements des cultures, des nécroses foliaires. De très nombreuses cultures semblent touchées mais aussi la végétation "naturelle" [17]. En outre, l'ozone troposphérique contribue également à augmenter l'effet de serre, en filtrant le rayonnement ; l'ozone absorbe dans l'Infra- Rouge avec un coefficient 2000 fois plus important qu'une molécule de CO₂ [18]. La part de l'ozone dans l'effet de serre additionné, sur l'ensemble de la planète est estimée à 18% [5].

➤ **Effet de PAN**

Bien que chaque polluant atmosphérique ait un effet spécifique, ce sont surtout les oxydants photochimiques (ozone et PAN) qui sont agressifs et dangereux pour les végétaux. Les PAN représentent de redoutables contaminants de l'air au plan éco toxicologique. Ils possèdent une très forte toxicité pour les végétaux dont ils attaquent le parenchyme palissadique des feuilles. Les seuils de phytotoxicité des PAN pour les plantes sont très faibles, de l'ordre voire inférieur à la ppb.

Le tableau I.2 rassemble les principaux polluants de l'air, leurs sources et leurs effets.

Tableau I.2 : Principaux polluants atmosphériques, leurs sources et leurs effets

Polluant	Sources principales	Effets sur la santé	Effets sur l'environnement
Monoxyde de carbone (CO)	Installations de combustion, transports, chauffage domestique.	Atteinte du système nerveux central et des organes sensoriels.	Contribue indirectement à l'effet de serre
Oxydes d'azote (NO _x)	Industries de combustion, transports et installations thermiques.	Irritations de l'appareil respiratoire, crises d'asthme et bronchiolite.	Contribuent à la formation d'ozone troposphérique et des pluies acides.
Dioxyde de soufre (SO ₂)	Industries (installations thermiques, raffineries).	Irritant respiratoire, contribue à l'exacerbation des troubles bronchiques.	Toxique pour les végétaux, contribue aux pluies acides.
Composés organiques volatils (COV)	Combustion, usage et évaporation des solvants et carburants industriels	Irritant des yeux et des poumons, peuvent engendrer des bronchites par intoxication chronique. A long terme, ils seraient responsables de cancers	Effets létaux et sublétaux sur les populations.
Particules	Véhicules (en particulier diesel) et combustion de certaines industries	Irritant très actif par altération des fonctions respiratoires, crises d'asthme avec à long terme des bronchites chroniques.	Salissures des édifices et des monuments et effet sur la visibilité atmosphérique et le climat
Plomb	Véhicules (en particulier essence) et les fonderies	effet sur le système nerveux central, effet sur la reproduction, effets rénaux, effet sur le système cardio-vasculaire.	Provoque des nécroses, défoliations et même la mort des plantes
Ozone	Polluant secondaire formé suite à des réactions chimiques entre COV et NO _x en présence de rayons ultraviolets	Polluant irritant des yeux de la gorge et des poumons, peut altérer la fonction respiratoire et la résistance aux infections.	Perturbations du métabolisme et de la photosynthèse des plantes, des nécroses foliaires et contribue à l'effet de serre
Peroxy-acyl-nitrates (PAN)	Polluant secondaire formé suite à des réactions chimiques entre COV et NO _x en présence de rayons ultraviolets.	action sur les voies, respiratoires, action cutanée, troubles sensoriels et céphalées, irritations des yeux, propriétés cancérogènes	Ils possèdent une très forte toxicité pour les végétaux dont ils attaquent le parenchyme palissadique des feuilles

Source: Mois même

Conclusion

Dans ce chapitre sont présentés les différents composés chimiques intervenant dans la pollution atmosphérique en cherchant à identifier et à quantifier, quand c'est possible, les différentes activités humaines responsables des émissions correspondantes. Le trafic automobile apparaît comme un facteur important surtout pour les émissions de CO, NO_x et les COV.

Nous avons indiqué les conséquences néfastes que la pollution atmosphérique peut avoir sur la santé de l'homme en donnant les valeurs limites indiquées par l'OMS pour la concentration de certains de ces composés chimiques.

Nous avons résumé les effets qu'engendrent ces derniers sur l'environnement en décrivant les symptômes observés et les causes possibles des dégâts constatés (le cas de l'acidification des eaux continentales, au début des années 1970, au Canada, au Etats –Unis et en Scandinavie qui a conduit les populations de poissons de ces eaux à la diminution).

Le prochain chapitre abordera les mécanismes de formation de la pollution atmosphérique d'origine automobile, la réglementation des émissions automobiles et le rôle du progrès technique dans la réduction de cette pollution.

CHAPITRE II

La pollution atmosphérique d'origine automobile

Introduction

Le développement durable (DD) est un concept qui a été défini en 1987, suite au rapport Brundtland, comme étant : « Un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre ceux des générations futures » [39]. De nos jours, on ne peut aborder les enjeux du développement durable sans aborder les politiques de transport, particulièrement dans les grandes agglomérations qui posent de réels défis à tout développement harmonieux des villes. En effet, en milieu urbain la divergence croît entre la dispersion de l'habitat et la mobilité d'une part, et la bonne volonté de protection de l'environnement par la limitation de la pollution atmosphérique et sonore, de la congestion et des émissions de gaz à effet de serre (GES), d'autre part.

Une analyse sur l'ensemble des impacts de transport sur l'environnement permet de définir le concept de chaîne de causalités, de la source à l'impact final. Les paramètres en sont: le type de source (construction de l'infrastructure, production du véhicule, production et distribution de l'énergie, trafic, et destruction du véhicule et de l'infrastructure), le processus lui-même décrit à travers les principales disciplines scientifiques impliquées, les échelles de temps et de distance de la source aux impacts finaux, le type de cible finale (nature : ressources et écosystèmes; hommes : santé au sens restreint et bien-être ; patrimoine anthropique ; terre couvrant toutes les autres cibles) [40].

La circulation automobile suscite une inquiétude croissante dans beaucoup de pays, parce que les moteurs émettent des composés nuisibles à la biosphère. Ainsi le transport est actuellement un des secteurs les plus importants d'émission de polluants. Ces polluants sont un mélange très complexe constitué de substances chimiques dont la composition varie considérablement en fonction du carburant, du type de moteur, de l'âge du parc des véhicules et de l'intensité du trafic.

I- Formation des polluants d'origine automobile

Au moment où l'effet de serre est une des préoccupations majeures pour la planète, le moteur thermique est un atout décisif pour ce genre de pollution.

I-1- Les moteurs automobiles et la pollution engendrée

Du point de vue thermodynamique, le moteur est un réacteur chimique qui, par la combustion, transforme l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique recueillie sur l'arbre du moteur. Pour la formation des polluants, le moteur peut être assimilé à un ensemble de réacteurs chimiques, en parallèle ou en série, constitué des chambres de combustion (sur

un moteur polycylindre) et du système d'échappement, lui-même constitué de plusieurs chambres dont certaines peuvent être des réacteurs catalytiques.

En ce qui concerne les motorisations, les principaux facteurs influençant les émissions sont:

- la richesse du mélange air combustible : Le fonctionnement d'un moteur près de la stoechiométrie défavorise la production d'imbrûlés. Il est donc moins polluant.
- la puissance du véhicule : La quantité de polluants est proportionnelle à la puissance nominale en kW.
- la qualité de carburant.

La nature des produits de réaction, donc des polluants, va dépendre non seulement des réactifs de départ (type de carburant, richesse du mélange carburé), mais encore du processus de combustion : allumage commandé avec l'essence, allumage par compression avec le gazole. Les conditions d'ambiance rencontrées au cours et après la combustion (variations de volume, transferts de chaleur, transferts de masse, etc.) vont influencer fortement sur les mécanismes complexes conduisant à la formation des polluants.

I-1-1- Les véhicules à essence :

La combustion parfaite des carburants, composés uniquement de carbone et d'hydrogène, n'engendrerait que CO₂ et H₂O. Mais la durée très faible laissée aux processus chimiques d'oxydation pour s'accomplir au sein des chambres de combustion, les défauts d'homogénéité des mélanges carburés, l'hétérogénéité et les variations rapides de température ne permettent jamais d'atteindre l'équilibre thermodynamique idéal ; cela entraîne la présence à l'échappement de produits de combustion incomplète (HC) très élevé chez ce genre de moteurs.

Le moteur à essence fonctionne en mélange riche à pleine charge et au démarrage lors de l'utilisation du starter ; dans ces conditions, les émissions de CO sont significatives.

Dans ces types de moteur, les particules ont trois origines distinctes : le plomb des carburants plombés, les sulfates issus du soufre des carburants et la suie. Avec les carburants plombés, les émissions particulaires, qui sont de l'ordre de 100 à 150 mg/km pour une essence à 0,15 g/L de plomb, contiennent 25 à 60 % de leur masse sous forme de plomb. Ce type de particules se forme par condensation des sels de plomb émis à l'échappement ; on observe ainsi que les véhicules à essence plombée et non plombée émettent respectivement 6 et 20 fois moins de particules que les véhicules Diesel correspondants. Les émissions de *suie*

sont anormales dans le cas des moteurs à allumage commandé bien réglés, car elles ne se produisent que dans le cas de mélanges carburés excessivement riches [10].

I-1-2- Les véhicules Diesel:

Parmi les différents types d'automobiles, ce sont les véhicules Diesel qui gagnent du terrain grâce à leur robustesse, leur longévité, leur fiabilité et surtout pour leur bon rendement énergétique. Cependant le Diesel a des inconvénients qui consistent à l'émission des particules (suie, hydrocarbures imbrûlés) et des oxydes d'azotes NO_x [41].

Les problèmes environnementaux s'en trouvent aggravés, puisque le diesel contient 10 fois plus de soufre que l'essence et émet 50 fois plus de particules. Certes, il émet moins d'oxyde de carbone et d'hydrocarbures qui sont des polluants atmosphériques importants [42].

On peut alors conclure que les émissions sont très dépendantes du type de carburant du véhicule : les moteurs à essence émettent davantage de CO et d'HC alors que les moteurs diesel sont responsables de la majeure partie des émissions de NO_x et PM du secteur des transports. Mais, les polluants émis par les moteurs à combustion interne sont les mêmes quel que soit le type de combustion envisagé. Seules les quantités relatives émises varient avec le type de moteur, sa conception, sa géométrie interne et les conditions de fonctionnement.

I-2- Origine des polluants automobiles:

Pour les véhicules équipés de moteurs à essence les polluants proviennent des gaz d'échappement, des gaz de respiration du carter, de la ventilation des hydrocarbures présents dans le réservoir ou du rejet d'hydrocarbures par le carburateur (élévation de la température sous le capot lors de la demi-heure qui suit l'arrêt du moteur). Les émissions polluantes des véhicules à moteur diesel ne proviennent quant à elles que des gaz d'échappement. Le fonctionnement normal du moteur à essence conduit à émettre une quantité d'imbrûlés tandis que le moteur Diesel émet, lors du fonctionnement en surcharge, des suies provenant du craquage des vapeurs de gazole ou des imbrûlés liquides.

Donc, d'une manière générale, les polluants atmosphériques émis par les moteurs à combustion interne peuvent avoir trois origines :

- les gaz de ventilation de carter,
- les pertes par évaporation,
- les gaz d'échappement qui constituent la source principale de pollution.

I-2-1- Les gaz de ventilation de carter

Ils proviennent des défauts d'étanchéité de la segmentation en tête de piston, sont constitués d'un mélange d'air carburé (environ 80 %) et de gaz d'échappement.

Riches en hydrocarbures, ces gaz, primitivement rejetés directement à l'atmosphère par un évent sur le carter, sont actuellement obligatoirement recyclés à l'admission du moteur. Ils ont été les premiers à être réglementés et leur contribution autrefois importante (de l'ordre de 25 % des hydrocarbures émis) est actuellement négligeable.

I-2-2- Les pertes par évaporation

Elles sont liées à la volatilité des carburants et sont essentiellement le fait des moteurs à essence. Les pertes d'essence ont pu être estimées à au moins 0,8 g/km parcouru ou environ 7,4 g/jour/véhicule. On distingue sur le véhicule :

- les pertes en fonctionnement lorsque le véhicule effectue un parcours routier ;
- les pertes journalières, dues à la respiration du réservoir par suite des variations journalières de la température ;
- les pertes à l'arrêt à chaud, sur un véhicule en stationnement, moteur coupé après une période de marche, au moment où la tuyauterie, le réservoir, la cuve de carburateur sont surchauffés par le moteur encore chaud.

Ces pertes sont amenuisées sur les véhicules récents par des circuits de récupération de vapeurs qui les stockent temporairement sur des cartouches de charbon actif.

À ces pertes sur véhicules s'ajoutent les pertes au remplissage par éclaboussures (environ 0,13 g/litre chargé) et évacuation à l'air libre des vapeurs saturantes contenues dans l'espace gaz du réservoir en cours de remplissage (environ 1,2 g/litre chargé). Les pertes au remplissage font aussi l'objet de la mise en place de dispositifs récupérateurs (pistolets de remplissage étanches et à récupération de vapeur) [11].

I-2-3- Les gaz d'échappement

Les gaz d'échappement constituent la source principale de pollution. Ils sont à l'origine de la majorité des hydrocarbures émis par l'automobile et de la totalité des autres polluants. L'entrée en vigueur des normes anti-pollution, l'amélioration des moteurs tendant à limiter leurs émissions et la mise en place de systèmes de post-combustion (pots catalytiques) réduisent progressivement les émissions unitaires des véhicules et la pollution correspondante diminuera si le nombre de véhicules en circulation n'augmente pas simultanément [9].

Le tableau II.1 présente la composition des principaux gaz d'échappement des véhicules routiers.

Tableau II.1: Composition des gaz d'échappement des véhicules routiers [9].

Polluant (% de)	Moteur essence			Moteur Diesel		
	max.	min.	moyenne	max.	min.	moyenne
CO ₂	15,0	2,7	9,0	13,8	0,7	9,0
CO	13,5	0,2	4,0	7,6		0,1
O ₂	17,4	0	4,0	20	0,5	9,0
H ₂	5,8	0	2,0	2,5	0	0,03
HC	4,0	0	0,5	0,5	0	0,02
Aldéhydes	0,03	0	0,004	0,0037	0	0,002
NO _x	0,20	0	0,06	0,15	0	0,04
SO ₂	0,008	0	0,006	0,03	0,01	0,02

I-3- Influence du cycle de conduite sur les émissions de polluants

Plusieurs familles de cycles de conduite représentatifs des conditions normales d'utilisation et de fonctionnement des véhicules ont été développées et sont utilisées pour la mesure des émissions de polluants. Ces familles correspondent à différents stades d'évolution de la méthode d'analyse et à différentes bases de données à partir desquelles ils ont été construits.

L'objectif de ces cycles est clairement la description représentative des conditions d'utilisation des véhicules dans leur diversité. Le cycle de conduite influe sur les émissions à froid et à chaud.

I-3-1- Influence du cycle de conduite sur les émissions à froid

Définie comme 'distance à froid' la distance après départ à froid nécessaire pour que l'émission se stabilise autour de sa valeur à chaud. Cette distance varie selon le polluant et le type de véhicule, et varie assez fortement aussi avec la vitesse moyenne. Cependant elle est en première approximation proche de 6 km [43].

Les démarrages à froid pour les moteurs sensibles aux températures, sont la cause d'une plus grande émission de HC et de HAP [44].

I-3-2- Influence du cycle de conduite sur les émissions à chaud

Les émissions de polluants étant très variables d'un véhicule de même catégorie à un autre, et pour un même véhicule d'un moment à un autre.

Pour une même classe de véhicules, les émissions unitaires à chaud sont très différentes d'un cycle à un autre.

La vitesse moyenne du cycle explique sans aucun doute une grande part de ces différences, selon la conclusion du récent état de l'art européen en matière d'émissions des transports. Mais pour une même vitesse moyenne, des écarts importants demeurent.

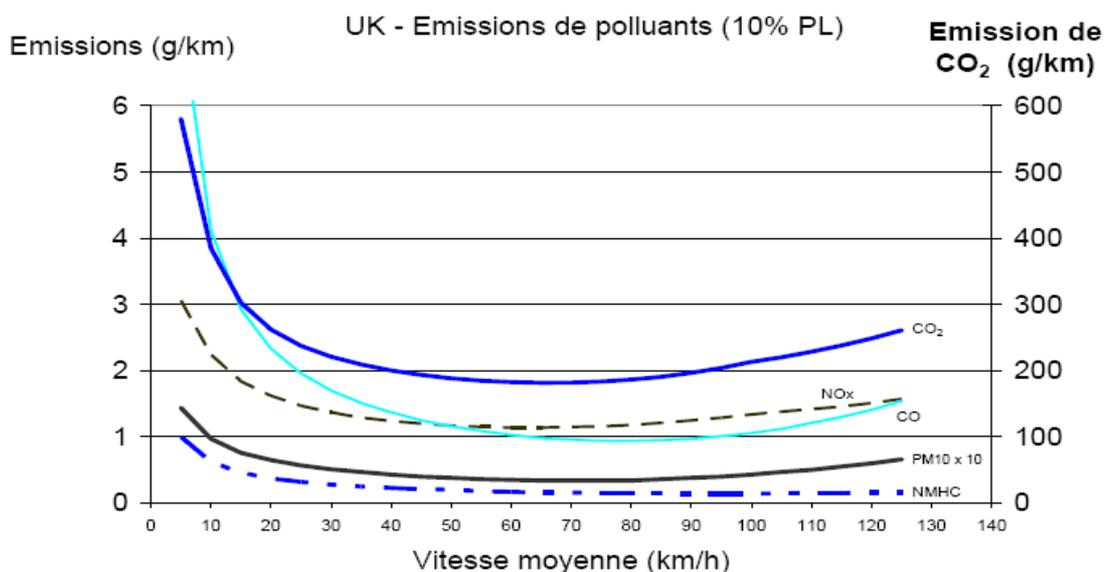
Donc les émissions unitaires sont des fonctions croisées de plusieurs paramètres : classe de véhicule, vitesse moyenne du cycle, charge notamment [43].

I-3-2-1- Influence de la vitesse moyenne

La vitesse d'un véhicule a des incidences importantes sur l'environnement car elle est étroitement corrélée aux émissions de gaz à effet de serre et de polluants locaux, ainsi qu'à l'augmentation de la consommation de carburant.

L'augmentation des vitesses de circulation accroît les émissions de polluants en particulier les oxydes d'azote. Le trafic autoroutier est ainsi à l'origine d'une grosse partie des émissions de dioxyde d'azote [18].

Comme le montre la figure II.1, la vitesse optimale, c'est-à-dire la vitesse à laquelle les émissions sont réduites au minimum, varie selon le type d'émission. De manière générale, les émissions sont optimisées à une vitesse constante de 40 à 90 km/h. L'ozone, qui provient de réactions chimiques faisant intervenir les hydrocarbures, les oxydes d'azote et la lumière solaire, subit l'influence des émissions des véhicules et donc de la vitesse [45].



Source : UK Department for Transport.

Figure II.1: Emission de gaz en fonction de la vitesse (Royaume Uni 2005) [45].

Il est par conséquent souhaitable, dans le cadre des campagnes d'information pour le respect des limitations de vitesse, d'informer la population que la limitation de vitesse a un rôle essentiel sur la sécurité routière mais aussi sur la qualité de l'air.

I-3-2-2- Influence de la charge

L'influence de la charge reste faible pour les émissions gazeuses (-2 à -7 % selon le polluant), tandis qu'elle est plus marquée pour les particules (-20 %).

Globalement, la charge conduit à une diminution de CO, HC et particules, et à une augmentation des émissions de NO_x et CO₂.

I-3-2-3- Émission selon la catégorie de véhicule

Les différences entre catégories de véhicule, qui sont hétérogènes en termes de norme d'émissions, sont notables.

La sévèrisation des normes d'émissions (et l'évolution des véhicules eux-mêmes) s'est traduite par une diminution des émissions de CO, HC et particules, une stabilité des émissions de NO_x, et plutôt par une augmentation des émissions de CO₂ [46].

II- Normes internationales Anti-pollution des Véhicules Essence et Diesel

La pollution de l'air constatée au début des années 50 dans les grandes villes américaines, européennes et japonaises, a poussé les gouvernements respectifs à mettre en place les structures appropriées pour pouvoir contrôler et limiter les émissions de gaz jugés nocifs à travers des réglementations adaptées aux conditions spécifiques de chaque pays ou région, ce qui représente une des possibilités de protection et d'amélioration de l'environnement.

II-1- Procédures d'essais réglementaires

Pour pouvoir contrôler l'application des règlements dans des conditions de mesure les plus reproductibles possibles, il a été nécessaire de concevoir des procédures standardisées de roulage des véhicules à vérifier, associées à des méthodes d'analyse également réglementées. Les mêmes cycles sont généralement utilisés pour mesurer la consommation spécifique des véhicules. Ils correspondent à un déroulement de vitesses en fonction du temps réalisé sur banc à rouleaux [47].

Depuis 1982, les méthodes de prélèvement et d'analyse des gaz d'échappement sont identiques pour tous les pays. Elles utilisent la procédure de prélèvement des gaz

d'échappement dilués par l'air atmosphérique, à volume constant, appelée méthode C.V.S (Constant Volume Sample), (figure II.2).

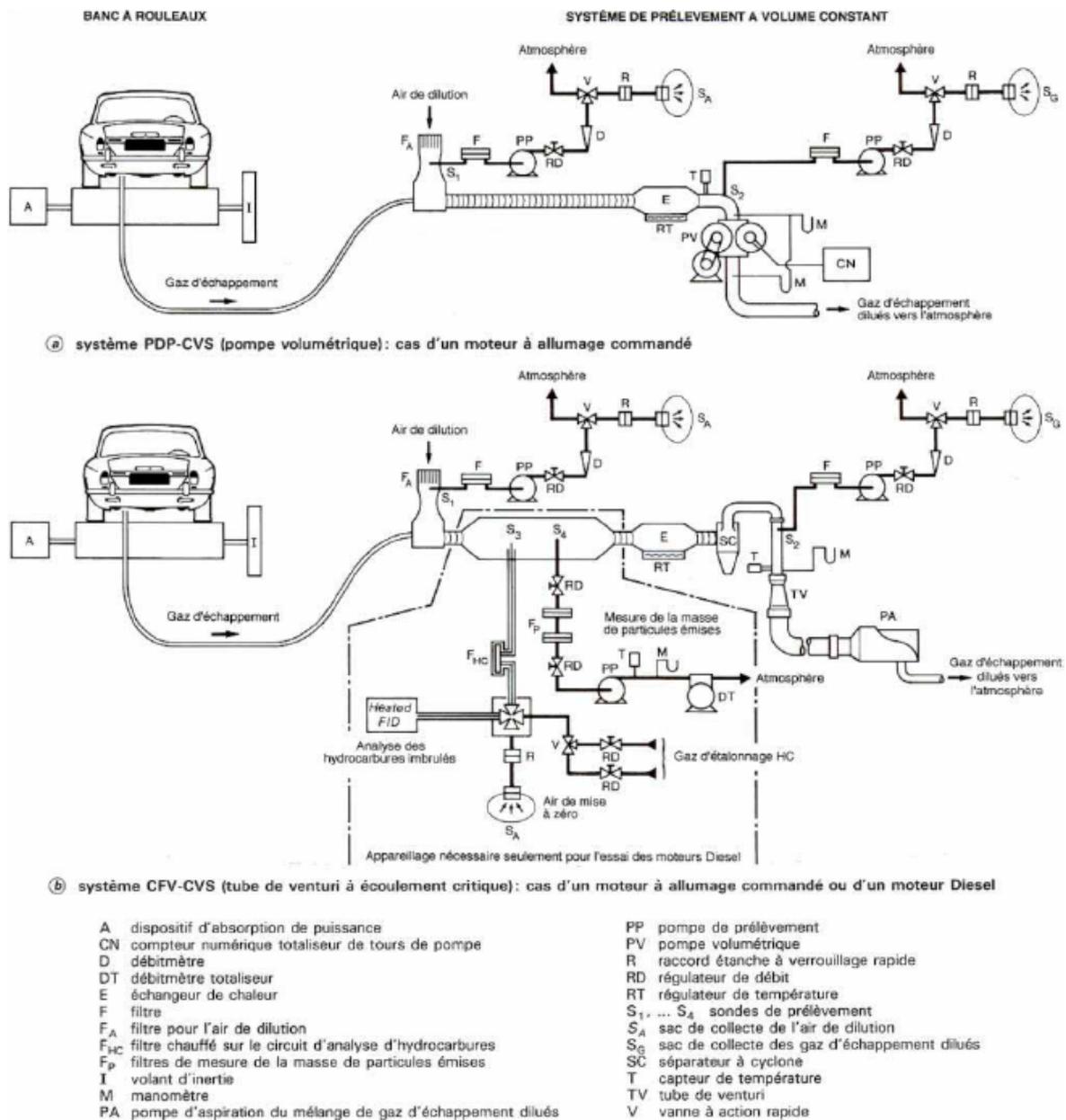


Figure II.2: Schéma de principe d'une installation de contrôle des polluants [11].

Les teneurs des gaz sont mesurées par les analyseurs suivants :

- La concentration de CO₂ et CO est mesurée par un analyseur non dispersif à absorption dans l'infrarouge, appelée **analyseur NDIR**.
- La concentration de HC est mesurée par un analyseur à détection par ionisation de flamme, appelé **analyseur FID**, fonctionnant à une température de 190°C.

- La concentration des NO_x est mesurée par un analyseur à chimiluminescence, **analyseur CLI**, raccordé à un convertisseur NO_x/NO.
- La mesure des émissions de particules n'est effectuée que sur les véhicules à moteur diesel [47].

Malheureusement, jusqu'à présent, aucune unanimité ne s'est faite pour adopter des procédures universellement appliquées et on se trouve en présence de plusieurs types de cycles d'essai, qui sont résumés dans le tableau II.2, et pour lesquels il n'existe pas de corrélation permettant de passer de l'un à l'autre.

Tableau II.2: Paramètre comparés des cycles de conduite [5].

Paramètres	ECE	EUDC	FTP 72	FTP 75	Japon	Japon
Vitesse moyenne (km/h)	18,7	62,6	31,5	34,1	22,7	30,6
Vitesse moyenne (hors ralenti) (km/h)	27,1	69,55	38,3	41,6	33,1	39,1
Accélération moyenne (m/s ²)	0,75	-	0,60	0,67	0,54	0,64
Décélération moyenne (m/s ²)	0,75	-	0,70	0,71	0,65	0,60
Durée moyenne d'une séquence de roulage. (s)	45	360	66	70	50	94
Nombre moyen de changements accélération-décélération et vice versa pendant une séquence	1	2	5,6	6	2	5
Ralenti (% temps)	30,8	11	17,8	18,0	31,4	21,7
Accélération (% temps)	18,5	29	33,5	33,1	24,4	34,2
Vitesse constante (% temps)	32,3	53	20,1	20,4	23,7	13,3
Décélération (% temps)	18,5	7	28,6	28,5	20,5	30,8

II-2- Normes américaines, européennes et japonaises

II-2-1- Législation américaine de contrôle des émissions des véhicules particuliers

Sous la pression du lobby de l'industrie automobile, le gouvernement américain a su trouver des moyens juridiques pour protéger son industrie automobile de toute concurrence étrangère. Les mouvements écologiques ont également contribué dans l'accélération de l'application des mesures réglementaires dans la lutte contre la pollution de l'air. Aux Etats Unis, le Clean Air Act of the Federal Register représente la référence en matière des normes de contrôle des émissions de polluants dues aux sources mobiles ou stationnaires. En 1970 a été fondée l'agence américaine de protection de l'environnement (Environmental Protection

Agency : EPA), dont la mission est la coordination de l'ensemble des activités destinées à la protection de l'environnement entre les différents ministères ou départements du gouvernement américain.

II-2-1-1- Test d'homologation selon le cycle FTP75 (US-TEST 75) et valeurs limites des émissions

Le premier cycle urbain de conduite adopté était le cycle californien (California Cycle) qui a été introduit en 1966 en Californie. Ce cycle fut remplacé en 1972 par le cycle FTP72 (Federal Test Procedure), appelé aussi cycle LA-4 ou cycle US-City et en 1975 lui succéda le cycle FTP75, qui comporta d'autres phases. Les Figures II.3.a et II.3.b montrent l'évolution marquante des limites des émissions des gaz d'échappement pour les 49 états (normes fédérales) et pour l'état de Californie (normes Californiennes).

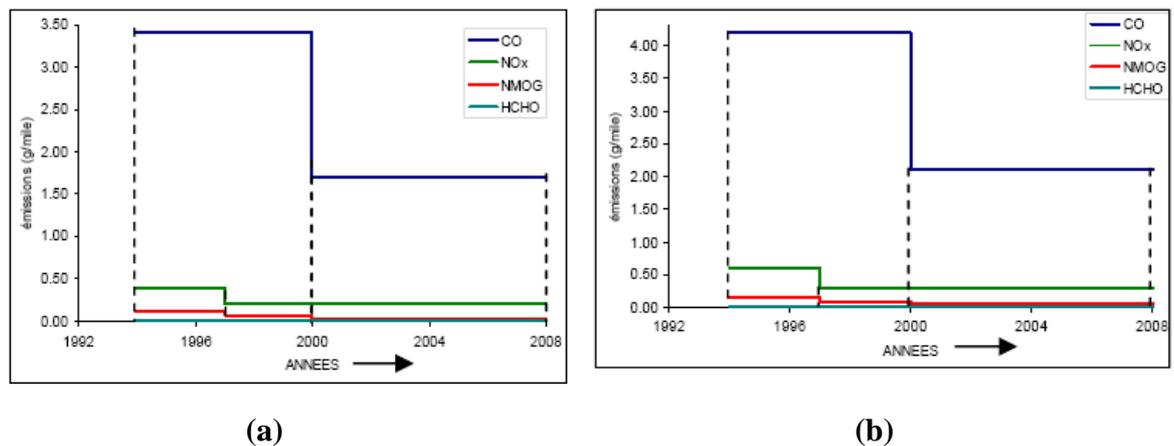


Figure II.3: Evolution de la législation américaine fédérale (49 états) (a) et californienne (b) pour les véhicules légers essence et diesel. Valeurs limites (en g/mile) des émissions de polluants par l'échappement à partir de 1994. Les valeurs limites données sont valables aussi pour le test de durabilité de 50000 miles [47].

II-2-1-2- Introduction de valeurs limites d'émissions d'hydrocarbures imbrûlés sans méthane (NMHC) et des gaz organiques sans méthane (NMOG)

L'utilisation de carburants propres (par exemple le méthanol, l'éthanol, l'hydrogène ou l'énergie électrique) nous amène à considérer le classement des voitures dites à carburant propres suivant la quantité émise de polluants et le calendrier d'application:

TLEV: En 1994 fut introduite la catégorie dite Transitional Low Emission Vehicles

LEV : En 1997, la catégorie des véhicules ayant des valeurs limites basses « Low Emission Véhicules».

