



HAL
open science

Expositions professionnelles aux substances cancérogènes émises par les transports

Claire Philippat

► **To cite this version:**

Claire Philippat. Expositions professionnelles aux substances cancérogènes émises par les transports. Sciences pharmaceutiques. 2009. dumas-00592329

HAL Id: dumas-00592329

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00592329>

Submitted on 12 May 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE JOSEPH FOURIER
FACULTE DE PHARMACIE DE GRENOBLE

Année : 2009

N°:

Expositions professionnelles aux
substances cancérogènes émises par les
transports

THESE

Présentée pour l'obtention du titre de DOCTEUR EN PHARMACIE

Diplôme d'état

Candidat : Mlle Philippat Claire

Née le : 16/02/1986 à Bourgoin Jallieu

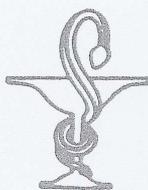
Thèse soutenue publiquement à la faculté de pharmacie de Grenoble le : 24 Novembre 2009

Devant le Jury composé de :

Président du jury : Mme Maître Anne

Membres : Mr Allenet Benoît

Mme Schiele Clarisse



UFR
DE PHARMACIE
DE GRENOBLE

UNIVERSITE
JOSEPH FOURIER
SCIENCES. TECHNOLOGIE. SANTÉ.



UNIVERSITE JOSEPH FOURIER
FACULTE DE PHARMACIE DE GRENOBLE
Domaine de la Merci 38700 LA TRONCHE

Doyen de la Faculté : Mme le Professeur **Renée GRILLOT**
Vice -Doyen : Mme **Edwige NICOLLE**

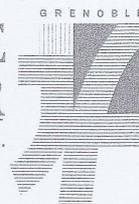
Année 2008-2009

MAITRES DE CONFERENCES DE PHARMACIE

ALDEBERT	Delphine	Parasitologie - Mycologie (L.A.P.M)
ALLENET	Benoît	Pharmacie Clinique (ThEMAS TIMC-IMAG / CHU)
BATANDIER	Cécile	Nutrition et Physiologie (L.B.F.A / CHU)
BRETON	Jean	Biologie Moléculaire / Biochimie (L.C.I.B)
BRIANCON-MARJOLLET	Anne	Physiologie Pharmacologie (HP2)
BUDAYOVA SPANO	Monika	Biophysique (U.V.H.C.I)
CAVAILLES	Pierre	Biologie Cellulaire et génétique (L.A.P.M)
CHOISNARD	Luc	Pharmacotechnie (D.P.M)
DELETRAZ-DELPORTE	Martine	Droit Pharmaceutique Economie Santé
DEMEILLIERS	Christine	Biochimie (N.V.M.C)
DURMORT-MEUNIER	Claire	Biotechnologies (I.B.S.)
ESNAULT	Danielle	Chimie Analytique (D.P.M.)
GEZE	Annabelle	Pharmacotechnie (D.P.M.)
GERMI	Raphaële	Microbiologie (I.V.H.C.I. / CHU)
GILLY	Catherine	Chimie Thérapeutique (D.P.M.)
GROSSET	Catherine	Chimie Analytique (D.P.M.)
HININGER-FAVIER	Isabelle	Biochimie (L.B.F.A)
JOYEUX-FAURE	Marie	Physiologie -Pharmacologie (HP2)
KRIVOBOK	Serge	Biologie Végétale et Botanique (L.C.B.M)
MOUHAMADOU	Bello	Cryptogamie, Mycologie Générale (L.E.C.A)
MORAND	Jean-Marc	Chimie Thérapeutique (D.P.M.)
MELO DE LIMA	Christelle	Probabilités Biostatistiques (L.E.C.A)
NICOLLE	Edwige	Chimie Organique (D.P.M.)
PINEL	Claudine	Parasitologie - Mycologie Médicale (CIB / CHU)
RACHIDI	Walid	Biochimie (L.C.I.B)
RAVEL	Anne	Chimie Analytique (D.P.M.)
RAVELET	Corinne	Chimie Analytique (D.P.M.)
RICHARD	Jean Michel	Service Accueil Handicap (Direction)
SOUARD	Florence	Pharmacognosie (D.P.M)
TARBOURIECH	Nicolas	Biophysique (U.V.H.C.I.)
VANHAVERBEKE	Cécile	Chimie organique (D.P.M.)
VILLET	Annick	Chimie Analytique (D.P.M.)

Mise à jour du 13/05/2009

1



ENSEIGNANTS ANGLAIS

COLLE Pierre Emmanuel	Maître de Conférence
FITE Andrée	Professeur Certifié
GOUBIER Laurence	Professeur Certifié

ATER

1 ATER	RECHOUM Yassine	Immunologie / DMBMT
1 ATER	GLADE Nicolas	Biophysique
½ ATER	RUTA Joséphine	Chimie Analytique
1 ATER	NZENGUE Yves	Biologie cellulaire / DMBMT
1 ATER	ELAZZOUI Samira	Pharmacie Galénique
1 ATER	VERON Jean Baptiste	Chimie Organique
1 ATER	HADJ SALEM Jamila	Pharmacognosie
½ ATER	REINICKE Anne Teresa	Pharmacologie
1 ATER	CHENAU Jérôme	DMBMT
1 ATER	NASER EDDINE Abeer	Anglais

ATER : Attachés Temporaires d'Enseignement et de Recherches

CHU : Centre Hospitalier Universitaire

CIB : Centre d'Innovation en Biologie

DPM : Département de Pharmacochimie Moléculaire

DMBMT : Département Mécanismes Biologiques des Maladies et des Traitements

HP2 : Hypoxie Physiopathologie Respiratoire et Cardiovasculaire

IAB : Institut Albert Bonniot, Centre de Recherche « Oncogenèse et Ontogenèse »

IBS : Institut de Biologie Structurale

LAPM : Laboratoire Adaptation et Pathogenèse des Microorganismes

LBFA : Laboratoire de Bioénergétique Fondamentale et Appliquée

LCBM : Laboratoire Chimie et Biologie des Métaux

LCIB : Laboratoire de Chimie Inorganique et Biologie

LECA : Laboratoire d'Ecologie Alpine

TIMC-IMAG : Laboratoire Technique de l'Imagerie, de la Modélisation et de Cognition

UVHCI : Unit of Virus Host Cell Interactions



UFR
DE PHARMACIE
DE GRENOBLE

UNIVERSITE
JOSEPH FOURIER
SCIENCES. TECHNOLOGIE. SANTÉ.



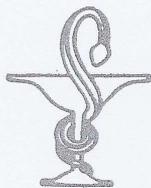
UNIVERSITE JOSEPH FOURIER
FACULTE DE PHARMACIE DE GRENOBLE
Domaine de la Merci 38700 LA TRONCHE

Doyen de la Faculté : Mme le Professeur **Renée GRILLOT**
Vice -Doyen : Mme Edwige **NICOLLE**

Année 2008-2009
Mise à jour : le 13 février 2009

PROFESSEURS A L'UFR DE PHARMACIE

BAKRI	Aziz	Pharmacie Galénique et Industrielle, Formulation et Procédés Pharmaceutiques (LR)
BOUMENDJEL	Ahcène	Chimie Organique (D.P.M.)
BURMEISTER	Wilhelm	Physique (U.V.H.C.I)
CALOP	Jean	Pharmacie Clinique (CHU)
DANEL	Vincent	Toxicologie (CHU SAMU-SMUR)
DECOUT	Jean-Luc	Chimie Inorganique (D.P.M.)
DROUET	Emmanuel	Immunologie / Microbiologie (U.V.H.C.I)
FAURE	Patrice	Biochimie (DBI / CHU)
FAVIER	Alain	Professeur Emérite
GODIN-RIBUOT	Diane	Physiologie – Pharmacologie (HP2)
GRILLOT	Renée	Parasitologie - Mycologie Médicale (Directeur UFR / CHU)
MARIOTTE	Anne-Marie	Pharmacognosie (D.P.M.)
PEYRIN	Eric	Chimie Analytique (D.P.M.)
SEVE	Michel	Biotechnologie (CHU / CRI IAB)
RIBUOT	Christophe	Physiologie - Pharmacologie (HP2)
ROUSSEL	Anne-Marie	Biochimie Nutrition (L.B.F.A)
WOUESSIDJEWE	Denis	Pharmacotechnie (D.P.M.)



UFR
DE PHARMACIE
DE GRENOBLE

UNIVERSITE
JOSEPH FOURIER
SCIENCES. TECHNOLOGIE. SANTÉ.



PROFESSEURS ASSOCIES (PAST)

CHAMPON	Bernard	Pharmacie officine
RIEU	Isabelle	Qualitologie (CHU)
TROUILLER	Patrice	Santé Publique (CHU)

PROFESSEUR AGREGE (PRAG)

GAUCHARD	Pierre Alexis	Chimie Inorganique (D.P.M.)
----------	---------------	-----------------------------

CHU : Centre Hospitalier Universitaire
DPM : Département de Pharmacochimie Moléculaire
HP2 : Hypoxie Physiopathologie Respiratoire et Cardiovasculaire
LBFA : Laboratoire de Bioénergétique Fondamentale et Appliquée
LCIB : Laboratoire de Chimie Inorganique et Biologie
LR : Laboratoire des Radio pharmaceutiques
PAST : Professeur Associé à Temps Partiel
PRAG : Professeur Agrégé
UVHCI: Unit of Virus Host Cell Interactions

Remerciements :

Mes remerciements vont à Mme Anne Maître, directrice de cette thèse qui a bien voulu me prendre en stage dans son service, qui m'a transmis l'ensemble des données nécessaires à ce travail et qui m'a guidée et soutenue tout au long de son élaboration. Grâce à elle, j'ai pu aborder une thématique d'actualité en Toxicologie de l'environnement et m'initier au travail de chercheur.

Je remercie Mr Benoît Allenet qui m'a fait confiance et qui m'a autorisée à réaliser mon stage de cinquième année hospitalo-universitaire au sein de l'équipe Médecine et Santé au Travail de Grenoble.

Je voudrais remercier l'ensemble des membres de l'équipe EPSP du laboratoire TIMC de Grenoble qui m'a accueillie dans ses locaux du mois de mars au mois d'août 2009 et plus particulièrement Mme Sylvette Liaudy, documentaliste de l'équipe Médecine et Santé au Travail qui m'a initiée aux joies du travail bibliographique ainsi que Franck Balducci, informaticien qui m'a aidée dans la prise en main du logiciel de statistiques SPSS.

Caroline Marie, Monique Chabert ont relu mes écrits et apporté des corrections orthographiques et/ou bibliographiques adéquates.

Je tiens également à remercier Mr Frédéric Ranchin pour son soutien et sa patience tout au long de ce travail.

Avant propos :

La découverte de la toxicologie de l'environnement au cours de l'année universitaire 2007/2008 passée à Montréal (Québec) a été une révélation et c'est à partir de ce moment que j'ai envisagé une carrière dans ce domaine. Ma formation de pharmacien, riche et diversifiée est un atout pour la compréhension des effets potentiels des polluants sur la santé humaine. De plus, cette thèse est un bon préambule car j'ai pu travailler sur un sujet d'actualité en toxicologie environnementale, tout en me perfectionnant en recherche bibliographique, analyse statistique, étude de données... Et tout ce que j'ai pu apprendre au cours de la réalisation de cette thèse me sera bénéfique pour la suite.

Table des matières :

Partie 1 : Rappels historiques et bibliographiques

<u>Introduction</u>	p13
<u>I) Rappels sur les moteurs, les carburants et les systèmes de traitement des émissions post combustion</u>	p14
1 Les différents moteurs	p14
1.1 Le moteur Diesel	p14
1.1.1 Généralités	p14
1.1.2 Moteurs deux et quatre temps	p14
1.2 Le moteur essence	p15
1.3 Le marché	p16
2 Les carburants	p16
2.1 Les carburants conventionnels	p16
2.2 Profils d'émission des motorisations essence versus diesel	p16
2.3 Influence de la qualité des carburants	p17
3 Evolutions techniques concernant les systèmes motorisés	p17
3.1 Les systèmes d'injection	p18
3.2 Alternatives aux moteurs conventionnels	p18
3.3 Traitement des émissions post combustion	p19
3.3.1 Les pots catalytiques	p19
3.3.2 Les filtres à particules	p20
3.4 Amélioration des carburants	p20
3.4.1 Emulsion eau/gazole	p20
3.4.2 Ajout de composés oxygénés à l'essence	p20
3.4.3 Ajout d'huile végétale	p20
3.4.4 Le gaz de pétrole liquéfié (GPL)	p21

<u>II) Revue des substances cancérogènes émises par les transports</u>	p22
1 Evaluation de la cancérogénicité	p22
1.1 Classement CIRC	p22
1.2 Classification de l'Union Européenne	p22
2 Polluants cancérogènes émis par les transports	p23
2.1 La phase particulaire	p23
2.2 Les hydrocarbures aromatiques polycycliques : HAP	p25
2.3 Le benzène	p29
2.4 Les aldéhydes : acétaldéhyde et formaldéhyde	p30
2.5 1,3 butadiène	p31
2.6 Les métaux	p31
3 Evolution des émissions	p32
<u>III) Evaluation de l'exposition professionnelle aux hydrocarbures aromatiques polycycliques</u>	p33
1 Surveillance atmosphérique	p34
1.1 Le benzo(a)pyrène atmosphérique	p34
1.2 Concentration toxique équivalente en B(a)P : [B(a)P]éq	p34
1.3 Limites de la surveillance environnementale	p34
2 Surveillance biologique de l'exposition	p35
2.1 Le 1-hydroxypyrene	p35
2.2 Le 3-hydroxybenzo(a)pyrene	p36
2.3 Autres biomarqueurs d'exposition aux HAP	p36
 <u>Partie 2 : Etude de l'exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques de populations professionnellement exposées aux émissions moteurs</u> 	
<u>Introduction</u>	p38

<u>I) Matériel et Méthodes</u>	p38
1 Niveaux de la littérature	p38
2 Niveaux mesurés par l'équipe	p39
2.1 Secteurs professionnels étudiés	p40
2.2 Les méthodes d'évaluation des niveaux d'exposition	p41
2.2.1 Prélèvements atmosphériques	p41
2.2.2 La surveillance biologique	p44
2.2.3 L'analyse des données	p44
<u>II) Résultats</u>	p45
1 Niveaux de la littérature	p45
1.1 Exposition atmosphérique	p45
1.1.1 Population générale	p45
1.1.2 Population exposée aux émissions moteurs	p46
1.2 Niveaux biologiques	p51
1.2.1 Population générale	p51
1.1.2 Population exposée aux émissions moteurs	p54
2 Niveaux mesurés par l'équipe	p56
2.1 Atmosphère	p56
2.1.1 Profil des HAP en fonction des secteurs d'activité	p57
2.1.2 Expositions au BaP et BapeqUE des différentes catégories professionnelles	p60
2.2 Biologie	p64
2.2.1 Concentrations urinaires de 1-OHP suivant les professions	p65
<u>III) Discussion</u>	p68
<u>Conclusion</u>	p72
<u>Bibliographie</u>	p74

Liste des tableaux et figures :

Tableau 1 : Règlement CE n° 715/2007 : Normes Euro 5 et Euro 6: réduction des émissions polluantes des véhicules légers

Consulté le 20/07/2009 sur http://europa.eu/index_fr.htm

Tableau 2 : Règlement CE n° 715/2007 : Normes Euro 5 et Euro 6: réduction des émissions polluantes des véhicules légers

Consulté le 20/07/2009 sur http://europa.eu/index_fr.htm

Figure 1 : **S.Boland, A.Baeza-Squiban, F.Marano 35**

Toxicité respiratoire des particules diesel : les mécanismes cellulaires et moléculaires, médecine/sciences 2001 ; 17 : 596-603 m/s n° 5, vol. 17, mai 2001

Figure 2 : **A.Maître, C.Marie, R.Persoos, M.Marques, M.Stoklov**

Exposure assessment to Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) mixtures: PAH profile determination to calculate B(a)Peq and Biological Exposure Index of OHP.
Poster

Abréviations, symboles

AFSSET : Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail

CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer

CNAM : Caisse Nationale d'Assurance Maladie

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

HC : Hydrocarbures imbrûlés

IARC : International Agency for Research on Cancer

InVS : Institut de Veille Sanitaire

1-OHP : 1- hydroxypyrene

Introduction :

Le transport autoroutier est très développé dans les pays industrialisés et la voiture est actuellement un des principaux moyens de locomotion. Or, malgré les améliorations techniques, les transports sont une des principales sources d'émission de polluants atmosphériques. La composition de ces émissions varie suivant le type de motorisation et de carburant (diesel, essence) mais elles contiennent toujours des substances connues pour favoriser le développement de certains cancers. Afin de limiter ces émissions, il est important de comprendre et d'identifier les différents paramètres favorisant leur formation au sein des véhicules. C'est pourquoi ce document présente, dans une première partie, les différents moteurs et carburants existants ainsi que quelques innovations ayant permis de limiter les émissions de polluants atmosphériques. De plus, dans le but d'évaluer les risques liés à ces polluants, il est nécessaire de caractériser ces substances et leurs mécanismes d'action chez l'homme.

Les niveaux d'exposition aux substances cancérogènes émises par les transports auxquels est exposée la population générale sont relativement faibles mais certaines personnes peuvent, via leur profession, être exposées à des niveaux beaucoup plus élevés. Afin de déterminer le risque encouru par ces travailleurs, il est possible de quantifier ces expositions par des surveillances individualisées. Ces surveillances existent pour certains polluants comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et, une étude de l'exposition aux HAP de personnes professionnellement exposées aux émissions moteurs est transcrite dans ce document.

I) Rappels sur les moteurs, les carburants et les systèmes de traitement des émissions post combustion :

1 Les différents moteurs :

Le but des moteurs est de transformer une énergie thermique en une énergie mécanique utilisable pour mettre le véhicule en mouvement. La production de chaleur se fait à l'intérieur du moteur par combustion d'un carburant sous pression.