ULEV: L'introduction de la catégorie ULEV (Ultra Low Emission Vehicles) débuta en 1997, mais elle n'est devenue obligatoire qu'à partir de l'année 2000.

ZEV: La catégorie ZEV (Zéro Emission Véhicules) est un projet de la CARB (California Air Resources Board) qui prévoyait à partir de 1998 une émission nulle de NMOG en commençant avec 2 % de la flotte automobile américaine.

Cette valeur limite nulle devrait être réalisée en 2001 par 5 % et en 2003 par 10 % de la flotte automobile.

II-2-2- Réglementation Européenne

La directive 70/220/CEE de limitation des émissions des véhicules adoptée en 1970 a été modifiée plus de 12 fois au cours des 30 dernières années. La figure II.4 illustre l'évolution des valeurs limites imposées par les réglementations et directives successives européennes et leur calendrier d'application pour les voitures à essence et diesel. Actuellement les pays européens appliquent parallèlement les nouvelles normes européennes et américaines pour des raisons d'exportation de leurs véhicules vers l'Amérique du nord et les pays du groupe de Stockholm.

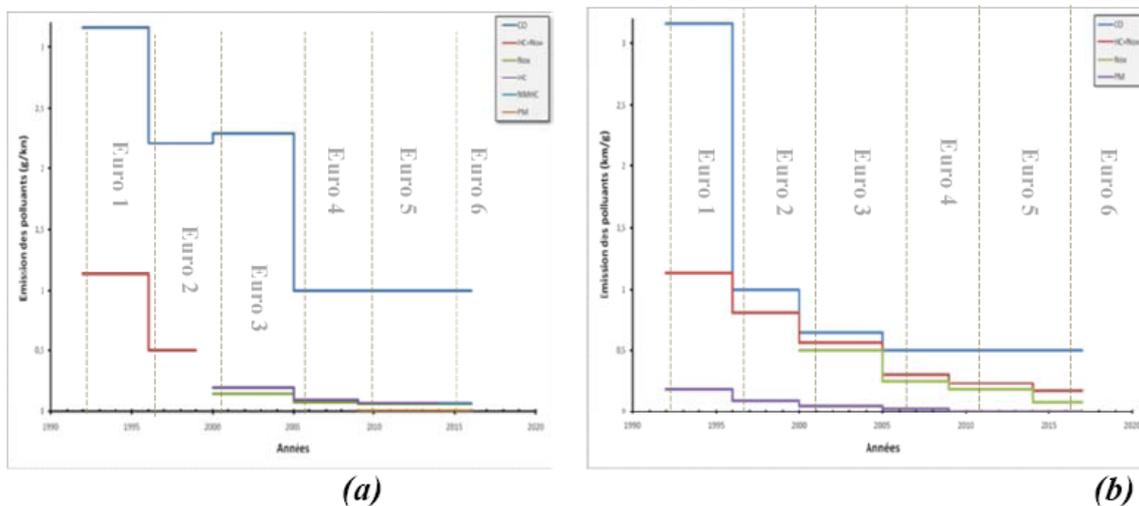


Figure II.4: Valeurs limites d'émissions des polluants des véhicules légers suivant l'essai du type I Cycle ECE départ à froid Directive 88/76/CEE (a) Moteurs Essence, (b) Moteurs Diesel [47].

Le tableau II.3 résume les normes européennes appliquées à la composition des carburants.

Tableau II.3: Normes européennes appliquées à la composition des carburants [9].

	Essence		Gazole	
	Soufre	Teneur en benzène	Soufre	Teneur en benzène
Normes antérieures	500 ppm	5%	500 ppm	49
Normes 2000	150 ppm	1%	350 ppm	51
Norme 2006	50 ppm	-	50 ppm	-

II-2-3- Réglementation japonaise

Après les premières limites introduites en 1973, basées sur le cycle ancien 10 modes, la sévérité des règlements s'est rapidement accrue, demandant des systèmes de contrôle d'une complexité comparable à ceux nécessaires pour satisfaire les standards californiens. Bien qu'utilisant le système classique CVS, les cycles de conduite japonais sont spécifiques à ce pays.

L'évolution au Japon des règlements concernant les polluants gazeux concerne surtout les oxydes d'azote et les particules. La figure II.5 montre l'évolution des normes d'émissions des NO_x-PM au Japon.

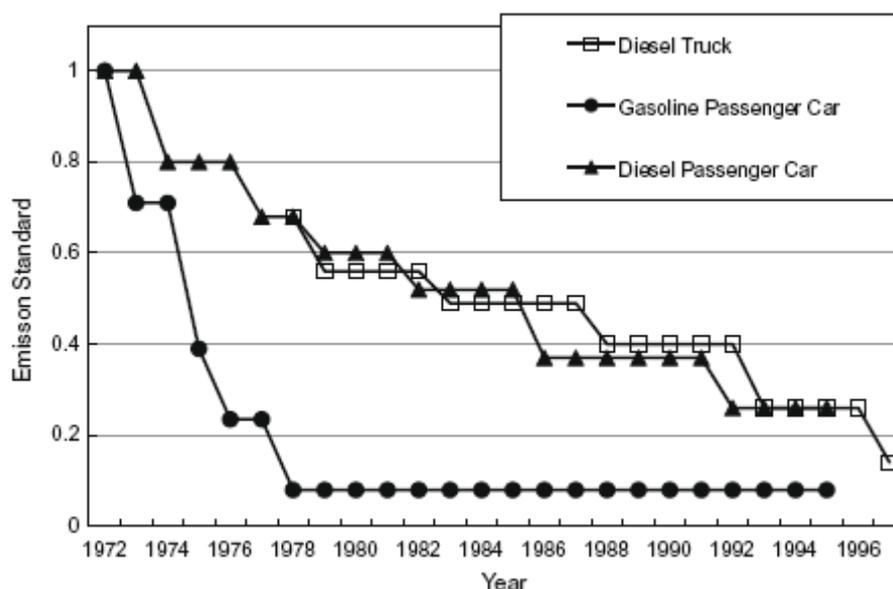


Figure II.5: Evolution des normes d'émissions des NO_x-PM au Japon [48].

Dans le tableau II.4 sont représentées les valeurs limites des émissions des véhicules légers en monoxyde de carbone (CO), oxydes d'azote (NO_x), hydrocarbures imbrûlés (HC) et particules (PM) mises en place par les grands pays industrialisés du monde qui sont les Etats-Unis, le Japon et les pays de l'Union Européenne.

Tableau II.4: Normes américaine, européenne et japonaise appliquées aux émissions automobiles

	Normes de Japon entrées en vigueur 2002 (g/km)		Normes des Etats-Unis fixées en 1990. (g/mile)				UE entrées en vigueur 2005 (g/km)		Californie entrées en vigueur 2004 (g/mile)	
	D	E	D*	Non D*	D'	Non D'	D	E	D	E
CO	0.63	2.1	2.83	2.29	3.37	3.71	0.50	1.00	0.67	0.67
NO _x	0.28	0.25	0.84	0.40	0.65	0.65	0.25	0.08	0.01	0.01
HC	0.12	0.25	0.21	0.21	0.27	0.27	0.3	0.10	2.7	2.7
PM	0.052	-	0.07	-	0.07	-	0.025	-	0.006	-

E: véhicule essence

D: véhicule diesel

D: véhicules diesel de 0 à 3750 livres*

D': véhicules diesel de 3750 à 5750 livres

Il convient de signaler que les normes californiennes sont applicables à la durée de vie utile qui est de 120000 et 150000 miles et les normes américaines sont applicables à la durée de vie utile qui est de 100000 miles (10 ans) [49].

Une unification des normes antipollution représente une alternative qui facilite la comparaison de différents véhicules de la même catégorie (véhicules essence et diesel). Les normes actuelles demeurent des mesures théoriques, définies sur des véhicules dépourvus d'options, suivant des cycles standardisés qui ne reproduisent pas exactement la marche réelle des véhicules sur les routes. Elles ne s'appliquent qu'aux véhicules neufs.

II-2-4- La réglementation algérienne

nne

L'Algérie n'a pas encore de constructeurs automobiles, il n'y a pas de texte réglementant les émissions. Le seul texte est celui qui limite les émissions industrielles.

L'Algérie, comme tous les pays, vit une crise sévère de l'environnement, due en grande partie au transport. Pour remédier à ces problèmes l'état a depuis 1998, mis en branle un arsenal juridique judicieux. Parmi ces mesures, figure le contrôle technique automobile.

II-2-4-1- Les missions de l'ENACTA

L'article 5 du décret exécutif n° 98-271 du 7 Joumada El Oula 1419 correspondant au 29 août 1998 portant réaménagement des statuts du centre national pour l'étude et la recherche en inspection technique automobile (CNERITA) et modification de sa dénomination en Etablissement national de contrôle technique automobile (ENACTA) énonce que l'Etablissement a pour mission:

- d'effectuer la réception technique des véhicules;
- de réaliser ou de faire réaliser le contrôle périodique des véhicules automobiles;
- de participer à l'élaboration de réglementation relative à la construction des véhicules;
- d'instruire les dossiers de demandes d'agrément des agences de contrôle technique des véhicules;
- de proposer, en tenant compte de l'évolution technique automobile, toute mesure destinée à améliorer les normes de construction des véhicules [50].

II-2-4-2- Mesures lors du contrôle technique

À la sortie du pot d'échappement, il y a un mélange extrêmement complexe de polluants dont il est impensable de déterminer simultanément la réelle contribution dans l'environnement.

Au niveau des stations de contrôle technique, deux appareils ULTIMA 600 sont utilisés pour la mesure de ces polluants:

- L'analyseur de gaz ULTIMA 600 qui mesure le CO, CO₂, O₂, et HC à leur sortie des pots d'échappement des véhicules à essence.
- L'opacimètre ULTIMA 600 qui mesure l'opacité de la fumée des véhicules équipés de moteurs diesel.

Nous avons assisté au contrôle de plusieurs véhicules au niveau de la station de contrôle technique automobile de Bejaia (Agence Cota à Bir Slem). Pour les mesures de pollution, les limites fixées sont 2,5 m⁻¹ pour l'opacité des véhicules diesel et 3,5 % du volume pour le CO des véhicules à essence.

Nous avons choisi un échantillon de cinq véhicules : un véhicule diesel lourd, 2 véhicules légers diesel et 2 véhicules légers essence. Les résultats de la mesure de CO et de l'opacité sont présentés sur la figure II.6.

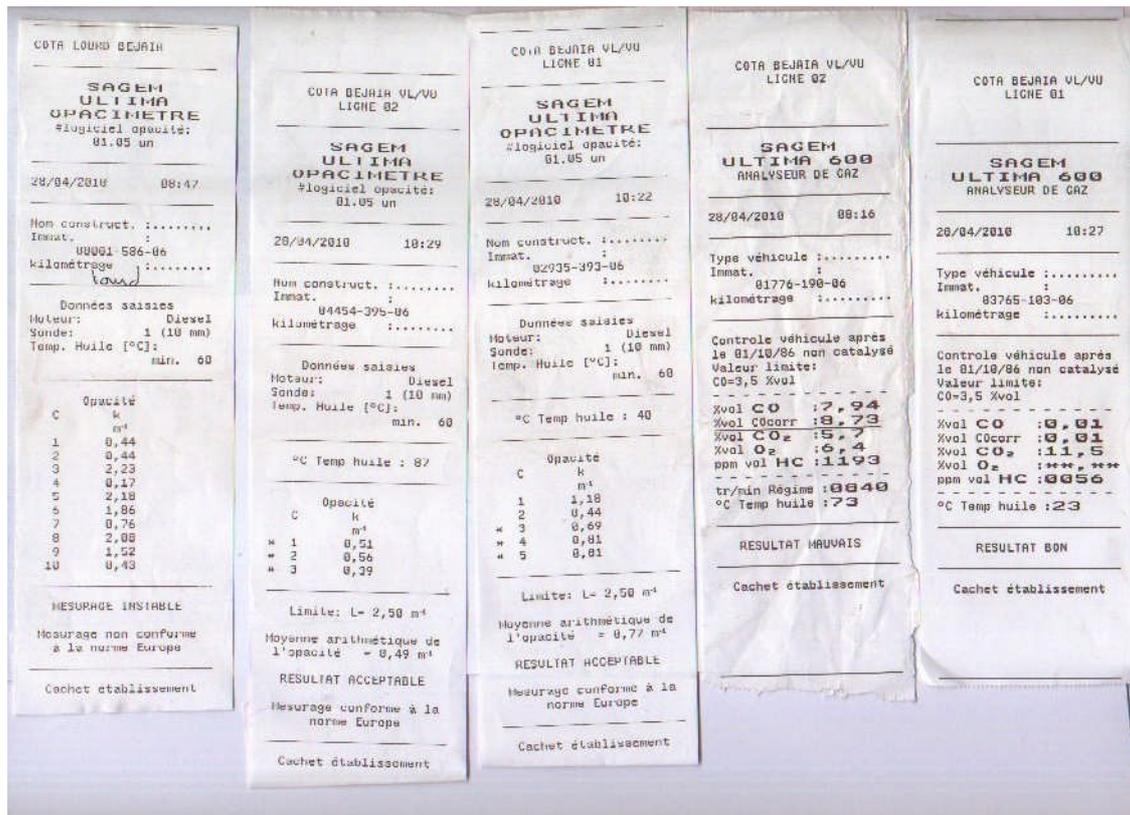


Figure II.6: Spécimens de résultats obtenus au niveau de la station de contrôle technique automobile de Bejaia.

- A: instable mesurage du véhicule lourd diesel: 10 essais d'opacité
- B: bon résultat diesel opacité = $0,49 \text{ m}^{-1} < 2,5 \text{ m}^{-1}$
- C: bon résultat diesel opacité = $0,77 \text{ m}^{-1} < 2,5 \text{ m}^{-1}$
- D: mauvais résultat essence $\text{CO} = 7,94 \text{ \% vol} > 3,5 \text{ \% vol}$
- E: bon résultat essence $\text{CO} = 0,01 \text{ \% vol} < 3,5 \text{ \% vol}$

Pour les véhicules qui affichent de mauvais résultats ou mesurage instable, comme le cas de A et D, il est conseillé de régler la faute technique à l'origine du problème. Mais pour le moment aucun texte juridique n'est élaboré pour pénaliser ou réformer les véhicules.

II-3- Appréciation des normes antipollution

II-3-1- Au niveau de procédure d'essai :

- Tous les essais de mesures des émissions des gaz d'échappement, quelques soient les normes choisies, sont effectuées dans des conditions de laboratoire. Les valeurs mesurées ne reflètent donc pas les conditions réelles.

- Toutes les mesures sont effectuées avec un gaz d'échappement dilué avec l'air.
- A compter des normes Euro 3, les conditions de mesure sont effectuées au démarrage avec moteur à froid et non à chaud.
- Dans la phase de démarrage à froid, la température de service du moteur et celle des gaz d'échappement joue un rôle décisif pour l'appréciation des émissions des voitures équipées de pot catalytique.
- Aux Etats-Unis, un essai d'émissions de monoxyde de carbone (CO) à basse température est fixé à -7° . En Europe, il n'y a que la Suède qui applique ce type d'essai. L'inclusion de ce type d'essai dans le projet de directives européennes sur les gaz d'échappement de véhicules est très utile.
- Le conditionnement du moteur dans le cas du départ à froid prend beaucoup de temps (entre 12 et 36 heures de conditionnement avant l'essai).
- La durée totale pour achever les tests suivant la norme américaine est comprise entre 15 et 40 heures (mesure des émissions et de la consommation).
- Le nombre de tests dans les normes américaines et européennes est relativement élevé, surtout si on ajoute les gaz NMHC, NMOG et HCOH. L'introduction d'autres gaz polluants à faible teneur compliquera davantage la procédure d'essai et augmentera sa durée globale et par conséquent le coût pour un test d'homologation.

II-3-2- Appareillage de Mesure

La technique de mesure est la même pour l'ensemble des normes internationales actuelles. Les résultats des tests sont toujours affectés d'erreurs qui peuvent atteindre les $\pm 30\%$. Un appareillage piloté par ordinateur permettrait un étalonnage rapide et précis des appareils de mesure.

- La mesure de CO_2 ne pose aucun problème en raison de sa concentration élevée dans les gaz d'échappement (Intervalle de mesure jusqu'à 100 ppm).
- Des appareils CLI ayant une grande sensibilité, un intervalle de mesure allant de 5 à 10 ppm nécessitent des techniques assez coûteuses.
- L'analyseur FID ne peut pas mesurer les gaz organiques sans méthane (NMOG). La chromatographie représente une possibilité de mesure des NMOG.

Pour la mesure gravimétrique des particules, la norme ne mesurant que la masse des particules favorise en priorité l'élimination des particules les moins toxiques, car les particules les plus fines sont les plus toxiques. Depuis l'installation de turbocompresseurs sur les moteurs diesel, les particules rejetées sont devenues plus fines. Sauf si une nouvelle technologie devient

disponible pour respecter la norme Euro 06 les motoristes n'auront alors guère d'autre choix que d'installer un système de post-traitement sélectif (SCR) qui est assez coûteux.

II-3-3- Cycles définis dans les normes actuelles

- Dans tous les cycles ont été négligées les résistances dues à la pente et au glissement des roues.
- Tous les cycles sont indépendants de l'influence du conducteur.
- Dans le cycle européen, la proportion des phases au régime de ralenti (31 % du fonctionnement du moteur) et aux vitesses stabilisées est plus importante que celle dans le cycle FTP75.
- Il est préférable d'avoir un cycle de conduite pour chaque catégorie de véhicules (par exemple un cycle pour les véhicules à faible motorisation et un cycle pour une motorisation importante).
- L'élimination des 40 premières secondes du cycle de conduite européen représente une amélioration de la réglementation relative aux émissions de véhicules. Cette mesure visant à rendre le cycle de conduite plus réaliste aidera à résoudre le problème de l'efficacité du catalyseur en cas de départ à froid [47].

Les normes actuelles demeurent des mesures théoriques, définies sur des véhicules dépourvus d'options, suivant des cycles standardisés qui ne reproduisent pas exactement la marche réelle des véhicules sur les routes. Elles ne s'appliquent qu'aux véhicules neufs.

Les pays en voie de développement dont l'Algérie fait partie ne disposent d'aucune norme nationale antipollution valable aux véhicules malgré qu'ils soient de grands importateurs de voitures neuves ou déjà immatriculées. Il est donc urgent d'élaborer une législation antipollution adaptée aux conditions climatiques, géographiques et de circulation dans les grandes villes de chaque région. Ceci est faisable puisqu'il suffit d'opter, par exemple, pour la procédure de contrôle californienne vue les conditions climatiques et géographiques similaires à celles des pays du sud et de fixer les limites des émissions admissibles.

III- Politique de lutte contre la pollution atmosphérique due au transport

Les causes et les conséquences de la pollution atmosphérique sont presque exclusivement imputables aux activités humaines. La maîtrise et la gestion des rejets anthropiques sont donc désormais devenues nécessaires. Cependant, ceci est difficile à mettre en œuvre étant donné le mode de développement économique actuel et du fait d'une sphère

politique souvent peu sensible aux problèmes environnementaux. Ainsi la question de la définition d'un véhicule à la fois propre et économe demeure toujours posée : les véhicules diesel peuvent être qualifiés de plus économes en énergie par rapport aux véhicules à essence mais ces derniers sont plus propres.

Diverses solutions techniques sont explorées aujourd'hui pour dépasser ce dilemme.

En plus des réglementations des émissions des polluants à appliquer par chaque pays, des politiques économiques et des techniques doivent être mises pour lutter contre la pollution atmosphérique.

III-1- Politiques économiques

III-1-1- Améliorer l'organisation et le fonctionnement du système de transport

L'amélioration du système des transports peut se faire par les actions suivantes:

- Développement des transports publics (qualité, efficacité, fiabilité, compétitivité, sensibilisation du public).
- Aménagement du territoire (décentralisation et régionalisation – minimisation des déplacements motorisés – contournement du trafic (rocade, voie rapide....)) ;
- Intégration des technologies génériques [51].

III-1-2- Réduire la consommation de carburant des véhicules

Ceci peut se faire en considérant:

- Cylindrée des véhicules ;
- Subvention pour l'achat de véhicules neufs;
- Retrait du parc des véhicules très anciens;
- Maintenance et entretien ;
- Révision du prix du carburant [52].

Pour l'Algérie, l'autorité de régulation des hydrocarbures (ARH) propose une augmentation de 10% et pendant 10 ans à compter de décembre 2009. Cette proposition a été faite en vertu de l'article 9 de la loi 05-07 sur les hydrocarbures qui prévoit d'aligner, dans les dix prochaines années, le prix du brut entrée raffinerie vendu sur le marché national à celui exporté vers l'étranger. Elle suggère également d'augmenter les tarifs des autres carburants comme l'essence (à l'exception du GPL/C) pour inciter sa consommation.

III-1-3- Influencer le comportement au volant

Les conducteurs doivent adopter les réflexes suivants :

- Arrêter le moteur au ralenti ;
- Conduire avec souplesse ;
- Limiter la conduite à grande vitesse ;
- Eliminer les éléments dégradant l'aérodynamique (galerie, charge....)

III-1-4- Exploiter les carburants de substitution

Pour réduire la forte dépendance des transports aux combustibles fossiles il est recommandé :

- Recours au GPLC surtout dans les transports en commun,
- Utilisation des combustibles renouvelables ou même carburant à base d'hydrogène,
- Développement des véhicules électriques ou hybrides [52].

Une de ses solutions consiste à remplacer les carburants classiques par de nouveaux carburants tels que:

- Le Gaz Pétrole Liquéfié (GPL)

Le GPL est constitué des hydrocarbures légers ayant 3 ou 4 atomes de carbone par molécule (butane, propane, leurs isomères et alkènes), liquéfiés par simple augmentation de pression. C'est un excellent carburant, disposant d'un excellent indice d'octane. Le GPL est l'un des carburants « propres » les plus intéressants. En effet, sa disponibilité et sa production sont aisées et il peut être utilisé directement dans les moteurs traditionnels. Les émissions de gaz polluants sont très faibles.

Dans certains pays le GPL représente 5 à 10 % du carburant automobile (Japon, Italie, Pays Bas). Il est notamment très utilisé dans les flottes de taxis de certains de ces pays. Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) présente des émissions élevées de propane, ce qui est un indicateur d'une mauvaise combustion, cependant en général c'est un combustible plus propre que l'essence, qui émet certains des composés chimiques à l'atmosphère. En ce qui concerne les émissions spécifiques, elles sont très basses grâce au bas rendement volumétrique du moteur quand il utilise ce combustible. En ce qui concerne l'effet de serre, le GPL contient moins de carbone que le gazole à énergie égale, mais plus que le GNV [53].

- Le Gaz Naturel pour Véhicule (GNV): Le gaz naturel, essentiellement constitué de méthane (et d'un peu d'éthane), est un excellent carburant, utilisé d'une façon absolument

analogue au GPL. La principale différence tient à la pression plus forte du réservoir, environ 200 bars actuellement.

Le GNV présente des avantages tant pour les « niveaux de pollution » local, zonal et régional, que pour l'effet de serre. En effet la stabilité du méthane fait que les émissions d'imbrûlés n'ont qu'un effet local: il met plusieurs années à se transformer en O₃. C'est pourquoi les normes des USA ne le compte pas comme un hydrocarbure (HC). Compte tenu de son effet de diminution des « déchets valorisés », de sa moindre teneur en Carbone, de l'activité des imbrûlés sur l'effet de serre seulement double de celles des HC et enfin des faibles pertes lors de sa distribution, le gaz naturel diminue de 30% les émissions à effets de serre par rapport aux carburants pétroliers. Il sera plus particulièrement destiné aux flottes de transport en commun [11].

- Les biocarburants:

Les biocarburants, sont des carburants issues d'extraits végétaux tel que l'huile de colza ou de tournesol, ils permettent aux véhicules les moins économes de réduire leurs émissions de CO₂. Malheureusement, ces carburants « verts » sont trois à quatre fois plus coûteux à produire qu'un carburant traditionnel. Leur développement ne pourra être que très limité [54].

Les biocarburants et le biodiesel, obtenus à base du colza ou de l'éthane incorporé à l'essence, sont inconnus en Algérie, il n'y a aucune trace de cela dans les programmes officiels en Algérie [42].

Une autre méthode consiste à améliorer l'architecture des systèmes de motorisation tels que les véhicules alternatifs, et notamment électriques ;

- Les véhicules électriques

Afin de lutter contre la pollution, la recherche concernant le développement des véhicules électriques a pris un nouvel essor. Grâce à des améliorations techniques, les voitures ont une plus grande autonomie et atteignent des vitesses qui, tout en restant moindres que celles des automobiles à moteur à explosion, répondent mieux qu'auparavant aux exigences de la circulation urbaine. Des initiatives publiques ont permis la mise en place de sites-pilotes, en équipant des villes de bornes pour recharger les batteries.

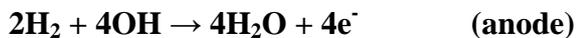
- Les véhicules à moteurs hybrides

Dans le but d'éviter les taux élevés des émissions à froid du moteur thermique et de régler le problème de la durée de charge des batteries utilisées dans le moteur électrique, un moteur hybride est mis en fonctionnement sur le marché automobile. Le moteur électrique fonctionne au démarrage et à faibles vitesses alors que le moteur thermique fonctionne à de grandes vitesses. [5]

- Les véhicules à pile à combustible

La pile à combustible est un composant électrochimique dans lequel l'énergie d'une réaction chimique est directement transformée en électricité. Contrairement aux piles électriques ou aux batteries, une pile à combustible ne se décharge pas ou n'a pas besoin d'être rechargée ; elle fonctionne tant qu'un combustible et un oxydant alimentent la pile en continu, par apport extérieur.

Une pile à combustible est constituée d'une anode, alimentée par un combustible, en général l'hydrogène et d'une cathode alimentée par un oxydant, en général l'oxygène. Les deux électrodes sont séparées par un électrolyte conducteur ionique. Il y'a deux réactions à l'anode et à la cathode.



Les électrons générés à l'anode arrivent à la cathode par le circuit externe contenant la charge. Les ions OH^- générés à la cathode se dirigent, grâce à l'électrolyte, à l'anode, où ils forment de l'eau en réagissant avec l'hydrogène. L'eau produite à l'anode doit être constamment soutirée pour que la pile ne soit pas submergée [55].

III-2- Principales techniques de réduction des émissions automobiles polluantes

III-2-1- Techniques appliquées en amont de la source

La réduction des émissions polluantes par traitement en amont de la source consiste essentiellement à modifier la composition du carburant utilisé (suppression du plomb, réduction de la teneur en soufre...)

- Essence sans plomb:

Certains pays ont des réglementations antipollution sévères qui imposent l'utilisation de ce que l'on appelle communément « l'essence sans plomb » pour certaines automobiles. Les alkyles de plomb, additifs utilisés depuis 1992, permettent d'augmenter l'indice d'octane

de l'essence. Leur toxicité directe n'a jamais été démontrée ; cependant, ils inhibent l'action des métaux précieux utilisés dans les pots d'échappement catalytiques.

La suppression du plomb dans l'essence ne résoudrait cependant le problème de la pollution de l'air que de façon fort partielle. On a ainsi calculé que la qualité de benzène émise passerait de 1 à 17%. Ce composé certainement plus toxique que le plomb, entraînerait beaucoup plus de dommages pour notre santé [16].

III-2-2- Techniques appliquées au niveau de la source

Une des solutions actuelles pour abaisser le taux des gaz polluants réside dans l'exploitation fonctionnelle et structurelle du moteur [56].

Parmi les nombreuses techniques mises au point par les motoristes pour limiter la production de polluants, nous trouvons notamment :

- L'amélioration de la préparation du mélange air-carburant par le passage de la carburation mécanique à la carburation électronique, la mise au point d'injecteurs multipoints (obtention d'un mélange plus homogène) et l'optimisation de la géométrie de la chambre de combustion
- L'utilisation de moteurs à essence à mélange pauvre (fort excès d'air dans le mélange permettant une importante réduction des émissions de NO_x)
- La recirculation des gaz d'échappement (EGR) permettant de limiter la température de combustion ce qui réduit les émissions de NO_x sans pénaliser la consommation (-30% à -50% de NO_x pour un recyclage de 10 à 12%) [9].

III-2-3- Techniques appliquées en aval de la source

Cette solution consiste à retirer partiellement le polluant formé, en recyclant par exemple les vapeurs d'essence qui s'échappent du véhicule. Ceci peut s'effectuer en transformant les gaz brûlés en substances moins nocives par l'intermédiaire d'un convertisseur catalytique comme le pot catalytique.

III-2-3-1- La catalyse

Un pot catalytique transforme la majeure partie des hydrocarbures et de monoxyde de carbone en dioxyde de carbone et en eau, ainsi que l'azote en dioxyde d'azote. Il est souvent muni d'un filtre qui sépare les particules de suies constituées de carbone [56].

Actuellement, toutes les voitures neuves vendues en Europe sont équipées de pots catalytiques, de même qu'aux États-Unis et au Japon.

- Les catalyseurs des NO_x : ils font appel aux propriétés structurelles spéciales du revêtement catalytique pour générer un environnement riche en hydrocarbures (issus des gaz d'échappement) afin de réduire les oxydes d'azote en azote alors que la composition moyenne de ces gaz d'échappement demeure globalement pauvre.

D'autres recherches vont dans le sens d'une augmentation de la température de fonctionnement et de l'efficacité de conversion.

- La réduction catalytique sélective (SCR) : elle a trouvé ses premières applications dans les groupes électrogènes et les moteurs stationnaires. Aujourd'hui, cette technique s'utilise aussi sur les véhicules diesel utilitaires lourds, et des travaux sont en cours pour en étendre l'application aux véhicules utilitaires diesel légers.

L'ammoniac ou ses précurseurs sont utilisés comme réducteurs sélectifs en présence d'un excès d'oxygène pour convertir plus de 70% des NO_x en azote grâce à un système catalytique spécial. Les émissions de particules sont également réduites.

Les systèmes SCR montés sur des véhicules utilitaires ont parfaitement fonctionné sur des centaines de milliers de kilomètres.

- La catalyse multifonctionnelle : les hydrocarbures imbrûlés, le CO et les NO_x sont éliminés simultanément lorsque la combustion s'effectue pour une richesse du mélange carburé stoechiométrique. Il est alors nécessaire de piloter le carburateur ou le système d'injection par une sonde lambda : si la quantité d'oxygène dans les produits de combustion s'appauvrit, la réaction d'oxydation de CO en CO₂ est prédominante et il ne reste plus assez d'oxygène pour que la réaction d'hydrolyse des hydrocarbures imbrûlés en H₂ et CO₂ s'effectue. Lorsque le mélange est riche, les concentrations en oxygène et en oxyde d'azote ne sont plus suffisantes pour obtenir un taux de conversion satisfaisant du CO et des hydrocarbures imbrûlés. En cas de fonctionnement non-stoechiométrique, les réactions de réduction des polluants sont accompagnées de réactions secondaires qui entraînent la formation de substances agressives pour le pot catalytique et l'environnement. La destruction du pot catalytique, dont les normes américaines exigent le fonctionnement durant au moins 80.000 km, est l'un des problèmes les plus importants intervenant dans son utilisation. Elle se produit soit par empoisonnement par le plomb ou d'autres substances (zinc, soufre, calcium, baryum) contenus dans le carburant à l'état de traces, soit par fusion. Cette possibilité résulte de la présence de quantités importantes d'hydrocarbures imbrûlés et de CO en présence d'oxygène dans le cas d'un dysfonctionnement moteur (non-allumage ou extinction prématurée de la flamme dans la chambre de combustion).

- Les systèmes de catalyseurs chauffés électriquement : ils font intervenir un catalyseur d'appoint en amont du catalyseur principal. Le substrat sur lequel repose le catalyseur est en métal, de sorte que lorsqu'un courant le traverse, il se réchauffe rapidement. Ainsi, le catalyseur est opérationnel en quelques secondes.

III-2-3-2- Les systèmes d'adsorption

- Les systèmes d'adsorption des hydrocarbures incorporent des matières spéciales, comme les zéolites, à l'intérieur du catalyseur ou en amont de celui-ci. Les émissions d'hydrocarbures sont collectées lorsque la température d'émission est trop faible pour un fonctionnement efficace du catalyseur. Les hydrocarbures sont ensuite désorbés à des températures plus élevées lorsque le catalyseur a atteint sa température de fonctionnement et est prêt à recevoir et à détruire les hydrocarbures.

Cette technologie est en mesure de réduire les hydrocarbures de plus de moitié par rapport aux niveaux d'émission d'un convertisseur catalytique trois voies.

- Les adsorbants de NO_x (pièges à NO_x) représentent une voie prometteuse. En effet, les résultats indiquent que les systèmes fondés sur les adsorbants de NO_x sont moins limités par les températures de fonctionnement que les catalyseurs de NO_x . Les pièges à NO_x adsorbent et stockent les NO_x qui se dégagent lors de la combustion d'un mélange pauvre. L'approche classique consiste à accélérer la conversion du monoxyde d'azote (NO) en dioxyde d'azote (NO_2) au moyen d'un catalyseur d'oxydation, de telle manière que le NO_2 puisse être rapidement fixé sous forme de nitrate sur des oxydes alcalino-terreux. Un bref retour, pendant une seconde ou deux, à un régime stoechiométrique ou à un mélange riche, suffit pour désorber les NO_x stockés et créer les conditions permettant à un catalyseur trois voies classique monté en aval de détruire les NO_x .

III-2-3-3- Les filtres à paroi céramique (ou filtres à particules)

Le filtre en céramique sépare les particules des suies constituées de carbone. Ces dernières vont réagir avec les molécules de dioxyde d'azote et, en brûlant dans le filtre, se transforment en dioxyde de carbone [56].

Les filtres à paroi céramique (ou filtres à particules) éliminent plus de 90% du poids total des particules contenues dans les gaz d'échappement des véhicules diesel. Les limites actuelles portent sur la masse (en grammes) de particules au kilomètre. Toutefois, de récents travaux sur les particules ultrafines (PM_{10}) générées par les moteurs diesel focalisaient sur la quantité et la taille des particules, indices plus parlants, pense-t-on, quant aux effets possibles

des particules sur la santé. Un traitement complémentaire par filtration peut réduire la quantité de particules, y compris les ultrafines (PM_{0.01} à PM₁), de l'ordre de 99,9%, sinon davantage, dans les conditions de marche du moteur les plus diverses.

Pour éviter que le filtre à paroi céramique ne soit rapidement obstrué par les particules, il convient d'en "régénérer" les propriétés filtrantes en brûlant régulièrement les particules collectées.

Ces dernières années, le perfectionnement des filtres à particules a abouti à la mise au point de filtres traitant à la fois les particules et les NO_x. Ce type de filtre utilise un support à structure nid d'abeille (la cordiérite) pour piéger temporairement les NO_x et oxyder les particules en dioxyde de carbone lors des phases de fonctionnement moteur en mélange pauvre. Lorsque le substrat est saturé, le moteur passe momentanément en mode mélange riche pour éliminer l'excès d'oxygène et réduire les NO_x en azote et oxygène actif. L'azote est alors rejeté tandis que l'oxygène est réutilisé pour l'oxydation des particules. Le procédé permet d'éliminer environ 90% des particules et des NO_x.

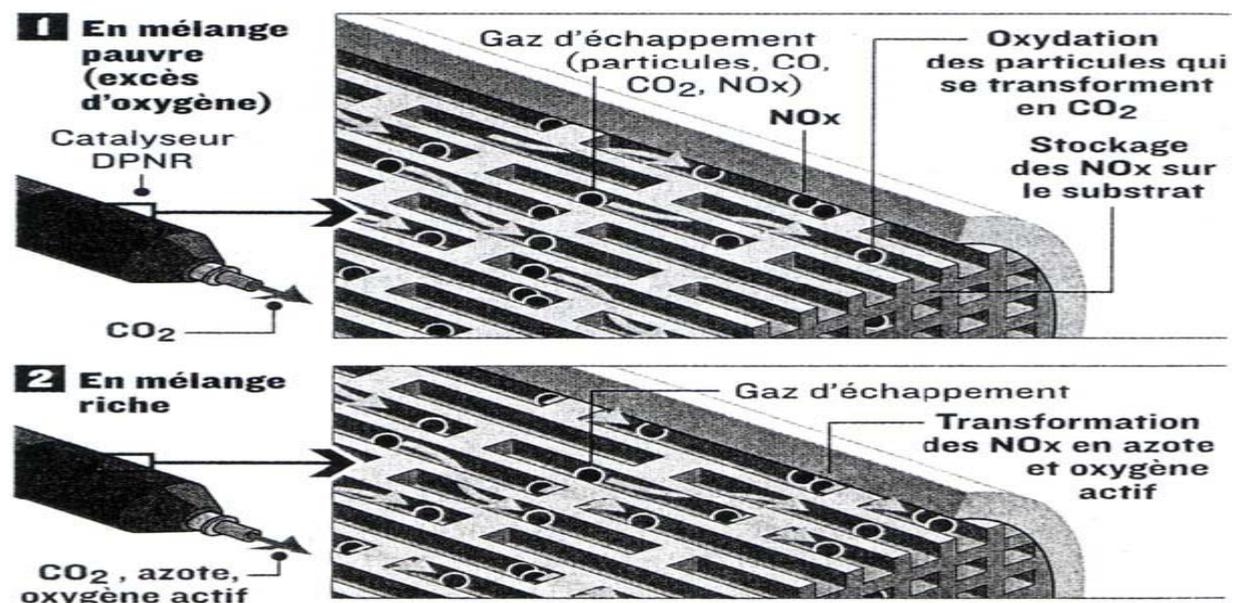


Figure II.7: Fonctionnement du filtre à NO_x et à particules en fonction du mode de fonctionnement moteur

III-2-3-4- Traitement des effluents gazeux par procédés plasma

La sévérité des normes d'émissions polluantes, les coûts de traitement élevés ou la taxation des rejets poussent les entreprises à améliorer des procédés déjà existants ou à en mettre au point de nouveaux si les techniques traditionnelles s'avèrent insuffisantes. Dans le cas des procédés utilisant la combustion, l'oxydation des composés à traiter est obtenue par l'action

d'espèces réactives (radicaux O, OH, H...) dont la production nécessite de hautes températures. Dans le cas d'un traitement par plasma froid, l'essentiel de l'énergie est utilisé pour générer des électrons hautement énergétiques qui conduisent à la formation de ces espèces actives et non au chauffage du milieu. L'intérêt de ces techniques est évident lorsque l'on cherche à traiter des polluants qui sont fortement dilués dans l'effluent total. De plus, la basse température du gaz réduit le rôle des réactions inverses et permet de conserver des produits formés. Ces raisons ont donc largement participé au développement des procédés de dépollution par voie plasma ces dernières années.

Les investissements pour le développement de nouveaux procédés de dépollution par plasma hors-équilibre illustrent parfaitement l'intérêt de ces techniques, qui viennent compléter les techniques traditionnelles (par exemple par association d'un réacteur plasma oxydant le NO en NO₂ avec un catalyseur en post-décharge réduisant le NO₂ et les COV en N₂, CO₂ et H₂O) ou qui se substituent à elles lorsque celles-ci atteignent leurs limites. Ces procédés propres doivent obéir à de nombreuses contraintes (économiques, techniques ou juridiques).

III-2-3-5- Dépollution par précipitation électrostatique

La précipitation électrostatique fait appel aux champs de forces électriques afin de séparer les particules solides ou liquides transportées par le gaz. Développées pour éliminer les poussières fines, on commence aussi à envisager leur emploi pour éliminer les composés organiques volatils (COV).

Pour l'ionisation intense du gaz porteur on utilise l'*effet couronne*, ensemble de phénomènes caractérisés par la naissance d'un champ électrique non homogène entre des électrodes émissives portées à de hautes tensions de 40 à 110 kV et des électrodes collectrices reliées à la terre. Leurs surfaces sont différentes, beaucoup plus intenses au voisinage immédiat du fil constituant l'électrode d'émission.

En choisissant une valeur de la tension entre les électrodes telle qu'au voisinage de l'électrode d'ionisation le champ électrique atteint une tension dite de claquage, il se produit le long de l'électrode d'ionisation du gaz (accompagné d'un léger crépitement de petites étincelles).

L'effet couronne peut être positif ou négatif selon la charge négative ou positive de l'électrode ionisant. Les électrofiltres industriels utilisent presque toujours un effet couronne négatif, car il permet de réaliser des tensions de claquage plus élevées, d'où des vitesses de précipitation supérieures.

La captation des particules dispersées dans le gaz ionisé se réalise en trois étapes successives:

- la charge électrique des poussières;
- la migration des particules chargées dans le champ électrique vers l'électrode de précipitation (positif) où elles précipitent par décharge électrique;
- l'évacuation du gaz purifié et l'élimination des poussières collectées [6].

III-3- Complexité de la comparaison des solutions envisagées

La comparaison des solutions dans le domaine des transports automobiles est un problème complexe pour plusieurs raisons:

- 1) L'amélioration apportée par une solution dépend totalement du niveau de pollution auquel on se place: telle « bonne » solution sur les plans régional ou local peut n'avoir aucun intérêt pour l'effet de serre et vice-versa. Une pondération est donc à faire entre les divers objectifs.
- 2) Même une fois choisi le « niveau de pollution », la multiplication des polluants à considérer fait que l'on peut améliorer certaines émissions tout en détériorant d'autres.
- 3) Les situations sont très différentes selon le type de fonctionnement énergétique du pays. Ainsi le trolleybus diminue les émissions aux niveaux local et régional dans tous les cas. Mais il produit plus d'effet de serre qu'un autobus Diesel si l'électricité est produite à partir de combustibles fossiles et moins si l'électricité est majoritairement nucléaire ou hydraulique [54].

III-4- Evolution des émissions par le transport routier

L'adoption, à partir des années 50, de plusieurs directives relatives à la limitation des émissions des véhicules a eu pour effet de réduire progressivement les émissions de gaz et de particules. Depuis le début des années 80, les normes antipollution ont contribué à la conception de voitures moins polluantes et plus économiques : une voiture de 2004 émet 4 fois moins de polluants qu'un véhicule de 1993 et 20 fois moins qu'un véhicule de 1980 [47]. Pour un milieu urbain comme Gênes (figure II.8), malgré l'augmentation en nombre de véhicules y circulant et en kilométrage parcouru, on a remarqué une diminution continue de l'ordre de 80% pour les émissions de monoxyde de carbone.

Le dioxyde d'azote (NO₂), indicateur d'origine essentiellement automobile, présente une légère tendance à la baisse depuis 1992 jusqu'à atteindre une valeur de réduction de 20% en 2000. De cette date, les valeurs commencent à augmenter pour revenir à leur valeur initiale

en 2010. La tendance actuelle à la stagnation des niveaux des dioxydes d'azote peut s'expliquer par la part croissante du trafic automobile (véhicules diesel) qui compense les gains en propreté des moteurs.

Les niveaux de HC sont en nette régression sur le long de la période pour atteindre un niveau de 30% en 2010 (réduction de 70% pendant 18 ans), toujours selon les estimations pour les trois dernières années.

De même, que pour le niveau de HC, les oxydes d'azotes (NO_x) et les particules ont tendance à la baisse mais avec un niveau de diminution moins accéléré à partir de 2002 [57].

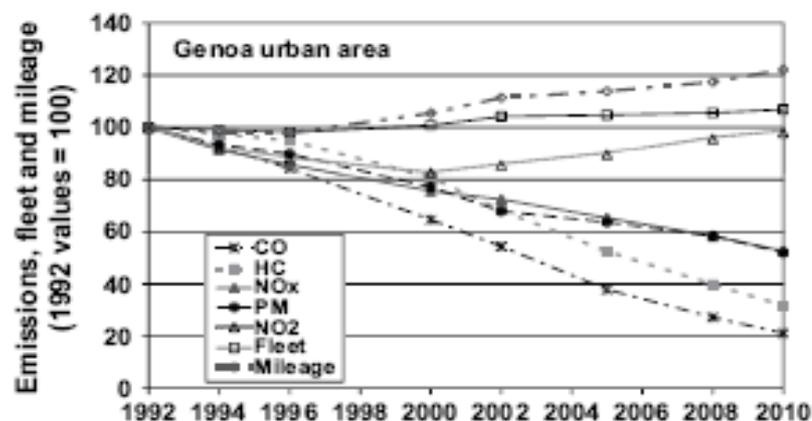


Figure II.8: Variation des émissions en fonction du kilométrage et du nombre de véhicules à Genoa (Italie) [57].

Pour le cas de L'Algérie, les niveaux d'émissions par type de carburant montrent de 1980 à 2005 une réduction des émissions dues à la combustion de l'essence : - 44% pour CO, -12 % pour les COV, - 66% pour Pb, et une croissance de 9% de NO_x de 59% pour CO_2 . Le plomb décroît rapidement et est en voie de disparition depuis la réduction de la teneur de plomb dans l'essence et l'introduction de l'essence sans plomb sur le marché algérien. La pratique de vitesses plus élevées en raison du développement du réseau autoroutier est responsable de la croissance des émissions de NO_x . La combustion du gasoil est responsable de la croissance des émissions de tous les polluants émis par les véhicules diesel, avec un taux moyen de croissance de 158% pour le CO, NO_x , COV et les particules depuis 1980. Cette croissance des émissions issues des véhicules diesel est principalement due à l'augmentation du nombre de véhicules diesel dans le parc algérien des VP et VUL et aussi à l'importance du

kilométrage parcouru par les véhicules diesel. Le CO₂ croît de 288% en cette période, ce qui révèle la forte croissance de la diésélisation en Algérie [58].

Conclusion

Le nombre élevé, l'âge et le type des véhicules motorisés, la qualité et la quantité des sources d'énergie constituent les principaux facteurs de pollution. Cependant, la vitesse moyenne, la catégorie et la charge de véhicule interviennent également pour contribuer à élever le taux de pollution dans les villes.

Les polluants émis par les moteurs à combustion interne sont les mêmes quel que soit le type de combustion envisagé. Seules les quantités relatives émises varient selon le type de carburant du véhicule. Ainsi les moteurs à essence émettent davantage de CO et d'HC alors que les moteurs diesel sont responsables de la majeure partie des émissions de NO_x et PM du secteur des transports.

Les émissions automobiles font l'objet, dans la plus part des pays industrialisés, de mesures réglementaires, le nombre des espèces polluantes concernées a tendance à augmenter, les limites réglementaires deviennent plus sévères et les pays intéressés plus nombreux.

Le renforcement des réglementations a conduit à la mise en œuvre de multiples dispositifs technologiques destinés à réduire très sensiblement les émissions des véhicules de transport. En Algérie, un contrôle technique automobile est la technique utilisée pour la réduction de ces émissions. Des valeurs limites sont fixées, des mesures d'opacité et de CO sont périodiquement effectuées à chaque contrôle mais jusqu'à aujourd'hui aucun véhicule n'est rejeté pour cause de mauvais résultat concernant ces émissions.

Certes, les voitures d'aujourd'hui sont moins polluantes que celles d'antan, qui avaient l'incontinence de fumer comme des cheminées. La lutte contre la pollution doit donc se poursuivre, mais avec de nouvelles méthodes.

CHAPITRE III

Surveillance de la qualité de l'air

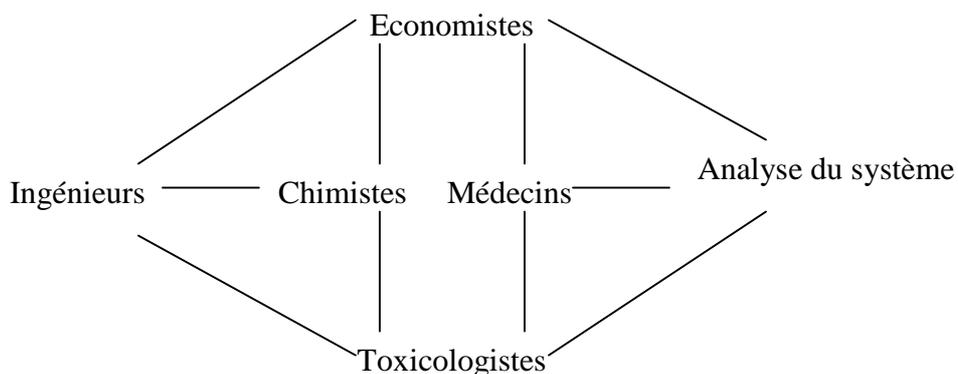
Introduction

L'amélioration permanente de la qualité du milieu vis-à-vis des critères de qualité de vie (santé, confort, environnement) est le but de toute politique d'environnement. Les décisions visant à l'amélioration de la situation doivent être élaborées à partir d'éléments objectifs décrivant la situation et les tendances.

Dans le cas de l'air, les progrès peuvent être réalisés par une maîtrise accrue des émissions de polluants (trafic, chauffage, industrie). Cependant, les niveaux des différents polluants dans l'environnement dépendent également fortement de facteurs non maîtrisables: météorologie, topographie..., qui interviennent sur les émissions de façon complexe. Une approche multidisciplinaire doit être mise en place afin de cerner les problèmes liés à la pollution de l'air. Dans ce contexte, le préfet de la région parisienne pour l'environnement et la pollution a déclaré: « Chaque époque, pour ne pas dire chaque civilisation, a été marquée par un problème fondamental. Hier en occident, c'était la disette et la lèpre. Aujourd'hui, à l'âge de la civilisation post-industrielle, c'est celui de la sauvegarde de l'environnement et de la lutte contre la pollution. Il s'agit donc de rassembler dans un vaste élan de solidarité et d'entraide tous ceux qui peuvent être les artisans d'une telle activité: élus, administrateurs, juristes, sociologues, économistes, médecins, savants, hygiénistes, techniciens, industriels, agriculteurs, usagers, ingénieurs. Tous les secteurs de la vie économique et sociale, public, parapublic et privé doivent être unis dans cette même recherche».

Les aspects scientifiques sont contrôlés par les météorologistes, les chimistes, les spécialistes en mécanique des fluides, des biologistes, des géographes, des économistes, des démographes et autres. La figure III.1 montre le schéma d'une équipe interdisciplinaire intervenant dans l'étude environnementale.

Figure III.1: Schéma d'une équipe interdisciplinaire expérimentée [59].



I- La surveillance de la qualité de l'air

La surveillance de la qualité de l'air ne constitue pas une fin en soit mais un moyen d'investigation destiné à montrer les endroits où la pollution de l'air est excessive.

I-1- Objectifs de la surveillance de la qualité de l'air

Par la mesure de certains indicateurs (polluants), un dispositif de surveillance doit permettre d'apprécier cette situation en tenant compte des cibles potentielles (santé, végétaux, bâtiments) et des sources d'émissions (pôles d'activité, trafic automobile...).

Si l'objectif de la surveillance est la connaissance de l'exposition des personnes et privilégie l'aspect « effets sur la santé » un dispositif de surveillance doit répondre simultanément à de multiples objectifs dont les principaux sont les suivants:

- 1) Permettre le suivi *spatiotemporel* de la pollution atmosphérique afin de situer la qualité de l'air par rapport à des critères d'exposition et des valeurs réglementaires ou sanitaires (objectifs de qualité OMS);
- 2) Dégager les tendances et donc les priorités d'action;
- 3) Contribuer à la sensibilisation du public et son information, notamment lors des pics de pollution;
- 4) Mieux comprendre les phénomènes de pollution atmosphérique et être un point d'appui à la recherche dans ce domaine.

I-2- Critères de choix des polluants mesurés

Les polluants mesurés doivent répondre aux principaux critères suivants:

- être mesurables, si possible de façon automatique;
- être caractéristiques de certaines sources d'émission;
- avoir des effets nocifs connus.

I-3- Conditions de réalisation des mesures

Certains indicateurs (dioxyde de soufre, ozone, poussière, oxydes d'azote, monoxyde de carbone) sont mesurés automatiquement in situ.

D'autres indicateurs (plomb, hydrocarbures spécifiques...) doivent être prélevés et analysés au laboratoire.

I-4- Localisation des sites de mesures

Les stations de mesure automatiques sont installées:

- soit pour rendre compte de la répartition géographique de la pollution [60] (une seule station à Alger qui est celle située à Ben Aknoun) [61]

Ces stations, dites « réseau de fond », sont alors installées dans des sites non directement influencés par des émissions et correspondent à l'exposition inéluctable de l'ensemble de la population;

- soit pour représenter les situations les plus exposées notamment à la pollution automobile.

Ces stations, dites du « réseau de proximité », rendent alors compte du risque maximum d'exposition à la pollution émise [60]. Elles sont trois stations pour Alger (Bab El Oued, Place du 1^{er} Mai et Place d'El Hamma) [61].

I-5- La mesure des polluants atmosphériques

Pour surveiller la pollution atmosphérique et évaluer ses effets, dimensionner et contrôler le bon fonctionnement des installations de dépollution il faut mesurer la concentration en polluants.

La pollution atmosphérique est un mélange dynamique complexe d'un grand nombre de polluants. Il y a une dizaine d'années, seules quelques substances polluantes étaient recherchées parmi toutes celles existant. Aujourd'hui, la réglementation impose le dosage d'un nombre de composés de plus en plus importants et des limites de détection de plus en plus basses.

Il existe plusieurs types de mesures de polluants dans l'air, suivant les endroits où le prélèvement s'effectue. Chaque domaine possède ses propres méthodes de mesures et de prélèvements:

- **Mesures à l'émission** : le prélèvement s'effectue directement à l'endroit où le polluant est rejeté dans l'atmosphère. Ce type de mesures est utile pour vérifier si les différentes normes de rejet sont respectées ou pour calculer, via un modèle, l'impact de la source sur l'environnement.

- **Contrôle de la qualité de l'air**: Il s'agit de l'air extérieur que respire la population. Ce type de mesure est de loin le plus important car il touche toute la population; c'est pourquoi, la qualité de l'air fait l'objet de normes exigeantes pour protéger le citoyen et l'environnement.

- **Hygiène industrielle**: Il s'agit de mesurer l'air dans les milieux professionnels.

D'un point de vue toxicologique, les gammes de concentrations sont plus importantes et il est souvent possible de trouver un groupe de travailleurs soumis à un polluant bien particulier, alors que dans l'environnement la population subit les effets d'un mélange de polluants.

- **Pollution intérieure:** Ce domaine d'application est relativement récent, mais se développe de plus en plus, car nous passons une large partie de notre vie à l'intérieur des bâtiments. Près de 300 substances sont susceptibles d'être mesurées, mais la source principale de pollution intérieure reste l'usage du tabac [28].

I-6- Méthodes d'analyse des polluants

L'analyse a pour but d'identifier un élément, un composé présent dans un mélange, c'est l'*analyse qualitative*. Mais lorsque l'on détermine la concentration (ou quantité) de cet élément, il s'agit de l'*analyse quantitative*.

Il est d'usage de distinguer deux types de méthodes. Dans une première catégorie sont regroupées les *méthodes chimiques* et *physico-chimiques*, qui mettent en jeux des réactions chimiques ou électrochimiques pour obtenir l'information analytique recherchée. Ces méthodes exigent l'emploi d'un réactif devant être renouvelé. La seconde catégorie comprend les *méthodes purement physiques*, utilisant des propriétés physiques de la matière et qui permettent souvent une mesure directe. Leur précision, leur rapidité, leur spécificité sont autant d'éléments qui justifient le développement actuel des méthodes physiques [6].

I-6-1- Le dosage des polluants atmosphériques gazeux

Les **méthodes à principe optique** sont basées sur la mesure de la quantité de lumière absorbée ou émise par le composé à doser:

- La méthode de dosage par émission de la lumière la plus couramment utilisée est la fluorescence qui mesure la quantité de lumière réémise par le polluant quand celui-ci est placé en présence d'un fort excès de réactif approprié.
- Les méthodes par absorption sont:
 - L'absorption infrarouge non dispersive, où une cellule remplie du constituant gazeux recherché s'échauffe en absorbant la lumière après que cette dernière ait traversé le polluant à doser. On mesure alors l'échauffement.
 - La spectrométrie sélective qui permet de mesurer l'absorption de la lumière du composé dans une bande de longueur d'onde spécifique de son spectre d'absorption moléculaire.
 - La spectrométrie interférentielle à modulation sélective.

La **méthode par ionisation de flamme** provoque l'apparition d'ions par suite de la destruction du polluant par une flamme à haute température. Ces ions sont collectés pour

provoquer un courant que l'on mesure. L'intensité du courant est liée à la concentration du polluant dans l'échantillon gazeux injecté dans la flamme.

La plus utilisée des **méthodes électrochimiques** est celle basée sur l'oxyde de zirconium. Dans ce cas, on mesure la concentration en oxygène dans le gaz à analyser par rapport à celle d'un gaz de référence.

Les **méthodes magnétiques** sont basées sur la détection de la dissymétrie d'un champ magnétique provoqué par la présence de molécules paramagnétiques (l'oxygène par exemple) [60].

I-6-2- Le dosage des polluants atmosphériques particuliers

Pour les mesures de la concentration en particules solides, il faut distinguer les méthodes qui nécessitent une opération manuelle des méthodes qui peuvent être mises en œuvre de façon continue.

Les méthodes de dosage des particules solides nécessitant une **intervention manuelle** sont les suivantes:

- La pesée: les particules sont recueillies sur un filtre préalablement pesé. La masse de poussière est déterminée par une nouvelle pesée et est rapportée au volume de gaz filtré. Cette technique a l'avantage de permettre d'autres investigations telles que des examens microscopiques (forme et structure des particules), des analyses physicochimiques ou biologiques.
- -la mesure de la lumière réfléchie: cette méthode est fondée sur la détermination par réflectométrie de la teinte de la tache formée sur un filtre.

Les méthodes de mesures **en continu** sont les suivantes:

- La mesure de l'absorption ou de la diffusion d'un faisceau lumineux: celui-ci est provoqué par les particules en suspension.
- L'absorption du rayonnement bêta: dans cette méthode, les particules sont filtrées par une membrane dont on connaît la capacité d'absorption du rayonnement bêta. Par une nouvelle mesure on détermine, par différence, la masse de particules recueillies.

Comme dans tous les processus d'analyse, on distingue deux stades dans la détermination analytique d'un polluant, d'une part, le prélèvement de l'échantillon ou échantillonnage, et, d'autre part, l'examen de celui-ci. Ces deux stades qui peuvent être automatiques ou manuels, sont toujours successifs, mais l'intervalle de temps les séparant peut être très court [8].

D'une façon générale, on considère trois catégories de méthodes analytiques:

- 1- les méthodes « manuelles » où les échantillons prélevés de façon discontinue sont ensuite transportés au laboratoire pour examen;
- 2- les méthodes « automatiques » avec échantillonnage et analyse en continu sur site qui donnent à tout moment la teneur du polluant concerné. En couplant l'analyseur à un système d'acquisition de données, il est possible d'enregistrer l'évolution de la concentration du polluant au cours du temps et de déterminer la teneur moyenne de polluant sur un intervalle de temps particulier;
- 3- les méthodes « automatiques avec échantillonnage continu séquentiel » qui mettent en œuvre un appareil automatique, permettant de recueillir pendant une période présélectionnée un échantillon moyen d'air pollué. Cet échantillon est ensuite examiné soit immédiatement sur place, soit en laboratoire. Le résultat obtenu représente aussi la teneur moyenne en monoxyde de carbone sur la période de temps choisie.

En tout état de cause, le choix de la méthode analytique à employer reste déterminé par les moyens dont on dispose, par les circonstances et par les objectifs à atteindre.

Ainsi, lorsqu'il s'agit d'étudier et de suivre l'évolution de la pollution de l'atmosphère d'une ville par la mesure du monoxyde de carbone, l'organisme qui en la charge devra s'équiper d'analyseurs automatiques de précision, alors que de simples appareils à tubes détecteurs, dont la précision est moindre, peuvent suffire pour contrôler l'hygiène de la combustion d'un appareil thermique ou pour détecter des sources de monoxyde de carbone lors d'enquêtes après intoxications oxycarbonées [8].

I-6-3- Quelques exemples de dosage automatique

- SO₂- conductimétrie, réaction du SO₂ en H₂ SO₄ dilué; mesure de l'augmentation de la conductivité;
- SO₂- fluorescence en UV; excitation des molécules de SO₂ par des radiations UV (190-230nm); mesure des radiations de fluorescence;
- NO/NO₂- chimiluminescence; réaction du NO avec le O₃ pour donner le NO₂; détection de la radiation chimiluminescence par photomultiplicateur;
- CO- absorption non dispersive dans l'infrarouge; mesure par un dispositif de détection approprié de l'intensité de la radiation non absorbée;
- O₃- chimiluminescence; réaction du O₃ avec l'éthène pour former le formaldéhyde; détection de chimiluminescence par photomultiplicateur [6].

I-7- La biosurveillance de la qualité de l'air

Il semble de plus en plus évident que la gestion de la pollution atmosphérique ne doit plus se limiter à la surveillance et la mesure des émissions ou des immissions, mais qu'elle doit chercher à évaluer les expositions et les risques. La biosurveillance végétale entre dans le cadre de cette démarche en permettant de définir non seulement la nature ou la répartition spatio-temporelle des polluants présents dans l'air, mais également leur dangerosité pour les êtres vivants.

En fonction de la situation à laquelle on est confronté, on a souvent recours soit à une approche dite *passive*, soit à une approche dite *active* (afin d'augmenter la performance du diagnostic, on utilisera simultanément ces deux approches).