1.1 Le moteur Diesel :

1.1.1 Généralités :

Le moteur Diesel est un moteur à combustion interne dans lequel le carburant s'auto-enflamme. Cela est possible car il existe un très fort taux de compression dans la chambre de combustion. Ce taux correspond au rapport du volume de la chambre lorsque le piston est au point le plus bas sur le volume lorsqu'il est au point haut. Le rapport volumétrique des moteurs Diesel est compris entre 14:1 et 25:1 alors qu'il n'est que de 9:1 dans les moteurs à essence.

Sous l'effet de la compression, l'air s'échauffe et le gazole s'enflamme de façon spontanée, sans qu'il y ait besoin d'étincelle, lorsque la température atteint environ 450°C. Afin de faciliter le démarrage du moteur à froid, on utilise des bougies de préchauffage qui élèvent la température des parois de la chambre de combustion. La masse d'air aspiré, à régime égal, d'un cycle à l'autre, est constante. Les moteurs à essence, eux, admettent une masse de mélange carburé variable d'un cycle à l'autre.

Les carburants utilisables dans un moteur de type diesel sont du gazole, du fioul lourd ou des huiles végétales (Carburants définis dans le paragraphe : I.3.4 Amélioration des carburants). Il existe deux modèles de moteur Diesel : les moteurs deux temps et les moteurs quatre temps.

1.1.2 Moteurs deux et quatre temps :

Le cycle d'un moteur quatre temps se décompose en quatre étapes distinctes :

I - Admission d'air

2 - **Compression de l'air** qui s'échauffe à plus de 450°C.

3 - **Injection - combustion - détente** : Le carburant forme un mélange instable avec l'oxygène de l'air comprimé et s'enflamme presque immédiatement. Les gaz chauds se dilatent et repoussent le piston en libérant une partie de leur énergie.

4 - **Échappement** : les gaz brûlés sont évacués. Le moteur est alors prêt à admettre une nouvelle charge d'air frais et le cycle peut recommencer.

Le moteur deux temps fonctionne avec seulement deux mouvements linéaires du piston au lieu des quatre du moteur quatre temps. Néanmoins les mêmes opérations : admission, compression, combustion-détente et échappement sont réalisées. Ces moteurs sont plus polluants et consomment plus qu'un moteur quatre temps équivalent. Cependant, ils sont encore utilisés pour les tondeuses à gazon et les deux roues.

1.2 Le moteur essence :

Le moteur à essence ou moteur à allumage commandé appartient à la famille des moteurs à explosion. Le taux de compression retrouvé dans ce type de moteurs est très inférieur à celui d'un moteur Diesel et le mélange de combustibles ne s'enflamme pas spontanément, mais sous l'action d'une étincelle provoquée par une bougie.

Le cycle du moteur à allumage commandé est similaire à celui d'un moteur Diesel quatre temps :

1 - **Admission** : entrée du mélange air et carburant vaporisé.

2 - **Compression du mélange** : La pression augmente et la chambre de combustion atteint des températures environnant les 400°C.

3- **Combustion** : Lorsque la compression est maximale, la bougie produit une étincelle qui déclenche la combustion du mélange.

4- **Echappement** : Les gaz brûlés sont chassés pour laisser la place à une nouvelle charge de mélange air/carburant.

Ce type de moteur fonctionne avec de l'essence, avec certains biocarburants à base d'alcool et avec le gaz de pétrole liquéfié : GPL (Carburants définis dans le paragraphe : I.3.4 Amélioration des carburants).

1.3 Le marché :

Depuis les années 1990, on observe un développement important du moteur Diesel qui représente aujourd'hui les deux tiers du marché. Cet engouement pour les moteurs Diesel s'explique par le fait qu'ils sont moins énergivores et consomment moins de carburant que leurs équivalents essence. En effet, les taux de compression élevés des moteurs Diesel permettent une combustion plus complète.

Outre le type de moteur, la qualité et les caractéristiques du carburant utilisé sont des facteurs influençant le profil d'émission des véhicules.

2 Les carburants

2.1 Les carburants conventionnels :

Les carburants conventionnels comme le diesel ou l'essence sont obtenus à partir du pétrole, mélange d'hydrocarbures de résines et d'asphaltènes qui contient également du soufre, de l'azote et de l'oxygène. Les carburants automobiles sont obtenus par le raffinage du pétrole qui consiste à le fractionner par des distillations successives. Les coupes pétrolières obtenues sont caractérisées par leur température d'ébullition : plus elle est élevée, plus le composé organique est lourd et a une faible volatilité. L'essence est obtenue à des températures de distillation plus faible que le gazole, ce qui implique que les hydrocarbures qui la composent sont plus légers et plus volatils. La différence de poids moléculaire et de volatilité des composants des deux carburants explique une partie des profils d'émissions.

2.2 Profils d'émission des motorisations essence versus diesel :

Le carburant utilisé a une influence majeure sur les composés retrouvés à l'échappement et ces différences sont suffisamment importantes pour que le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC), lors de ses évaluations, ait différencié les émissions essence et diesel [15]. En effet, dans la classification IARC (International Agency for Research on Cancer) de 1989, les produits d'échappement des moteurs à essence sont répertoriés 2B, tandis que les échappements diesel sont classés 2A (Classifications CIRC décrites paragraphe II.1.1.Evaluation de la cancérogénicité).

Les émissions d'aldéhydes, d'hydrocarbures aromatiques polycycliques gazeux et particulaires sont plutôt caractéristiques des émissions diesel. Il en est de même pour les particules fines, essentiellement émises par les motorisations diesel. Le benzène est, lui, plutôt caractéristique des motorisations essence. Son émission a augmenté de façon considérable lors du développement de l'essence sans plomb dans laquelle a été ajouté du benzène comme antidétonant.

Les hydrocarbures contenus dans le carburant diesel sont de masse moléculaire plus élevée et leurs homologues imbrûlés se trouvent en majorité adsorbés sur les particules de suies, contrairement à ceux issus des moteurs à essence qui sont plutôt à l'état gazeux.

Les composés de l'essence étant très volatils, on observe des pertes d'hydrocarbures par évaporation qui s'ajoutent à ceux émis par l'échappement. Ces pertes sont particulièrement abondantes en période estivale et ne sont pas observées pour un moteur Diesel. [49]

2.3 Influence de la qualité des carburants :

Les facteurs principaux influençant les émissions de polluants par les moteurs sont :

La teneur initiale en HAP : Il existe une corrélation entre la mutagénicité des émissions et les HAP présents dans le carburant initial (quantité et types) [15, 48].

Teneur en soufre : Oxydé en SO_3 , il participe à la synthèse des particules et la teneur en soufre des huiles diesel est réglementée au niveau européen.

Densité : L'émission de particules augmente avec la densité du carburant utilisé. [22]

Indice de cétane : Il rend compte de la capacité d'un carburant à s'enflammer. Un indice de cétane faible implique un allongement du délai d'allumage et une augmentation des émissions d'hydrocarbures imbrûlés et de particules.

3 Evolutions techniques concernant les systèmes motorisés :

Des évolutions récentes, mises en œuvre par les constructeurs, ont permis de diminuer les émissions de polluants nocifs.

3.1 Les systèmes d'injection [51]

Il existe deux types de système d'injection : la plus ancienne, l'injection mécanique, a été remplacée peu à peu par l'injection électronique. Ce système utilise des capteurs électroniques et adapte la durée d'injection et la quantité de carburant à injecter en fonction de l'enfoncement de la pédale d'accélérateur, de la température du moteur ou du taux d'oxygène. Avec ce type d'injection, la combustion et l'atomisation du carburant est plus efficace et un moteur équipé d'injecteurs électroniques émet, en fonctionnant au ralenti, moins de monoxyde de carbone mais surtout moins d'hydrocarbures et de particules.

En injection indirecte, le mélange air/carburant se fait en amont de la chambre de combustion alors que pour l'injection directe, développée par la suite, le carburant est introduit directement dans la chambre de combustion. Ceci permet de réduire la consommation car le carburant est injecté uniquement dans la chambre où la combustion est optimale. L'injection se fait à des pressions supérieures à celles de l'injection indirecte, les gouttelettes ainsi formées sont plus fines, ce qui permet une meilleure combustion et limite la production d'hydrocarbures imbrûlés (HC). Ce système fonctionne plutôt avec un mélange pauvre, ce qui augmente le taux d'oxyde d'azote émis. Mais cet effet négatif peut être contrôlé par l'installation d'un système de traitement post-combustion en sortie. (Voir paragraphe I.3.3 Traitement des émissions post combustion)

3.2 Alternatives aux moteurs conventionnels

- **Moteur Stop and Start** : Utilisable avec du gazole ou de l'essence, il se met en veille dès que la vitesse est inférieure à 6 km/h. Il permet de diminuer la consommation de carburant en milieu urbain d'environ 10% et donc de limiter les émissions polluantes proportionnelles à la consommation de carburant.
- **Véhicule électrique** : Ce type de véhicule n'émet pas de polluant cancérigène. Néanmoins il pose d'autres problèmes, environnementaux, comme le recyclage des batteries, et techniques car il est doté d'une faible autonomie.
- **Véhicule hybride** : Association d'un moteur thermique et d'un moteur électrique qui se recharge en récupérant de l'énergie lors du fonctionnement, notamment au freinage. Il permet de diminuer, suivant l'utilisation de 10 à 50 % la consommation et donc de limiter les émissions polluantes associées.

3.3 Traitement des émissions post combustion

3.3.1 Les pots catalytiques

Les pots catalytiques ont été développés pour transformer, grâce à des réactions chimiques, les polluants émis par les moteurs en un mélange de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone. Ils agissent en oxydant les polluants oxydables comme le monoxyde de carbone et les hydrocarbures et en réduisant le monoxyde d'azote. Ces réactions sont accélérées en présence de catalyseurs fonctionnant à haute température : platine, palladium, rhodium... Pour être actifs, ces catalyseurs nécessitent une température minimale de 250 degrés, température atteinte après seulement un à trois kilomètres effectués en milieu urbain. Donc, pendant la phase de démarrage l'élimination des polluants est limitée. Pour pallier ce phénomène, le développement de techniques de chauffage du pot catalytique ou l'ajout d'additifs dans l'essence pour abaisser la température d'amorçage des catalyseurs sont à l'étude.

De plus, pour que ce système fonctionne correctement, il est impératif qu'oxydants (NO, O₂) et réducteurs (CO, H₂, HC) soient en proportions définies qui correspondent à un mélange air/carburant stœchiométrique. Cette caractéristique explique pourquoi ce type de traitement est particulièrement adapté aux moteurs essence mais peu efficace pour une motorisation diesel qui fonctionne en général avec un excès d'air. Ils sont tout de même intéressants pour les véhicules diesel car ils favorisent l'oxydation de la partie extractible soluble (SOF) retrouvée à la surface des particules et qui contient des composés cancérogènes (HAP, nitro-HAP...).

Actuellement, l'installation d'un pot catalytique sur un véhicule essence permet de réduire les aldéhydes à l'échappement de 50 à 80%, d'éliminer 85% du benzène, et jusqu'à 97% des hydrocarbures aromatiques polycycliques gazeux. De plus, il réduit les émissions massiques d'hydrocarbures totaux (HAP, HAM, benzène, aldéhydes...) d'environ 30 fois par rapport à un véhicule essence de même catégorie non catalysé. En France, tous les véhicules à essence immatriculés depuis le 1^{er} janvier 1993 doivent être équipés d'un pot catalytique et pour les diesels, ils sont obligatoires depuis 1997.

3.3.2 Les filtres à particules

Les particules de carbone constituent un aérosol très dilué et doivent être accumulées sur un filtre avant d'être brûlées. La combustion complète nécessite des températures de l'ordre de 500°C. Or ces températures sont rarement atteintes à l'échappement et la combustion est en général assistée par des catalyseurs qui abaissent la température d'inflammation des suies. Les particules fines sont essentiellement émises par les véhicules diesel et les filtres à particules ont permis de réduire ces émissions qui sont maintenant quasiment équivalentes à celles d'un moteur (de même modèle) fonctionnant avec de l'essence. L'association d'un filtre à particules et d'un catalyseur d'oxydation en sortie de moteur Diesel est couramment utilisée et est efficace dans la prise en charge des polluants.

3.4 Amélioration des carburants

Afin de diminuer l'émission de substances délétères pour la santé, les scientifiques ont cherché à modifier la composition des carburants conventionnels voire à développer de nouveaux carburants et quelques exemples sont étudiés dans ce paragraphe.

3.4.1 Emulsion eau/gazole

Les résultats obtenus avec ce type de préparation varient suivant la proportion d'eau incorporée et le type de véhicule utilisé (lourd ou léger). Néanmoins, dans les deux cas, l'émission de particules fines diminue mais celle des hydrocarbures imbrûlés augmente. [8]

3.4.2 Ajout de composés oxygénés à l'essence

L'ajout d'éthanol à l'essence permet de diminuer l'émission des hydrocarbures imbrûlés et notamment des hydrocarbures aromatiques polycycliques des émissions. En revanche, on observe une augmentation des acétaldéhydes et du formaldéhyde. [51]

3.4.3 Ajout d'huile végétale

Les huiles végétales ont des propriétés proches du gazole (indice de cétane, viscosité) et peuvent être utilisées dans un moteur Diesel sans qu'il n'y ait besoin de le modifier. Elles sont pratiquement dépourvues de soufre et de composés aromatiques et leurs utilisations diminueraient les émissions de composés génotoxiques par rapport au diesel simple.

Néanmoins, les données actuelles ne permettent pas d'affirmer clairement le bénéfice de l'utilisation de ces huiles pour l'homme. [48]

3.4.4 Le gaz de pétrole liquéfié (GPL)

Le GPL est un sous-produit du pétrole constitué d'un mélange de butane et de propane. Les véhicules GPL ne produisent pas d'aldéhydes, pas d'aromatiques, ni de benzène et peu de particules. Néanmoins, ils sont pénalisés dans certaines études qui ne prennent en compte que les hydrocarbures imbrûlés totaux qui contiennent certes des HAP mais aussi du méthane, composé émis en grande quantité par les moteurs fonctionnant au GPL mais inoffensif pour l'homme. [49]

II) Revue des substances cancérogènes émises

1 Evaluation de la cancérogénicité

1.1 Classement CIRC

L'évaluation du degré de risque de cancérogénicité des polluants par le CIRC est fondée sur des études publiées et le classement des substances est revu régulièrement mais n'a pas de caractère réglementaire. Pour les substances considérées comme cancérogènes, le CIRC émet une monographie. Il en existe une pour les émissions diesel et essence dans leur globalité ainsi que pour des composés retrouvés dans ces émissions comme les HAP.

Classification CIRC

<p>Groupe 1 : agent ou mélange cancérogène pour l'homme</p> <p>Groupe 2A : agent ou mélange probablement cancérogène pour l'homme</p> <p>Groupe 2B : agent ou mélange cancérogène possible pour l'homme</p> <p>Groupe 3 : agent ou mélange ne pouvant être classé du point de vue de sa cancérogénicité pour l'homme</p> <p>Groupe 4 : agent ou mélange probablement non cancérogène pour l'homme.</p>

1.2 Classification de l'Union Européenne

La classification de l'Union Européenne est la classification de référence sur laquelle se base la réglementation. Elle a été réalisée à partir d'études épidémiologiques et/ou expérimentales.

Classification UE

Catégorie 1 : substances que l'on sait être **cancérogènes** pour l'homme.

Catégorie 2 : substances **assimilées comme** des substances cancérogènes pour l'homme.

Catégorie 3 : substances **préoccupantes** pour l'homme

2 Polluants cancérogènes émis par les transports

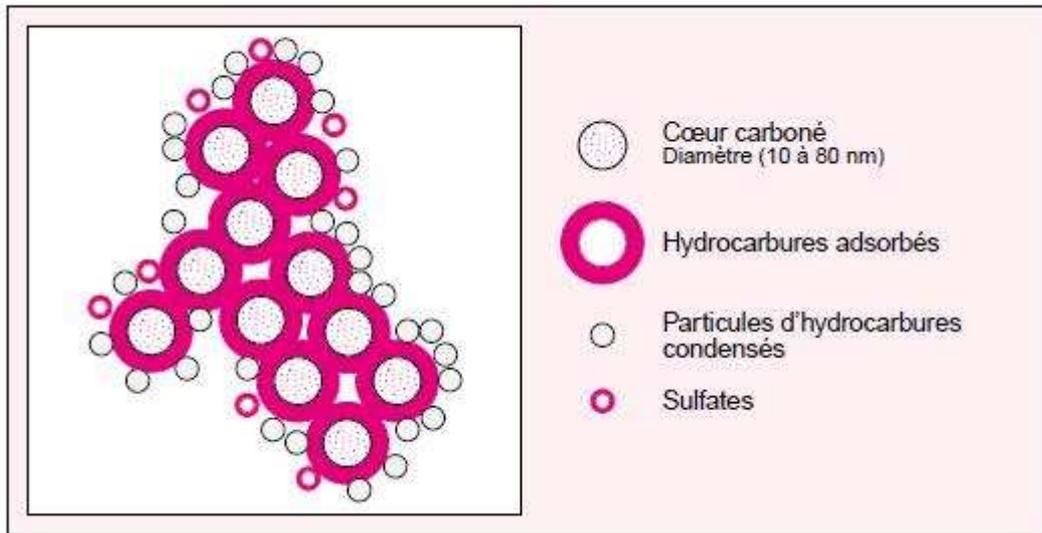
2.1 La phase particulaire

Les particules en suspension présentes dans les émissions diesel sont des agglomérats de carbone formés lors de la combustion. On les distingue en fonction de leur taille et plus elles sont petites, plus elles ont un impact sanitaire important car elles pénètrent plus facilement et plus profondément dans les poumons et les bronches.