Par approche *passive*, on entend l'utilisation de végétaux en place, avec les inconvénients de ne pouvoir choisir ni les sites, ni les espèces, ni leur environnement. Il s'agit d'une intégration rétroactive sur une plus ou moins longue durée de la pollution et des paramètres stationnels (climat) et des facteurs propres au végétal (variabilités génétiques).

Par approche *active*, on entend la mise en place sur un site pendant une période donnée de végétaux génétiquement sélectionnés et cultivés dans des conditions standardisées. Elle permet de se dégager des facteurs génétiques et stationnels.

La définition de la biosurveillance sera précisée après avoir défini les quatre concepts que nous regroupons sous ce terme: biomarqueur, bio-indicateur, bio-intégrateur et bioaccumulateur (figure III.2) [36].

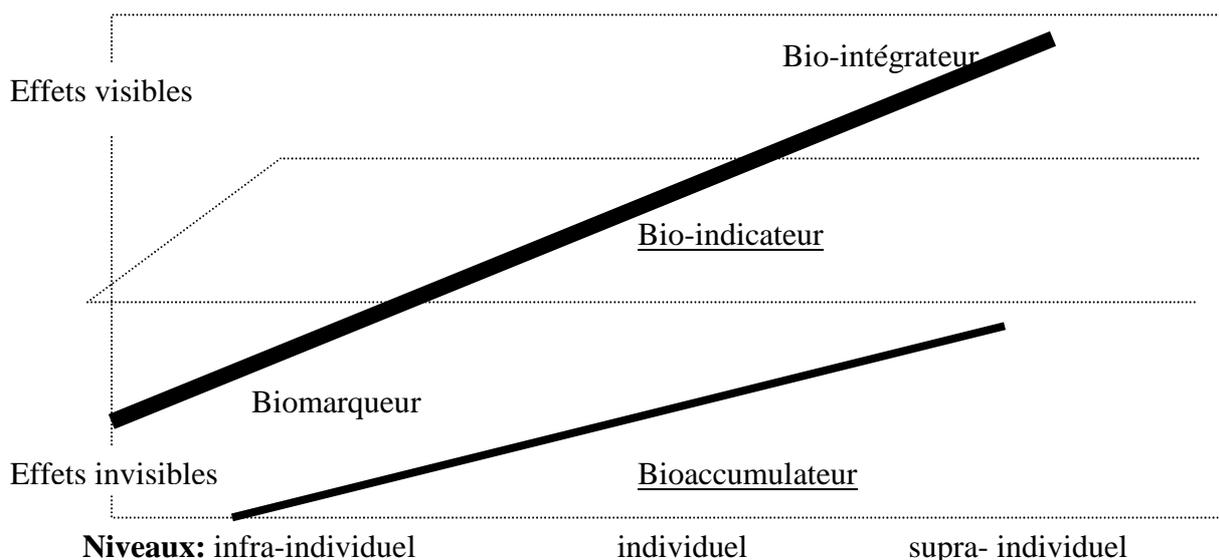


Figure III.2: Présentation des différents concepts de la biosurveillance de la qualité de l'air en fonction des niveaux d'organisation biologique et de visibilité des effets [36].

Les trois premiers concepts relèvent essentiellement de processus biologiques, ce sont des indicateurs de réaction. Ils correspondent à une progression à la fois dans l'expression et la lisibilité des effets observés que dans le niveau d'organisation biologique étudié:

- le bio marqueur se situe au niveau infra-individuel: altérations moléculaires, biochimiques, cellulaires ou physiologiques non visibles [36]. L'ADN du végétal bio marqueur subit un endommagement en présence d'un polluant atmosphérique à qui il est sensible [62];
- le bio-indicateur se situe au niveau individuel: altération physiologiques, tissulaires ou morphologiques visibles;
- le bio-intégrateur se situe au niveau populationnel et/ou communautaire: disparition ou apparition d'espèces, variation densitaire;
- les trois concepts sont séparés de celui de bio accumulateur en raison de la finalité de la bio surveillance de la pollution atmosphérique, le végétal utilisé en bioaccumulation sert principalement de matrice pour le dosage de différents polluants. Suite à des mécanismes de transfert et d'accumulation. Le végétal devient un « capteur vivant » et non plus un modèle d'étude de phénomène biologique résultant de l'accumulation [36]. Les tableaux III.1 et III.2 rassemblent les plantes utilisables en biosurveillance de la pollution.

Tableau III.1: Liste des plantes utilisables en biosurveillance active de la pollution atmosphérique [36].

Polluants	Bio-indicateur	Bioaccumulateur
SO ₂	<i>Medicago sativa</i> <i>Spinacia oleracea</i> <i>Plantago major</i>	<i>Nicotiana tabacum</i>
O ₃	<i>Trifolium subterraneum</i> <i>Populus nigra</i>	
PAN	<i>Urtica urens</i> <i>Poa annua</i> <i>Lactuca sativa</i>	
NO ₂	<i>Nicotiana glutinosa</i> <i>Apium graveolens</i>	<i>Nicotiana tabacum</i>
Hydrocarbures C ₂ H ₄	<i>Petunia hybrida</i> <i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Lactuca sativa</i> <i>Cichorium endiva</i> <i>Pinus sp.</i>

Tableau III.2: Utilisation actuelle des végétaux supérieurs, des bryophytes et des lichens en biosurveillance de la qualité de l'air [36].

	Polluants gazeux très phytotoxiques O₃, SO₂	Dépôt secs ou humides de polluants moins phytotoxiques (NO_x, NH₃)	Eléments traces métalliques	Polluants organiques
Végétaux supérieurs	<p>Bio-indication Pour l'ozone: Approche active (surtout tabac) Approche passive (pin d'Alep en région méditerranéenne)</p> <p>Bioaccumulation (sauf pour O₃) (ray-grass)</p> <p>On connaît mieux les <i>biomarqueurs</i> des végétaux supérieurs que ceux des mousses et des lichens</p>	<p>Bioaccumulation (dosages des polluants dans les feuilles en approche passive ou en approche active dans le ray-grass)</p> <p>Emergence de la bio-intégration (par ex: en milieux forestiers)</p>	<p>Bioaccumulation <i>Approche active</i> (plantes herbacées, par exemples l'utilisation du ray-grass)</p> <p><i>Approche passive</i> (feuilles, aiguilles, écorces)</p> <p>[Emergence des <i>biomarqueurs</i>]</p>	<p>Bioaccumulation <i>Approche active</i> (plantes herbacées telles que le chou; conifères)</p> <p><i>Approche passive</i> (plantes herbacées, conifères)</p> <p>[Bio-indication (pétunia)]</p> <p>[Emergence des <i>biomarqueurs</i>]</p>
Bryophytes	Pas d'utilisation en pratique de routine	<p>Bioaccumulation de l'azote</p> <p>Approche passive et active</p>	<p>Bioaccumulation</p> <p>Approche passive et active</p>	<p>Bioaccumulation</p> <p>Approche passive et active</p>
Lichens	Bio-integration/ Bio-indication	<p>Bio-integration/ Bio-indication (indices d'acidophilie et de nitrophilie)</p> <p>Bioaccumulation De l'azote Approche passive et active</p>	<p>Bioaccumulation</p> <p>Approche passive et active</p>	<p>Bioaccumulation</p> <p>Approche passive et active</p>

L'utilisation des lichens, des mousses ou les végétaux supérieurs constitue un complément simple, rapide et économique aux méthodes physicochimiques classiques. Elle permet une surveillance environnementale à proximité de sources fixes ponctuelles ou agglomérées, mais également une évaluation sur le long terme des désordres écologiques causés par les aérocontaminants à la biodiversité et à la densité des populations végétales.

II- La surveillance de la qualité de l'air à Alger

II-1- L'aspect réglementaire :

Dans chaque région du monde, l'état confie la surveillance de la qualité de l'air à une ou plusieurs associations agréées de surveillance de la qualité de l'air dont les missions de base sont :

- la surveillance de la qualité de l'air ;
- la diffusion des résultats et des prévisions ;
- l'information du public et des décideurs lors des dépassements des seuils d'information, de recommandation et d'alerte. Dès le niveau d'information et de recommandation, il peut être préconisé de réduire la vitesse de 20km/h en zone périurbaine et hors agglomération, de privilégier les modes de déplacement non polluants, d'éviter les exercices physiques intenses.

Il est reconnu à chacun le droit de respirer un air qui ne nuise pas à sa santé et d'être informé de la qualité de l'air qu'il respire. Ainsi l'Algérie se dote de Normes sur la qualité de l'air à partir de la publication au journal officiel du Décret exécutif n° 06-02 du 7 Dhou El Hidja 1426 correspondant au 7 janvier 2006 définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique qui sont présentés sur le tableau III.3 [63].

Tableau III.3: Normes sur la qualité de l'air en Algérie

	Les polluants atmosphériques			
	Dioxyde d'azote (NO ₂)	Dioxyde de soufre (SO ₂)	Ozone (O ₃)	Particules fines en suspension
Objectif de qualité	135 mg/Nm ³	150 mg/Nm ³	110 mg/Nm ³	50 mg/Nm ³
Valeur limite	200 mg/Nm ³	350 mg/Nm ³	200 mg/Nm ³	80 mg/Nm ³
Seuil d'information	400 mg/Nm ³	350 mg/Nm ³	180 mg/Nm ³	-
Seuil d'alerte	600 mg/Nm ³	600 mg/Nm ³	360 mg/Nm ³	-

La Loi algérienne N° 43 du 20 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable consacre des dispositions spéciales à la pollution de l'air que nous respirons. Elle stipule notamment:

- Que les industries polluantes doivent prendre toutes les dispositions nécessaires pour réduire ou supprimer leurs émissions.
- Que l'état doit définir les valeurs limite, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité pour l'air ainsi que les dispositifs de surveillance de l'atmosphère.

Dans le cadre de la surveillance de la qualité de l'air en Algérie, le ministère de l'aménagement du territoire, de l'environnement et de tourisme (MATET) a mis en place en Avril 2002 des réseaux de surveillance, baptisés SAMASAFIA, qui appartient à l'observation nationale de l'environnement et du développement durable.

Sur le plan de la surveillance, les principales actions menées sont la mise en place de stations de surveillance de la qualité de l'air au niveau des grandes villes notamment, Alger, Annaba, Oran et Skikda.

Pour les agglomérations d'Alger et d'Annaba, le réseau est composé de 4 stations reliées à un poste central.

Les réseaux mesurent:

- Les Polluants atmosphériques : Oxyde de carbone, Oxydes d'azote, Oxyde de soufre, Hydrocarbures, Ozone et poussières.
- Les Facteurs climatiques : Température ambiante, Humidité relative, Vitesse et Direction du vent.

Le projet de loi sur l'air prévoit l'équipement des villes de plus de 500.000 Habitants d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air.

II-2- La pollution atmosphérique dans la ville d'Alger

Afin d'évaluer le degré réel de pollution urbaine et industrielle et mettre en œuvre une politique de protection de la santé des citoyens et de la qualité de vie, il est nécessaire de surveiller la qualité de l'air à Alger. La figure III.3 montre les photos des 4 stations installées à Alger.



Figure III.3 : Photos des 4 stations SAMASAFIA installées à Alger [61].

SAMASAFIA d'Alger appuie son expertise sur un réseau permanent de surveillance pour s'assurer que l'air respiré quotidiennement soit de bonne qualité.

Le rôle de SAMASAFIA d'Alger consiste à :

- ❖ fournir des indications sur l'ensemble des polluants réglementés (dioxyde de soufre, oxydes d'azote, monoxyde de carbone, ozone, poussières, benzo(a)pyrène, benzène, arsenic, nickel, cadmium, plomb) sur les agglomérations où les valeurs guides risquent d'être dépassées.
- ❖ rendre accessible des données à toute personne intéressée (mise en ligne sur internet, indice de qualité de l'air quotidien et alerte en cas de pic de pollution).

Mais au travers de ses missions, outre l'aspect réglementaire, SAMASAFIA d'Alger répond également à toute demande de mesure de qualité de l'air dans une logique de politique régionale de surveillance de la pollution atmosphérique.

Le réseau comprend 4 sites pour une vingtaine d'analyseurs.

Toutes ces stations de mesure, permanente, permettent de suivre en continu les polluants atmosphériques réglementés mais également des polluants plus spécifiques: les métaux toxiques,...

Les quatre agglomérations d'Alger (Ben Aknoun, Bab El Oued, El Hamma et place du 1^{er} Mai) sont équipées de stations de mesures automatiques en continu (24h/24, 7j/7).

II-3- Les paramètres météorologiques et la pollution atmosphérique à Alger

La majorité des pointes de pollution par l'ozone sont enregistrées pendant les mois estivaux où les températures et les taux d'humidité sont élevés.

L'évolution mensuelle de l'humidité durant l'année 2007 dans les quatre stations de Samasafia d'Alger a montré qu'elle influence les taux de concentrations en ozone. La nébulosité ou l'hygrométrie modulent l'intensité des rayonnements solaires par absorption UV par les molécules d'eau.

La vitesse du vent joue un rôle important sur les conditions de dispersion des polluants. La figure III.4 montre la corrélation entre les concentrations d'ozone mesurées et la vitesse du vent au niveau de la station de BEN AKNOUN durant l'été 2007.

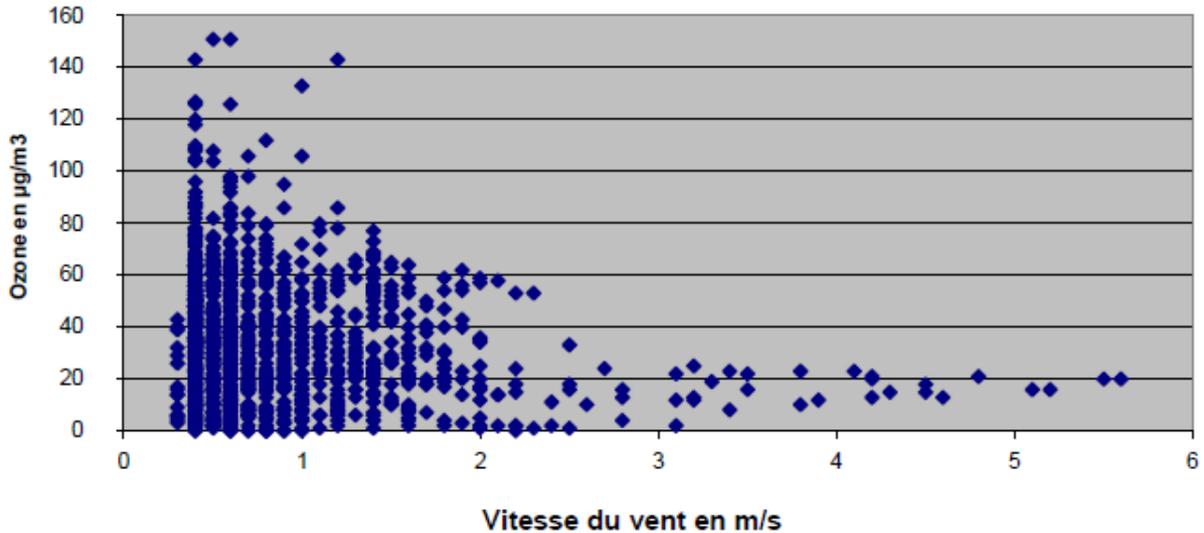


Figure III.4: Répartition des concentrations d'ozone en liaison avec la vitesse du vent durant l'été 2007 au niveau de la station de BEN AKNOUN [64].

Au niveau des fortes concentrations, on remarque une augmentation jusqu'à des vitesses de vent atteignant 4 à 6 m/s, puis la tendance s'inverse et les concentrations semblent diminuer à mesure que la vitesse du vent augmente. La diminution est facile à comprendre par une plus grande turbulence, donc une meilleure dilution du polluant. L'augmentation des concentrations avec la vitesse du vent peut s'expliquer par un apport de polluant, provenant de couches plus élevées de l'atmosphère, durant une période de forte turbulence. Cette hypothèse permet également d'expliquer la raison de l'absence de concentrations faibles pour des vitesses de vent élevées.

La vitesse du vent n'est qu'un des paramètres influençant les concentrations en ozone et ne constitue pas en soi une condition suffisante : il peut y avoir des fortes vitesses de vent sans pour autant enregistrer des fortes concentrations en ozone.

On remarque la diminution de la proportion de valeurs élevées en dioxyde d'azote avec la vitesse du vent, grâce à une meilleure dilution.

II-4- Le dioxyde d'azote NO₂

Généralement, l'ensemble des sites ne dépasse pas l'objectif de qualité annuel de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pour la station de Ben Aknoun, si l'on excepte l'année 2006, exceptionnelle sur le plan météorologique, une baisse régulière est observée pour les oxydes d'azote (figure III.5). Elle s'explique par l'importance prise progressivement par le nombre de véhicules catalysés dans le parc roulant ainsi que la concrétisation des objectifs du Ministère de l'Environnement (généralisation de l'essence sans plomb, dépollution industrielle....).

En 2007, les teneurs poursuivent leur baisse par rapport à 2006. Les concentrations moyennes en 2007 sont les plus basses.

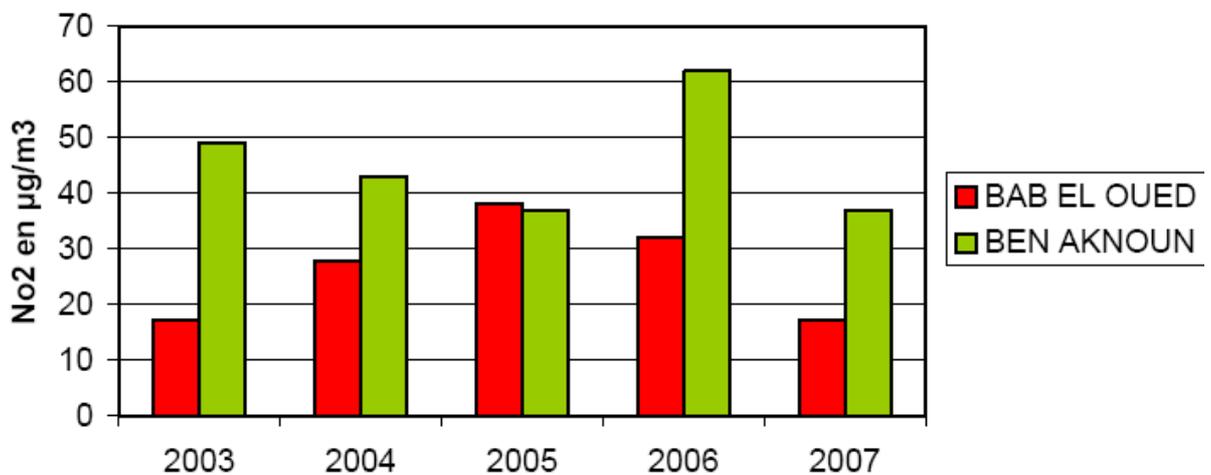


Figure III.5: Evolution annuelle des concentrations de Dioxyde d'azote dans l'agglomération d'Alger [64].

Pour l'année 2007, il est intéressant de regarder l'évolution mensuelle de NO₂. Les données de l'année 2007, fournies par le réseau SAMASAFIA pour les deux stations de Ben Aknoun et Bab El Oued, indiquent une augmentation des teneurs en NO₂ pendant la période hivernale, essentiellement centrée sur les mois de décembre, janvier et février. La reprise d'activité du mois de septembre induit également une augmentation des taux de NO₂. L'hiver, les conditions météorologiques sont plus pénalisantes (régimes de stabilité plus fréquents) et l'activité humaine, notamment le trafic routier, est maximale.

Les niveaux moyens mensuels en NO₂ sur les stations de Ben Aknoun et Bab El Oued sont très contrastés en fonction des environnements considérés.

Le tracé de la semaine type met l'accent sur l'impact de la circulation automobile et des activités socio-économiques (travail, école) sur les niveaux de pollution. Sur le profil

d'une semaine moyenne, on remarque une diminution des concentrations durant les week-ends attribuable à la baisse du trafic.

Les concentrations en NO₂ varient fortement au cours d'une journée. Le profil d'une journée moyenne en NO₂ est typique et correspond aux flux automobiles. On aperçoit clairement un profil bimodal avec un pic matinal et un pic vespéral moins marqué (figure III.6), ces pics correspondant aux départs du matin et aux retours du soir. Au même moment, cette pollution est aggravée par l'effet de couvercle thermique qui se forme parfois la nuit et se détruit le matin. Les polluants accumulés sous l'inversion thermique sont brassés et rabattus au sol.

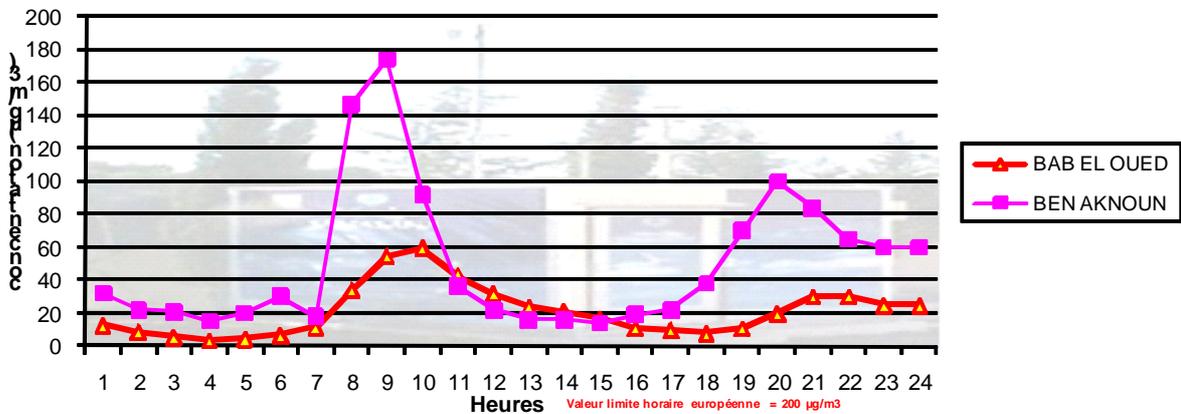
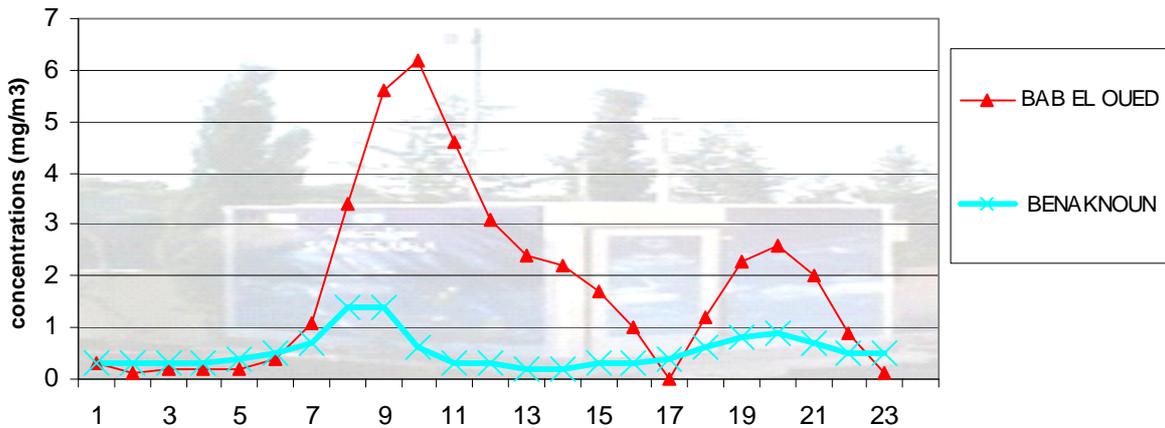


Figure III.6: Profil moyen journalier des teneurs en Dioxyde d'azote (NO₂) pour l'ensemble du réseau durant le mois de janvier 2008 [61].

II-5- Le monoxyde de carbone (CO)

A l'instar des oxydes d'azote, l'évolution journalière des concentrations de monoxyde de carbone est fortement corrélée aux fluctuations du trafic automobile. Ainsi, deux pointes de concentration de CO sont généralement observées aux heures d'intensification du trafic du matin et du soir (figure III.7).



Recommandation OMS = 10 mg/m³ Heures

Figure III.7: Profil moyen journalier des teneurs en monoxyde de carbone pour l'ensemble du réseau durant le mois de janvier 2008 [61].

Les variations entre sites sont relativement faibles et l'incidence des conditions météorologiques reste limitée compte- tenu de l'inertie de ce polluant (donc de sa stabilité).

Les niveaux enregistrés ne dépassent jamais les limites réglementaires.

L'évolution des moyennes annuelles depuis 2004 montre la baisse constante et régulière des teneurs de monoxyde de carbone dans l'air ambiant. Cependant en 2007, on enregistre une augmentation des valeurs annuelles avec 0,98 mg/m³ à Bab El Oued, 0,53 mg/m³ à Ben Aknoun en raison du trafic plus perturbé et moins rapide.

Un cycle saisonnier est mis en évidence avec des concentrations plus élevées en hiver.

Au niveau de l'agglomération d'Alger, le monoxyde de carbone provient pour l'essentiel du trafic automobile. Les véhicules à essence constituent les principales sources d'émission de ce polluant.

II-6- Le dioxyde de Soufre (SO₂)

La pollution par le dioxyde de soufre concerne uniquement la station du 1^{er} MAI.

Les concentrations moyennes horaires enregistrées en sont cependant largement inférieures au seuil limite de 350 µg/m³ (figure III.8).

Les concentrations maximales horaires sont le plus souvent observées entre 08h et 13h. Cette période correspond aux pics de pollution du matin et aux heures de visite de l'hôpital (la station de mesure étant localisée à l'intérieur de cette institution).

Les moyennes journalières observées durant le mois de juin sont largement inférieures au seuil limite européen de $125\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dans 98% des cas les valeurs enregistrées sont inférieures à $8\mu\text{g}/\text{m}^3$ confirmant bien la faiblesse de la pollution par le dioxyde de soufre par rapport aux normes journalières.

Les faibles niveaux de pollution par le SO_2 s'expliquent principalement par l'absence de soufre dans le gaz naturel utilisé comme source d'énergie aussi bien pour les besoins domestiques qu'industriels.

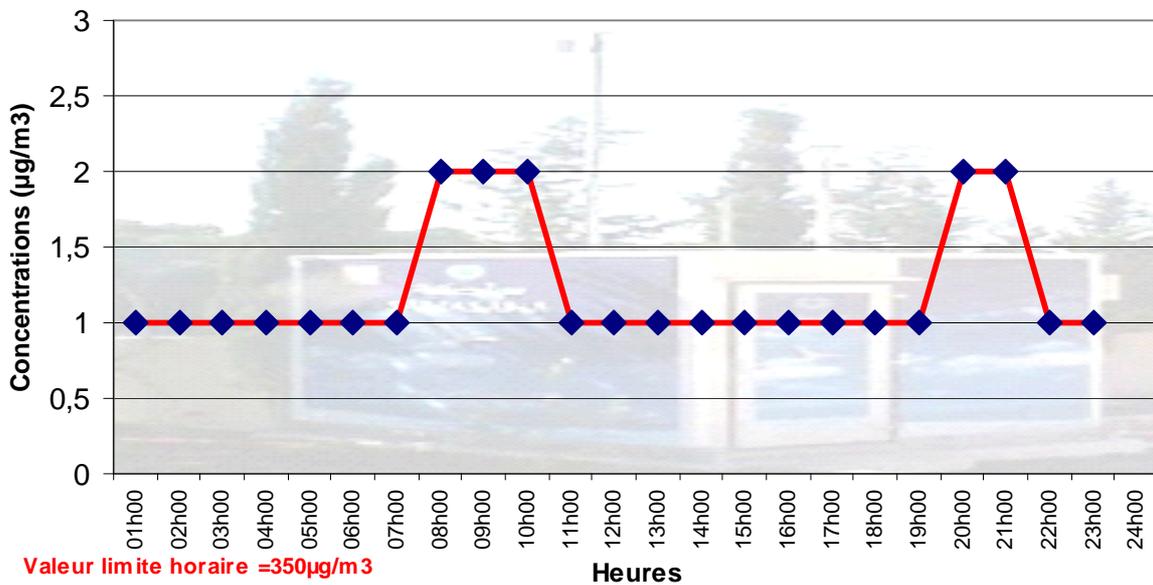


Figure III.8: Profil moyen horaire des teneurs en dioxyde de soufre à la station du 1er MAI durant le mois de janvier 2008 [61].

II-7- Les particules

Une étude réalisée sur plusieurs années a permis d'accéder aux niveaux de pollution de l'air par les particules fines (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ et PM_1) atteints à Alger en différents types de sites (deux sites urbains U1 et U2 qui permettent d'évaluer les taux d'exposition de la population citadine à la pollution), un site de proximité de type station trafic P (site sous influence directe des émissions automobiles) et deux sites péri-urbains PU1 et PU2 situés à la limite du tissu urbain d'Alger.

Les résultats obtenus montrent que dans tous les sites les teneurs journalières varient dans une large fourchette. A titre d'exemple, nous présentons en figure III.9 l'évolution journalière des PM_{10} , PM_3 et PM_1 mesurées au site de proximité P en 2003.

Cette variation journalière est due, d'une part aux changements dans l'intensité des sources émettrices (trafic routier), et d'autre part aux influences météorologiques (vent, pluie, etc.). En ce site, les teneurs moyennes annuelles des particules inhalables PM-10, des particules respirables PM-2,5 et des particules très fines PM-1 s'élèvent respectivement à 80,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 43,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 27,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

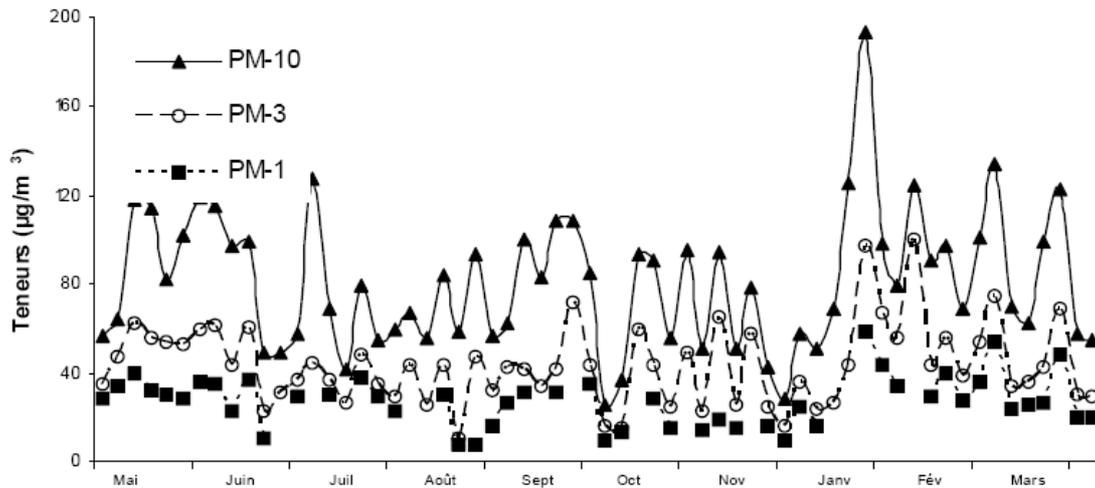


Figure III.9: Évolution des teneurs en PM_{10} , PM_3 et PM_1 mesurées à Alger [30].