Structure

Les particules émises par les moteurs Diesel sont de très petite taille, de l'ordre de 1µm de diamètre. Elles sont formées d'un noyau de carbone élémentaire recouvert de composés organiques : HAP, nitro-HAP..., de substances solubles comme des sulfates, nitrates, fluorures, chlorures ainsi que de petites quantités de métaux. Ces composés sont extractibles par des solvants appropriés et sont couramment dénommés partie extractible soluble (SOF).

Figure 1 : Particules diesel



Métabolisme :

L'essentiel des effets délétères des particules atmosphériques concerne celles dont le diamètre est inférieur à $10\mu\text{m}$, les PM_{10} . En dessous de cette taille, elles sont inhalables et peuvent se déposer le long de l'arbre respiratoire et, lorsqu'elles font moins de $2,5\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$), elles peuvent atteindre le parenchyme pulmonaire profond. Une partie d'entre elles sédimentent au niveau de la trachée et des bronches et sont évacuées vers le pharynx d'où elles seront expectorées ou avalées. Celles qui se déposent au niveau des alvéoles peuvent être épurées via les bronchioles périphériques pourvues de cils ou être absorbées par des macrophages qui les transportent vers des zones ciliées d'où elles seront évacuées en direction du pharynx. Les particules ultrafines peuvent traverser la paroi alvéolaire pour atteindre les ganglions lymphatiques régionaux et, dans ce cas l'élimination est beaucoup plus longue.

Cancérogénicité :

Les particules diesel sont classées 2A, par le CIRC. En effet, de nombreuses études ont mis en évidence une augmentation du risque de développer un cancer du poumon suite à une exposition à long terme aux particules atmosphériques fines issues d'émissions automobiles [15].

La communauté scientifique a d'abord cru que l'excès de risque de tumeur associé à une exposition aux particules diesel était uniquement dû aux HAP adsorbés à leurs surfaces. Or Pott et Heinrich en 1991 ont montré l'apparition de tumeurs pulmonaires chez des rats exposés à des particules noires de carbone dépourvues de HAP et ces tumeurs étaient d'autant plus fréquentes que les particules étaient fines. D'autres études, utilisant des particules noires de carbone ont donné des résultats similaires et les mécanismes d'action envisagés pour expliquer les effets cancérigènes des particules sont les suivants : les substances organiques, type HAP et nitro-HAP se désorbent des particules et vont interagir avec l'ADN en l'altérant tandis que les particules carbonées en forte concentration agissent en synergie et jouent un rôle de promoteur pour ces réactions. [22]

Réglementation

Les émissions de particules diesel sont réglementées, au niveau européen, par la norme d'émission EURO IV qui limite le rejet de particules par les véhicules diesel à 25mg/km. Le règlement dit EURO V, plus sévère, limite cette émission à 5 mg/km et rend obligatoire le filtre à particules pour les véhicules diesel neufs à partir de septembre 2009.

2.2 Les hydrocarbures aromatiques polycycliques : HAP

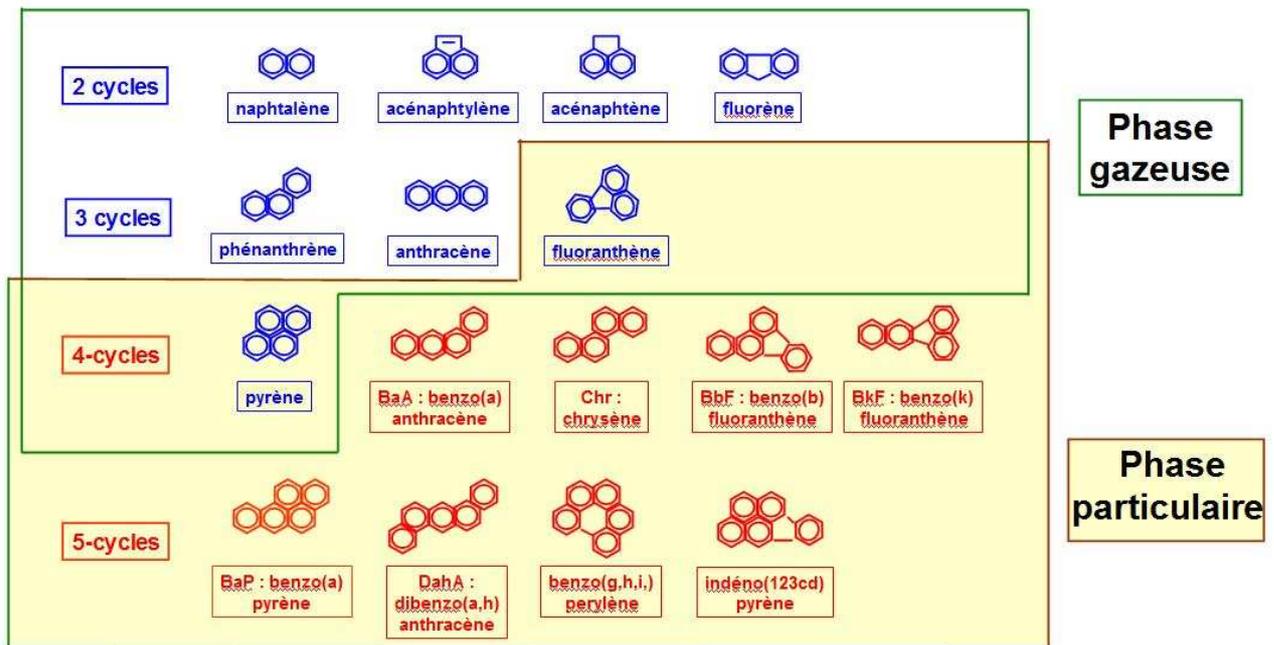
Ces composés sont principalement issus de la combustion incomplète des combustibles fossiles ou, plus généralement, des composés formés de carbone et d'hydrogène. Les géochimistes distinguent les HAP de source pétrogénique, c'est-à-dire issus de la combustion des carburants fossiles, des HAP pyrogéniques, qui se forment à des températures élevées lors de la combustion incomplète de matière organique. Les principales sources des HAP atmosphériques sont : la combustion de carburants fossiles (pétrole ou charbon), les feux de forêts, les usines de traitement du bois, les **gaz d'échappements automobiles** et l'incinération de déchets.

Structure

Les HAP sont constitués de deux à huit cycles aromatiques juxtaposés et sont classés suivant leur nombre de cycles. On distingue deux groupes : les HAP dit « légers » possèdent jusqu'à trois cycles tandis que les lourds, eux, sont formés de quatre cycles et plus. Dans l'air ambiant, ils existent sous forme gazeuse ou particulaire. Leur répartition entre les deux phases

dépend de leur poids moléculaire, de leur tension de vapeur et de la température ambiante (l'importance de la phase gazeuse augmente avec la température). Les composés à deux noyaux benzéniques se trouvent principalement en phase gazeuse, tandis que ceux à quatre noyaux sont en phase particulaire. Certains HAP, comme le pyrène ou le fluoranthène, ayant une tension de vapeur comprise entre 10^{-4} et 10^{-8} mmHg sont considérés comme semi-volatils et sont trouvés dans la phase gazeuse et la phase particulaire [20].

Figure 2 : Structure chimique des principaux HAP



Métabolisme :

- **Exposition :** Pour les sujets non-fumeurs, l'alimentation est la voie d'exposition la plus importante, notamment via l'ingestion de produits fumés ou grillés. La quantité d'HAP ingérée varie entre 1,2 et $5\mu\text{g}$ par jour. Les fumeurs sont exposés via la fumée émise. En effet, la fumée d'une cigarette émet entre 10 et 100ng de benzo(a)pyrène, classé cancérigène par le CIRC et la consommation d'un paquet par jour correspond à l'ingestion de 2 à $5\mu\text{g}$ d'HAP. La pollution atmosphérique est une source d'exposition non négligeable. En effet, en zones rurales les concentrations atmosphériques d'HAP sont de l'ordre de $4\text{ng}/\text{m}^3$ d'air et atteignent des concentrations de $40\text{ng}/\text{m}^3$ dans certaines agglomérations polluées.

-**Absorption** : Les HAP, très liposolubles, sont facilement absorbés par les voies cutanée, pulmonaire et orale. Lorsqu'ils sont inhalés, une fraction est rejetée dans l'air expiré tandis que le reste pénètre dans l'organisme par l'intermédiaire des cellules de l'épithélium bronchique ou alvéolaire. Quelle que soit la voie d'exposition, les HAP sont rapidement distribués dans l'organisme avec un tropisme particulier pour le foie.

- **Métabolisme** : Le métabolisme enzymatique des HAP au sein de l'organisme s'effectue en deux phases. Lors de la phase I, les enzymes du cytochrome p450 provoquent des réactions d'oxydation, de réduction et d'hydrolyse qui aboutissent à la formation de dérivés hydroxylés, diols, tétrols, époxyHAP, dihydroxyHAP, dont certains sont toxiques. En phase II, les enzymes jouent un rôle de détoxification et assurent la formation de composés conjugués (glucuronides, esters sulfates et acides mercapturiques), qui sont rapidement éliminés. Les cytochromes p450, responsables de la transformation des HAP sont retrouvés au niveau pulmonaire, cutané, et hépatique et leur activité enzymatique peut être induite par les HAP et leurs métabolites. De plus, la capacité d'induction de ces enzymes est génétiquement contrôlée et il existe une grande variabilité au sein de la population, ce qui peut expliquer les variations de réponse inter-individuelle observées suite à l'exposition aux HAP.

- **Élimination** : Les principales voies d'élimination sont les fèces et l'urine dans lesquelles on retrouve des métabolites conjugués qui servent de biomarqueurs d'exposition aux HAP dans de nombreuses études chez l'homme.

Cancérogénicité [7, 15]

Les effets des HAP sur la santé sont surtout de type chronique et de nombreuses études épidémiologiques ont mis en évidence leur responsabilité dans le développement de cancer du poumon, de la vessie et de la peau. Un certain nombre de ces molécules sont classées par le CIRC comme produits cancérigènes.

L'effet cancérigène des HAP est surtout dû à leurs métabolites, c'est-à-dire des dérivés oxygénés, des quinones et des radicaux cations. Dans l'organisme, il existe trois voies d'activation des HAP mettant en jeu les enzymes du cytochrome p450 et plus particulièrement le cyp1A1: La **voie de la mono-oxygénation** conduit à la formation d'époxydes qui, par réactions successives peuvent donner des dihydro-époxydes, des diols ou des tétradiols, dont certains sont hautement cancérigènes. Seuls les HAP ayant une structure particulière

(« creux » au niveau de leurs squelettes carbonés) peuvent être métabolisés par cette voie. Les HAP ayant un potentiel d'ionisation faible sont métabolisés par la **voie d'oxydation mono-électronique** par des peroxydases qui agissent en arrachant un électron. Les radicaux cations ainsi formés peuvent interagir avec les brins d'ADN pour former des liaisons covalentes avec les sites nucléophiles. Le dibenzo(a,l)pyrène est un des HAP pris en charge par cette voie. Une autre voie de métabolisation consiste en **la formation de quinones**, très réactives vis-à-vis de l'ADN. De plus, il semble que ces composés soient capables d'induire des mutations du gène de la protéine p53, connue pour son implication dans les phénomènes de cancérogénèse.

L'activation des HAP se fait donc essentiellement par les enzymes des cytochromes p450, or ces réactions peuvent être auto-induites par les HAP et plus particulièrement par le benzo(a)pyrène. En effet, il se lie à une protéine cytosolique : AhR (aryl hydrocarbon receptor) qui le transporte dans le noyau où ce complexe s'associe à une protéine nucléaire : Arnt (Ah receptor nuclear transcription factor). Cet hétérodimère joue alors le rôle de facteur de transcription et induit l'expression du cyp1A1, impliqué dans le métabolisme de phase I des HAP.

De plus, il existe dans l'atmosphère des dérivés nitrés d'HAP, comme le 3 nitro-pérylène, qui sont directement cancérogènes, ainsi que des dérivés méthylés, qui, lorsqu'ils sont hydroxylés par les enzymes de phases I peuvent se lier à l'ADN et former des adduits.

Mécanisme de toxicité

-Formation d'adduits à l'ADN : on parle d'adduits lorsque des composés exogènes se lient de façon covalente à ADN. S'ils ne sont pas réparés, les adduits peuvent provoquer des mutations au sein du patrimoine génétique des tissus et initier un processus de cancérogénèse. Ce phénomène est mis en évidence pour les dérivés hydroxylés des HAP et leurs métabolites radicaux cations et quinones qui possèdent des propriétés électrophiles leur permettant de se lier au niveau des sites nucléophiles de l'ADN.

- Stress oxydatif : Par la voie des quinones, des radicaux hydroxyles « toxiques » peuvent se former. Ils s'ajoutent à l'ADN en formant des bases oxydées ou réagissent avec le 2'désoxyribose, ce qui conduit à des cassures au niveau des brins d'ADN.

-Mutation de la protéine p53 : Certains dérivés des HAP interagissent avec la protéine p53, indispensable au maintien de l'intégrité de la cellule et de ses composants. Elle possède des capacités anti-prolifératives et apoptotiques. Des mutations au niveau de la protéine p53 entraînent la perte de ses capacités et sont retrouvées dans de nombreux cancers.

Réglementation

Au niveau européen, le cadre de surveillance des HAP atmosphériques est défini par la directive 2004/107/CE. Cette directive établit une valeur cible, applicable en 2012, pour le benzo(a)pyrène de 1 ng.m³ (en moyenne annuelle) dans l'air ambiant. Elle impose également la surveillance d'autres HAP comprenant au minimum le benzo(a)anthracène, benzo(b)fluoranthène, benzo(j)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, indeno(1,2,3-cd)pyrène et le dibenzo(a,h)anthracène.

2.3 Le benzène

Le benzène, classé cancérigène pour l'homme par le CIRC (groupe 1), appartient à la famille des hydrocarbures aromatiques monocycliques. Son émission par les transports a augmenté de façon considérable suite à l'interdiction du plomb dans les essences. En effet, il est ajouté aux essences sans plomb en tant qu'antidétonant et pour améliorer leur indice d'octane.

Métabolisme [17]

- **Absorption :** La voie principale d'absorption du benzène est la voie pulmonaire.

- **Distribution :** Le benzène, très lipophile, est distribué rapidement dans les tissus riches en graisses tels que le système nerveux, les surrénales, la moelle osseuse ou le foie, où il s'accumule. Au niveau sanguin, il a tendance à se lier aux hématies ainsi qu'aux protéines plasmatiques.

- **Métabolisme :** Le benzène est métabolisé au niveau du foie par le cytochrome p450.

Le métabolisme de phase I aboutit à la formation d'un phénol qui est ensuite métabolisé en composés réactifs comme la pyrocatechine, l'hydroquinone ou l'acide phénylmercapturique, pouvant se lier de façon covalente à l'ADN, l'ARN et les protéines. La phase II conduit à la formation de métabolites conjugués hydrosolubles qui seront éliminés dans les urines.

Carcinogénèse

Les métabolites hydroxylés du benzène forment des adduits d'ADN. De plus, une exposition au benzène entraîne l'apparition d'altérations chromosomiques, de modifications cytogénétiques ainsi que des modifications de la différenciation des lignées cellulaires au niveau de la moelle osseuse. Suite à une exposition chronique, on observe une diminution des globules rouges et blancs ainsi que de nombreuses cellules souches. Des études épidémiologiques ont permis de mettre en évidence un lien entre le développement de certaines leucémies et une exposition au benzène. De plus, il pourrait être impliqué dans d'autres affections malignes touchant le système hématopoïétique.

2.4 Les aldéhydes : acétaldéhyde et formaldéhyde

Les aldéhydes, naturellement présents dans l'environnement, sont dégagés par l'oxydation de méthane ou de méthanol lors des combustions. Ils font partie des composés organiques volatils émis par les véhicules essence et diesel et sont retrouvés en abondance dans les émissions des véhicules fonctionnant avec des carburants à base d'alcool car ce sont ses métabolites.

Formaldéhyde

La principale voie par laquelle le formaldéhyde affecte l'organisme humain est l'inhalation et, contrairement à d'autres composés, il ne s'accumule pas dans l'organisme. En effet, la majeure partie de la dose absorbée est métabolisée et éliminée sous forme de CO₂ et d'eau. Néanmoins, une part réduite est transformée par le foie et les érythrocytes en acide formique.

En 1996, l'Union Européenne considérait le formaldéhyde comme une substance préoccupante pour l'homme en raison d'effets cancérigènes possibles (groupe 3) et le CIRC, qui l'avait en premier lieu placé dans le groupe 2A, a revu sa classification en 2004. Il

appartient désormais au groupe 1. En effet, les experts du CIRC estiment que le formaldéhyde est un facteur de risque pour le cancer du rhinopharynx chez l'homme et qu'il pourrait être également un facteur de risque de leucémie, de cancer des fosses nasales et des sinus de la face. [16,18]

Acétaldéhyde

Des études animales ont permis de mettre en évidence la carcinogénicité de ce composé et il serait impliqué dans le développement de tumeurs malignes au niveau du tractus respiratoire. Néanmoins, il manque d'études épidémiologiques pour conclure à ses effets sur l'homme et il est actuellement classé comme potentiellement cancérigène par le CIRC (2B). [16]

2.5 1,3 butadiène

Le 1,3 butadiène se forme lors de la combustion incomplète des carburants. L'Environmental Protection Agency (EPA) aux États-Unis estimait, en 1993, que les transports étaient responsables de 94% des émissions de 1-3 butadiène et de récentes études ont montré son implication dans le développement de leucémies, lymphosarcomes, réticulosarcomes et tumeurs de l'estomac. Ces observations ont conduit l'Union Européenne à le considérer comme cancérigène pour l'homme (groupe 1). Dans l'atmosphère, il réagit avec des radicaux hydroxyles et de l'ozone pour former des aldéhydes et notamment de l'acroléine et du formaldéhyde, cancérigène connu [19].