Une comparaison avec d'autres villes montre également qu'Alger accuse un taux élevé de pollution. Les teneurs en PM_{10} mesurées à Alger sont en effet très supérieures à celles observées dans les villes européennes telles que Paris, Lyon et Marseille (22 à 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), mais inférieures à celles des villes de certains pays émergents connues pour leur forte pollution comme Pékin (135,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et le Caire (130 à 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

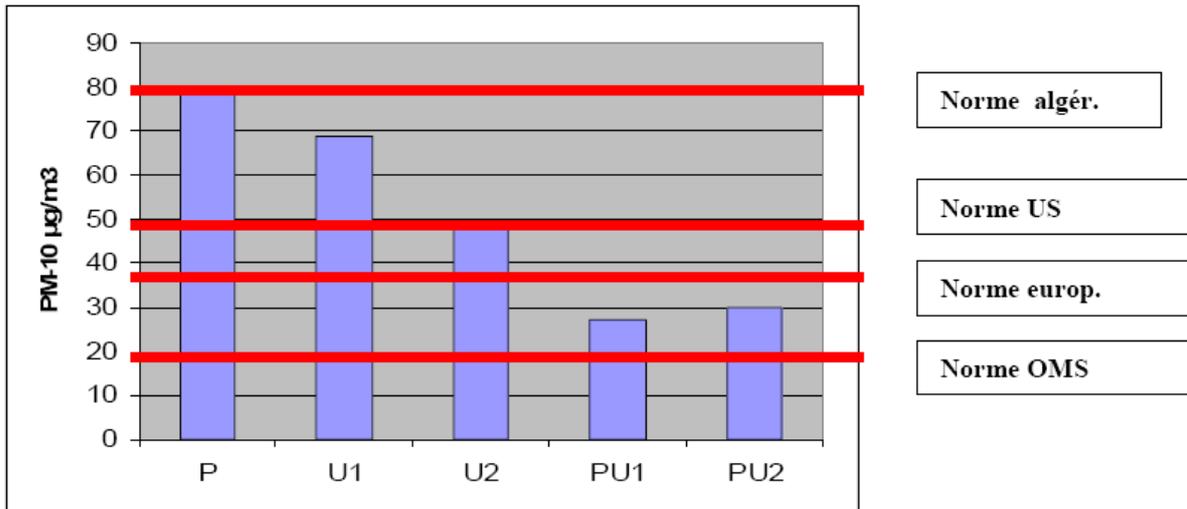


Figure III.10: Comparaison des PM_{10} par apport aux normes [61].

Comme le montre la figure III.10, en milieu urbain et en site station trafic routier, les teneurs en PM_{10} et $PM_{2.5}$ sont excessives et dépassent les normes internationales et OMS. Cette pollution est d'autant plus inquiétante que plus de 60 % des PM_{10} sont des particules respirables. En sites péri-urbains, les niveaux de pollution sont certes réduits de moitié, mais atteignent en ampleur les niveaux mesurés en sites urbains dans les grandes villes européennes. On montre par ailleurs que les PM_{10} suivent une distribution bimodale centrée sur 0,6 et 6µm. Il existe probablement trois sources majeures de pollution : le trafic routier et les particules secondaires pour les PM_3 et les sources terrigènes pour les PM_{3-10} .

L'étude des métaux lourds montre la présence d'un taux élevé de plomb associé aux particules très fines et de Fe et Mn de l'écorce terrestre dans les particules grossières. Ainsi, en plus des émissions du trafic routier, les sols nus, le manque de végétation et la resuspension contribuent à ces taux élevés en pollution de l'air par les particules [30].

II-8- L'ozone O_3

En 2007 et comme chaque année, les chaleurs estivales, bien qu'ayant été normales, ont activé les mécanismes de production photochimique de l'ozone.

Aucun dépassement du seuil d'information et de recommandation à la population, fixé par la réglementation à 180 microgrammes par mètre cube n'a été enregistré.

Les maximums horaires enregistrés l'année 2007 ont été en dessous des seuils limites.

Le profil moyen journalier montre que les valeurs maximales d'ozone sont généralement observées en début d'après-midi en raison d'un ensoleillement élevé en cette période de la journée.

Ces moyennes horaires maximales sont le plus souvent observées dans la plage horaire 12h-14h c'est-à-dire aux heures susceptibles de niveaux élevés d'ozone en lien avec l'activité photochimique (figure III.11).

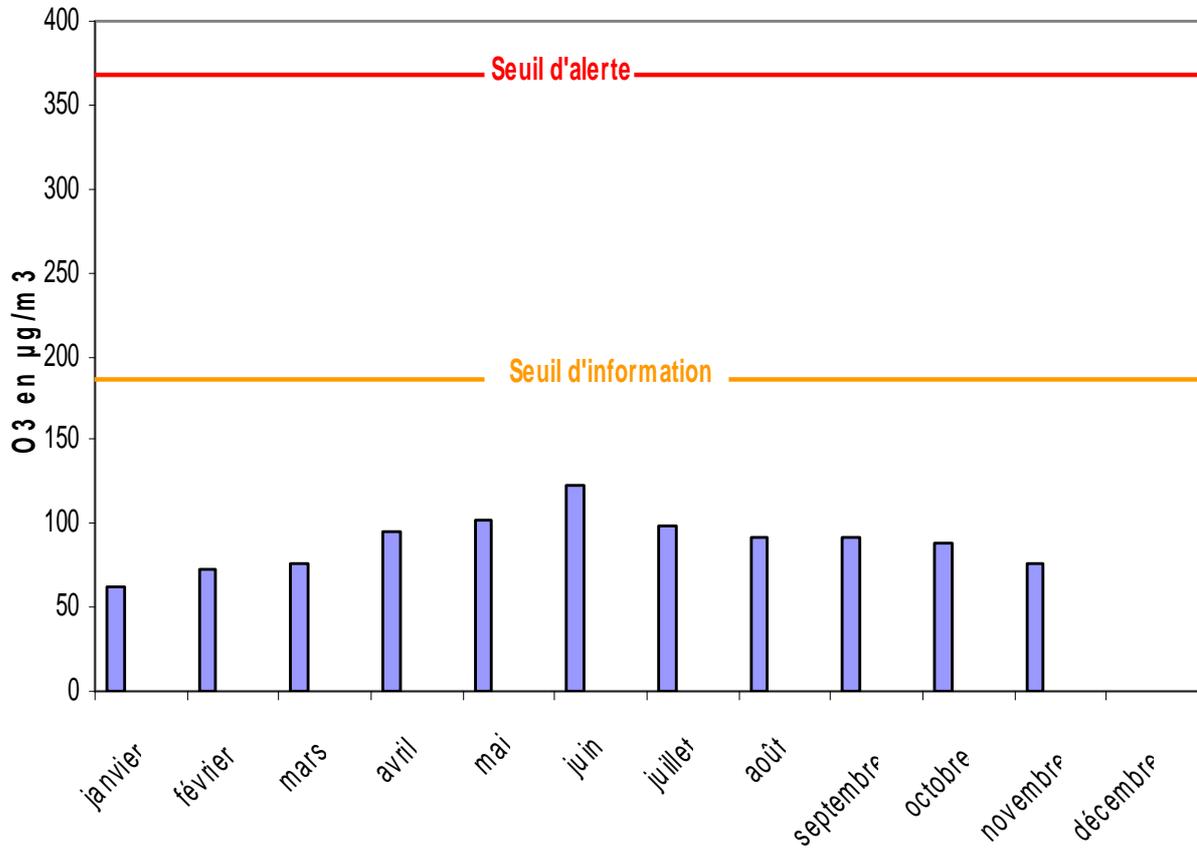


Figure III.11: Variation des maxima horaires en ozone en 2004 à Alger [64].

Durant toute l'année, les moyennes mensuelles enregistrées dans la région, sont inférieures à 65 µg/m³ (seuil de protection de la végétation).

La majorité des pointes de pollution par l'ozone sont enregistrées pendant les mois estivaux.

Les niveaux d'ozone les plus élevés sont observés principalement lorsque les masses d'air sont originaires des secteurs nord à est. La production de l'ozone au cours du transport des masses d'air depuis les régions limitrophes et en particulier depuis la région d'Alger centre semble être la principale cause des fortes concentrations observées suivant ces secteurs. La part due à la production locale ne doit pas être négligée [64].

III- Mesure de la pollution urbaine dans la ville de Bejaia

Pour montrer l'impact négatif du parc automobile sur la pollution de l'air, il s'est avéré nécessaire de procéder à une analyse du trafic et des principaux facteurs de pollution de l'air que sont le nombre et la qualité des véhicules motorisés, la qualité et la quantité d'énergie consommée, afin d'évaluer la quantité de polluants émis.

III-1- Caractéristiques du parc automobile de Bejaia

Le parc automobile de la wilaya de Bejaia ne cesse d'augmenter. Il est passé de **11285** de véhicules en 1970 à **174847** véhicules en décembre 2009 dont 66,91% ont un age supérieur à 10 ans, 14,85% compris entre 5 et 10 ans et 18,24% inférieurs à 5 ans. Les véhicules ayant l'age supérieur à 20 ans représentent 43,38% de ce total (tableau III.4). Si la durée de vie moyenne d'un véhicule en Europe est de 11 ans, dans le parc de Bejaia elle dépasse 20 ans [61]. 86,8 % des véhicules ont plus de 5 ans et constituent donc des sources potentielles de fortes émissions. D'après ces chiffres nous constatons que le parc automobile de Bejaia est caractérisé par son ancienneté.

Tableau III.4: Véhicules immatriculés à Bejaia au 31 décembre 2009

Types de véhicules	Catégories d'age					Total
	0-5 ans	6-10 ans	11-15 ans	16-20 ans	>20 ans	
Véhicules tourisme	17511	19291	15722	12830	41180	106534
Camions	2608	1181	255	705	10485	15234
Camionnettes	7515	3155	4605	3133	13902	32310
Autocars	1474	1164	1197	246	600	4681
Tracteurs routiers	1155	286	73	324	2090	3928
Tracteurs agricoles	142	265	132	604	2711	3854
Véhicules S	229	131	193	181	588	1324
Motos	37	22	23	14	394	490
Total	31896	25957	22479	18663	75852	174847

Dans ce parc, il y'a des véhicules de première immatriculation de plus 30 ans aussi bien parmi les camions que parmi les véhicules de tourisme. Ce parc est composé en majorité de véhicules de tourisme avec un nombre de 106534 qui représente 60,93% du total du parc.

La part des véhicules fonctionnant au diesel a augmenté régulièrement durant la période 1999-2009 passant de 43,17% en 1999 à 53,3% en 2009. Les véhicules à essence représentent alors 46,7% du parc. Le tableau III.5 donne l'évolution du parc automobile en circulation à Béjaia.

Tableau III.5: Parc automobile en circulation

	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Total	111367	117151	122692	128334	132254	136943	142590	148623	154882	162685	168672
Variation%	-	5,19	4,73	4,60	3,05	3,54	4,12	4,23	4,21	5,04	3,48
Essence %	56,13	54,1	52,2	50,55	49,79	49,3	48,9	48,5	48,4	46,9	46,7
Diesel %	43,17	45,9	47,8	49,45	50,21	50,7	51,1	51,5	51,6	53,1	53,3

Il est à noter que ce n'est pas tous les véhicules immatriculés à Béjaia qui sont en circulation. Un nombre non négligeable de vieux véhicules sont réformés.

Comme le montre le tableau III.6, les polluants rejetés par les véhicules dépendent fortement de leurs âges et du type de carburant utilisé.

Tableau III.6 : Emissions mesurées (en g/km) des véhicules diesel (dies) et essence (Ess) en fonction de l'année de mise en circulation [66].

]80-84]]84 -88]]88-92]]92-96]]96-00]]00-04]	
	Dies	Ess	Dies	Ess	Dies	Ess	Dies	Ess	Dies	Ess	Dies	Ess
CO		8,5	0,68	3,6	0,77	3,3	0,77	4,1	0,57	2,8	0,54	1,9
NO		0,36	0,43	0,33	0,43	0,21	0,33	0,18	0,32	0,13	0,12	0,12
SO ₂			0,32		0,37		0,33		0,32		0,12	

Nous remarquons que les émissions des véhicules récents (2000 – 2004) sont voisines des normes européennes, par contre pour les plus anciens véhicules les émissions sont beaucoup plus importantes.

La zone urbaine de Bejaia et sa périphérie sont reliées aux routes nationales par des voies secondaires (routes vicinales et communales). Ce dense réseau routier favorise une augmentation exponentielle de l'activité et plus particulièrement celle de la circulation automobile. Elle demeure la principale source de la pollution atmosphérique liée aux émanations des gaz d'échappement qui contiennent de fortes concentrations d'hydrocarbures imbrûlés.

III-2- Mesure de la pollution urbaine dans la ville de Bejaia

Bejaia n'est pas une ville à forte industrie, la pollution qui y règne est essentiellement d'origine urbaine.

Des mesures de concentrations de polluants (CO, NO₂ et SO₂) ont été effectuées au centre ville près du rond point Daouadji [66]. La figure III.12 montre la distribution du CO en fonction du nombre de véhicules.

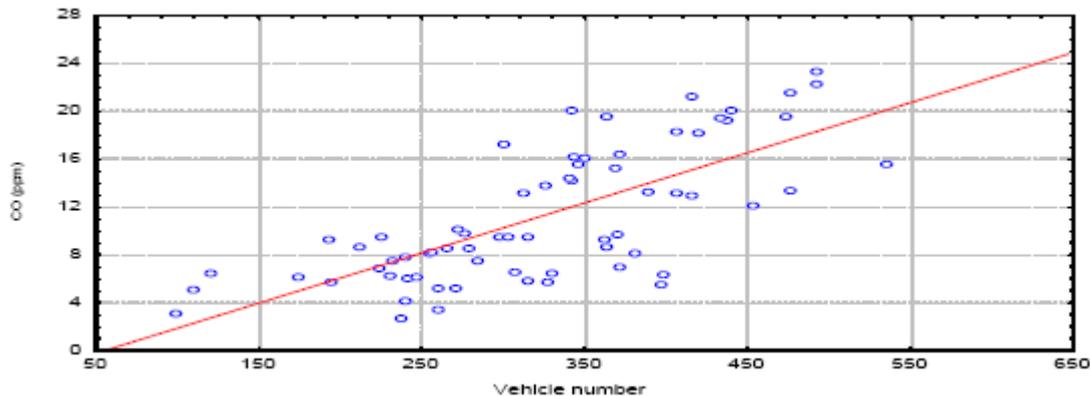


Figure III.12: Courbe de régression entre le CO et le nombre de véhicule à Bejaia [66].

L'analyse statistique de corrélation - régression a abouti à une forte corrélation entre la concentration du monoxyde de carbone et le nombre de véhicules avec un coefficient de 0,87. Ceci confirme que la pollution urbaine est essentiellement d'origine automobile.

III-2-1- L'évolution hebdomadaire de la pollution à Bejaia

Dans une étude faite en 2004, la pollution a été mesurée dans plusieurs sites de la ville de Bejaia. Il s'est avéré que les carrefours Aamriw et Daouadji sont les sites les plus pollués dans cette ville. Ces deux carrefours sont caractérisés par une circulation automobile très intense. Pour faire ressortir la part du trafic automobile dans la pollution de l'air, les concentrations de 3 polluants (CO, NO et SO₂) ont été mesurées tout en comptant le nombre de véhicules passant par le carrefour Daouadji.

Nous avons exploité ces mesures pour tracer l'évolution mensuelle de la pollution moyenne journalière. Durant le mois de mars 2004 l'évolution de la pollution moyenne est montrée sur l'histogramme de la figure III.13. Trois semaines sur quatre, la journée du lundi est la plus polluée à cause du trafic intense. Par contre les vendredis la pollution est minimale.

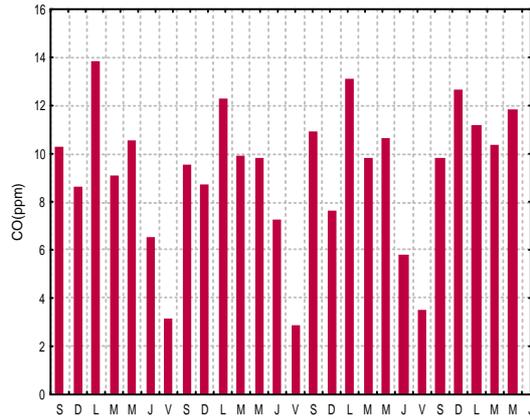


Figure III.13: Evolution mensuelle de la pollution dans la ville de Bejaia

De faibles concentrations sont constatées les jours de week-end (vendredi et jeudi) à cause de la réduction de trafic automobile. En revanche la pollution maximale est constatée les lundis probablement à cause du marché hebdomadaire du lundi et de l'après midi sans activité scolaire donc de sorties pour beaucoup d'automobilistes.

III-2-2- Evolution diurne

La figure III.14 montre l'évolution diurne de la teneur en CO durant la journée du lundi 08 mars 2004. Une moyenne des mesures toutes les 30 minutes a été prise. Sur le tracé apparaissent clairement les heures de pointe où le trafic automobile est intense. La corrélation entre la concentration du CO et le nombre de véhicules est très significative ($r = 0,78$).

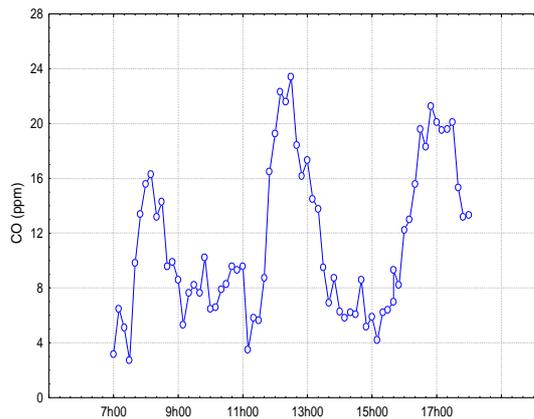


Figure III.14: Evolution diurne de la pollution dans la ville de Bejaia

Cette forte corrélation signifie que la pollution mesurée est due principalement au trafic automobile. Les concentrations de CO mesurées sont comparables à celles mesurées dans d'autres villes européennes et restent inférieures aux limites recommandées.

Les fortes concentrations de CO sont largement corrélées aux fortes intensités du trafic automobile. Cependant, chaque jour, on remarque trois (3) pics de pollution ; à 8h, 13h et 17h. Quand aux concentrations de NO, on remarque deux pics; l'un à 8h et l'autre à 18h. Les concentrations de SO₂ représentent uniquement un seul pic à 13h.

III-2-3- L'évolution saisonnière de la pollution à Bejaia

La concentration des polluants dans les basses couches de l'atmosphère dépend des variables saisonnières tels que la structure thermique verticale de l'air et du vent. La figure III.15 montre la variation des concentrations des trois polluants (CO, SO₂, NO) au niveau de la ville de Bejaia durant l'année 2006.

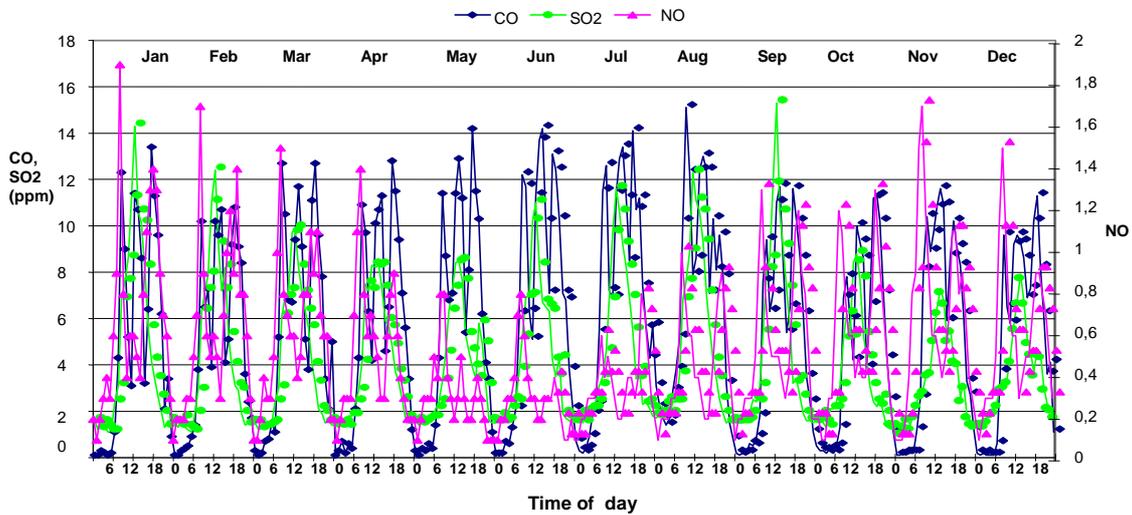


Figure III.15: Variations journalières des concentrations des trois polluants (CO, SO₂ et NO) dans la ville de Bejaia en 2006 [66].

Les concentrations maximales de CO sont constatées durant la période estivale malgré les températures élevées. Elles sont dues à la forte circulation résultante d'une saison touristique caractéristique de Béjaia. Par contre, les concentrations les plus élevées pour le NO sont constatées en automne et en hiver suite aux faibles taux d'humidité et aux faibles concentrations de l'ozone.

III-3- Effets des paramètres météorologiques sur la pollution de l'air dans la ville de Bejaia

Les effets, des trois (3) facteurs météorologiques (la température, l'humidité relative et la vitesse du vent), sur la dispersion de la pollution atmosphérique dans la ville de Bejaia ont

été étudiés pour la période qui s'étale de Février à juillet 2006. Les mesures ont été effectuées à proximité du carrefour d'Amriw, à forte densité de trafic.

Avec les paramètres météorologiques, l'analyse statistique de corrélation-régression a montré diverses dépendances.

Avec l'augmentation de la température ambiante, les concentrations de NO et SO₂ diminuent légèrement tandis que celle de CO augmente substantiellement. Les coefficients de corrélation sont respectivement 0.182, 0.219 et -0.395. La faible augmentation de NO peut être expliquée par la formation secondaire d'aérosols. Lorsque la température augmente le CO a tendance à monter plus facilement et sa concentration au sol diminue.

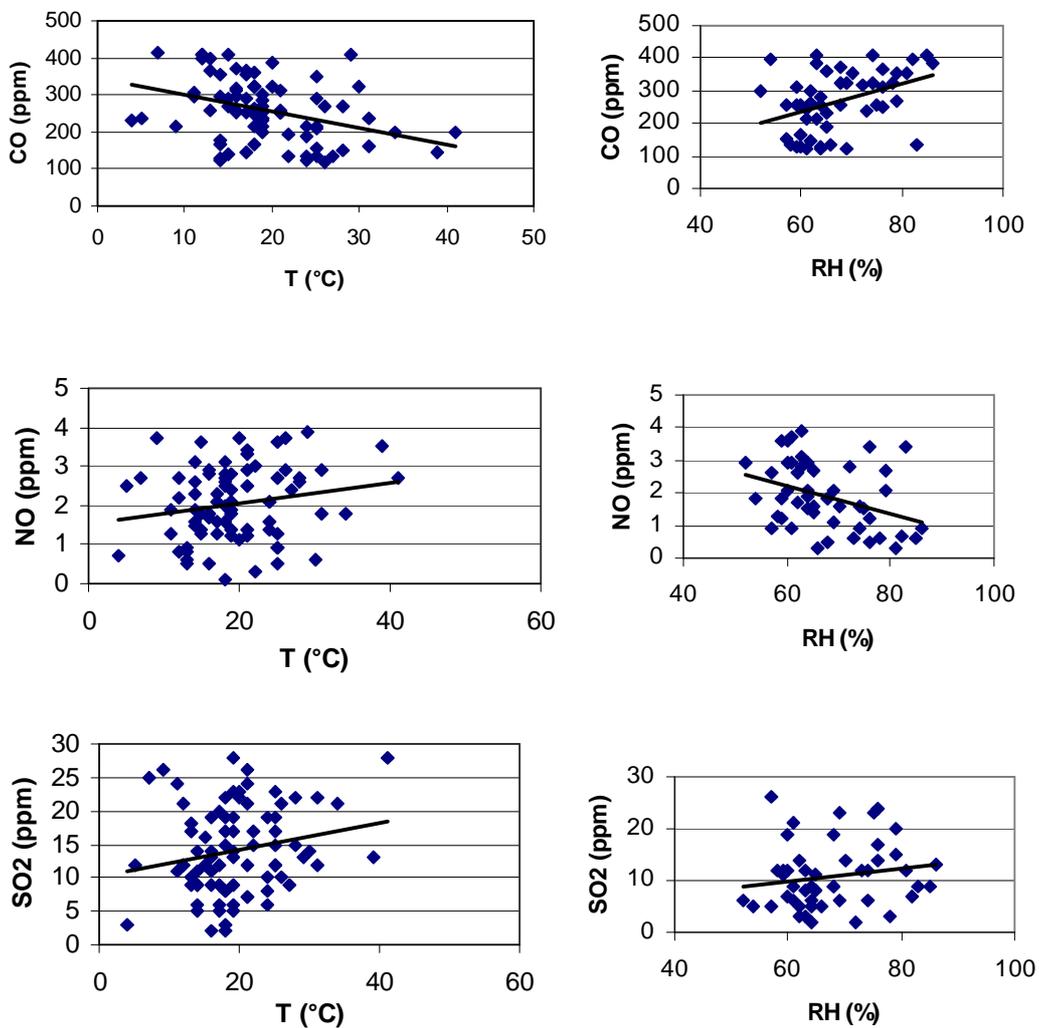


Figure III.16: Courbes de corrélation-régression entre les concentrations des polluants (CO, NO et SO₂) et la température ambiante l'humidité relative [66].

Pour l'humidité relative, les mesures ont donné une corrélation positive significative ($r=0.402$) avec le CO, moins significative avec le SO₂ ($r=0.176$) et négative avec le NO ($r= -0.377$). Les réactions avec la vapeur d'eau expliquent ces résultats.

Les variations de pression étant assez faibles durant la période de mesure, les corrélations avec les polluants ne sont pas significatives.

Le vent dans la ville de Bejaia provient de la mer et prend une direction privilégiée nord ouest. Les mesures en amont du carrefour selon cette direction ont montré une forte corrélation négative pour les trois polluants.

Les données sur le parc automobile de la wilaya de Bejaia ainsi que la circulation automobile congestionnée suggèrent la nécessité de prendre les mesures adéquates pour la surveillance de la qualité de l'air à Béjaia. Sans cela, il sera difficile de connaître l'impact sanitaire de cette pollution non mesurée sur les résidents.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différents moyens et méthodes utilisés pour la surveillance de la qualité de l'air. En plus des méthodes manuelles et automatiques utilisées pour définir la nature ou la répartition spatio-temporelle des polluants présents dans l'air, une approche vient pour compléter le travail de la gestion de la pollution atmosphérique, c'est celle de la biosurveillance qui cherche à évaluer les expositions et les risques (dangerosité) sur les êtres vivants.

Nous avons donné un aperçu sur le réseau de surveillance de la qualité de l'air (SAMASAFIA) à Alger. Des données mensuelles sont exposées pour quelques polluants mesurés par les stations de ce même réseau. Ces données permettent de montrer que la pollution atmosphérique urbaine est majoritairement d'origine automobile. Les polluants mesurés atteignent de fortes concentrations aux heures de pointe du trafic routier.

Des données sur le parc automobile de la wilaya de Bejaia et un ensemble de mesures ont été exploitées pour montrer que les concentrations des polluants sont fortement corrélées avec la densité du trafic urbain. L'effet des facteurs météorologiques a été abordé.

Ces résultats vont nous servir à interpréter les résultats du quatrième chapitre en absence de données de mesures permanentes de la qualité de l'air à Béjaia.

CHAPITRE IV

**Etude épidémiologique sur les effets de la pollution
atmosphérique à Bejaia**

Introduction

L'air est un élément indispensable à la vie de l'homme, qui en absorbe en moyenne 12 m³ par jour, soit environ 15 Kg. La pollution atmosphérique est incontestablement une gêne pour l'homme. L'analyse des épisodes de pollution aiguë prouve qu'à des teneurs élevées, les polluants atmosphériques peuvent altérer sérieusement la santé humaine et provoquer des décès. Ce fut par exemple le cas à Londres durant la période de 1952 à 1962 [21].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats d'une étude épidémiologique, effectuée au niveau de la wilaya de Bejaia, sur les effets sanitaires de la pollution atmosphérique. Nous avons choisi deux régions celle de "Kherrata" à l'Est de la wilaya et celle de la ville de Bejaia. Elles diffèrent en matière de la formation topographique mais ont en commun une circulation automobile intense du fait que la première est traversée par la route nationale numéro 9 qui passe par le tunnel et que la deuxième est un milieu urbain ayant une congestion automobile.

Avant d'entamer cette présentation, un aperçu général sur ce genre d'études s'est avéré nécessaire.

I- L'épidémiologie et la pollution de l'air

Comme il est déjà signalé au premier chapitre l'étude des effets de la pollution atmosphérique sur la santé nécessite une démarche pluridisciplinaire. De là découlent plusieurs méthodes, suivant l'objectif fixé:

- **Clinique** : observation médicale chez le patient.

- **Expérimentation**: étude en laboratoire sur l'animal et l'homme (extrapolation possible, on connaît exactement l'exposition mais souvent pour un seul polluant) [26].
 - ✓ connaître les effets toxicologiques et physiopathologiques
 - ✓ technique des tests de provocation : aérosol, chambre de tête, effets à long terme ?

- **Météorologie**: connaissance des expositions. L'exposition humaine est définie par Ott (1982) comme étant « L'évènement où une personne soit en contact d'un polluant pour une certaine de sa concentration et pendant une certaine période de temps ». Ainsi l'exposition dépend du polluant et de la personne exposée [67].

• **Toxicologie** : montrer l'existence d'effets toxiques des polluants chez l'animal [26].
Connaissance des mécanismes moléculaires et cellulaires (transposition à l'homme délicate)
A partir de ce genre d'études sont désignés des seuils de toxicité aiguë.

Dans le cadre de la prévention des risques liés à des émissions accidentelles dans l'atmosphère de substances chimiques dangereuses, les gestionnaires de risques souhaitent disposer de seuils de toxicité aiguë qui seront le plus souvent utilisés associés à des scénarios d'accidents pour des études de dangers et pour l'élaboration de plans d'urgence.

Les définitions des seuils de toxicité se font par des groupes d'experts toxicologues.