2.6 Les métaux [2]

Les métaux émis par les véhicules proviennent des carburants, des lubrifiants ou des systèmes catalytiques et dans les émissions moteurs, les métaux suivant sont présents.

- **Plomb** : Ce métal était ajouté à l'essence comme anti-détonant. Ses effets sur la santé sont connus et bien documentés ; il agit au niveau du système nerveux, rénal, sanguin et est le facteur responsable du saturnisme. Pour ce qui est de la cancérogénèse, certains éléments collectés par l'INRS, l'INSERM et le CIRC suggèrent un effet cancérigène, notamment au niveau bronchique. Mais les données actuelles ne sont pas suffisamment

convaincantes et le CIRC le classe dans le groupe 3. Néanmoins, la commercialisation de l'essence plombée en Europe est interdite depuis l'année 2000.

- **Platine, palladium, rhodium** : Ils sont utilisés comme catalyseurs chimiques dans les pots catalytiques et il a été démontré que des quantités importantes de ces métaux précieux sont rejetées dans l'environnement. [2]

- **Cadmium** : Le cadmium est une impureté associée au zinc. Il n'est pas issu directement des carburants mais émis à partir des additifs à base de zinc utilisés comme lubrifiants. Il pénètre dans l'organisme principalement par les voies respiratoires et de façon moins importante par la voie digestive. Un des problèmes lié à ce métal est sa capacité à s'accumuler dans la chaîne alimentaire et, en chronique, il est suspecté d'augmenter la fréquence des cancers rénaux et prostatiques. De plus, l'exposition conjointe au cadmium et à l'arsenic pourrait jouer un rôle dans le développement de cancers du poumon. Il est d'ailleurs classé 2A par le CIRC. [9]

3 Evolution des émissions

En France, les émissions de polluants atmosphériques étaient maximales entre les années 1960 et 1990 mais, depuis cette période la tendance est à la baisse. La diminution des rejets s'explique par des améliorations techniques sur les véhicules, par une amélioration des carburants et additifs et aussi par le développement de normes européennes d'émissions de plus en plus sévères. En effet, les normes EURO instaurée en 1988 n'ont cessé de se durcir et actuellement, c'est la norme EURO V entrée en vigueur le 1^{er} septembre 2009, qui s'applique. Néanmoins, de nombreux composés considérés comme cancérigènes par le CIRC (HAP, 1,3 butadiène...) et qui sont retrouvés dans les émissions automobiles ne possèdent pas de normes personnelles et sont inclus dans les émissions d'hydrocarbures totaux.

Tableau 1 : Réglementation s'appliquant aux véhicules diesel

Polluants	Limite d'émission en mg/km
Monoxyde de carbone (CO)	500
Particules	5
Oxydes d'azotes (NOx)	180
Emissions combinées d'hydrocarbures et d'oxyde d'azote	230

RÈGLEMENT (CE) No 715/2007

Tableau 2 : Réglementation s'appliquant aux véhicules essences

Polluants	Limite d'émission en mg/km
Monoxyde de carbone (CO)	1000
Particules	5 (pour les moteurs à injection directe et mélanges pauvres)
Oxydes d'azotes (NOx)	60
Hydrocarbures totaux (HCtot)	100
Hydrocarbures non méthaniques	68

RÈGLEMENT (CE) No 715/2007

III) Evaluation de l'exposition professionnelle aux hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques, présents dans les émissions moteurs sous forme particulaire et gazeuse, sont impliqués dans le risque de développement de cancer du poumon. [7,46,20,5] C'est pourquoi il est important de déterminer, pour une population donnée, l'importance de cette exposition. En ce qui concerne l'exposition professionnelle, deux types d'indicateurs sont utilisés : les marqueurs d'expositions atmosphériques et les biomarqueurs.

1 Surveillance atmosphérique

La surveillance des HAP dans l'air ambiant est réglementée, au niveau communautaire, par la directive 2004/107/CE. Cette directive, reprise en France en 2007 (décret 2007-1479), impose, entre autres, la surveillance du benzo(a)pyrène atmosphérique mais aussi du benzo(a)anthracène, benzo(b)fluoranthène, benzo(j)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, indeno(1,2,3-cd)pyrène, dibenzo(a,h)anthracène.

Le prélèvement des HAP se fait grâce à des pompes portatives individuelles équipées d'un filtre (pour les HAP particulaires) et d'un support adsorbant (HAP gazeux). Les techniques chromatographiques actuellement utilisées (chromatographie liquide haute performance : CLHP) permettent l'identification et la quantification des HAP, qu'ils soient gazeux ou particulaires.

1.1 Le benzo(a)pyrène atmosphérique

Le benzo(a)pyrène (B(a)P) est l'HAP le plus étudié et est considéré comme un bon traceur du potentiel cancérigène d'un mélange d'HAP. Classé dans le groupe 1 par le CIRC, il appartient à la phase particulaire. Pour l'air ambiant, il existe une norme de qualité européenne, applicable en 2012, qui recommande de ne pas dépasser une exposition de 1 ng/m³ en moyenne annuelle. Pour les expositions professionnelles, il n'existe pas, en France, de valeur limite d'exposition. Néanmoins, la Caisse Nationale d'Assurance Maladie recommande de ne pas dépasser 150ng/m³.

1.2 Concentration toxique équivalente en B(a)P : [B(a)P]éq

Afin d'évaluer la toxicité d'un mélange d'HAP il est courant de calculer, la concentration toxique équivalente en benzo(a)pyrène ([B(a)P]éq). Cette concentration correspond à la somme des HAP présents pondérée par leur facteur équivalent toxique (TEF) qui rend compte du pouvoir cancérigène de chaque HAP par rapport au B(a)P.

$$[B(a)P]éq = \sum([HAP]*TEF)$$

Il existe plusieurs listes de TEF et celle qui semble obtenir le plus de consensus est celle de Nisbet et Lagoy. [3]

1.3 Limites de la surveillance atmosphérique

La métrologie permet d'évaluer l'exposition atmosphérique au poste de travail et d'identifier les sources d'expositions. Mais, le manque de données toxicologiques fait que seuls certains HAP présents dans le mélange sont pris en compte, ce qui conduit souvent à une sous-estimation du risque. De plus, l'estimation du risque par l'approche TEF dépend de l'extrapolation d'études animales à l'homme, extrapolation qui peut être contestable. La surveillance environnementale ne permet pas non plus de connaître la dose effectivement reçue par les individus. C'est pourquoi, l'étude de l'exposition atmosphérique doit être complétée par une surveillance biologique à l'aide de marqueurs spécifiques.

2 Surveillance biologique de l'exposition

Les biomarqueurs sont très utilisés en toxicologie car ils renseignent sur les quantités réellement absorbées par l'individu. De plus, ils prennent en compte l'ensemble des voies d'absorption ainsi que l'utilisation ou non de moyens de protection. Les HAP, après avoir été transformés par le foie, sont principalement éliminés via les fèces et les urines et les métabolites étudiés sont ceux retrouvés dans les urines. [7]

2.1 Le1-hydroxypyrene

Le 1-hydroxypyrene (1-OHP) est un métabolite issu du pyrène, HAP non cancérigène mais présent de façon abondante au sein des mélanges d'HAP particuliers. Le dosage du 1-OHP urinaire se fait en routine par chromatographie liquide haute performance, technique peu coûteuse et relativement sensible. La cinétique d'élimination du 1-hydroxypyrene urinaire est rapide ($t_{1/2} = 2$ à 4,6 heures) et, en cas d'exposition professionnelle, le maximum d'excrétion apparaît en moyenne trois heures après la fin de poste. On réalise donc des prélèvements en début de poste (DP), fin de poste (FP) et quand cela est possible trois heures après la fin de l'exposition (pic d'élimination). En cas d'exposition cutanée majoritaire, on observe un pic d'excrétion retardé et il est recommandé de faire des prélèvements en fin de semaine-fin de poste + 9 heures. Cette cinétique plus lente pourrait résulter d'un stockage au niveau du derme.

Le 1-OHP, considéré comme un bon biomarqueur de l'exposition aux HAP est utilisé de façon courante. Néanmoins, l'intérêt de ce marqueur pour évaluer le risque cancérigène des

populations exposées est discutable car il n'est pas le métabolite d'un HAP cancérigène. De plus, la consommation de tabac qui augmente significativement la concentration urinaire de 1-OHP est un facteur confondant important à prendre en compte dans l'interprétation de résultats. [13]

2.2 Le 3-hydroxybenzo(a)pyrène

Le benzo(a)pyrène appartient au groupe 1 du CIRC et est éliminé par voie urinaire principalement sous forme de 3-hydroxybenzo(a)pyrène (3-OHB(a)P). Le maximum d'excrétion du 3-OHBaP se situe en moyenne 16 heures après la fin de l'exposition et ce quelle que soit la voie d'exposition. Ce métabolite est plus représentatif des hydrocarbures aromatiques cancérogènes que le 1-hydroxypyrene. Néanmoins, son dosage est peu utilisé pour évaluer l'exposition aux HAP car il manque de sensibilité et est très coûteux. De plus, le B(a)P ne représente qu'un faible pourcentage des HAP particuliers.

2.3 Autres biomarqueurs d'expositions aux HAP

D'autres biomarqueurs sont susceptibles de rendre compte de l'exposition aux HAP et du risque cancérigène associé mais actuellement, aucun de ces dosages n'est utilisé en routine.

- **Dosage des naphthols urinaires** : Ce dosage, réalisé en fin de poste, permet d'apprécier l'exposition au naphthalène, HAP léger bicyclique, très bien absorbé par voie cutanée. Les concentrations urinaires sont bien corrélées aux concentrations atmosphériques de naphthalène mais il existe de larges variations individuelles.

- **Dosage des adduits d'HAP aux macromolécules** : Contrairement aux marqueurs précédents qui rendent compte des variations récentes d'exposition, les adduits reflètent une imprégnation plus ancienne. Ce dosage apparaît très sensible mais il est non spécifique d'un HAP particulier. De plus, la quantité d'adduits formés varie d'un individu à l'autre et est sensible à l'alimentation, au tabagisme et au polymorphisme enzymatique. La corrélation avec l'intensité de l'exposition est donc assez médiocre.

- **Dosage des HAP urinaires** : Certains auteurs ont proposé le dosage des HAP dans les urines en fin de poste. Mais les données sont encore peu nombreuses et les variations individuelles semblent importantes.

Ainsi, les émissions issues des transports ne sont pas anodines et sont couramment composées de substances identifiées comme cancérogènes par le CIRC. Des améliorations techniques sur les moteurs et les carburants ont permis de diminuer ces rejets mais l'augmentation en parallèle du parc automobile limite l'impact bénéfique de ces changements. L'exposition de la population à ces substances est un problème majeur de santé publique et il est important de l'évaluer et de la quantifier afin de déterminer le risque potentiellement encouru. Dans ce but, un travail de recherche sur **l'évaluation de l'exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques des populations professionnellement exposées aux émissions moteurs** a été réalisé.

PARTIE 2 : ETUDE DE L'EXPOSITION DE DIFFERENTS GROUPES PROFESSIONNELS AUX HAP EMIS PAR LES TRANSPORTS.

Introduction

L'objectif de cette étude est de caractériser l'exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques de personnes professionnellement exposées aux émissions moteurs. Elle est basée sur des données issues de la littérature ainsi que sur des données de terrain fournies par l'équipe EPSP du laboratoire TIMC (UMR CNRS 5525). Les données d'exposition de terrain font essentiellement appel à des données régionales.

I) Matériel et méthodes

1 Niveaux de la littérature

A l'aide des bases de données Medline et Toxline, les études relatives aux niveaux d'exposition aux HAP, publiées depuis 1993 ont été recensées.

Mots-clés utilisés : Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, environmental exposition, occupational exposition, diesel exhaust, engine exhaust, diesel combustion, outdoor workers, garage, trucking industry, police officers, urban tunnel

Les résultats sont présentés en deux parties sous forme de tableaux.

La première partie concerne les niveaux d'exposition atmosphériques et la légende est la suivante :

Pyr : pyrène

BaP : benzo(a)pyrène

Σ HAPp = somme des HAP particulaires = Fluoranthène + Pyrène + Benz[a]anthracène + Chrysène + Benzo[b]fluoranthène + Benzo[k]fluoranthène + Benzo[a]pyrène + Dibenzo[a,h]anthracène + Benzo[g,h,i]perylene + Indeno[1,2,3-cd]pyrène

Σ HAPg = somme des HAP gazeux = Naphthalène + Acénaphthène + Fluorène + Phénanthrène + Anthracène + Fluoranthène + Pyrène

Σ HAPc = somme des HAP cancérogènes selon l'UE = Benzo[a]pyrène + Benz[a]anthracène + Dibenzo[a,h]anthracène + Chrysène + Benzo[b]fluoranthène + Benzo[k]fluoranthène

Σ HAPt = somme des HAP totaux

Moy +/- ET = moyenne +/- écart type ; méd = médiane, [min-max] = valeur minimale et valeur maximale

Nb = nombre (sujets, échantillons)

Types de prélèvements ; ind = individuel, atm = atmosphère

La deuxième partie concerne les niveaux d'exposition biologique du 1-OHP urinaire

DP = Début de Poste, **FP** = Fin de Poste, **DS** = Début de semaine, **FS** = fin de semaine.

LD = Limite de Détection

ND = Non Détecté

Tb = tabagisme, **NF** = non fumeur ; **F** = fumeur ; **tous** = NF + F

(1-OHP : 1 μ mol/mol créatinine = 1,93 μ g/g créatinine = 3 μ /L urine)

2 Niveaux mesurés par l'équipe

Les résultats présentés dans cette étude sont issus de dosages atmosphériques d'HAP et de dosages urinaires de 1-OHP réalisés par le laboratoire de Toxicologie de l'Equipe Hospitalo-Universitaire de Médecine et Santé au Travail de Grenoble entre 2006 et 2009. Ces dosages ont été réalisés en collaboration avec les médecins du travail et l'ensemble du personnel des différents sites. Ils ont été effectués dans le cadre de l'étude EXPORISQ financée par AFSSET et l'INVS. Les données brutes ont été saisies à l'aide de tableaux Excel.

2.1 Secteurs professionnels étudiés

Pour étudier les prélèvements atmosphériques et biologiques, les sujets sont regroupés dans des groupes homogènes quant à leur exposition.

Catégories	Descriptifs	Salariés concernés
témoin	Salariés non exposés professionnellement aux HAP	Etudiants Personnel de bureau Enseignants
urbain	Salariés travaillant en extérieur en zone urbain	Agents municipaux Techniciens de maintenance Egoutiers Réparateurs de canalisation Agents de nettoyage Rippeurs (personne chargée de la collecte des déchets)
péage	Salariés travaillant sur les aires de péages autoroutiers	Péagers RIVA (Personnes travaillant en extérieur sur les aires de péages autoroutiers)
chauffeurs	Salariés conduisant un engin Diesel ou essence	Conducteurs/ chargeurs Caristes/manutentionnaires Chauffeurs/livreurs Conducteurs de bus Conducteurs d'engins Conducteurs PL Chauffeurs de camions de nettoyage Chauffeurs de bennes à ordures ménagères
tunnel	Salariés travaillant en partie dans un tunnel autoroutier	
garage	Salariés travaillant dans un garage	Garage véhicules légers Garage poids lourds Entretien des engins de travaux publics Entretien d'engins agricoles

Afin d'affiner l'analyse, des sous-groupes de population ont été étudiés :

Groupe	Sous groupes	Descriptif
urbain	chaussée	Salariés travaillant au raz du sol : égoutiers, réparateurs de canalisation, techniciens de maintenance
	nettoyage	Salariés chargés de l'entretien de la voirie : rippeurs, agents de nettoyage
	agents municipaux	
péage	péagers	
	Riva	
garage	garage véhicules légers (VL)	
	garage poids lourd (PL)	
	entretien des engins de travaux publics (TP)	
	entretien d'engins agricoles (agri)	

2.2 Les méthodes d'évaluation des niveaux d'exposition

2.2.1 Prélèvements atmosphériques

Les prélèvements et les analyses des HAP gazeux et particulaires sont en conformité avec les normes AFNOR NF X43-294 [1]. Dans cette étude, seuls les prélèvements individuels de longue durée (4 à 8 heures) sont utilisés. Les HAP sont prélevés à l'aide de pompes portatives individuelles à compensation automatique de perte de charge reliées par un tuyau flexible à une cassette « fermée » de 37 mm de diamètre contenant un filtre en fibre de quartz (norme NF X 43-294) pour les HAP particulaires et un tube contenant un adsorbant de type XAD-2 permettant de récupérer les HAP gazeux. Le débit des pompes est réglé en début de prélèvement à 1000 ml/min et est contrôlé en fin de prélèvement à l'aide d'un débitmètre. En cas de variation de débit supérieure à 5%, l'échantillon n'est pas analysé.

Pour extraire les HAP particulaires, les filtres en fibres de quartz sont soumis aux ultrasons dans du dichlorométhane, puis le solvant est évaporé et le résidu sec est repris dans l'acétonitrile.

Les HAP gazeux sont désorbés des tubes XAD-2 grâce à de l'acétonitrile. Après extraction, les HAP sont dosés par chromatographie liquide haute performance (HPLC) avec une détection par fluorescence.



Figure 3 : Pompe individuelle : SKC Modèle 224 PCEX 4

Les HAP étudiés sont les suivants :

	HAP	Limite de détection
HAP gazeux	Naphthalène (Naph)	2 ng/tube
	Acenaphthène (Acen)	0,6 ng/tube
	Fluorène (Fluo)	0,2 ng/tube
	Phénanthrène (Phe)	0,4 ng/tube
	Anthracène (Anth)	0,4 ng/tube
	Fluoranthène (Flua)	0,6ng/tube
	Pyrène (Pyr)	0,8ng/tube
HAP particulières	Fluoranthene (Flua)	0,15 ng/filtre
	Pyrène (Pyr)	0,2 ng/filtre
	Benz[a]anthracene (BaA)	0,05 ng/filtre
	Chrysène (Chr)	0,03 ng/filtre
	Benzo[b]fluoranthène (BbF)	0,05 ng/filtre
	Benzo[k]fluoranthène (BkF)	0,01 ng/filtre
	Benzo[a]pyrene (BaP)	0,02 ng/filtre
	Dibenzo[a,h]anthracène (DahA)	0,05 ng/filtre
	Benzo[g,h,i]perylene (BghiP)	0,1 ng/filtre
	Indeno[1,2,3-cd]pyrene (IP)	0,1ng/filtre

La légende des tableaux présentés est la suivante :

BaP : Benzo[a]pyrene

Pyrp : Pyrène particulaire

HAPtot = somme des HAP totaux

HAPp = somme des HAP particulières = Fluoranthene + Pyrène + Benz[a]anthracene + Chrysène + Benzo[b]fluoranthène + Benzo[k]fluoranthène + Benzo[a]pyrene + Dibenzo[a,h]anthracène + Benzo[g,h,i]perylene + Indeno[1,2,3-cd]pyrene

Σ HAPg = somme des HAP gazeux = Naphthalène + Acenaphthène + Fluorène + Phénanthrène + Anthracène + Fluoranthène + Pyrène

BapeqUE = concentration toxique équivalente en BaP. Cette concentration est calculée à partir des HAP classés dans le groupe 2 des substances cancérigènes de l'UE auxquels sont appliquées les TEF publiées par l'INERIS.

$$\text{BapeqUE} = \text{BaP} + \text{DahA} + 0,1 * (\text{BaA} + \text{BbF} + \text{BkF}) + 0,01 * \text{chr}$$

2.2.2 La surveillance biologique

Afin de décrire précisément l'activité du sujet, chaque échantillon urinaire est complété par une fiche de renseignements. Les concentrations de 1-OHP urinaire mesurées dans cette étude ont été prélevées en :

DSDP : début de semaine - début de poste

FSDP : fin de semaine - début de poste

FSFP = fin de semaine – fin de poste

Le 1-hydroxypyrene (1-OHP) urinaire est analysé après hydrolyse enzymatique et extraction en ligne en phase solide par chromatographie liquide haute performance avec détection par fluorescence. La limite analytique de détection est de 0,02 µg/mL d'urine soit 9,16 µmol/L. En parallèle, la créatinine est analysée par colorimétrie. Lorsque les urines sont trop diluées (< 2,66 nmol de créatinine/L) ou trop concentrées (> 26,6 nmol de créatinine/L) les échantillons sont exclus de l'étude. Les valeurs de 1-OHP sont rendues en µmol/mol de créatinine : 1 µmol 1-OHP/ mol créat = 1,93 µg 1-OHP/g créat).

2.2.3 L'analyse des données

Les résultats atmosphériques sont rendus en ng/m³ tandis que les valeurs biologiques sont en µmol/mol et l'ensemble des données est saisi dans un tableau Excel puis l'analyse est réalisée grâce au logiciel SPSS. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux comprenant : la moyenne, l'écart-type, la médiane, le minimum, le maximum et le nombre d'échantillons (N). Les résultats sont aussi présentés par secteur d'activité sous forme de boîtes de distribution (box-plot). Le trait à l'intérieur de la boîte représente la médiane et les bornes de la boîte correspondent aux 25^{ème} et 75^{ème} percentiles.

Les tests statistiques utilisés sont des tests non paramétriques pour séries indépendantes.

II) Résultats

1 Niveaux de la littérature

1.1 Exposition atmosphérique

1.1.1 Population générale

Référence	Année	Type de prélèvement	Nb	Poste	BaP	Pyr	Σ HAPp	Σ HAPc	Σ HAPt
					<i>moy ± ET</i>	<i>moy ± ET</i>	<i>moy ± ET</i>	<i>moy ± ET</i>	<i>moy ± ET</i>
					<i>moy géométr</i>	<i>moy géométr</i>	<i>moy géométr</i>	<i>moy géométr</i>	<i>moy géométr</i>
					<i>méd [min-max]</i>	<i>méd [min-max]</i>	<i>méd [min-max]</i>	<i>méd [min-max]</i>	<i>méd [min-max]</i>
NIELSEN [37] Danemark	1996	atm	60	milieu rural	[0,08-0,5]				
NIELSEN [38] Danemark	1996	atm		rue passante	4,4± 1,2	7,3			
				parc en centre ville	1,4± 0,6	1,3			
				aires suburbaines	1,9± 1,3				
				village	1,2± 0,4				
				campagne	0,6± 0,2				
PASTORELLI [41] Italie	1999	ind	72	administratifs NF		2,97± 2,39 2,6			
				administratifs F		3,4± 2,96 3,6			
				administratifs NF (été)		1,67± 1,64 1,02			
				administratifs F (été)		1,69± 2,43 0,55			
				administratifs NF (hiver)		4,18±2,37 4,1			
				administratifs F (hiver)		5,48± 2,1 5			
SCHOKET [46] Hongrie	1999	ind	55	témoins	[0,6-0,9]	[0,3-1,1]			
ZMIROU [53] France	2000	ind	38	été	0,07± 0,02 [0,05-0,09]	ND	Σ(7-13,15,16) 1,94	Σ(9-13,16) 0,76	
				hiver	1,05±0,87 [0,5-2,34]	0,25± 0,004 [0,25-0,26]	Σ(7-13,15,16) 10,73	Σ(9-13,16) 7,16	
KUUSIMAKI [29] Helsinki (Finlande)	2003	ind	5	témoins, hiver					Σ(1,2,4-16) 0,25 [0,19-0,35]
			17	témoins, été					Σ(1,2,4-16) 0,27 [0,10-0,72]

Tableau 1 : Concentrations atmosphériques des HAP dans la population générale (ng/m³)

Les sources d'expositions aux HAP sont multiples : tabagisme, alimentation, combustions (chauffages), pollutions automobiles et industrielles... et il est intéressant d'étudier les niveaux retrouvés dans la population générale pour avoir une idée de l'exposition

environnementale. Les études répertoriées dans le tableau 1 présentent des prélèvements d'ambiance en extérieur et des prélèvements réalisés chez des personnes exerçant une profession qui ne les expose pas directement.

Les études de Nielsen [37,38] montrent des niveaux de B(a)P décroissants, que l'on se trouve à proximité d'un centre ville, en banlieue, dans un village ou à la campagne. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que les moteurs automobiles émettent des HAP et qu'il est normal que ces polluants soient retrouvés en plus faible quantité à la campagne (moy = 0,6 ng/m³) où le trafic est moindre et en quantité plus importante en centre ville (moy = 4,4 ng/m³).

De plus, les concentrations atmosphériques d'HAP sont plus élevées en hiver qu'en été [29, 41, 54]. En effet, l'hiver le chauffage domestique se surajoute aux sources d'HAP existant l'été. De plus, pour les villes de fond de vallée entourées de hautes montagnes il peut exister un phénomène d'inversion thermique qui accentue la pollution atmosphérique en ville [37].

1.1.2) Population exposée aux émissions moteurs

Référence / Pays	Année	Type de prélèvement	Nb	Poste	Concentration atmosphérique en ng/m3				
					BaP	Pyr	Σ HAPp	Σ HAPc	Σ HAPt
					<i>moy ± ET</i>	<i>moy ± ET</i>	<i>moy ± ET</i>	<i>moy ± ET</i>	<i>moy ± ET</i>
					<i>moy géométr</i>	<i>moy géométr</i>	<i>moy géométr</i>	<i>moy géométr</i>	<i>moy géométr</i>
<i>méd [min-max]</i>	<i>méd [min-max]</i>	<i>méd [min-max]</i>	<i>méd [min-max]</i>	<i>méd [min-max]</i>					
HEMMINKI [14] Suède	1994	ind	16	mécaniciens, garage à bus	<15				Σ(9-16) 150
NIELSEN (38) Danemark	1996	atm	49	chauffeurs de bus urbains	3,9 [1-20]				
HARA [13] Japon	1997	atm	15	éboueurs	[2,5-10,5]	38,7 ± 27,9 [10,3-70,3]	Σ(7-9,12,13,15) 94,3		
AUBERTIN-GARNIER [3] France	1998	Ind	28	tunnel autoroutier	[1,2-5,2]	[2,7-33,6]	Σ(7-13,15) [6,7-63,4]	Σ(9-13) [3-14,2]	
SCHOKET [46] Hongrie	1999	ind	47	garages à bus et chauffeurs PL	[51-184]	[250-2600]			Σ(9-16) 1200
SZANISLO [47] Budapest (Hongrie)	2001	ind	28	policiers de ville	8				Σ(9-16) 43
PERICO [43] Italie	2001	ind	36	policiers (forte densité trafic, hiver)	4,5± 2,6 4,1 [0,4-9,7]	25,7± 13,3 23,1	Σ(8-15) 53,6±31,8 44,6 [9,6-109,3]	Σ(9-14) 18,8	
		ind	35	policiers (forte densité trafic, été)	1,2± 0,8 1,2 [0,1-3,7]	12,4± 11,2 9,3	Σ(8-15) 22,2±14,9 19,4 [5,3-68,7]	Σ(9-14) 6,5	
		ind	25	policiers (faible densité trafic, hiver)	2,2±1,2 1,8 [0,7-4,3]	11± 4,3 12,1	Σ(8-15) 24,4±11,4 22,1 [9,3-48]	Σ(9-14) 9,6	
		ind	23	policiers (faible densité trafic, été)	0,2± 0,2 0,2 [0,1-0,6]	2,1± 1,1 2	Σ(8-15) 4,1±1,6 3,9 [1,7-7,9]	Σ(9-14) 1,4	
PEREIRA [42] Brésil	2002	atm	12	station bus	3,1± 1,45	2,5± 1,8	Σ(7-16) 36,6	Σ(9-14,16) 28,3	Σ(1-16) 42
		atm	6	tunnel urbain	12,6± 3,8	79,4± 11,5	Σ(7-13,15,16) 213	Σ(9-14,16) 80,1	Σ(1-16) 234
	2002	ind	4	policiers hiver	1,44± 2,1 0,28 [0,13-5,08]		Σ(7-15) 27,31± 27,1 13,14 [8,88-74,1]	Σ(9-14) 6,52 ± 10,75 1,19 [0,49-22,62]	

MAITRE [37] France		ind	8	policiers été	0,18± 0,19 0,10 [ND-0,52]		Σ(7-15) 4,17± 2,4 3,89 [1,75- 8,11]	Σ(9-14) 0,86± 0,73 0,5 [0,2-2,11]	
		atm	4	policiers hiver	1,25± 2 0,14 [ND- 4,71]		Σ(7-15) 26,53± 29,05 12,26 [5,01-76,58]	Σ(9-14) 7,2± 12,2 1,56 [0,06- 25,42]	
		atm	1	policier été	0,03		Σ(7-15) 2,19	Σ(9-14) 0,37	
POSNIAK [44] Pologne	2003	ind	5	mécaniciens	13,2± 12,4 12,1 [1-28]	39,4± 29 [0-77]	Σ(7-16) 156,16	Σ(9- 14,16) 99	Σ(1,2,4- 16) 13,92
		ind	5	électro- mécaniciens	10,1± 5,8 8 [1-16]	53± 51 [2- 134]	Σ(7-16) 331,8	Σ(9- 14,16) 159	Σ(1,2,4- 16) 19,22
		ind	13	mécaniciens- serrurier	15± 11,6 19 [5-31]	65,7± 41 [28-124]	Σ(7-16) 240,2	Σ(9- 14,16) 106,5	Σ(1,2,4- 16) 26,76
		ind	24	conducteurs de chariots élevateur	22± 16 31 [8-63]	133± 82 [0-386]	Σ(7-16) 289,4	Σ(9- 14,16) 88,4	Σ(1,2,4- 16) 22,56
SAUVAIN [45] Suisse	2003	atm	2	salariés dépôt de bus (été)	0,61 [0,38- 0,85]				3,85 [3,09- 4,62]
		atm	3	salariés dépôt de bus (été)	1,09 [0,27- 1,09]				4,59 [1,51- 4,92]
		atm	2	salariés dépôt de bus (hiver)	4,53 [3,34- 5,72]				24,6 [16,9- 32,4]
		atm	2	réparateurs camions (été)	0,25 [0,2- 0,29]				2,32 [1,55- 3,08]
		atm	3	réparateurs camions (été)	0,28 [0,27- 0,52]				
		atm	1	réparateurs camions (hiver)	3,33				
		atm	2	tunnel en sous sol (été)	1,47 [1,35- 1,58]				
		atm	2	tunnel en sous sol (été)	0,28 [0,25- 0,30]				
		atm	1	tunnel en sous sol (été)	1,3				

KUUSIMAKI [29] Helsinki (Finlande)	2003	ind	22	garage à bus (hiver)	2,9 [ND-60]	3,2 [ND-105]			$\Sigma(1,2,4-16)$ 2,24 [0,89-5,96]
				garage à bus (été)	0,6 [ND-8,9]	0,8 [ND-12]			
ZHANG [52] Beijing (Chine)		ind	106	garage à bus (hiver)	0,60 [ND-8,9]	1,1 [ND-12]			$\Sigma(1,2,4-16)$ 1,24 [0,25-3,26]
	2006	ind		policiers, été	0,54	0,02	148± 118	14,9± 5,9	
LIU [34] Beijing (Chine)	2007	ind		policiers, hiver			750± 100		

Tableau 2 : Concentrations atmosphériques des HAP pour des populations exposées professionnellement aux émissions moteurs ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Au cours de la dernière décennie, plusieurs auteurs se sont intéressés à l'exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques des populations professionnellement exposées aux émissions moteurs. Les professions explorées dans les études présentées dans le tableau 2 sont variées et similaires aux grandes catégories définies pour notre étude : personnes travaillant en extérieur en milieu urbain [13,34,37,43,47,53], garagistes[14,44,45,46,49], chauffeurs[49,46], personnel de tunnel [3,42,45]. Aucune donnée concernant les péagers n'a pu être trouvée.

Les niveaux d'HAP retrouvés lors d'expositions professionnelles aux émissions moteurs sont relativement faibles et les concentrations de B(a)P sont toujours très en deçà de la valeur guide de $150\text{ng}/\text{m}^3$ de la CNAM. Lorsque l'on s'intéresse aux prélèvements individuels, plus représentatifs de l'exposition que les prélèvements d'ambiance, les sujets les plus exposés sont les mécaniciens et les concentrations de B(a)P retrouvées pour cette population sont de l'ordre de $15\text{ng}/\text{m}^3$ [14,44,]. Seule une étude, réalisée en Hongrie montre des niveaux extrêmement élevés avec un maximum pour le B(a)p de $184\text{ng}/\text{m}^3$ sans que cela puisse s'expliquer.

En ce qui concerne les tunnels, les prélèvements sont essentiellement de type atmosphère et les concentrations médianes de B(a)P mesurées sont de l'ordre de $1\text{ng}/\text{m}^3$, ce qui est faible et semblable aux valeurs obtenues dans la population générale [2]. Une étude se démarque en présentant une moyenne pour le de B(a)P de $12,6\text{ng}/\text{m}^3$ [42] ce qui est beaucoup plus élevé que les données issues des autres travaux concernant ce milieu. Cela peut s'expliquer par des différences de trafic et de systèmes de ventilation entre les ouvrages. De

plus, le tunnel dans lequel Perreira [42] a fait ses mesures est un tunnel urbain, au Brésil, pays connu pour être très pollué.

Les données obtenues pour les personnes travaillant en extérieur près de grands axes de circulation ou en milieu urbain concernent essentiellement des policiers et sont, elles aussi faibles, avec des médianes inférieures à $2\text{ng}/\text{m}^3$ pour le B(a)P. Les concentrations d'HAP retrouvées dépendent de la saison et sont significativement plus élevées en hiver qu'en été [34,37,52]. De plus, ces concentrations sont d'autant plus importantes que la densité du trafic est forte [43]. Les valeurs obtenues par Liu [34] concernant les HAP particuliers pour des policiers sont très élevées ($H_{\text{app}} = 750 \pm 100 \text{ ng}/\text{m}^3$). Cela s'explique par le fait que les prélèvements proviennent de Bejin, en Chine, ville très polluée pour laquelle les niveaux d'été [53] sont déjà hauts et nettement supérieurs à ceux retrouvés en France [37]. De plus, l'étude de Liu a eu lieu en hiver, période où les HAP émis par les chauffages se surajoutent à ceux des autres sources urbaines (transports, industries...)

Il ressort de ses études que les niveaux d'HAP auxquels sont soumises les populations exposées aux émissions moteurs sont relativement faibles et sauf exception [46] toujours inférieurs à la valeur guide de la CNAM pour le B(a)P. Il s'avère aussi que ce sont les mécaniciens qui sont les plus exposés.