Trois types d'effets toxiques sont généralement définis :

- les "*effets létaux*" qui correspondent à la survenue de décès,
- les "*effets irréversibles*" qui correspondent à la persistance dans le temps d'une atteinte lésionnelle ou fonctionnelle, directement consécutive à une exposition,
- les "*effets réversibles*" qui correspondent à un retour à l'état de santé antérieur à l'exposition.

Les couples concentration - durée d'exposition associés à ces effets permettent de déterminer les seuils de toxicité aiguë que sont:

- le "*seuil des effets létaux*" (S.E.L) correspond à la concentration, pour une durée d'exposition donnée, au dessus de laquelle on peut observer une mortalité au sein de la population exposée.
- le "*seuil des effets irréversibles*" (S.E.I) correspond à la concentration, pour une durée d'exposition donnée, au dessus de laquelle des effets irréversibles peuvent apparaître au sein de la population exposée.
- le "*seuil des effets réversibles*" (S.E.R) correspond à la concentration, pour une durée d'exposition donnée, au dessus de laquelle la population exposée peut présenter des effets réversibles.
- le "*seuil de perception*" (S.P) correspond à la concentration entraînant la détection sensorielle de la substance chimique par la population exposée [68].

• **Épidémiologie** : pôle d'observation des effets sur la santé pour les populations. Ce sont des efforts statistiques qui mesurent l'exposition journalière des personnes aux différents polluants atmosphériques [69].

L'épidémiologie est la science qui étudie la fréquence des problèmes de santé dans les groupes humains ainsi que les facteurs qui déterminent leur répartition. Avec les autres

sciences de la santé, elle permet de découvrir les causes des maladies. Elle sert aussi à guider des actions de prévention.

Parmi toutes ces méthodes, ce sont les techniques épidémiologiques qui offrent le meilleur moyen d'étudier l'influence de la pollution de l'air sur la santé.

Pour étudier l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique, trois types d'études épidémiologiques sont fréquemment utilisées: l'étude écologique temporelle, l'étude de panel et l'étude de comparaison géographique.

Dans l'étude écologique temporelle, on analyse les risques sanitaires et les niveaux de pollution sur une même durée, en général la journée. Le terme « écologie » signifie ici que l'exposition à la pollution atmosphérique est évaluée au niveau de l'ensemble de la population et non pas au niveau de chaque individu. Cette démarche est mise en œuvre en Île-de-France dans le cadre de l'étude d'Evaluation des risques de la pollution urbaine sur la santé (ERPURS) qui est conduite depuis 1987 et réactualisée régulièrement[11].

Dans l'étude de panel, l'exposition est mesurée pour chacun des individus qui sont suivis pendant une période de quelques semaines. Certains paramètres comme la fonction pulmonaire peuvent être mesurés quotidiennement. Chaque individu est donc son propre témoin. Sa fonction pulmonaire des jours les plus pollués est comparée avec celle des jours les moins pollués. Ce type d'étude permet d'explorer les effets à court terme de la pollution de façon plus approfondie que les études écologiques.

Dans les études de comparaison géographiques, on compare les risques sanitaires dans des zones polluées et des zones peu polluées. Le plus souvent, on considère que l'exposition est identique pour tous les habitants au sein des différentes zones. Ce sont donc des études de type écologique mais la comparaison est dans l'espace au lieu d'être dans le temps comme dans le cas de l'étude ERPURS. Ce type d'étude se prête bien à l'analyse des effets à long terme de la pollution. Cependant, leur interprétation est délicate car les zones étudiées peuvent différer pour d'autres facteurs que la pollution: niveau socio-économique, les habitudes alimentaires ou le niveau de pollens, par exemple. Seules des différences importantes de risques peuvent être identifiées par cette méthode [11].

Les études épidémiologiques peuvent avoir pour objet de montrer soit les effets éloignés de la pollution atmosphérique, c'est-à-dire les répercussions de ce phénomène sur les personnes qui ont vécu pendant de nombreuses années en milieu pollué, soit les effets intermédiaires constatés après quelques semaines ou quelques mois d'exposition à certains taux de pollution, soit encore les effets immédiats qui se manifestent dans les 24 à 48 heures consécutives à un accroissement déterminé de la pollution. On peut aussi faire une distinction

entre ces études suivant qu'elles visent à déterminer la mortalité ou la morbidité due à la pollution. A leur tour, les études de morbidité peuvent être subdivisées en plusieurs catégories selon qu'elles portent sur l'ensemble d'une population, sur un groupe d'âge particulier, sur une classe professionnelle ou sociale donnée ou sur un groupe de personnes atteintes d'une maladie particulière telle que la bronchite.

I-1- Difficultés des études comparatives

L'emploi de méthodes épidémiologiques pour déterminer les effets de la pollution atmosphérique comporte de nombreuses difficultés. Dans le passé, les données réunies ont, pour la plupart, revêtu la forme de moyennes mensuelles, si bien que les recherches épidémiologiques ont été orientées vers l'étude des effets éloignés de la pollution. On a donc été amené à comparer l'état de santé de populations urbaines avec celui de populations témoins vivant dans les zones relativement peu polluées. Ce n'est qu'à une date récente, grâce à l'adoption de systèmes de mesures plus complets de la pollution, que l'on a pu commencer à analyser les effets immédiats, et comme ces travaux permettent de déterminer les retentissements de différents degrés de pollution sur une même population il est inutile d'avoir recours à des groupes témoins.

La comparaison de collectivités différentes soumises à des taux respectivement faibles et élevés de pollution est loin d'être facile, car collectivités sont nécessairement appelées à se distinguer à beaucoup d'autres points de vue que celui de la pollution de l'air qu'elles respirent. Même lorsqu'on rapproche deux villes en composition presque identique, le fait que l'une est exposée à des taux plus élevés de la pollution implique que ses habitants appartiennent à des classes sociales et professionnelles différentes de celles que l'on rencontre dans l'autre ville. Nombreux sont, en fait, les facteurs de divergence: milieu, climat, données anthropométriques, conditions sociales, état de nutrition, activité professionnelle, etc.

L'usage de tabac joue un rôle particulièrement important et, parmi les facteurs de milieu, il faut tenir compte de la construction et de leur mode de chauffage. Il s'ensuit que les comparaisons de populations doivent comporter une analyse très poussée de la situation sociale et économique des habitants.

I-2- Indices de mortalité

Dans tous les pays, la mortalité est enregistrée de façon plus exacte que la morbidité et les études fondées sur le nombre des décès fournissent un moyen plus direct d'aborder le problème de la pollution que les études de morbidité. Elles ne donnent pas, cependant, une

idée complète de la situation, car elles ne tiennent pas compte des effets mineurs de la pollution sur la santé. En outre, ce n'est que dans les très grandes agglomérations urbaines que l'on peut étudier les effets immédiats de la pollution atmosphérique en analysant les données de mortalité. Lors du grand brouillard qui s'est abattu sur Londres en décembre 1952, plus de huit millions de personnes ont été soumises à des taux extrêmement élevés de pollution et l'on a estimé que l'excédent de décès imputables à ce phénomène s'était situé autour de 4000, soit un taux journalier de 12,2 pour 100000 habitants. Même dans cette immense agglomération, on a pu mettre en évidence des variations d'intensité de la pollution atmosphérique qui n'étaient associées qu'à des variations relativement faibles du chiffre des décès. Il est clair que, sauf dans les très grands centres de populations, les effets de la pollution sur la mortalité sont difficiles à déterminer, et, dans les centres moins importants, seuls les épisodes les plus graves provoqueront un accroissement significatif du nombre des décès. Même dans une ville d'un demi million d'habitants, le nombre des décès en hivers dépasse rarement 40 par jour. Il faut des circonstances exceptionnelles pour que les incidents causés par un accroissement de la pollution de l'air entraînent une augmentation statistiquement significative des décès et, en pareil cas, seule une longue série d'observations permet d'établir une relation quelconque entre ces deux phénomènes.

I-3- Indices de morbidité

On pourrait s'attendre à ce que les études de morbidité soient plus fructueuses que les études de mortalité, car la morbidité est un indice plus sensible des déviations que subit l'état de santé. Ces études devraient donc montrer les effets de la pollution atmosphérique sur la population normale et non pas seulement sur les personnes qui souffrent déjà de maladies graves. Comme les cas de maladie sont plus fréquents que les décès, les indices de morbidité peuvent reposer sur des bases plus larges, ce qui, sans aucun doute, les rend moins sujets à des variations aléatoires.

Malheureusement, il est plus difficile de mesurer la morbidité que la mortalité et l'on ne dispose de statistiques valables que pour quelques pays seulement. Les données existantes sont tirées des sources suivantes:

- 1- Statistiques d'absentéisme et certificats médicaux délivrés aux assurés médicaux et sociaux. Dans ce cas, cependant, les chiffres quotidiens de morbidité qui se rapportent aux jours fériés et aux week-ends ne sont pas comparables avec ceux qui s'appliquent aux jours ouvrables; et, même pour les jours ouvrables, les

chiffres sont très sensibles à certaines influences sociales. Ces données ne constituent donc pas un indice très sensible de l'état de santé dans la collectivité.

- 2- Admission dans les hôpitaux. En raison de sa nature cet indice ne rend compte que des maladies les plus graves, car les cas bénins ne donnent, en général, pas lieu à une hospitalisation.
- 3- Morbidité infantile. De nombreux auteurs estiment que la mesure de la morbidité chez les enfants fournit un bon indice des effets qu'exercent les conditions de milieu du genre de la pollution atmosphérique. Les enfants constituent un groupe relativement uniforme pour lequel il n'y a pas à tenir compte de l'activité professionnelle, ni de l'usage du tabac. Pour ces raisons, diverses études ont été faites chez les enfants en vue de déterminer les effets pathologiques de la pollution de l'air.
- 4- Morbidité chez les personnes âgées. En raison de leur plus grande sensibilité à la pollution atmosphérique, les gens d'un certain âge représentent un matériel d'étude intéressant. Le nombre de ces sujets est rarement assez élevé pour que l'on puisse procéder à des analyses épidémiologiques ou statistiques exactes, mais on peut recueillir d'utiles renseignements en observant certains groupes tels que les pensionnaires de maisons de retraite.
- 5- Forces armées. Les membres des forces armées forment un groupe d'adultes en bonne santé qui vivent dans des conditions relativement uniformes du point de vue de leur cadre d'existence, de leur activité et de leur alimentation. Leur haut niveau de santé, cependant, risque de réduire très fortement les effets de la pollution atmosphérique dans leur cas.
- 6- Etudes de malades atteints de maladies particulières. Les effets de la pollution atmosphérique sont particulièrement évidents chez les personnes atteintes d'une lésion cardiaque ou pulmonaire et ce genre de malades constituent un champs d'étude très prometteurs.

I-4- Méthodes statistiques

Les études épidémiologiques sur la pollution de l'air impliquent essentiellement la mise en évidence d'une relation entre l'indice de pollution et tel ou tel indice de mortalité ou de morbidité. Dans certains épisodes isolés, il peut suffire de montrer qu'un accroissement de la pollution coïncide avec une élévation des taux de mortalité ou de morbidité, comme dans les études qui ont été exécutées lors du grand brouillard de 1952 à Londres ; L'établissement

d'un diagramme est parfois utile quand il s'agit de montrer l'existence de la dite relation sur une période prolongée, comme dans les études qui ont porté sur les notations faites par des malades atteints de bronchite. On a suggéré l'utilisation de totaux quotidiens cumulatifs lorsque le nombre des décès ou des cas de maladies est faible. Si l'on établit un graphique des totaux cumulatifs en fonction du temps, un taux constant d'augmentation se traduira par une ligne droite. Si l'augmentation cesse d'être régulière, la pente changera [70].

II- Etat sanitaire des résidents de l'Est de la wilaya de Bejaia

Cette étude a pour objet d'évaluer l'impact sanitaire de la pollution de l'air dans la région de Kherrata connue par son tunnel qui présente une zone très polluante par les nombreux et divers véhicules le traversant chaque jour. Aussi sa forme topographique montagneuse (la région est une chaîne de montagnes) lui confère le caractère de piégeage des polluants atmosphérique au niveau des couches inférieures de la troposphère.

La figure IV.1, qui montre deux photos prises à l'entrée du tunnel, témoigne du degré de cette pollution.



Figure IV.1: Les polluants de l'air et les façades du tunnel de Kherrata

Cette pollution atmosphérique met en danger le patrimoine culturel bâti de la région et occasionne d'onéreux travaux de ravalement de façades ou de restauration de monuments.

Parmi les espèces qui sont largement réparties au niveau de la zone du tunnel de Kherrata, le Pin d'Alep est une espèce utilisée dans la démarche passive comme bio-indicateur de l'ozone. C'est une espèce à feuilles pérennes. Les feuilles illustrées en figure IV.2 (a) représentent un échantillon proche de la source qui est le trafic automobile tandis que les feuilles illustrées en figure IV.2 (b) sont celles d'un échantillon loin de cette source.



(a)



(b)

Figure IV.2: Effet de la pollution atmosphérique sur le Pin d'Alep à Kherrata

(a) Photo prise à cinq (5) mètres de l'entrée du tunnel de Kherrata

(b) Photo prise à cinq cent (500) mètres de l'entrée du tunnel de Kherrata

II-1- Matériel et méthodes

II-1-1- Groupe étudié

Le secteur sanitaire de Kherrata reçoit les malades d'une population de 140224 habitants répartis administrativement sur 8 communes regroupées dans 3 Daïras (tableau IV.1).

Tableau IV.1: Répartition de la population bénéficiant du secteur sanitaire de Kherrata, selon la commune de résidence.

Communes	Nombre d'habitants
Kherrata	35077
Drâa El Gaïd	29222
Total Daïra	64299
Souk El Tenine	14045
Melbou	11396
Tamridjet	8413
Total Daïra	33854
Darguina	14146
Aît Smail	11783
Taskriout	16142
Total Daïra	42071
Total population	140224

Source: DPAT de Bejaia

II-1-2- Procédure

Durant la période de stage (du 21/03/2009 au 21/04/2009), des données sur la mortalité et les admissions hospitalières ont été collectées concernant les malades souffrant des pathologies cardiorespiratoires à l'Etablissement Public Hospitalier (EPH) de Kherrata.

A partir des registres annuels disponibles au service des entrées, nous avons à sélectionner parmi toutes les admissions de l'année celles dues aux pathologies de l'appareil respiratoire sans les angines et la tuberculose. Chaque année de la période de 2005 à 2008 est représentée par deux registres: Un spécialement pour femmes et enfant et l'autre pour hommes. Chaque page de registre comprend sous forme de tableau les six indications suivantes: le nom et le prénom de patient, son adresse (commune de domicile), la date de son admission, la date de sortie, la pathologie, le nom du médecin chargé de son accueil et la décision thérapeutique qui y est prise. La première et les deux dernières indications ne servent pas notre étude. La méthode adoptée est la suivante:

Pour la mortalité, les données recueillies sont:

- Le nom de la commune de domicile de la personne entrant dans la zone d'étude;
- la cause de mortalité (toutes causes sauf accidentelles);
- la date de décès;
- la date de naissance (l'âge);

Pour la morbidité, les données sont recueillies dans les établissements de santé auprès:

- du service d'information;
- du service des urgences.

Les données concernent la date d'admission, la date de naissance, la commune de domicile et le diagnostic principal.

Pour qu'une admission soit inscrite sur ces registres, il faut que le patient reste au moins une nuit à l'hôpital (séjours hospitaliers classiques). Ainsi la majorité des cas, liés à ce genre de pathologies, ne sont pas enregistrées systématiquement à l'hôpital. Donc, pour avoir une idée quantitative, il faut avoir en plus les données des médecins généralistes et celles des cliniques privées.

Les consultations pour cause d'Infection Respiratoire Aiguës (IRA) par enfant de moins de cinq ans sont données par le service des épidémiologies et de maladies en prévention (SEMEP) de Kherrata au niveau de la polyclinique Amridj qui est

administrativement un service de l'Établissement public de santé de proximité (EPSP) sis à Kherrata près de l'Établissement public hospitalier (EPH) de Kherrata. Des fiches d'évaluation de la morbidité par IRA sont établies chaque mois par chacune des unités périphériques de cet EPSP. Ces fiches rentrent dans le cadre de l'application d'un programme nationale de lutte contre les IRA de l'enfant de moins de cinq ans. Un exemplaire de ces fiches est donné en annexe IV.1.

II-2- Résultats et discussion

II-2-1- Lieu de domicile et état sanitaire des habitants

La répartition des malades qui fréquentent l'EPH de Kherrata est différente selon les communes. La figure IV.3 montre la répartition des malades hospitalisés suite à une infection respiratoire reçus par cet établissement de 2005 à 2008.

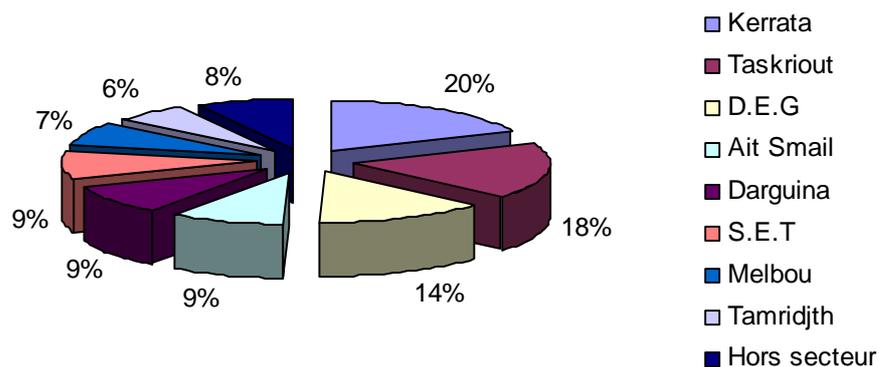


Figure IV. 3: Répartitions des malades hospitalisés suite à une infection respiratoire reçus par l'EPH de Kherrata selon leurs communes de domicile pour 4 ans (de 2005 à 2008).

La plus part des cas hospitaliers dans la spécialité pneumologie de cette établissement viennent des trois communes: Kherrata avec 302 cas, ce qui représente 20% du nombre total des hospitalisés dans ce service pour la période de 2005 à 2008, Taskriout avec un taux de 18% pour 286 cas et Draa El Gaid (D.E.G) avec un taux de 14% pour 230 cas. Elles sont les trois communes traversées par la RN9 qui relie Bejaia à Sétif. Cette route vit une circulation automobile intense et diversifiée.

II-2-2- Fréquences des problèmes respiratoires à l'hôpital de Kherrata

Les maladies qui pourraient être liées à la pollution atmosphérique extérieure, décrites sur la figure IV.4, sont responsables d'une mortalité et d'une morbidité considérables dans la communauté de Kherrata. Il s'agit des insuffisances respiratoires (IR), des Néoplasies, d'asthme, des broncho-pneumopathies chroniques (BPC), des Otites Aigues Pulmonaires (OAP), des pneumopathies (PP), des pneumothorax et autres maladies telle que la Laryngite.

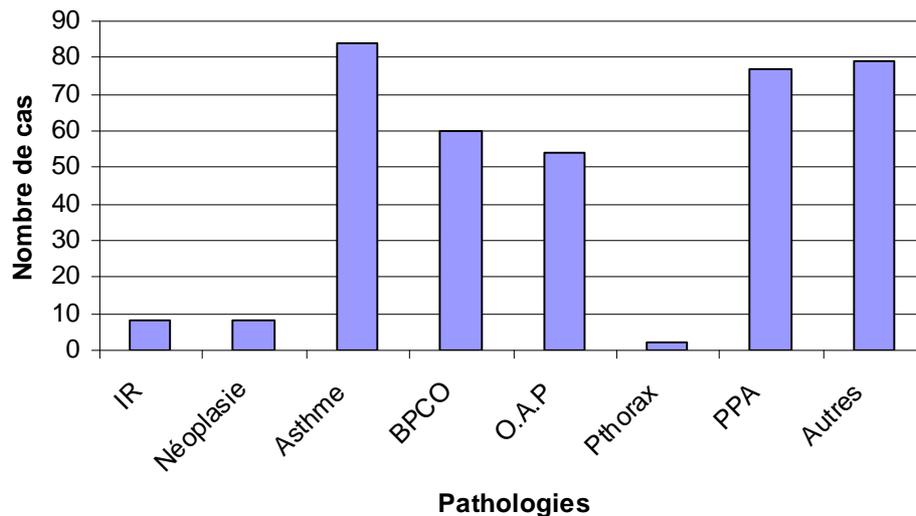


Figure IV.4: Répartitions des malades hospitalisés suite à une infection respiratoire reçus par l'EPH de Kherrata selon les pathologies pour 2008.

De plus, à Kherrata, on constate que l'asthme est la maladie la plus fréquente avec 84 cas, ce qui donne 22,58% du nombre total des hospitalisés au service pneumo-physiologie et 4,8 % des motifs d'hospitalisation pour 2008 qui ne paraît pouvoir être expliquée que par des facteurs environnementaux.

II-2-3- Problème de mortalité

En 2008, les infections respiratoires chez l'enfant constituent la première cause de mortalité à l'EPS de Kherrata avec 50% de l'ensemble de dix (10) décès. Pour la même année, 12,95% des hommes hospitalisés, pour la même cause (celle des infections respiratoire), sont décédés.

Pour cet établissement, les nombres de décès sont résumés sur le tableau IV.2.

Tableau IV.2: Mortalité par maladies respiratoires à l'hôpital de Kherrata pour les femmes (F), hommes (H) et enfants (E) pendant 4 ans (de 2005 à 2008):

Catégorie des décès	2005			2006			2007			2008		
	F	H	E	F	H	E	F	H	E	F	H	E
Effectifs	7	6	1	2	15	1	10	2	-	9	18	5

Pour l'ensemble des catégories et le total de la période, 76 décès sont comptés dans ce service, ce qui présente 0,54‰ du total de la population bénéficiant de cet établissement.

II-2-4- Problème de morbidité

Les infections respiratoires représentent également une des causes principales de morbidité hospitalière dans cet EPH avec un nombre total de 1617 personnes hospitalisées pour la période qui s'étale sur quatre ans (période de l'enquête). Ceci représente 9 hospitalisés pour mille habitants de la population de 140224 individus (tableau IV.1). Elles représentent un taux de 46,5% des motifs d'hospitalisation pour 2008. Les cas hospitalisés sont en légère diminution le long de cette période. En 2005, le nombre total d'admissions par les IR était de 464. Ce nombre devenait 402 en 2006, diminuait à 379 en 2007 et finissait en 2008 uniquement par 372 cas.

Plusieurs malades fréquentent cet établissement pour plusieurs fois dans l'année, même pour le même mois surtout en périodes estivales. Ainsi pour la femme asthmatique X1 (de la commune de Kherrata et âgée de 67 ans), le nombre de fois qu'elle a été hospitalisée suite à une crise d'asthme sévère pour l'année 2008 était de 16 fois. Pour la femme X2 qui souffre d'une Néoplasie à l'âge de 74 ans et qui vit à Taskriout, elle était hospitalisée 30 fois dans la même année. Cependant les fréquentations d'un même homme pendant une année sont uniquement 10 fois pour Y1 qui souffre d'une bronchite asthmatique et est habite D.E.G et de 8 fois pour Y2 ; asthmatique de 39 ans domicilié à Taskriout. La répartition mensuelle du nombre de fréquentations pour les quatre personnes est illustrée par la figure IV.5.

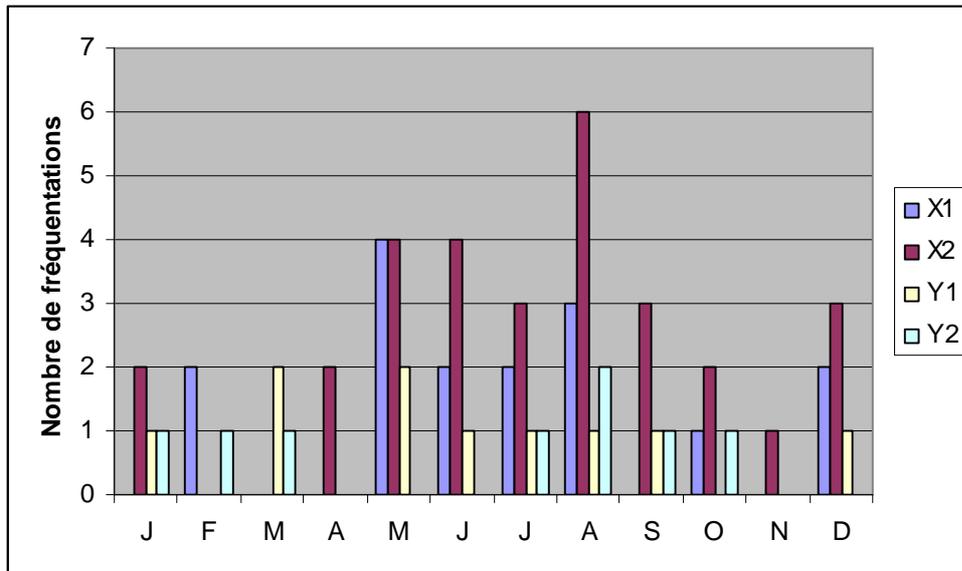


Figure IV.5: Fréquentations mensuelles par un échantillon de quatre malades admis à l’EPH de Kherrata pour 2008.

La durée de séjour des hospitalisés variait aussi selon les cas. Ainsi le plus long séjour, pour la période étudiée, était celui d’un vieux de 75 ans souffrant d’une broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO). Il s’est étalé du 18 Août jusqu’au 16 Septembre de l’année 2006.

II-2-5- Le sexe et l’âge en relation avec les IR

Selon la figure IV.6 le nombre de femmes hospitalisées est plus élevé que celui des hommes. Par contre chez les enfants; les effectifs chez les filles sont inférieurs à ceux chez les garçons comme il est indiqué à la figure IV.7.

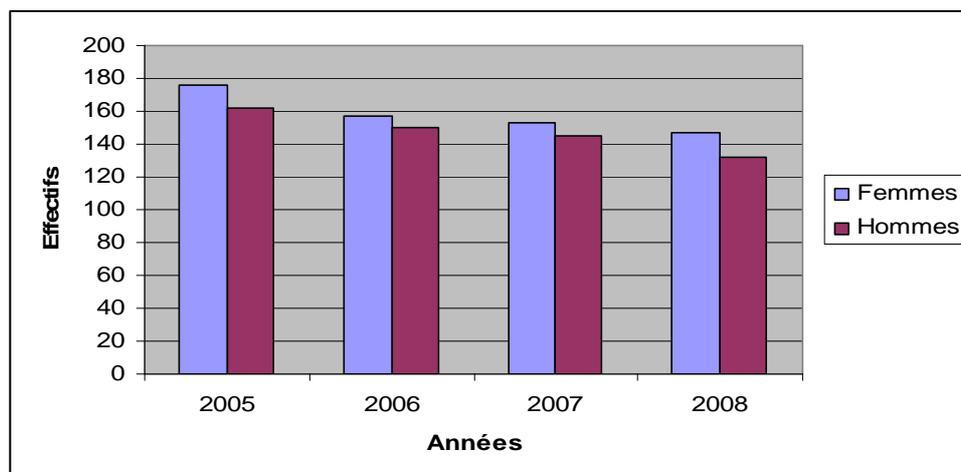


Figure IV.6: Nombre des adultes hospitalisés suite à une infection respiratoire reçu par l’EPH de Kherrata selon l’année de recueil et le sexe.

Les différences s'expliquent par le calibre des voies aériennes respiratoires (plus étroite chez les garçons dans l'enfance et changeant à l'adolescence) et des facteurs hormonaux intervenant au cours de la puberté semblent jouer un rôle important dans la variation du risque des maladies respiratoires selon l'âge chez les hommes et les femmes [28].

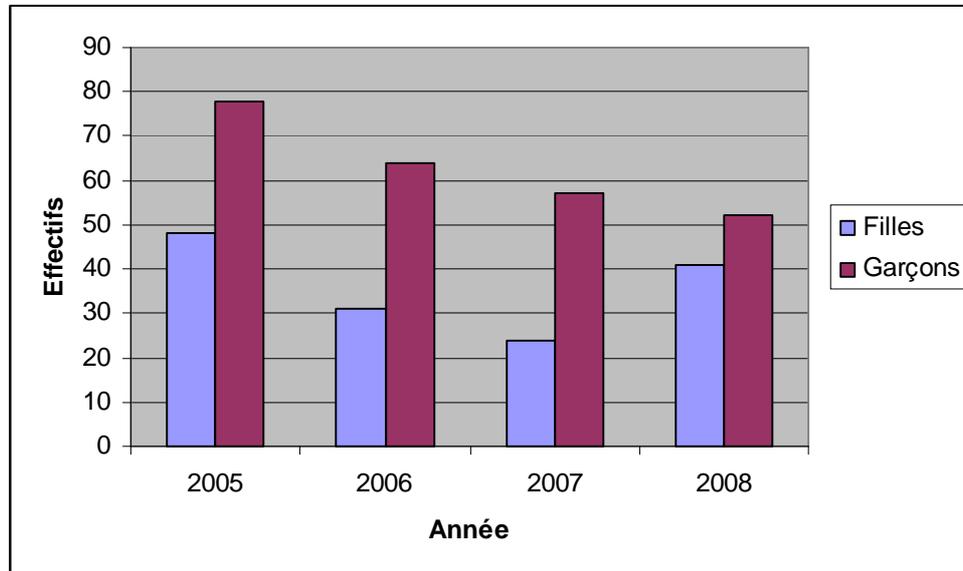


Figure IV.7: Nombre d'enfants hospitalisés suite à une infection respiratoire reçu par l'EPH de Kherrata selon l'année de recueil et le sexe.

La répartition des pathologies selon l'âge (figure IV.8) fait ressortir des valeurs plus élevées pour les personnes des classes d'âge de 0-14 ans et chez les 60 ans et plus, avec un palier pour les personnes des classes d'âge intermédiaires.

Le jeune âge, constitue un facteur de risque: le nourrisson est vraisemblablement plus à risque par son immaturité physiologique, qu'elle soit anatomique (étroitesse des voies aériennes rendant le syndrome obstructif plus important) ou immunologique (immaturité des défenses de l'appareil respiratoire).