1.2) Niveaux biologiques

1.2.1) Population générale

Références	Année	Poste	F/NF	Nb de sujets	Moment du prélèvement	1-OHP en $\mu\text{mol/mol}$ créatinine
						<i>moy \pm ET</i>
						<i>moy géométr</i>
						méd [min-max]
GRANELLA [11] Italie	1993		F NF	22 19		0,12 \pm 0,09 0,08 \pm 0,04
GOEN [10] Allemagne	1995	population générale administratifs d'une UIOM population générale	NF F tous NF F tous NF F tous	28 21 49 13 8 21 49 20 69		0,06 [<0,02-0,17] 0,12 [<0,02-0,68] 0,08 [<0,02-0,68] 0,05 [<0,05-0,11] 0,09 [<0,05-0,67] 0,05 [<0,05-0,67] 0,02 [<0,02-0,28] 0,14 [<0,02-0,31] 0,02 [<0,02-0,31]
LEVIN [31] Suède	1995	administratifs	NF F tous	14 10 24	FP FP FP	0,023 0,087 0,06
NIELSEN [37] Danemark	1996		NF	12		0,05 [0-0,11]
CHENIER [4] Québec (Canada)	1997	volontaires non exposés professionnellement	NF			0,0123 0,021 [0-0,151] 0,00578 0,052 [0,022-0,142] 0,1012 0,094 [0,046-0,566] 0,0316 0,026 [0,013-0,136] 0,037 0,037 [0,014-0,094] 0,1093

						0,093 [0,025-0,436] 0,0526 0,044 [0,005-0,350] 0,0341 0,031 [0,004-0,497]
HARA [13] Japon	1997		tous	10		0,14 ± 0,1 [0,03-0,62]
			F	6		0,17 ± 0,12 [0,04-0,62]
			NF	4		0,09 ± 0,06 [0,03-0,26]
KARAHALIL [27] Turquie	1998					1,55 ± 0,28
SCHOKET [46] Hongrie	1999	Témoins	tous			0,17 ± 0,18
PASTORELLI [41] Italie	1999	administratifs	NF			0,08 ± 0,08
			F			0,06 0,18 ± 0,10
		administratifs (été)	NF	37		0,07 ± 0,09
			F	18		0,04 0,17 ± 0,09
		administratifs hiver	NF	35		0,19 0,09 ± 0,06
F	15			0,07 0,19 ± 0,13		
SZANISZLO [47] Budapest (Hongrie)	2001	hiver		24		0,34 [0,11-0,57]
JONGENEELLEN [25]	2001	Hollande	NF	52		0,26
			F	38		0,28
			NF	14		0,17
		Suède	F	28		0,51
			NF	48		0,03
			F	10		0,09
		Turquie	NF	15		0,24
			F	14		0,33
		Allemagne	NF	90		0,04
			F	49		0,12
			NF	19		0,08
		Italie	F	22		0,13
			NF	95		0,07
		Canada	F	45		0,12
NF	10			0,27		
USA	F	11		0,76		

		Chine	NF F	74 84		0,68 0,76
JACOB [24] Allemagne	2002	population générale	NF F	10 9		[0,01-0,11] [0,03-0,31]
LAFONTAINE [30] France	2006	population générale	NF F	27 27		0,04 0,03 [0,01-0,15] 0,14 0,11 [0,04,0,53]

Tableau 3: Concentrations urinaires en 1-hydroxypyrene ($\mu\text{g/mol}$ de créatinine) dans la population générale

L'exposition environnementale aux HAP étant réelle, il est normal de retrouver le 1-OHP, métabolite du pyrène, dans les urines de populations non exposées professionnellement. Néanmoins les moyennes et médianes sont très faibles.

Les concentrations les plus élevées sont obtenues pour des sujets fumeurs [10,11,13,24,25,30,31,41]]. Cela met en évidence l'influence du tabagisme sur les concentrations de 1-OHP urinaire et c'est un facteur confondant important à prendre en compte, notamment pour les faibles niveaux d'exposition.

1.1.2) Population exposée aux émissions moteurs

Références/ Pays	Année	Poste	F/NF	Nb de sujets	Moment du prélèvement	1-OHP en $\mu\text{mol/mol}$ créatinine
						<i>moy \pm ET</i>
						<i>moy géométr</i>
						<i>méd [min-max]</i>
NIELSEN [38] Danemark	1996	mécaniciens dans garages bus	NF	10	FP	0,11 [0.05-0,016]
HARA [13] Japon	1997	éboueurs	tous	15		0,19 \pm 0,13 [0,01-0,51]
			F	10		0,21 \pm 0,13 [0,01-0,51]
			NF	5		0,15 \pm 0,11 [0,07-0,48]
KARAHALIL [27] Turquie	1998	réparateurs de moteurs		61		4,71 \pm 0,53
SCHOKET [46] Hongrie	1999	garage à bus et chauffeurs PL				0,30 \pm 0,26
PERICO [43] Italie	2001	policiers (forte densité trafic, hiver)	NF	13	FP	0,13 \pm 0,09 0,10 [0,04-0,51]
		policiers (forte densité trafic, été)		8		0,12 \pm 0,22 0,07
		policiers (faible densité trafic, hiver)		13		0,07 \pm 0,04 0,06 [0,005-0,16]
		policiers (faible densité trafic, été)		8		0,13 \pm 0,17 0,07
SZANISZLO [47] Budapest (Hongrie)	2001	policiers de ville				0,25 [0,07-0,43]
CHUANG [5] Taïwan	2007	chauffeurs taxis	NF	40		0,12 \pm 0,05
			F	55		0,21 \pm 0,11

Tableaux 4: Concentration urinaire du 1-hydroxypyrene ($\mu\text{g/mol}$ de créatinine) chez des salariés exposés aux émissions moteurs.

Benchmark observe des effets génotoxiques chez l'homme à partir de 1,4 $\mu\text{mol/mol}$ de 1-OHP urinaire [21]. Néanmoins, il n'existe pas actuellement de recommandation concernant ce métabolite.

Les niveaux d'exposition atmosphérique (paragraphe 1.1.2 Population exposée aux émissions moteurs) étant relativement faibles, il est normal d'observer des concentrations de 1-OHP urinaires peu élevées chez des personnes exposées aux émissions moteur. En effet, les concentrations présentées dans le tableau sont très en deçà de la valeur pour laquelle Benchmark observe des effets génotoxiques et les moyennes sont comprises entre 0,07 et 0,30 $\mu\text{mol/mol}$ de créatinine. Ces valeurs sont relativement proches de celles obtenues pour la population générale. Seule une étude montre des niveaux élevés [27] mais elle porte sur des jeunes travailleurs (13-18 ans) et les niveaux retrouvés pour les témoins correspondants sont eux aussi supérieurs à ceux des autres études ([1-OHP = 1.55 $\mu\text{mol/mol}$).

Comme pour les populations non exposées professionnellement, les concentrations de 1-OHP urinaires sont significativement plus élevées chez les sujets fumeurs que non fumeurs [13].

Il ressort de ces études que : les personnes exposées professionnellement aux émissions moteurs ont des concentrations urinaires de 1-OHP légèrement plus élevées que celles de la population générale. Leur niveau d'exposition aux HAP atmosphériques est faible et le tabagisme est un facteur confondant important à prendre à compte lors de l'analyse des résultats.

2) Niveaux mesurés par l'équipe

2.1) Atmosphère

Tableau de bord

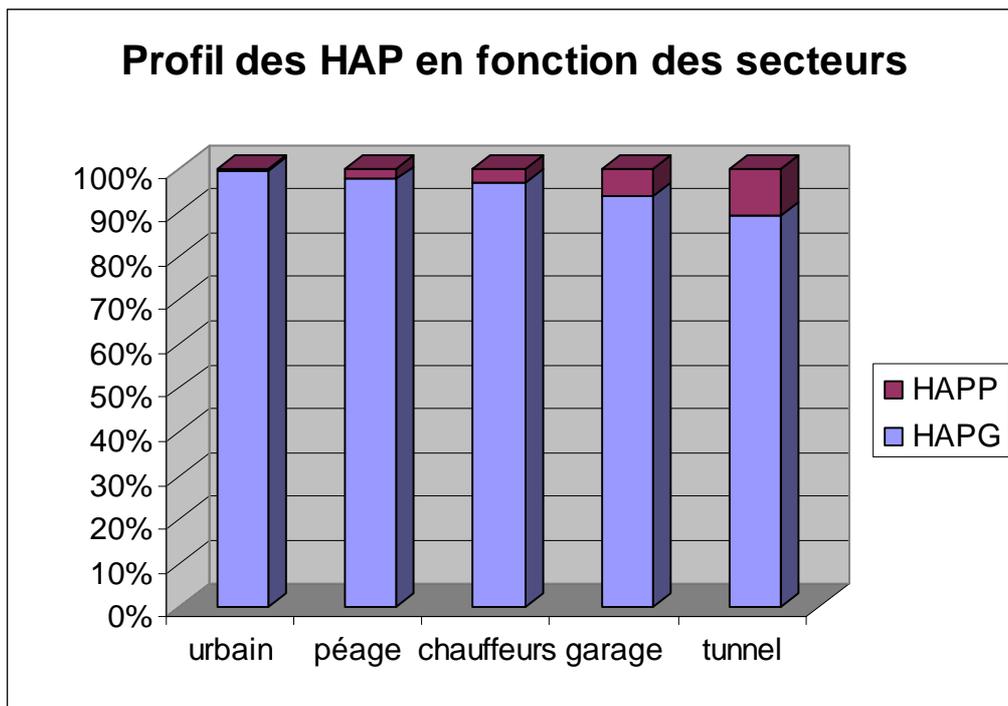
groupes de salariés		BAP	BAPEQUE	PYRP	HAPT	HAPG	HAPP
urbain	Moyenne	1,1461	1,6482	4,6839	523,8782	4968,4725	22,6659
	Ecart-type	1,48030	2,12840	6,80797	122,01464	10355,857	30,73468
	Médiane	,4100	,6421	1,8115	550,3885	532,3465	8,1100
	Maximum	5,08	7,73	21,64	630,46	35085,55	98,11
	Minimum	,00	,00	,00	390,79	141,83	1,75
	N	27	27	27	3	13	17
péage	Moyenne	,3026	,3492	4,6854	490,4617	434,5023	11,0176
	Ecart-type	,43507	,49270	3,53547	277,19777	275,06459	7,90639
	Médiane	,1600	,1600	3,9200	375,1800	340,8000	8,5300
	Maximum	2,16	2,41	16,10	1251,49	1236,80	35,32
	Minimum	,00	,00	,00	167,66	139,60	,00
	N	39	39	39	30	35	34
chauffeurs	Moyenne	1,3459	1,6623	4,2312	216,8271	710,0418	22,4367
	Ecart-type	2,04903	2,48097	5,57919	49,90737	1107,4238	23,92292
	Médiane	,6147	,7150	1,5536	235,3681	296,0075	10,2800
	Maximum	8,31	10,01	18,05	254,81	4549,20	65,77
	Minimum	,00	,00	,00	160,30	78,78	2,41
	N	34	34	34	3	20	17
tunnel	Moyenne	1,8026	2,2934	24,5850	430,0208	410,2850	49,2685
	Ecart-type	3,20771	3,63608	20,01986	230,86239	228,97047	36,08424
	Médiane	,7150	1,0542	21,8150	367,9650	353,8700	46,9100
	Maximum	13,42	14,94	78,10	857,35	832,29	137,48
	Minimum	,00	,00	,00	94,01	81,34	1,53
	N	34	34	34	12	12	34
garage	Moyenne	8,7940	13,5026	30,1685	2051,4157	1916,0981	127,5405
	Ecart-type	17,31930	26,27701	65,08219	1181,3735	1142,8019	226,84259
	Médiane	3,3600	4,3140	11,2262	1960,6612	1636,4673	52,6651
	Maximum	104,00	134,51	380,00	4622,41	4834,33	1103,00
	Minimum	,00	,00	,00	347,96	340,17	3,01
	N	63	63	63	32	51	44
Total	Moyenne	3,5727	5,2958	16,1907	1096,7690	1501,0915	57,7278
	Ecart-type	10,52410	15,95407	39,56728	1096,2993	3519,5521	134,29540
	Médiane	,7417	1,0547	5,8210	648,7300	637,0000	18,1697
	Maximum	104,00	134,51	380,00	4622,41	35085,55	1103,00
	Minimum	,00	,00	,00	94,01	78,78	,00
	N	197	197	197	80	131	146

Ce tableau, obtenu après traitements des données avec le logiciel SPSS, montre que les niveaux de B(a)P les plus élevés concernent les garagistes et le personnel travaillant dans les tunnels (>3 ng/m³) et que les chauffeurs, personnes travaillant en extérieur en zone urbaine et les péagers sont exposés à des concentrations inférieures à 1 ng/m³). Le fait que les péagers aient des niveaux inférieurs aux urbains peut s'expliquer par les systèmes de ventilation existant dans leurs cabines. Pour l'ensemble des groupes de polluants étudiés (Pyrène,

Benzo(a)pyrène équivalent toxique, HAP totaux, HAP gazeux et particulaires) **Les garagistes sont toujours ceux pour lesquels on trouve les niveaux les plus élevés.**

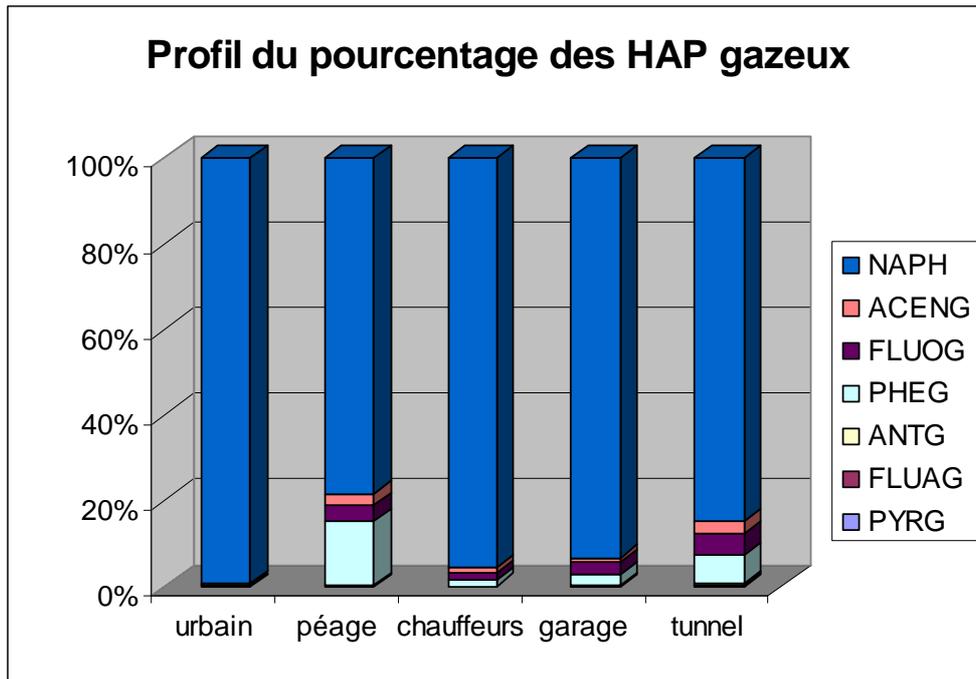
2.1.1 Profil des HAP en fonction des secteurs d'activité :

HAP gazeux versus HAP particulaires



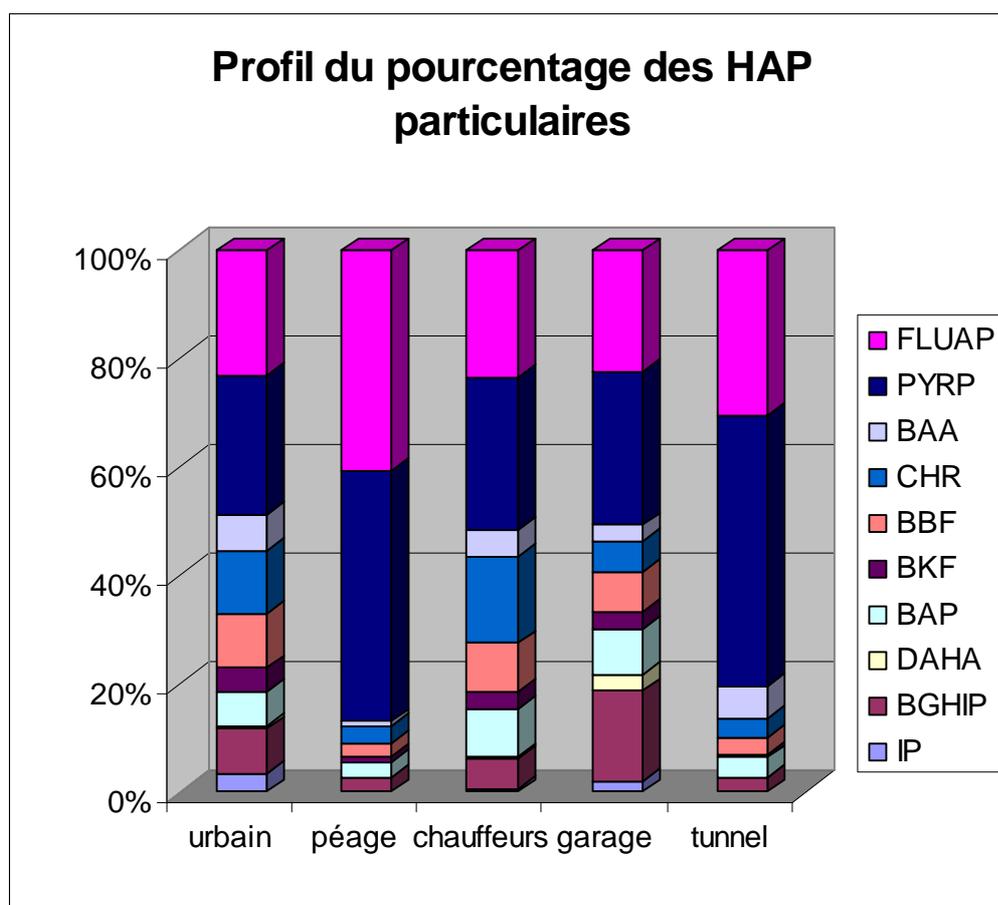
La répartition des HAP entre la phase gazeuse et particulaire est similaire pour l'ensemble des secteurs étudiés. En effet, on observe que les HAP atmosphériques sont majoritairement retrouvés dans la phase gazeuse qui représente plus de 80% des HAP totaux [28]. Le secteur pour lequel les HAP particulaires sont en plus grande proportion est le secteur tunnel où ils représentent environ 15% des HAP totaux. Cela est sûrement dû au fait qu'il s'agit d'un milieu fermé et que la ventilation évacue plus facilement la phase gazeuse par rapport à la phase particulaire.