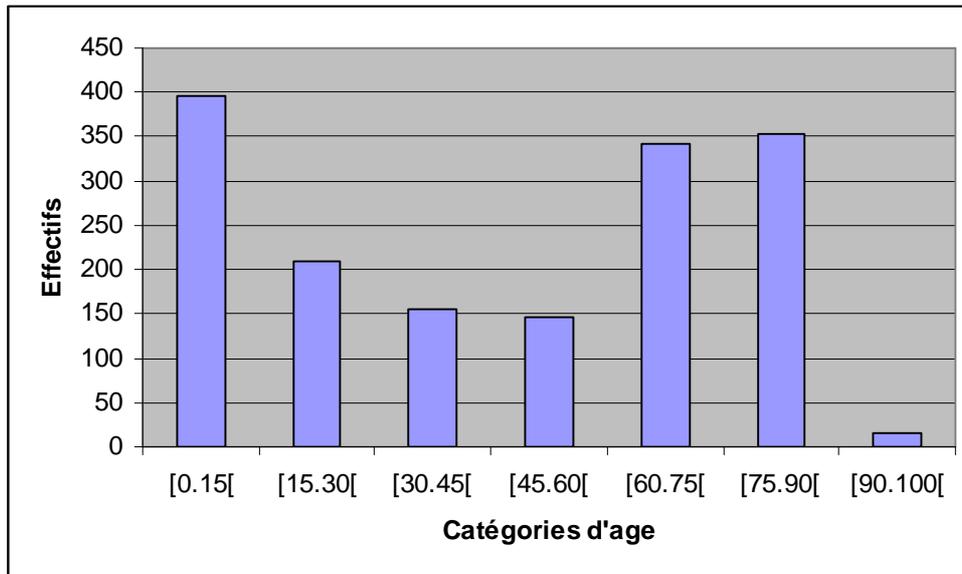


Figure IV.8: Répartitions des malades hospitalisés suite à une infection respiratoire reçus par l'EPH de Kharrata selon les groupes d'âge pour 4 ans (de 2005 à 2008).

II-2-6- L'évolution saisonnière de la morbidité

L'évolution saisonnière des cas hospitaliers illustrée en figure IV.9 montre une similitude de variation dans les quatre courbes. Ainsi, les effectifs les plus élevés sont relevés pendant la période estivale de chaque année.

Ces résultats coïncident avec les niveaux élevés des taux d'ozone troposphérique et d'autres polluants qui sont piégés près du sol tels le monoxyde d'azote et le monoxyde de carbone pour une région comme Kherrata dont la topographie (entourée par une chaîne de montagnes) et les conditions météorologiques défavorables (faiblesse de la vitesse des vents et les températures élevées) ne permettent pas la dispersion de ces polluants.

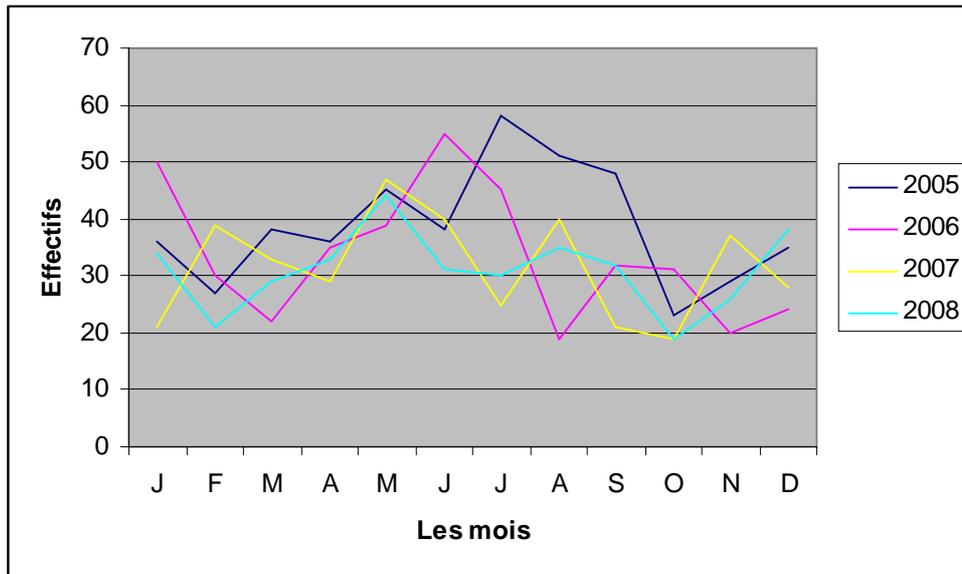


Figure IV.9: Evolution saisonnière des cas reçus par le service pneumologie à Kherrata

Une autre coïncidence est aussi à remarquer entre les valeurs estivales élevées des polluants et le nombre de consultations pour les IRA chez l'enfant.

Selon le SEMEP de Kherrata, les statistiques faites au niveau de secteur sanitaire de cette région montrent que le nombre des consultations pour les IRA chez les enfants de moins de cinq ans est plus important dans la période estivale que dans la période hivernale. En figure IV.10 sont illustrées les données mensuelles pour l'année 2005 et pour l'ensemble des unités de ce secteur.

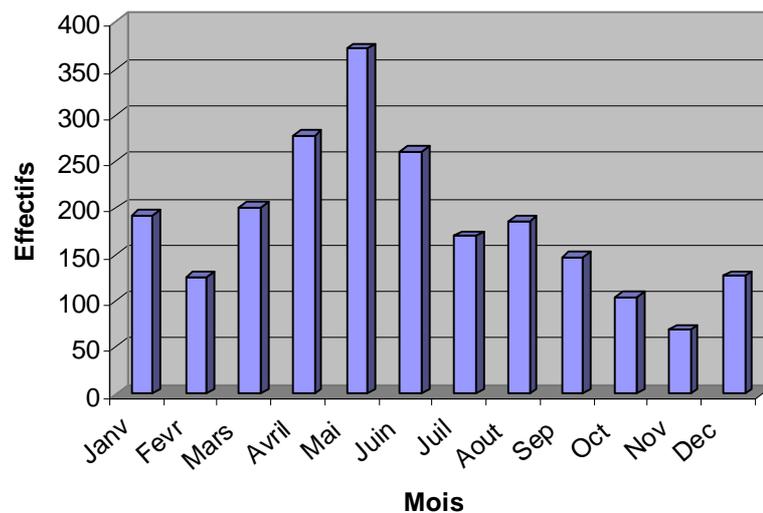


Figure IV.10: Evaluation de la morbidité par IRA; nombre de consultations dans les unités périphériques et l'Hôpital du secteur de Kherrata pour 2005.

Pour cette année 2005, il y avait 2236 consultations pour IRA, ce qui représente 37,41% du nombre de consultations toutes causes confondues (5798) pour cette classe d'âge. Le nombre maximal de consultations est constaté au mois de Mai avec 372 cas. Ce nombre mensuel, comme d'autres qui sont réalisés par l'unité principale du secteur en additionnant les chiffres donnés par chaque unité, est obtenu d'une manière non équivalente. Ainsi les taux les plus élevés sont enregistré la plus part du temps par l'unité d'Amridj (commune de Darguina) et celle de Kherrata. Le taux mensuel du mois de Juin 2005 qui est de 34,8% pour l'ensemble du secteur est calculé à base des taux du tableau IV.3, à l'aide de la fiche présentée en annexe IV.1 et d'autres fiches réalisées par les autres unités de ce secteur sanitaire.

Tableau IV.3: Nombre de consultations de 0 à 4 ans pour IRA par rapport au nombre de consultations de 0 à 4 ans toutes causes confondues pour les unités périphériques et l'Hôpital du secteur de Kherrata pendant le mois de Juin 2005.

Unités (ou sous secteur)	Nombre de consultants 0 à 4 ans toutes causes	Nombre de consultants 0 à 4 ans pour IRA	% IRA
Amridj	182	137	75,27%
Kherrata	128	33	25,78%
Drâa El Gaid	20	11	55%
Taskriout	420	80	19,04%
Total secteur	750	261	34,8%

III- Etat sanitaire des résidents de la ville de Bejaia et ses environs

Dans le but d'évaluer l'impact sanitaire de la pollution de l'air d'origine automobile, la région de Bejaia est choisie pour son caractère urbain et une congestion automobile intense avec un nombre de véhicules en augmentation incessante et une tendance accrue à la diésélisation (acquisition des véhicules à moteur Diesel) comme il est mentionné au chapitre III.

III-1- Matériel et Méthodes

III-1-1- Groupe étudié

Le secteur sanitaire de Bejaia reçoit des malades de la population de 234321 habitants distribués administrativement d'une manière inéquitable sur cinq communes qui sont groupées en deux Dairas (Tableau IV.4).

Tableau IV.4: Répartition de la population bénéficiant du secteur sanitaire de Bejaia, selon la commune de résidence.

Communes	Population totale
Bejaia	177988
Oued Ghir	19346
Total Daira	197334
Tichy	16546
Boukhelifa	8766
Tala Hamza	11675
Total Daira	36987
Total population	234321

Source: DPAT de Bejaia

III-1-2- Procédures

Pour une grande population, comme celle répartie sur le tableau IV.4, il s'est avéré nécessaire d'établir une division plus détaillée des services, au niveau des établissements sanitaires, par rapport à celle du secteur sanitaire de Kherrata. A la différence de ce dernier qui compte un seul service d'admissions hospitalières pour femmes et enfants, celui de Bejaia compte un service pédiatrie, qui est une annexe de l'Hôpital Tharga Ouzemour, et un service pour femmes dans la spécialité pneumo-physiologie au niveau de l'Hôpital Frantz Fanon.

Pour étudier cette population dans son ensemble (enfants et adultes), deux stages ont été effectués:

- 1- Le premier stage a pour objet la collecte des données concernant les adultes admis au service pneumo-physiologie de l'Hôpital Frantz Fanon (Bejaia). Sa période est du 27/06/2009 au 26/07/2009. Le travail qui y est effectué consiste à consulter les registres dont les pages contiennent les mêmes indications que celles des registres de l'EPH de Kherrata. Cependant ces derniers ne portent que les admissions des pathologies cardiorespiratoires mais portent de plus les noms des gardes malades.
- 2- Le deuxième stage concerne la collecte des données des enfants admis à l'Hôpital Tharga Ouzemour. Il s'est déroulé du 29/09/2009 au 29/10/2009. Le travail qui y est effectué est le même que celui effectué à l'Hôpital de Kherrata car là encore nous avons à sélectionner parmi les listes de toutes les admissions pédiatriques celles dues aux causes d'une infection respiratoire. Cependant, ici, encore sont données les fiches

d'évaluation des consultations pour cause d'Infection Respiratoire Aiguës (IRA) par enfant de moins de cinq ans. Des fiches qui sont établies chaque mois par chacune des unités périphériques et l'Hôpital du secteur et rentrent dans le cadre de l'application d'un programme nationale de lutte contre les IRA de l'enfant de moins de cinq ans. Un exemplaire de ces fiches est donné en annexe IV.2.

III-2-Résultats et Discussion

III-2-1- Lieu de domicile et état sanitaire des habitants

Pour la période allant de 2003 à 2008, nous avons enregistré 2077 malades hospitalisés, soit 67,61% du nombre total des séjours hospitaliers, au service pneumo-phtisiologie de l'hôpital Frantz Fanon pour les adultes et de l'hôpital Tharga Ouzemour pour les enfants venant tous de la commune de Bejaia. Ces chiffres n'apparaissent pas étonnants si nous savions que cette commune héberge à elle seule 177988 habitants (selon les résultats du recensement d'Avril 2008) qui représentent 75,96% de l'ensemble de la population qui bénéficie de ce secteur sanitaire.

Les autres communes qui constituent cette population représentent des pourcentages proches entre 1,63% et 7,61% comme le montre la figure IV.11.

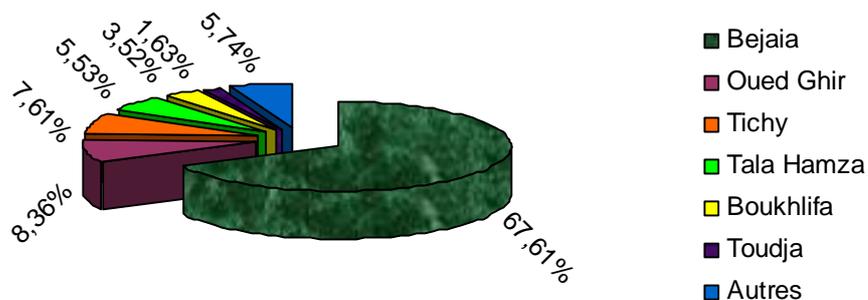


Figure IV.11: Répartitions des malades hospitalisés suite à une infection respiratoire reçus par l'EPS de Frantz Fanon (Bejaia) selon leurs communes de domicile pour 6 ans (de 2003 à 2008).

En tant que chef lieu de wilaya, la commune de Bejaia avec ces deux établissements reçoit des malades venant des autres régions. Pour cette même période, cette catégorie est représentée par 234 cas hospitaliers, soit un pourcentage de 7,61%.

III-2-2- Fréquences des problèmes respiratoires à l'hôpital Frantz Fanon (Bejaia)

Les causes et les pathologies cardio-respiratoires pour les admissions hospitalières à l'hôpital Frantz Fanon de Bejaia sont nombreuses mais nous nous sommes intéressés uniquement à celles en relation directe avec la pollution atmosphériques qui sont: infections respiratoires (IR), asthme, bronchites chroniques, broncho-pneumopathies chroniques obstructives (BPCO), Emphysème pulmonaire (EP), Cancer pulmonaire (CP), Pneumothorax (Pthorax) et Pneumopathie (PP). Leur répartition est indiquée dans la figure IV.12.

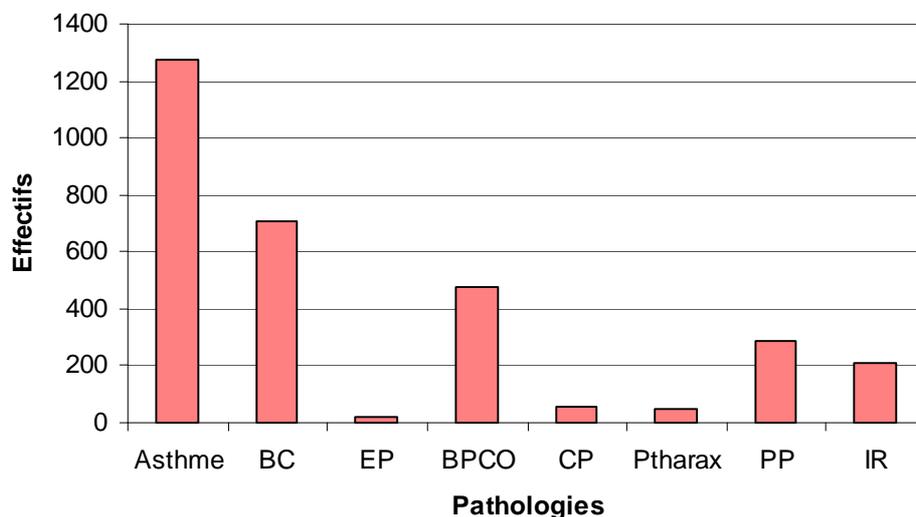


Figure IV.12: Répartitions des malades hospitalisés suite à une infection respiratoire reçus par l'EPS de Bejaia selon les pathologies de 2003 à 2008.

L'asthme est la pathologie la plus fréquente, dans ce secteur sanitaire, avec 1273 cas, suivie de BC avec 704 cas et de BPCO 475.

III-2-3- Problème de mortalité

Pour les deux établissements de santé étudiés (Tableau IV.5), le taux de mortalité lié aux pathologies cardio-respiratoires est très élevé. Chez les enfants ce taux constitue la première cause de mortalité entre 2003 et 2008 ; il est à 100% en 2006 par rapport au nombre total de décès, suivi de 88,88% en 2007 avec 8 cas de l'ensemble de 9 cas de décès. La

moyenne pour six ans est de 63,42%. Le taux minimal de 25%, pour cette période, est enregistré en 2008.

Ce même taux est enregistré au niveau de l'Hôpital Frantz Fanon pour les adultes comme minimum. Pour la période étudiée le taux moyen est de 37,84%. En 2007, ce taux atteint un maximum de 45%. Cependant, chez les hommes le taux de mortalité est plus élevé que chez les femmes. En 2008, parmi les sept (7) cas de décès au service Pneumo-phtisiologie de cet établissement six (6) sont des hommes. Ainsi, Trois (3) morts à cause de BPCO, Deux (2) à cause d'Asthme et Un (1) à cause du cancer du poumon.

La différence entre les femmes et les hommes pourrait être expliquée par la contribution chez les hommes des décès dus aux BPCO.

Tableau IV.5: La mortalité par maladies respiratoire à l'hôpital de Bejaia pour les adultes (A) et enfants (E) pendant 6 ans (de 2003 à 2008):

	2003		2004		2005		2006		2007		2008	
	E	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E	A
DSP	2	11	6	16	2	15	4	18	8	15	1	07
NTD	3	34	10	41	5	35	4	40	9	35	4	28
%	66,66	32,35	60,00	39,02	40,0	42,86	100	45,00	88,88	42,82	25,0	25,0

DSP: Décès au service Pneumo-phtisiologie

NTD: Nombre total de décès

III-2-4- Problème de morbidité

Pour la période de 2003 à 2008, le service Pneumo-phtisiologie de l'Hôpital Frantz Fanon enregistre 2270 malades adultes. Le registre de l'Hôpital Tharga Ouzemour compte 802 enfants hospitalisés à cause des IRA basses. Ce qui donne un chiffre total de 3072 cas d'admissions. Ceci correspond à près de 13 patients pour 1000 personnes de la population concernée qui est de 234321 individus.

Sans prendre en compte le type d'infection respiratoire, nous avons compté les cas d'hospitalisation dans ce service en plus des pathologies citées ci-dessus des pathologies telles que la tuberculose, l'angine et d'autres sont incluses. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau IV.6.

Tableau IV.6: Taux de morbidité par infection respiratoire (IR) à l'Hôpital Frantz Fanon de Bejaia pour la période de 2004 à 2009.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009
A S PP	649	879	655	689	720	900
Total A	2890	3750	3248	3452	3518	4633
fréquences%	22,45	23,44	20,16	19,96	20,47	19,42

AS PP: Admissions au service Pneumo-phtisiologie

Total A: Total des admissions

En comptant toutes les IRA (hausse et baisse) d'enfants à Tharga Ouzemour le nombre d'admission pour chaque année de 2003 à 2008 sont rassemblés dans le tableau IV.7. Ainsi les taux des admissions par les IRA par rapport au nombre total des admissions sont déduits. Le taux moyen pour la période concernée est de 21%.

Tableau IV.7: Taux de morbidité par infection respiratoire (IR) à l'Hôpital Tharga Ouzemour de Bejaia pour la période de 2003 à 2008.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Admissions pour IR	207	140	152	90	160	153
Total Admissions	821	707	700	600	636	760
Pourcentage (%)	25,21	19,80	21,43	15	25,08	20,13

A partir des fiches d'évaluation de la morbidité par IRA, pour les enfants âgés de 0 à 4 ans, de l'année 2008, nous avons établi le tableau IV.8. Les fréquences sont calculées à base du nombre de consultations pour IRA dans les unités périphériques et l'hôpital du secteur sanitaire de Bejaia et du nombre de consultations toutes causes confondues dans le même secteur sanitaire.

Tableau IV.8: Taux de consultations pour Infections Respiratoire Aiguës (IRA) dans les unités périphériques et l'hôpital du secteur sanitaire de Bejaia en 2008.

	Janv.	Févr.	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov.	Dec
Fréquence%	24,8	17,8	29,3	25,3	26,5	25	20	23,4	22	21	18	22,3

D'une manière générale, la durée moyenne de séjour peut servir d'indication sur la gravité d'une pathologie: des séjours plus longs correspondent à une gravité ou une morbidité plus importante.

Le plus long séjour à l'Hôpital Frantz Fanon pour la période de 2003 à 2008, était celui d'un vieux de 81 ans souffrant d'une pneumopathie et domicilié à Bejaia. Il est rentré le 10 mai 2005 et en est sorti, mort, le 5 juin de la même année. Ce même patient a déjà été admis dans cet établissement plusieurs fois durant l'année 2005 et avant. De même, plusieurs autres malades le fréquentaient plusieurs fois dans l'année. Il y avait même ceux qui le fréquentaient plusieurs fois dans le même mois, surtout durant la période estivale qui se caractérise par des niveaux élevés de l'ozone urbain. Par exemple, en 2008, le registre spécial homme au niveau de service pneumo-physiologie de cet établissement indique un chiffre de 301 entrés mais uniquement 241 noms de malades sont inscrits. La différence (60) entre les deux chiffres représente le nombre de fréquentations par l'ensemble des malades.

III-2-5- Le sexe et l'âge en relation avec les IR

La distribution des pathologies cardiorespiratoires varie très fortement selon le sexe et la classe d'âge de la population. Les catégories d'âge qui affichent les valeurs les plus importantes (figure IV.13) sont celle des enfants de 0 à 15ans avec un effectif de 802 individus, suivie de celle des personnes âgées de 60 à 75 ans avec un effectif de 577 individus et celle de 75 à 90 ans avec un effectif de 455 individus. Les effectifs les plus bas sont enregistrés chez les individus qui constituent les deux catégories de 15 à 30 ans et de 30 à 45 ans. Pour leur fragilité immunitaire, les vieux et les enfants sont les catégories les plus touchées par ce genre de pathologies.

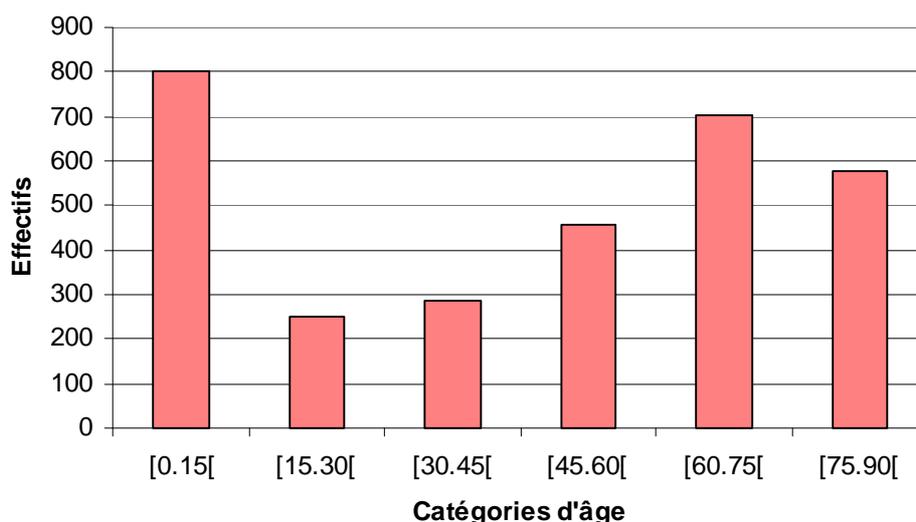


Figure IV.13: Répartitions des malades hospitalisés suite à une infection respiratoire reçus par le service pneumo-physiologie à Bejaia selon les groupes d'âge pour la période de 2003 à 2008.

Au sein d'une même classe d'âge, la distribution du nombre des malades varie selon le sexe. Chez les enfants, les garçons présentent des effectifs largement plus grands que les filles. La figure IV.14 le montre clairement. En 2008, Trois quarts (3/4) des hospitalisations au service pédiatrie, pour causes d'asthme ou de bronchiolite, sont des garçons. En 2006, le nombre de garçons est le double de celui des filles. Cependant cette figure n'indique rien en termes de variation dans le temps.

Mais chez les adultes, les femmes sont un peu plus à risque des pathologies cardiorespiratoires que les hommes. Quatre années sur six, de la période de 2003 à 2008, les effectifs de femmes hospitalisées au service pneumo-physiologie à l'Hôpital Frantz Fanon sont légèrement supérieurs à ceux des hommes hospitalisés dans le même service (figure IV.15).

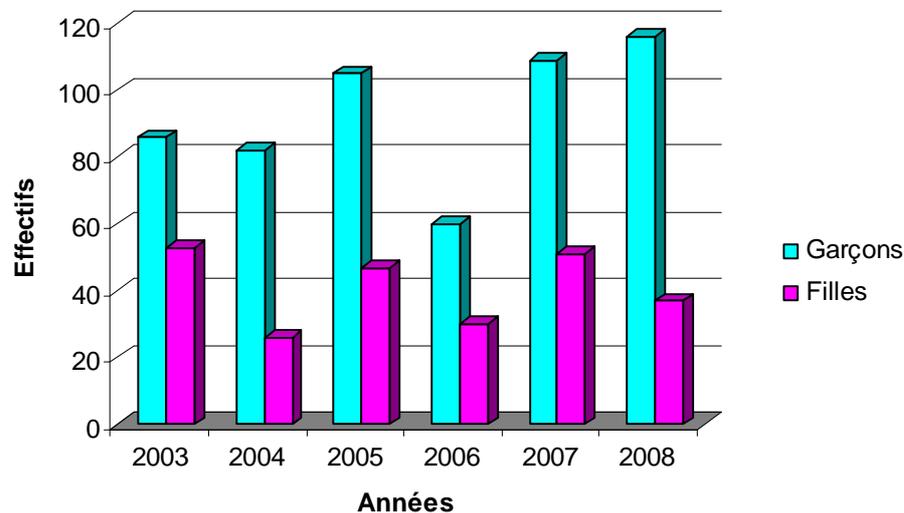


Figure IV.14: Nombre d'enfants hospitalisés suite à une infection respiratoire à l'Hôpital Tharga Ouzemour selon l'année de recueil et le sexe.

Cependant si nous rentrons dans l'analyse du type de pathologie porté par chaque catégorie, nous pourrions facilement déduire la différence entre les deux sexes. La différence se distingue surtout au niveau des effectifs concernant l'asthme et la broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO). Ainsi, pour l'asthme, les effectifs concernant les femmes sont largement supérieurs à ceux des hommes. En 2008, 113 cas du total de 180 des asthmatiques hospitalisés sont des femmes. Mais, pour la BPCO, les hommes sont les plus touchés. Parmi les 475 cas hospitalisés, pour la période de 2003 à 2008, suite à cette pathologie 372 cas sont des hommes.

Ces différences s'expliquent par les différences physiologiques entre les deux sexes pour l'asthme. Mais, pour les BPCO, le facteur de tabagisme est à l'origine de cette différence. Ainsi ce facteur est plus fréquent chez les hommes que chez les femmes pour la population étudiée.

Une tendance à l'augmentation dans le temps des effectifs, pour les deux sexes, est à remarquer selon les résultats indiqués par le graphe de la figure IV.15.

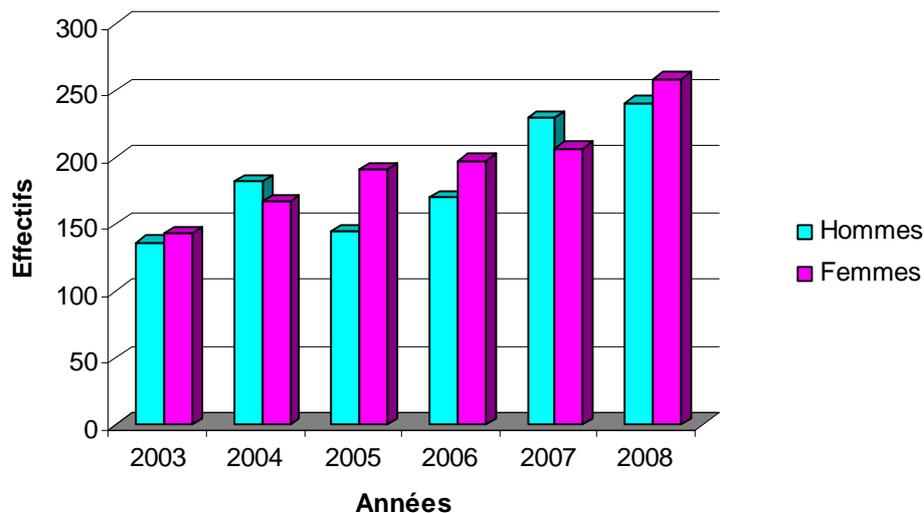


Figure IV.15: Nombre d'adultes hospitalisés suite à une infection respiratoire à l'Hôpital Frantz Fanon (Bejaia) selon l'année de recueil et le sexe.

Cette tendance à l'augmentation est due au nombre élevé des personnes exposées à la pollution urbaine qui revient à l'augmentation de la population de cette région au fil des années de la période considérée.

II-2-6- L'évolution saisonnière de la morbidité

A l'exception de 2007 dont la courbe, sur le graphe de la figure IV.16, montre deux pics hivernaux du nombre de malades ayant une infection respiratoire, pour les deux établissements, toutes les autres années de la période de 2003 à 2008 montrent une similitude de variation dans les courbes indiquées sur la même figure. Ainsi, les effectifs les plus élevés sont enregistrés pendant la période estivale.

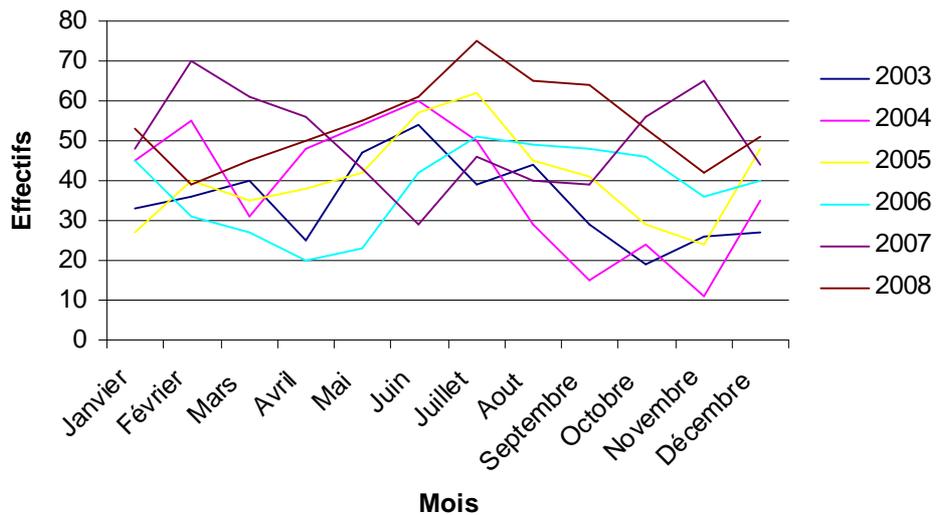


Figure IV.16: Evaluation saisonnière de la morbidité par pathologies cardiorespiratoires au niveau des Hôpitaux Frantz Fanon et Tharga Ouzemour (Bejaia) pour la période 2003-2008.

Si, en plus des variations des concentrations de CO illustrées dans la figure IV.17, nous pouvons considérer que les niveaux de pollution en ozone mesurés à Alger sont valables pour Bejaia, qui est aussi un milieu urbain avec une circulation automobile très congestionnée, nous pourrions facilement déduire la relation entre la pollution atmosphérique urbaine (l’ozone urbain) et les pathologies cardiorespiratoires. Ainsi l’évolution saisonnière de la morbidité par pathologies cardiorespiratoires au niveau des Hôpitaux Frantz Fanon et Tharga Ouzemour (Bejaia) pour la période 2003-2008 varie avec la variation des concentrations des polluants atmosphériques dans cette région.