Répartition des HAP au sein de la phase gazeuse



La majorité des HAP qui composent la phase gazeuse n'est pas cancérigène, néanmoins son étude est intéressante car certains HAP sont des précurseurs des nitro-HAP qui sont mutagènes. L'analyse approfondie de la composition de la phase gazeuse montre que, quel que soit le secteur, un HAP est largement majoritaire : le naphthalène. En effet il compose cette phase à plus de 80% voire presque 100% pour la population « urbain ».

Répartition des HAP particuliers :



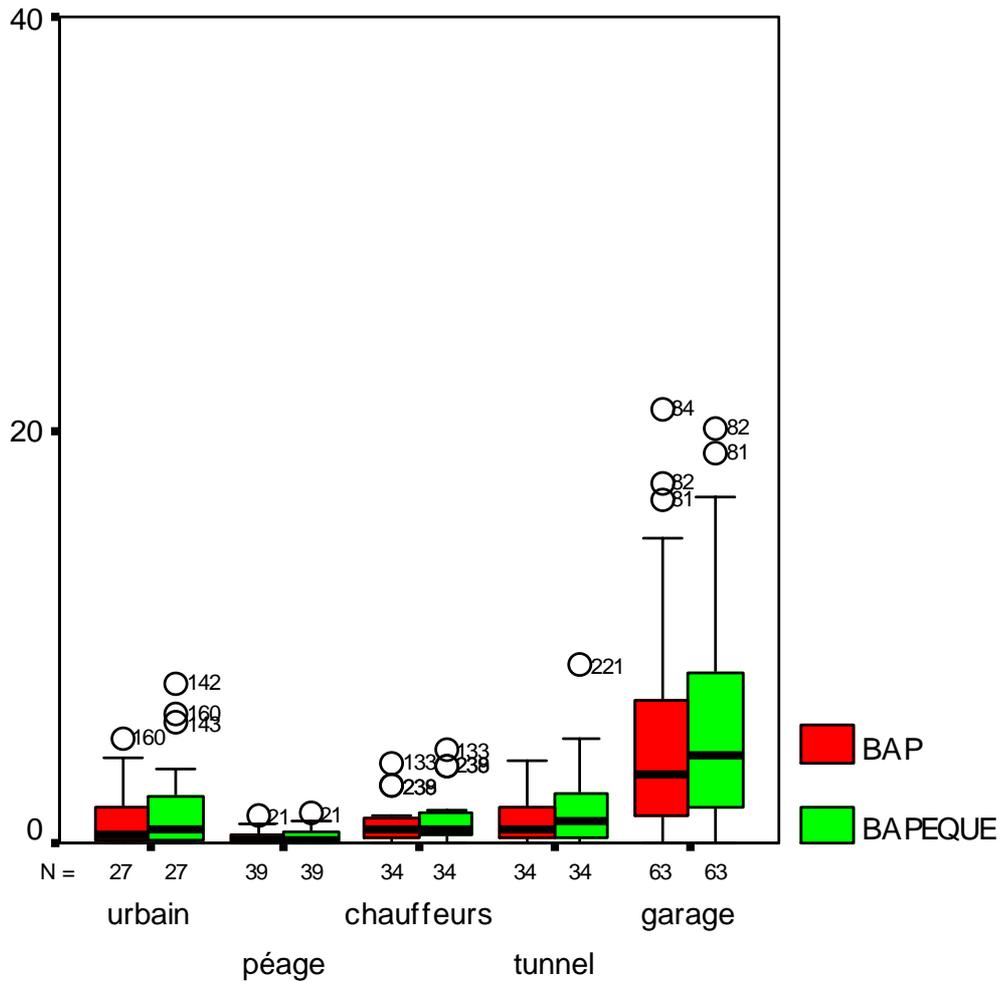
Les profils d'HAP particuliers sont différents suivant que les sujets travaillent près de la source d'émission (chauffeurs, garagistes) ou en sont plus éloignés (tunnels, péage). En effet, pour le premier groupe on observe plus d'HAP cancérigènes avec un rapport moyen de B(a)P/Pyr compris entre 46% pour la population des chauffeurs et 53% pour les garagistes. Pour le second groupe le rapport moyen est de l'ordre de 15%. Le rapport obtenu pour les « urbains » est entre les deux (34%) mais lorsque que l'on s'intéresse de plus près à cette catégorie, on s'aperçoit qu'il y a de grandes disparités. Les rapports B(a)P/Pyr calculés sont les suivants :

- personnes chargées du nettoyage, situées juste derrière le véhicule : 78%
- personnes travaillant au niveau de la chaussée : 50%
- agent municipaux, plus éloignés de la source : 15 %

Il semble donc que plus le salarié est proche de la source d'émission, plus il est exposé aux HAP cancérigènes.

2.1.2 Expositions au BaP et BaPeqUE des différentes catégories professionnelles

Concentrations atmosphériques en BaP et BaPeqUE (ng/m³)

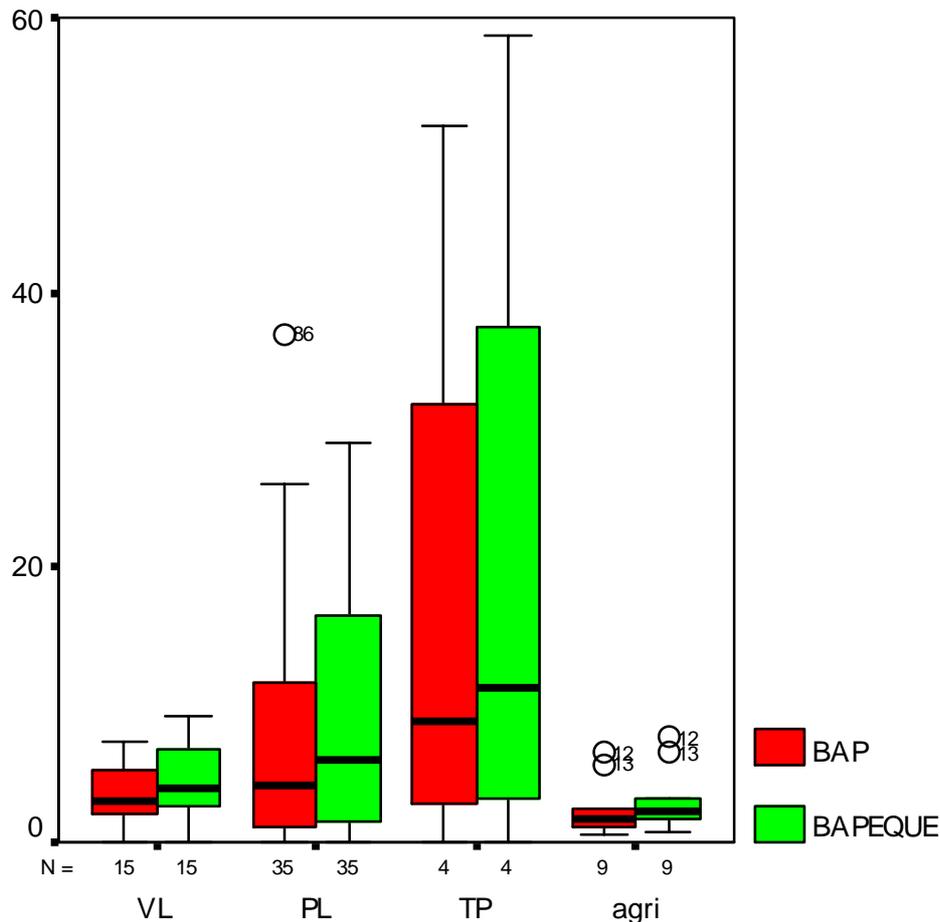


Les concentrations en B(a)P et B(a)P équivalents toxiques sont faibles pour des populations exposées professionnellement aux émissions moteurs. En effet, pour l'ensemble des populations étudiées, les concentrations de B(a)P sont très en deçà de la valeur guide définie par la CNAM de 150ng/m³ (plus de dix fois plus faibles) **Les médianes les plus élevées concernent les mécaniciens** et sont de l'ordre de 3,36 ng/m³.

Afin d'affiner l'analyse des sous-groupes de population ont été étudiés :

Groupes issus de la population « garage »

Concentrations atmosphériques en BaP et BaPeqUE (ng/m³)

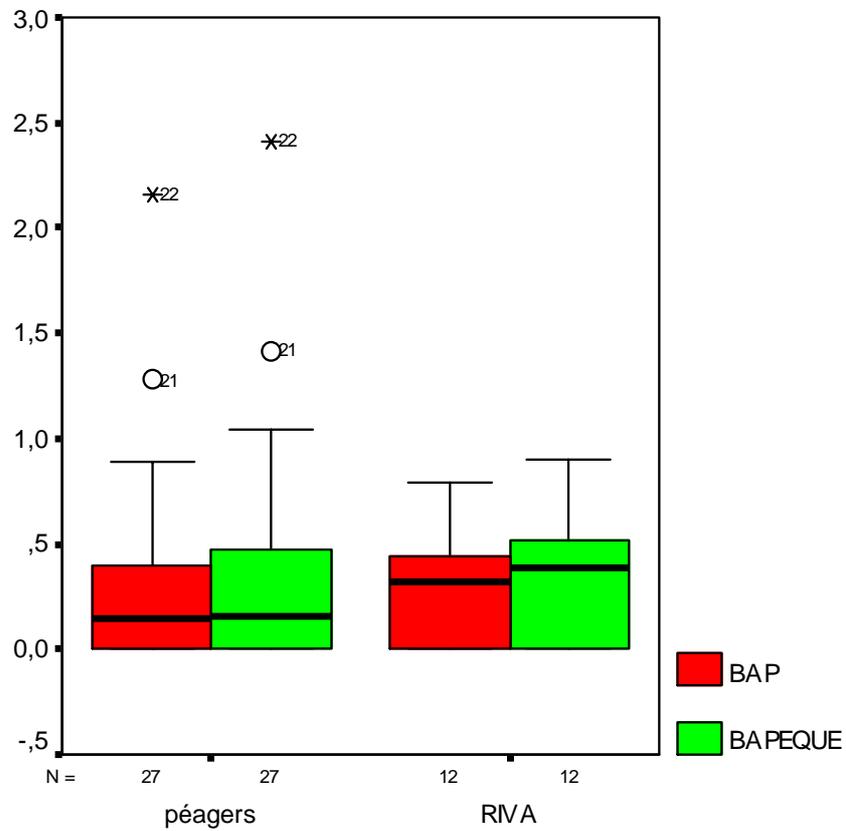


Les mécaniciens **les plus exposés** au B(a)P sont ceux qui s'occupent des engins de **travaux publics** (médiane = 8,7ng/m³ [0-52,2]), puis viennent avec respectivement 4,2ng/m³ [0-104] les mécaniciens poids lourds et avec 3,1ng/m³ [0-7,8] les mécaniciens véhicules légers (différence non significative : p = 0,46). La population la **moins exposée** semble être celle qui s'occupe des **engins agricoles** (médiane = 1,6 [0,55-6,53]).

Il est important de noter que les **effectifs correspondant aux mécaniciens travaux public et engins agricoles sont extrêmement faibles** et que les résultats obtenus ici devraient être re-confirmés en travaillant avec un nombre de sujet plus important.

Groupes issus de la population « péage »

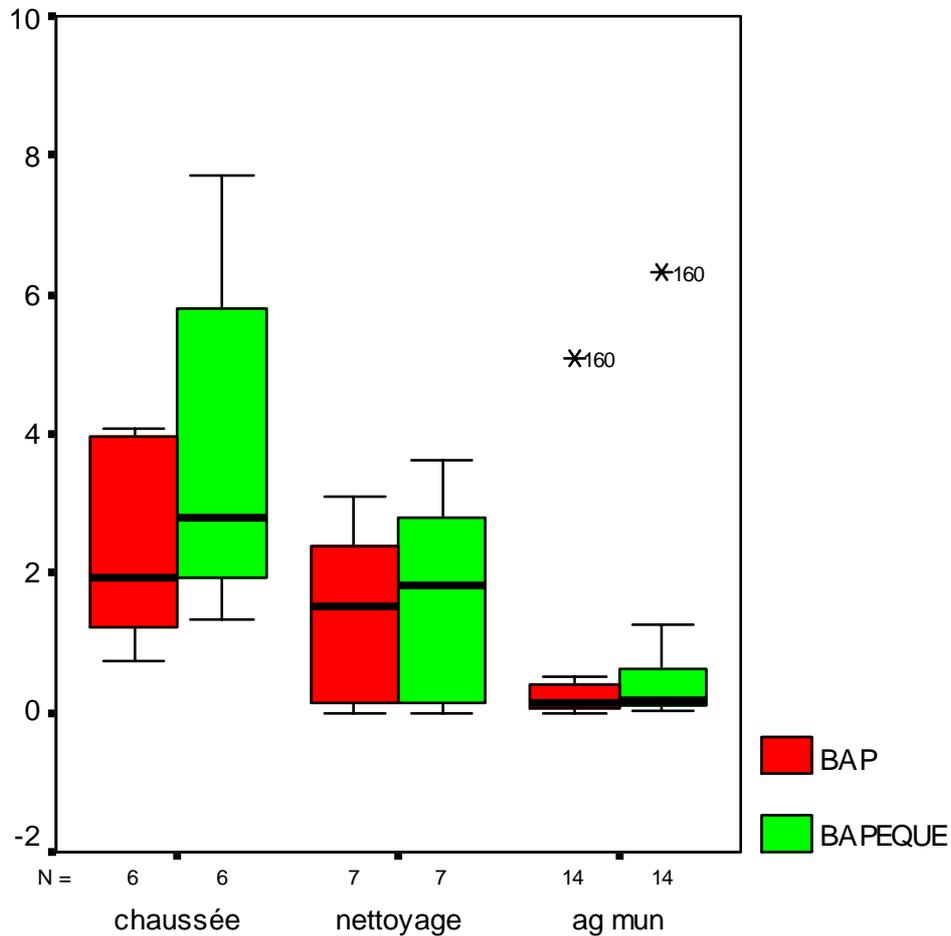
Concentrations atmosphériques en BaP et BaPeqUE (ng/m³)



Concernant l'exposition au B(a)P il n'existe pas de différence significative entre le personnel intervenant en extérieur sur les péages (RIVA) et les péagers en cabine ($p = 0,73$).

Groupes issus de la population « urbain » :

Concentrations atmosphériques en BaP et BaPeqUE (ng/m3)



Pour les personnes travaillant en extérieur en milieu urbain, ce sont ceux travaillant au raz de la chaussée (groupe « chaussée ») qui sont les plus exposés (médiane = 1,9ng/m³ [0,74-4,06]) En effet leur concentration médiane de B(a)P est significativement supérieure à celle retrouvée pour les agents municipaux (p = 0,02).

2.2 Biologie

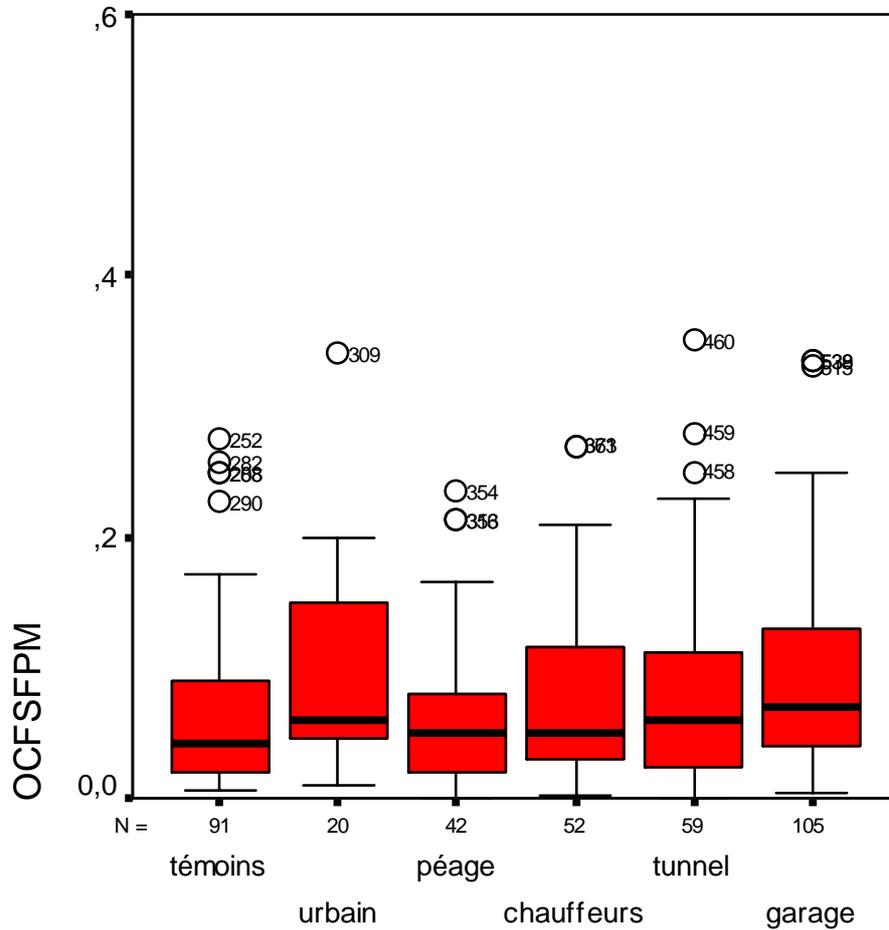
Tableau de bord

groupe de salariés		OCDSDPM	OCFSDPM	OCFSFPM
témoins	Moyenne		,06211	,06679
	Ecart-type		,062759	,067553
	Médiane		,04144	,04144
	Minimum		,005	,005
	Maximum		,357	,311
	N		91	91
urbain	Moyenne	,148	,07778	,09950
	Ecart-type	,100	,060782	,083507
	Médiane	,145	,06000	,06000
	Minimum	,030	,020	,010
	Maximum	,380	,210	,340
	N	12	9	20
péage	Moyenne	,059	,10101	,08980
	Ecart-type	,054	,130611	,131825
	Médiane	,040	,05866	,05000
	Minimum	,040	,000	,000
	Maximum	,212	,550	,780
	N	10	32	42
chauffeurs	Moyenne	,133	,06321	,07723
	Ecart-type	,136	,051408	,068594
	Médiane	,065	,05000	,05000
	Minimum	,040	,005	,002
	Maximum	,430	,210	,270
	N	8	39	52
tunnel	Moyenne	,021	,08516	,08480
	Ecart-type	,	,095223	,082980
	Médiane	,021	,05000	,06000
	Minimum	,021	,000	,000
	Maximum	,021	,570	,490
	N	1	59	59
garage	Moyenne	,102	,09286	,09837
	Ecart-type	,131	,071729	,086093
	Médiane	,060	,06500	,07000
	Minimum	,003	,030	,003
	Maximum	,744	,270	,760
	N	95	14	105
Total	Moyenne	,104	,07530	,08452
	Ecart-type	,124	,082624	,080508
	Médiane	,060	,05000	,05181
	Minimum	,003	,000	,000
	Maximum	,744	,570	,780
	N	126	244	369

Les médianes des concentrations de 1-hydroxypyrrènes urinaires en fin de semaine- fin de poste (dernière colonne) sont toutes inférieures à 0,1 $\mu\text{mol/mol}$ créat. Et les niveaux les plus élevés sont une fois encore retrouvés pour les mécaniciens (médiane = 0,07 $\mu\text{mol/mol}$ créat).