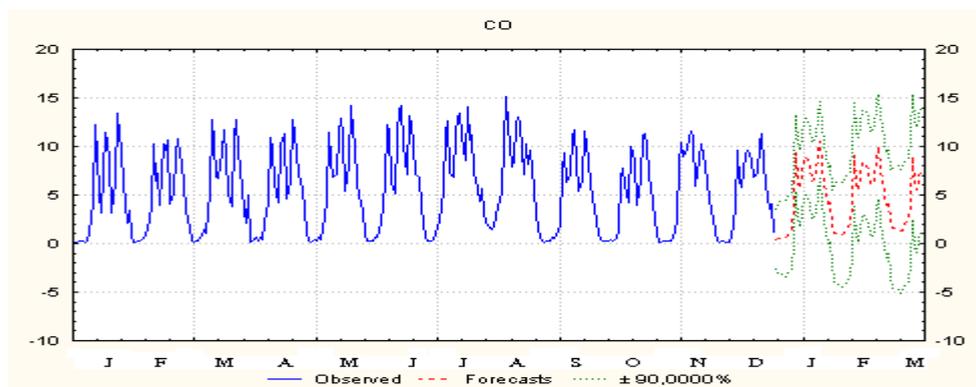


Figure IV.17: Concentration en CO observées à Bejaia pendant 2006 et estimées pour 2007

[60].

Une variation saisonnière est aussi à remarquer au niveau du nombre de consultation pour les infections respiratoires aiguës (IRA), chez les enfants de moins de cinq ans, dans les unités périphériques et l'hôpital du secteur sanitaire de Bejaia pour 2008. L'histogramme de la figure IV.18 montre que les valeurs enregistrées en été sont plus importantes que celles enregistrées en hiver. Le nombre maximal est enregistré au mois d'Août avec un nombre de 430 consultants.

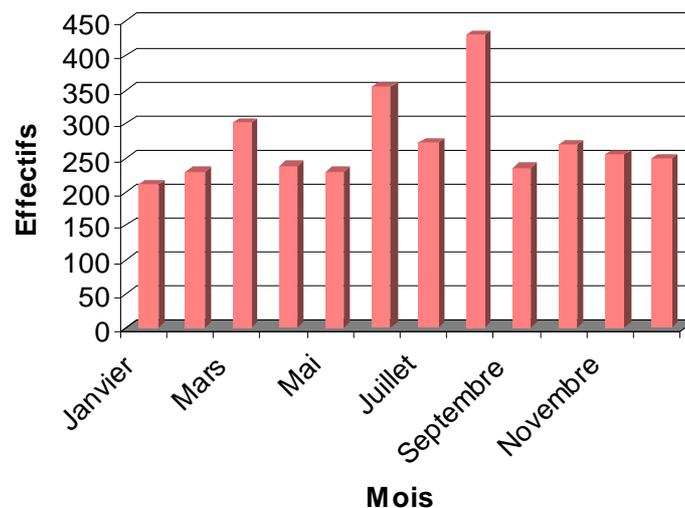


Figure IV.18: Evaluation saisonnière du nombre de consultations dans les unités périphériques et l'hôpital du secteur sanitaire de Bejaia pour 2008.

IV- Comparaison des résultats avec ceux d'autres études

Les résultats des deux études viennent de montrer que l'âge, le sexe et le lieu de domicile sont des facteurs influençant la distribution des pathologies cardiorespiratoires.

Pour qu'ils soient plus significatifs, en matière de la pollution atmosphérique, les résultats des deux études doivent être comparés entre eux et avec d'autres résultats d'études de référence comme celles réalisées par ERPURS.

Si on ne considère que la période de la première enquête qui est de 2005 à 2008 pour comparer les résultats des deux enquêtes le nombre total des hospitalisés pour causes des pathologies respiratoire à Bejaia serait de 2196 malades. Le taux des hospitalisations pour ces causes sera de 12 pour mille habitants, tandis que celui de Kherrata est de 9 pour mille habitants.

Le tableau IV.9 illustre les comparaisons des résultats des études à Kherrata, à Béjaia avec d'autres études en Algérie et à l'étranger.

Tableau IV.9 : Comparaison des résultats obtenus avec ceux d'autres études

	Etude sur Kherrata	Etude sur Bejaia	Autres études
Taux de mortalité respiratoire par rapport au total des décès	50 % enfants (2008) 12,75 % homme (2008)	25 % Enfants (2008) 25% Adultes (2008)	Total enfants et adultes 8% (Erpurs; 1995) [22]
Taux de mortalité respiratoire par rapport à l'ensemble de la population	0,54‰ (2005-2008)	0,68 ‰ (2005-2008)	0,30‰ APHEA [10]
Hospitalisation pour IR par rapport aux autres pathologies	46,7 % (2008)	20,47 % Adultes 20,13% enfants (2008)	25% (Erpurs; 1995) [22] 23% (Programme IRA en Algérie pour 2000) [71]
Consultation pédiatrique pour cause d'IRA	37,41 % pour (2005)	23% (2008)	22% (Erpurs; 1998) [22] 52%(Programme IRA en Algérie pour 2000)
Taux d'asthme (pathologie plus fréquente)	22,58% (2005-2008)	36% (2005-2008)	30% (PSAS-9; 2003-2006) [72]
Taux d'hospitalisation par rapport au nombre total d'habitants	9‰ (2005-2008)	12‰ (2005-2008)	

Les différences entre nos résultats et ceux des autres études sont donc notables. Elles correspondent cependant aux différences habituelles trouvées entre études de ce genre, pour des structures de populations et des conditions de vie différentes. Cela montre à contrario la fragilité des études épidémiologiques basées sur quelques caractères et négligeant d'autres.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis :

- De savoir que les études épidémiologiques étudient la fréquence des maladies dans les zones très ou peu polluées. Dans leurs analyses, elles utilisent des indices de mortalité et de morbidité. L'avantage de l'épidémiologie est qu'elle étudie l'homme dans ses conditions de vie réelles. Son inconvénient principal est, qu'étant une science d'observation, le jugement de causalité requiert beaucoup de prudence. On n'est jamais certain d'avoir contrôlé tous les facteurs pouvant jouer un rôle.

- D'avoir une idée sur l'état sanitaire des habitants de deux régions (Kherrata et Bejaia) au niveau de la wilaya de Bejaia en matière des pathologies respiratoires liées à la qualité de l'air. Ainsi nous avons obtenus des fréquences des pathologies cardiorespiratoires dans chacune des deux régions. Aussi nous avons vu la répartition de ces pathologies sur les deux territoires.

- De constater les facteurs qui influencent la distribution des pathologies cardiorespiratoires. Ainsi nous avons pu constater que la classe d'âge et le lieu de domicile de la population étudiée sont indispensables à considérer, cette distribution pouvant varier selon ces facteurs, mais aussi selon la période de l'année et d'autres facteurs environnementaux tels que la forme topographique et .

- De conclure que les deux populations de Kherrata et de Bejaia sont exposées à la pollution atmosphérique qui est d'origine automobile. Nous avons pu noter que, comme toutes les régions des pays en voie de développement, Bejaia n'est pas épargnée des effets sanitaires de la pollution de son air.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

La pollution atmosphérique urbaine est un amalgame de substances chimiques et de particules très diverses. Elle est de différentes sources mais majoritairement d'origine automobile. En Algérie où l'urbanisation et la motorisation se développent rapidement, la dégradation de la qualité de l'air et les nuisances sont déjà perçues. La principale source d'émission est le trafic routier.

Dans la plus part des pays industrialisés, les émissions automobiles font l'objet de mesures réglementaires de plus en plus sévères. Le renforcement des réglementations a conduit à la mise en œuvre de multiples dispositifs technologiques destinés à réduire très sensiblement les émissions des véhicules de transport.

En Algérie, il n'y a que le contrôle technique automobile qui pourrait contribuer à la réduction de ces émissions. Des valeurs limites sont fixées, des mesures d'opacité et de CO sont systématiquement effectuées à chaque contrôle mais aucun véhicule n'est rejeté pour cause de mauvais résultat concernant ces émissions. Cependant, la surveillance de la qualité de l'air, déjà fonctionnelle dans quatre grandes villes, permet de sensibiliser la population sur la nature de l'air qu'elle respire, les limites d'exposition ainsi que les gestes nécessaires pour contribuer à son amélioration. Elle devrait être étendue aux autres villes du pays. D'autre part, la biosurveillance peut être d'une grande utilité pour compléter le travail de gestion de la pollution atmosphérique.

Des mesures enregistrées à Alger, Béjaia et au tunnel de Kherrata ont montré que la pollution atmosphérique urbaine est majoritairement d'origine automobile. Les polluants mesurés atteignent de fortes concentrations aux heures de pointe du trafic routier. Les mesures journalières, hebdomadaires et saisonnières de la pollution de l'air ont confirmé que l'automobile est la première source qui influence la qualité de l'air.

L'augmentation sans cesse du nombre de véhicules, leur ancienneté et la tendance à la diésélisation sont les raisons qui font du parc automobile de Bejaia une source très importante de la pollution de l'air.

Les données qualitatives et quantitatives sur le parc automobile de Bejaia ne sont pas les seuls facteurs à prendre en compte pour juger de la qualité de l'air de cette région. Les conditions météorologiques ont aussi une influence sur les niveaux de pollution. Ainsi, avec les paramètres météorologiques, l'analyse statistique de corrélation-régression a montré diverses dépendances.

Avec l'augmentation de la température ambiante, les concentrations de NO et SO₂ diminuent légèrement tandis que celle de CO augmente substantiellement.

Pour l'humidité relative, les mesures ont donné une corrélation positive significative avec le CO, moins significative avec le SO₂ et négative avec le NO.

Les mesures ont montré une forte corrélation négative entre les trois polluants et la vitesse du vent.

Cette pollution n'est pas sans impacts sur les communautés biologiques et le milieu de ces régions. Les impacts de la pollution atmosphérique sont d'ordre sanitaire, à court ou long terme, et environnemental que ce soit sur les écosystèmes ou sur le bâti.

Les études épidémiologiques effectuées à Kherrata et à Béjaia ont révélé que l'ensemble de la population est touchée, mais la sensibilité à la pollution peut montrer des variations selon l'âge, le sexe et le lieu de domicile. Les enfants, les personnes âgées, les personnes les plus exposées à la circulation automobile et les femmes sont les plus affectées par la pollution atmosphérique. Les populations habitant la commune de Kherrata ou la ville de Bejaia sont les plus touchées par la pollution.

Parmi les pathologies cardiorespiratoires, l'asthme est la maladie la plus fréquente dans les deux régions étudiées. L'évolution saisonnière des taux de morbidité et de mortalité a montré des pics coïncidant avec les pics de pollution observés durant la saison estivale, le trafic routier étant le plus intense à cause d'afflux de touristes.

En perspective ces études épidémiologiques peuvent être complétées par :

- L'augmentation de la période concernée par les enquêtes et la prise en compte de la situation sanitaire à long terme.
- La profession des patients et la prise en considération de la consommation du tabac.
- Un meilleur dénombrement des effets sanitaires (mortalité, admissions hospitalières) et la prise en compte des admissions aux urgences.
- Le suivi d'exposition d'individus et non de toute la population supposée.
- L'installation de réseau de mesures de polluants

Pour un pays comme l'Algérie (importateur d'automobiles) les actions à mener pour réduire la pollution atmosphérique sont:

- Appliquer rigoureusement les lois sur les émissions
- Améliorer l'organisation et le fonctionnement du système des transports
- Encourager l'utilisation des énergies moins polluantes telles que les énergies renouvelables.
- Influencer le comportement au volant
- Rajeunir le parc automobile

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] MOSER M.A (1998), "Enquête épidémiologique sur les maladies respiratoires chez les enfants et adolescents de Strasbourg", Revue Environnement Et Technique; pp. 25-26.
- [2] BROCHURE P (1999), "Surveillance épidémiologique air et santé: Surveillance des effets sur la santé liés à la pollution atmosphérique en milieu urbain" - synthèse de l'étude Institut De Veille Sanitaire: INVS. p 19.
- [3] KANDA I (2004), "Effets à longs termes de l'exposition aux émissions automobiles sur la fonction pulmonaire des femmes adultes à Tokyo". Revue Environnement Risques et Santé, pp.334-335.
- [4] CAVILL. N. et al (2008), "Economic analyses of transport infrastructure and policies including health effects related to cycling and walking". A systematic review. Transport Policy (2009), doi:10.1016/j.tranpol.2008.11.001. p.14.
- [5] DEGOBERT P. (1995), "Automobiles and pollution". Editions TECHNIP, pp 22-102.
- [6] KOLLER E. (2004), "Traitement des pollutions industrielles" (Eau- Air- Déchets- Sols-Boues), Edition DUNOD, pp 178-198.
- [7] WESTERDAHL D & al. (2009), "Characterization of on-road vehicle emission factors and micro environmental air quality in Beijing, China", Atmospheric Environment journal vol. 43 (2009). pp 697–705
- [8] GERONIMI J-L (2000), "Le monoxyde de carbone (formation, mesure, toxicité, pollution urbaine, principales causes d'intoxication oxycarbonée)", Editions Tec et Doc. pp 6-7.
- [9] VINCENT A. (2002), "Conception et simulation d'un réacteur fil-cylindre à décharge couronne avec barrière diélectrique adapté au traitement des oxydes d'azote dans des effluents marqués par un isotope", thèse de Doctorat de l'université Paris VI, pp 16-46.
- [10] MASCRET P. (2005), "Pollution atmosphérique (causes, conséquences, solutions, perspective)", édition Ellipse.
- [11] ELICHEGARAY Ch. (2008), "La pollution de l'air, Sources, effets, prévention", Edition Dunod, Paris.
- [12] LE CLOIRE P. (1998) "Les composés organiques volatils (COV) dans l'environnement", Edition Tec & Doc, pp 74- 165
- [14] EL YAMANI M. (2006), "Pollution atmosphérique urbaine (Environnement et milieu)", Afsset, juin 2006, pp 1-6.
- [15] Centre de Ressources et d'Initiatives de Santé et Observatoire Régional de la Santé PACA.(2006) 'Santé et Pollution de l'air extérieur' Ville de Marseille, Direction Santé et Environnement.

- [16] LEONARD A. (1990), "Les mutagènes de l'environnement et leurs effets biologiques", Edition NASSON, p 39.
- [17] BIOCCHI S & L'HOSPITALIER C. (2002), "Les techniques de dépoussiéage des fumées industrielles", Edition Tec & Doc pp 34, 35.
- [18] RAMADE F. (2000), "Dictionnaire Encyclopédique des polluants", Edition Science International. Paris, p 402.
- [19] Conseil supérieur d'hygiène publique de France (Section de l'Evaluation des risques de l'environnement sur la santé) (1996), "L'ozone, indicateur majeur de la pollution photochimique, en France": Evaluation et gestion des risques sur la santé', Juin 1996, Edition Tec & Doc. pp 50-70.
- [20] MERAH A & AL (2009). "CFD photochemical modelling in an urban street canyon", ETGHAR'09; Colloque international sur l'environnement et transport dans des contextes différents. Février 16-18 (2009). p 9.
- [21] MARTIN J & MAYSTRE L.Y (1988), "Santé et pollution de l'air", 1^{ère} Edition Presses polytechniques Romandes. 243 p.
- [22] NASER T.M & AL. (2009) "Analysis of Traffic-related NO_x and EC concentrations at various distances from major roads in Japan", Atmospheric Environment, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.02.002. pp 14-15.
- [23] GRAINE H. (2009), "Prédiction de la concentration d'un polluant dans l'air à proximité d'une route".Centre de Recherche de Birine. Colloque international sur l'environnement et transport dans des contextes différents. Février 16-18 (2009). pp 31-37.
- [24] AIDAOU L & AL (2009). "Photochemical air pollution simulation with the air pollution model over a medium sized city region". Colloque international sur l'environnement et transport dans des contextes différents. Février 16-18 (2009). pp 103-114.
- [25] SAHA A & DESPIAU S. (2009) "Seasonal and diurnal variations of black carbon aerosols over a Mediterranean coastal zone", Atmospheric Research 92 (2009). pp 27-41.
- [26] BLANCHARD M. (2007), "Effet de la pollution atmosphérique (approche épidémiologique)", 16 juin 2007. INVS Institut de veille sanitaire, pp 9-30.
- [27] Organisation Mondiale de la Santé (2005), "Lignes directives OMS relatives à la qualité de l'air: Particules, ozone, oxydes d'azote et dioxyde de soufre, Synthèse de l'évaluation des risques", Mise à jour mondiale 2005, pp 09- 19.
- [28] PUDDU M & AL (2003), "L'Asthme et la Pollution de l'air Etat des connaissances et données disponibles pour le développement d'une politique de santé en Belgique", IPH/EPI Reports Nr. 2003 – 012, pp 53- 113.

- [29] VILLENAVE E. (2004) "Détermination des mécanismes d'oxydation des hydrocarbures aromatiques polycycliques adsorbés sur des aérosols de nature atmosphérique", PROGRAMME DE RECHERCHE INTERORGANISME POUR UNE MEILLEURE QUALITE DE L'AIR A L'ECHELLE LOCALE (PRIMEQUAL 2), Séminaire de programme, Juin 2004, p 38.
- [30] KERBACHI R & AL (2009), "Pollution par les particules fines dans l'agglomération d'Alger", Colloque international sur l'environnement et transport dans des contextes différents, ETGHAR'09, Ghardaïa, Février 2009, pp 48-60.
- [31] MAGNAN A (2004), "Etude de l'influence des particules diesel sur l'activation des lymphocytes T chez l'asthmatique allergique", PRIMEQUAL 2, Séminaire de programme, Juin 2004, p 25.
- [32] WALLAERT B (2004), " Effets des particules diesel sur le développement de la réaction inflammatoire allergique", PRIMEQUAL 2, Séminaire de programme, Juin 2004, p 28.
- [33] AUBIER M (2004), "Rôle des interactions particules diesel-fumée de cigarette dans la physiopathologie des remodelages bronchique et alvéolaire des Bronchopneumopathies Chroniques Obstructives (BPCO)". PRIMEQUAL 2, Séminaire de programme, Juin 2004. p 29.
- [34] MARANO F (2004), "Rôle des particules atmosphériques fines dans l'induction des pathologies cardiorespiratoires d'origine inflammatoire. Etude *in vitro* des interactions entre la muqueuse respiratoire et les cellules de l'endothélium pulmonaire". PRIMEQUAL 2, Séminaire de programme, Juin 2004, p 31.
- [35] FONTAN J. (2004) "Les pollutions de l'air (les connaître pour les combattre)", 2^{ème} Edition Vuibert (2004), pp 51-140.
- [36] GARREC J.P & HALUWIYN Ch.V. (2002) "Biosurveillance végétale de la qualité de l'air", Edition Tec & Doc, pp 9-30.
- [37] MACKENZI A et al, (2000) "L'essentiel en écologie", Edition BERTI, p 230
- [38] LEFEVRE R (2004), "Modélisation des effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux des bâtiments (calcaire et ciment)". PRIMEQUAL 2, Séminaire de programme, Juin 2004. p 75.
- [39] BENOUDJIT A & GUEGTAR N (2009), "Transport et développement durable : Enjeux et alternatives -- Véhicules Propres -- Technologies Emergentes", Colloque international sur l'environnement et transport dans des contextes différents, Ghardaia, Février 2009, p 121.

- [40] JOUMARD R & MANCEBO S. (2008) "Typology of the chains of causalities of environmental impacts in the transport sector". Colloque international sur l'environnement et transport dans des contextes différents, ETGHAR'09, Ghardaïa, Février 2009, pp 244-245.
- [41] MESRI N & AL. "Etude de la composition quantitative et qualitative des émissions Diesel par opacimétrie", Colloque international sur l'environnement et transport dans des contextes différents, ETGHAR'09, Ghardaïa, Février 2009, pp 302-303.
- [42] DORBANE N. (2008), "Impacts des transports urbains sur l'environnement de la ville de Tizi-Ouzou", Colloque international sur l'environnement et transport dans des contextes différents, ETGHAR'09, Ghardaïa, Février 2009, p 147.
- [43] JOUMARD R & AL. (1999) "Influence du cycle de conduite sur les émissions unitaires de polluants des voitures particulières", Rapport INRETS n° LTE 9902 Décembre 1999, pp 29-37.
- [44] KERBOUA B & AL. (2008) "Impact des émissions automobiles sur l'environnement : les risques d'une dégradation permanente". Colloque international sur l'environnement et transport dans des contextes différents, ETGHAR'09, Ghardaïa, Février 2009, pp 105-112.
- [45] Centre Conjoint OCDE/ CEMT de recherche sur les transports, "la gestion de la vitesse", édition CEMT, 2007, p 10.
- [46] JOUMARD R & AL. (2001) "Émissions unitaires de polluants des véhicules utilitaires légers", Rapport INRETS n° LTE 0101 Avril 2001, pp 21-27.
- [47] BOUCHETARA M & BEKOUICHE A. (2008) "Normes internationales Anti-pollution des Véhicules Essence et Diesel et Impacts sur l'environnement", Colloque international sur l'environnement et transport dans des contextes différents, ETGHAR'09, Ghardaïa, Février 2009, pp 142-155.
- [48] IWATA K & ARIMURA T.H. (2009) "Economic analysis of Japanese air pollution regulation: An optimal... Transport". Res. Part D (2009), doi:10.1016/j.trd.2008.11.009. p 3.
- [49] Conférence Européenne des ministres des transports (2000). L'évolution des émissions des véhicules.
- [50] Journal officiel de la république algérienne n° 65 du 2 septembre 1998.
- [51] HAAKANA M & al (2003), "Transport Policies in Relation to Congestion and Air Quality in Seven European Cities", les collection de l'INREST (Transport et pollution de l'air) Volume 2. Acte ENREST n° 92- Vol.2, pp 225-232.
- [52] M'HAMDI M. (2008) "Transport, pollution atmosphérique, et santé au Maroc : situation, impacts et prévention". Colloque international sur l'environnement et transport dans des contextes différents, ETGHAR'09, Ghardaïa, Février 2009, pp 123-129.

- [53] Cheng-Hsun Lai, "Emissions of liquefied petroleum gas (LPG) from motor vehicles", *Atmospheric Environment* vol. 43 (2009), pp. 1456–1463.
- [54] GIBLIN J.P (1997), "Pollution de l'air". Congrès international Francophone Versailles (Mobilité dans un environnement durable), ATEC, janvier 1997, pp 65-83.
- [55] KERBOUA B & AL. (2008) "Interaction entre le frottement dynamique du moteur thermique Alternatif (MTA) et le dégagement des gaz polluants", Colloque international sur l'environnement et transport dans des contextes différents, ETGHAR'09, Ghardaïa, Février 2009, pp 154-163.
- [56] MALAVAL F & VIGNERON J. (2003) "Innovation en environnement, Quelles perspectives en 2003? ", Edition economica, p 72.
- [57] ZAMBONI G & AL., "Estimation of road vehicle exhaust emissions from 1992 to 2010 and comparison with air quality measurements in Genoa, Italy", *Atmospheric Environment* vol. 43 (2009) pp. 1086–1092.
- [58] DRIASSA N (2009). "Inventaire des émissions du parc de véhicules routiers en Algérie". Colloque international sur l'environnement et transport dans des contextes différents, ETGHAR'09, Ghardaïa, Février 2009, pp 308-309.
- [59] CLEMENT H & al, (1972) T.D. B.SC. "S.O.S. biosphère: pollution", Edition HURTUBISE HMH, LTEE. pp 104-105.
- [60] LAMBERT S (1995); "Manuel environnement à l'usage des industriels". Edition AFNOR. pp 35-75.
- [61] Réseau de mesure de la qualité de l'air « SAMASAFIA » d'Alger, rapport annuel 2008, pp 4-26.
- [62] MEIRELES J. (2008), "Genotoxic effects of vehicle traffic pollution as evaluated by Micronuclei Test in Tradescantia (Trad-MCN)", *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* (2008), doi:10.1016/j.mrgentox.2009.02.005, pp 2-13.
- [63] Journal officiel de la république algérienne n° 01 du 8 janvier 2006.
- [64] Réseau de surveillance de la qualité de l'air « SAMASAFIA » d'Alger, rapport annuel 2007, pp 5-37.
- [65] ALKAMA R & AL. (2006), "Estimation and measurement of the automobile pollution: Application to Bejaia case", *Global NEST Journal*, Vol 8, No 3, 2006, pp 277-281.
- [66] ALKAMA R & al (2009), "Air Pollution in Bejaia City (Algeria): Measures and Forecasts" *Polish J. of Environ. Stud. Vol. 18, No. 5 (2009)*, pp 769-773.
- [67] ASHMORE M.R & DIMITROULOPOULOU C. (2009), 'Personal exposure of children to air pollution' *Atmospheric Environment* vol. 43 (2009), pp. 128–141.

- [68] TISSOT S & PICHARD A. (2004), "Seuils de Toxicité Aiguë Dioxyde d'Azote (NO₂)", Rapport Final Mai 2004. INERIS-DRC-03-47021-ETSC- STi - 03DR164. p 5.
- [69] DECAMPS E & TOUBON P. (1998), "La qualité de l'air. Que sais-je?", 1ere Edition Presse Universitaires De France, ISBN2130493270, pp 67-68.
- [70] LAWTHER P.J & AL. (1963) "L'épidémiologie de la pollution de l'air", rapport sur un Symposium, Organisation Mondiale de la Santé (OMS).
- [71] Comité National de Lutte contre les Infections Respiratoire Aigues de l'Enfant (2002), Guide des Infections respiratoires Aigues, Alger 2002 Unicef.
- [72] Observatoire régional de santé d'Ile-de-France, (1997) "La pollution de l'air et notre santé", pp. 21-23.

Annexes

**MINISTRE DE LA SANTE ET DE LA POPULATION
ET DE LA REFORME HOSPITALIERE**

WILAYA DE : *B. Béniouza*
 SECTEUR SANITAIRE DE : *Kherrata*
 SEMEP KHERRATA

MOIS DE : *juin*
 ANNEE DE : *2005*

5/5 d'Amich

**Fiche d'Evaluation de la Morbidité par IRA
Etat Global des Consultations dans les Unités
Périphériques et l'Hôpital du Secteur**

Nombre de consultant 0 à 4 ans révolus toutes causes confondues	Nombre de consultant 0 à 4 ans révolus pour IRA	% IRA	Diagnostic Topographique		Décision Thérapeutique			
			1	2	A	B	C	
								85
182	137	75,27						

Légende :

% d'IRA : Nombre de consultant pour IRA / Nombre de consultant toutes causes confondues.

Diagnostic topographique : 1 : IRA Haute Décision Thérapeutique : A : Prescription d'antibiotique.

2 : IRA Basse

B : Pas de prescription d'Antibiotique.

C : Patient Evacué.

Fait à Kherrata, Le 30.06.2005
CA mwidj

LE RESPONSABLE,

Amich

MINISTRE DE LA SANTE ET DE LA POPULATION

Annexe IV. II

WILAYA DE BEJAIA

SECTEUR SANITAIRE DE BEJAIA

FICHE D'EVALUATION DE LA MORBIDITE
PAR IRAETAT GLOBAL DES CONSULTATIONS DANS
LES UNITES PERIPHERIQUES ET
L'HOPITAL DU SECTEUR

MOIS DE ... Mars

Nombre de consultant 0 - 4 révolus toutes causes confondues	Nombre de consultant 0 - 4 révolus pour IRA	% I.R.A.	Diagnostic Topographique		Décision Thérapeutique		
			1	2	A	B	C
1024	301	29,38%	130	111	221	80	00

LEGENDE : % I.R.A = Nombre de consultant pour IRA / Nombre de consultant toutes causes confondues.

- Diagnostic Topographique 1 — IRA Haute
- 2 — IRA Basse

- Décision Thérapeutique A — Prescription d'antibiotique
- B — Pas de prescription d'antibiotique
- C — Patient évacué

FAIT A BEJAIA, le 02/04/08
Etablie par Mr. Bouabdouch

ملخص:

منذ بداية القرن المنصرم كان للانفجار الديموغرافي و التطور الصناعي تأثيرا على التلوث الهوائي الذي انعكس بدوره سلبا على صحة الإنسان. و تعتبر السيارة أكبر مصدر لهذا النوع من التلوث في الوسط المدني. ويشمل عملنا هذا على تأثير تلوث الهواء على الصحة في منطقة بجاية. و ذلك باستقصاء وبائي مرتبط بمختلف الأمراض الناجمة عن هذا النوع من التلوث. و معطيات عن حظيرة السيارات لولاية بجاية و أخرى عن مستوى تركيز العناصر الملوثة للهواء في هذه المنطقة أظهرت توافقا كبيرا مع كثافة حركة المرور. كما تطرق إلى تأثير العوامل الجوية على تكوين و انتشار هذه العناصر. و استنتجنا من خلال هذه الدراسة أن كل من السن، الجنس و الإقامة عوامل تؤثر على انتشار الأمراض الصدرية و التنفسية. و كل هذا يوحي بأن بجاية من بين المناطق الأكثر عرضة لتلوث الهواء. و بالتالي تعد مرا قبة نوعية الهواء فيها ضرورية.

الكلمات الرئيسية: تلوث الهواء، انبعاث السيارات، صحة الإنسان، التأثيرات، العوامل الجوية، مراقبة.

Résumé:

Depuis le début du siècle dernier l'accroissement démographique et le développement industriel sont à l'origine d'importants polluants atmosphériques qui sont nuisibles à la santé humaine. L'automobile est la principale source de cette pollution en milieu urbain.

Notre travail consiste à évaluer l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique à Bejaia. Il s'agit d'une enquête épidémiologique relative aux différentes pathologies générées par ce type de pollution. Des données sur le parc automobile de la wilaya de Bejaia et un ensemble de mesures ont été exploitées pour montrer que les concentrations des polluants sont fortement corrélées avec la densité du trafic urbain. L'effet des facteurs météorologiques a été abordé. Il ressort de cette étude que le sexe, l'âge et le lieu de domiciliation sont les facteurs qui influencent la distribution des pathologies cardiorespiratoires.

Toutes ces données nous permettent de suggérer que la wilaya de Bejaia présente toutes les caractéristiques d'une région à risque élevé de pollution atmosphérique. La surveillance de la qualité de l'air est nécessaire.

Mots clés: Pollution atmosphérique, Emissions automobile, santé humaine, effets, Facteurs météorologiques, surveillance.

Abstract:

Since the beginning of last century the population growth and industrial development are the cause of major air pollutants that are harmful to human health. The automobile is the main source of pollution in urban areas.

Our job is to assess the health impact of air pollution in Bejaia. This is an epidemiological survey on different pathologies generated by this type of pollution. Data on the number of cars in the wilaya of Bejaia and a set of measures have been used to show that concentrations of pollutants are highly correlated with the density of urban traffic. The effect of meteorological factors has been addressed. It appears from this study that sex, age and place of domicile are the factors that influence the distribution of cardiorespiratory diseases. All these data allow us to suggest that the wilaya of Bejaia has all the characteristics of a region at high risk of pollution. Monitoring air quality is necessary.

Keywords: Air pollution, Emission automotive, Humain health, effects, meteorological factors, Monitoring.