2.2.1 Concentrations urinaires de 1-OHP suivant les professions

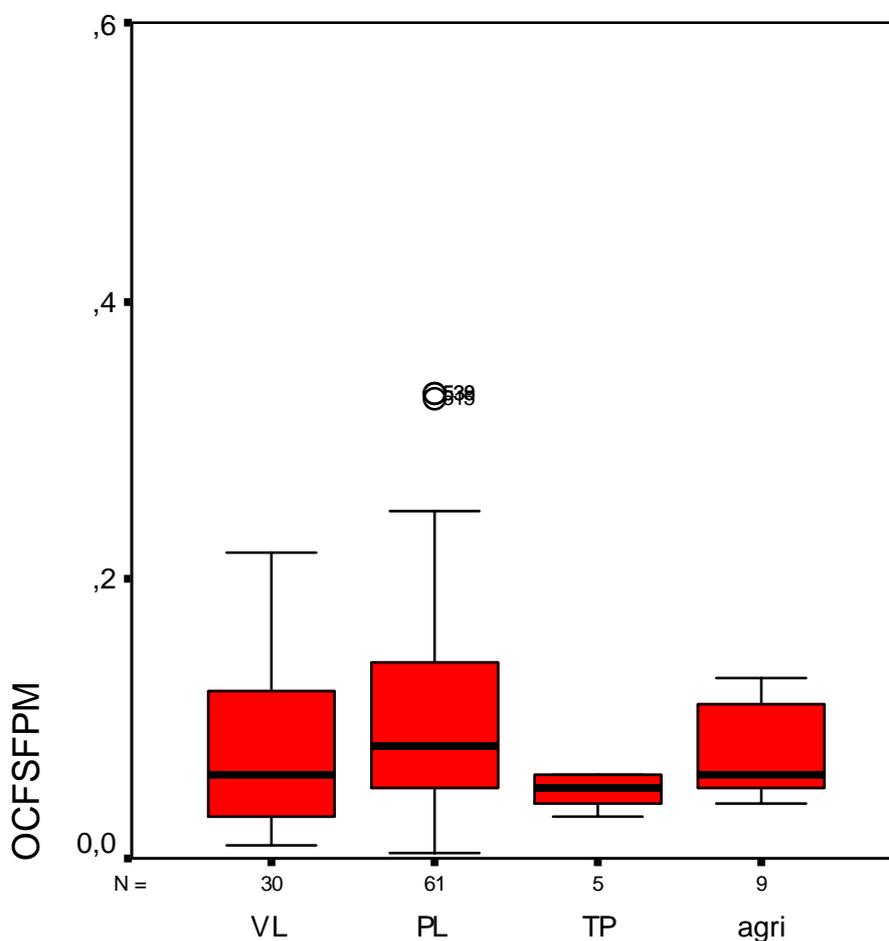
1-OHP urinaire en fin de semaine - fin de poste ($\mu\text{mol/mol}$ créat)



Les concentrations urinaires de 1-OHP mesurées en fin de semaine - fin de poste chez des personnes professionnellement exposées aux émissions diesel sont relativement faibles et, au risque $\infty = 5 \%$, **seul le 1-OHP urinaire des mécaniciens est significativement supérieur à de celui des témoins** ($p = 0,00$).

Afin d'affiner l'analyse des sous-groupes de population ont été étudiés :

1-OHP urinaire en fin de semaine - fin de poste ($\mu\text{mol/mol}$ créat)



Les résultats obtenus ci-dessus ne sont pas en corrélation avec les données concernant l'exposition atmosphérique aux HAP (paragraphe 2.1.2 Expositions au BaP et BapeqUE des différentes catégories professionnelles). En effet, alors qu'ils étaient les plus exposés aux HAP atmosphériques, **les mécaniciens d'engins de travaux public** ont les concentrations urinaires de **1-OHP urinaire les plus faibles**. De plus, les **mécaniciens d'engins agricoles** qui avaient des niveaux d'exposition aux B(a)P faibles se retrouvent avec des concentrations urinaires de **1-OHP urinaires plutôt élevées**.

Ces résultats s'expliquent par l'utilisation plus ou moins répandue **d'équipements de protection** par les salariés.

Utilisation d'équipements de protection par les salariés

	Equipement de protection collectif (%)	Port de masque (%)	Port de gants (%)
Véhicules légers	69	8	96
Poids lourds	35	43	68
Travaux publics	80	20	100
Engins agricoles	0	0	0

Ainsi, 80% des mécaniciens d'engins de travaux publics travaillent avec des équipements de protection collectifs (aspiration, hotte, ventilation...), 20% portent un masque et 100% sont équipés de gants tandis qu'aucun mécanicien d'engins agricoles ne possède un de ces équipements lorsqu'il travaille.

Cela explique les différences observées entre l'exposition atmosphérique aux HAP et les concentrations de 1-OHP urinaires mesurées. En effet, les mécaniciens d'engins de travaux publics sont les plus exposés aux HAP mais ils sont aussi les mieux protégés et ont des concentrations de métabolites urinaires faibles. Ce résultat montre l'efficacité et l'intérêt des équipements de protection chez des personnes exposées aux émissions moteurs.

III) Discussion

Il est important de noter que les saisons et les températures influent sur les concentrations atmosphériques d'**HAP, plus élevées en hiver qu'en été**. De plus, le lieu où est réalisée l'étude influence ces concentrations et il est important de connaître et d'identifier les sources potentielles d'HAP alentours (industries, zones de trafic intense...). C'est pourquoi, avant d'interpréter des résultats concernant des mesures atmosphériques d'HAP il est important de savoir **où et quand** ont eu lieu les mesures car certaines différences géographiques et temporelles peuvent expliquer les variabilités de résultats concernant des catégories professionnelles similaires. En effet, les résultats attendus seront différents si l'étude se passe à la campagne l'été ou au sein d'une mégapole proche d'un grand pôle industriel en hiver et il serait normal que les niveaux de la deuxième situation soient supérieurs.

L'étude de Nielsen [38] montre que le domaine des **transports influe sur les concentrations d'HAP atmosphériques**. En effet, dans la population générale, les concentrations de B(a)P diminuent lorsque l'on s'éloigne des zones urbaines où le trafic est intense et que l'on se rapproche des campagnes où le trafic est moindre. Et, bien que la pollution liée aux transports ne soit pas la source principale d'HAP en milieu urbain, notamment en hiver où la part du chauffage est importante, il est intéressant d'étudier et de surveiller les niveaux d'HAP auxquels sont soumises les populations professionnellement exposées aux émissions moteur. Lors de cette surveillance, et pour interpréter les résultats, il est nécessaire de se rappeler que **le tabagisme est un facteur confondant** important et qu'en cas de faible exposition, ce qui est le cas ici, il peut devenir la principale source d'HAP. Afin de définir le plus précisément l'impact de la source étudiée, il est préférable de ne travailler qu'avec des sujets non-fumeurs. Malheureusement, dans l'étude présentée ici, les effectifs étaient trop faibles pour que l'on puisse faire le distinguo entre les fumeurs et les non-fumeurs.

Niveaux atmosphériques

L'exposition professionnelle aux émissions moteurs concerne beaucoup de professions : chauffeurs, garagistes, péagers, intervenants dans les tunnels et lorsque l'on s'intéresse aux **niveaux d'HAP** auxquels ils sont exposés, on s'aperçoit qu'ils sont toujours **dix fois plus faibles que la valeur définie par la CNAM** pour le B(a)P. Cependant,

l'exposition aux HAP cancérogènes varie suivant l'activité exercée. Les concentrations de B(a)P les plus élevées sont retrouvées pour **les populations travaillant dans les garages**. Cela peut s'expliquer par le fait qu'elles travaillent en milieu confiné et sont proches de la source d'émission (pots d'échappements). En effet, l'étude des phases particulaires d'HAP et le calcul des rapports B(a)P/Pyr ont permis de montrer que le personnel est d'autant plus exposé aux **HAP cancérigènes qu'il travaille à proximité de la source d'émission**. Cette constatation est clairement mise en évidence quand on s'intéresse aux personnes travaillant en extérieur en milieu urbain. En effet, les personnes travaillant au niveau de la chaussée et donc du pot d'échappement des véhicules (égoutiers...) ont des niveaux de B(a)P significativement plus élevés que celles qui en sont plus éloignées comme les agents municipaux. De plus, il existe une grande disparité d'exposition chez les mécaniciens et les plus exposés sont ceux qui s'occupent de l'entretien des engins de travaux publics. Par contre, l'exposition est identique que l'on s'occupe de poids lourds ou de véhicules légers.

Les variations observées au sein d'une même catégorie professionnelle (minimum et maximum éloignés...) peuvent s'expliquer par le fait que les prélèvements ont été réalisés dans des entreprises différentes ayant des systèmes de ventilation et de protection collective différents et plus ou moins efficaces.

Niveaux biologiques

Afin d'évaluer les risques associés à l'exposition aux HAP, il est impératif d'étudier en **parallèle les données atmosphériques et les prélèvements biologiques**. En effet, les premières renseignent sur les sources d'exposition et les profils d'HAP présents (particulaires, gazeux, cancérogènes...) tandis que les secondes rendent compte de l'absorption réelle du toxique par le sujet.

Les concentrations urinaires de 1-OHP urinaires des populations exposées aux émissions moteurs sont faibles et seules celle des **mécaniciens sont significativement supérieures à celle des témoins**. C'est aussi ce que retrouvent Schoket et Nielsen dans leurs études [37,46]. Ces résultats s'expliquent par le fait que les concentrations atmosphériques d'HAP auxquelles sont exposées ces populations sont trop faibles pour entraîner une augmentation du métabolite urinaire. L'augmentation du 1-OHP urinaire observée chez les salariés de garages peut s'expliquer par le fait que c'est pour ces sujets que les niveaux d'exposition atmosphérique sont les plus élevés. Mais les mécaniciens sont aussi exposés de

façon non négligeable à **d'autres sources d'HAP que les émissions moteurs**, notamment par la **voie cutanée** lors de la manipulation des huiles et des carburants et cette voie peut se révéler importante [38]. L'étude du 1-OHP fin de poste + 9heures, plus spécifique de l'absorption cutanée, associée à un questionnaire précis renseignant sur l'activité, permettraient de rendre compte plus clairement de l'importance de cette voie d'absorption pour cette population. De plus, lorsque l'on s'intéresse aux sous-groupes de mécaniciens, on s'aperçoit que ceux qui sont les plus exposés aux HAP atmosphériques comme les mécaniciens d'engins de travaux public se retrouvent avec les concentrations urinaires de 1-OHP urinaire les plus faibles et inversement pour les mécaniciens d'engins agricoles qui ont des concentrations urinaires de 1-OHP urinaires plutôt élevées alors que leurs niveaux d'exposition au B(a)P sont moindres. Ces résultats s'expliquent par l'utilisation plus ou moins répandue d'**équipements de protection**. En effet, le port de masque, de gants ou l'existence d'un système de ventilation efficace permettent de limiter l'absorption des toxiques et une personne ayant des niveaux d'exposition atmosphériques élevés peut avoir des niveaux de marqueurs biologiques plus faibles qu'une personne moins exposée mais qui ne porte pas de protection. Il est donc important de diminuer les émissions à la source (carburants et moteurs plus propres) mais il est aussi nécessaire de sensibiliser les entreprises et les salariés à l'importance de l'utilisation d'équipements de protection.

Concordance entre niveaux atmosphériques et biologiques :

Les prélèvements biologiques et atmosphériques ayant été réalisés sur des personnes différentes, dans des entreprises parfois différentes, il est impossible d'établir une corrélation entre les deux. De plus, l'exposition atmosphérique est tellement faible qu'on peut se demander si le dosage du 1-OHP urinaire est représentatif de l'exposition. Néanmoins, on observe une certaine concordance entre la métrologie et la biologie. En effet, les **concentrations urinaires de 1-OHP les plus faibles sont retrouvées pour les populations les moins exposées aux HAP atmosphériques** : sujets travaillant en extérieur, policiers, péagers... alors que les concentrations urinaires les plus élevées sont retrouvées pour les mécaniciens, population pour qui les niveaux d'HAP atmosphériques sont les plus élevés. Il est tout de même nécessaire de prendre un peu de recul face à cette observation car le personnel de **garage est exposé à d'autres sources d'HAP**, notamment par la voie cutanée et les concentrations urinaires du métabolite du pyrène ne peuvent être attribuées seulement à l'exposition par inhalation d'émissions moteur.

Concordance avec les données issues de la littérature :

Il est difficile de comparer les résultats obtenus dans cette étude avec les données issues de la littérature car les méthodologies de prélèvement, d'analyse des échantillons et de sélection des populations diffèrent. Néanmoins, les résultats obtenus concordent et on a pu mettre en évidence que les niveaux d'exposition sont **relativement faibles pour les populations exposées professionnellement aux émissions moteurs et que les sujets les plus exposés sont ceux qui travaillent dans les garages.**

THESE SOUTENUE PAR : M^{lle} Philippat Claire

TITRE : Expositions professionnelles aux substances cancérogènes émises par les transports.

CONCLUSION

L'étude présentée dans ce document s'inscrit dans un vaste programme de surveillance des expositions professionnelles aux Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques, financé par l'Institut National de Veille Sanitaire (INVS) et l'Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail (AFSSET), nommé EXPORISQ. Les résultats de cette étude n'ont pas encore été rendus publics, néanmoins, en ce qui concerne le secteur des émissions moteurs, les niveaux d'exposition sont faibles et semblables à ceux de la population générale. Seule la catégorie des garagistes retient l'attention avec des niveaux atmosphériques et biologiques plus élevés. Une investigation plus poussée pour cette population serait intéressante à mener, notamment pour déterminer les principales voies d'exposition.

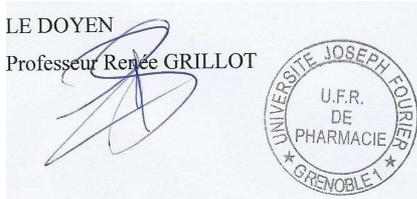
De plus, cette étude met en évidence l'utilité des équipements de protection collectifs et individuels qui, lorsqu'ils sont utilisés correctement, limitent efficacement l'absorption des toxiques. Lors du rendu des résultats, il sera important d'insister sur ce point auprès des entreprises et des salariés et d'organiser des campagnes de sensibilisation afin de promouvoir l'utilisation de ces équipements.

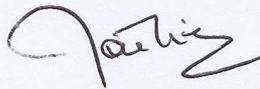
Les HAP font partie des substances cancérogènes retrouvées dans les émissions moteurs et leur étude est intéressante dans l'évaluation du risque associé aux expositions professionnelles. Néanmoins, les émissions moteurs contiennent d'autres polluants cancérogènes pouvant agir en synergie (particules, benzène, aldéhydes, 1,3 butadiène, métaux). C'est pourquoi, il serait intéressant de compléter cette étude par des travaux évaluant l'exposition aux autres substances présentes ainsi que l'effet des émissions moteurs sur l'homme en tant que mélange complexe et non en étudiant les polluants séparément.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER

Grenoble, le 08/10/2009

LE DOYEN
Professeur Renée GRILLOT




LE PRESIDENT DE LA THESE
Professeur Anne Maître

BIBLIOGRAPHIE :

1. **AFNOR.** Air des lieux de travail. Echantillonnage et analyse des hydrocarbures aromatiques polycycliques. Normes AFNOR, NF X 43-294, Paris, AFNOR, 1995 : 1-8
2. **Amossé J, Delbos V.** Dispersion dans l'environnement routier et urbain de Pt, Pd, et Rh émis par les pots d'échappement catalytiques. Étude de la spéciation. Comptes Rendus Chimie Vol 5, Issues 8-9, 2002, p565-570
3. **Aubertin-Garnier S.** Evaluation des risques toxiques des salariés d'exploitation d'un tunnel. Université J. Fourier-Grenoble 1, UFR de Médecine, Mémoire DU de toxicologie clinique, 1998
4. **Chenier V, Viau C.** Mesures des variations de l'excrétion urinaire du 1 hydroxypyrene chez des individus sans exposition professionnelle aux hydrocarbures aromatiques polycycliques. Travail et santé 1997 ; 13 (4) : S-21-S-24
5. **Chuang CY, Chang CC.** Urinary 1-hydroxypyrene level relative to vehicle exhaust exposure mediated by metabolic enzyme polymorphisms. J Occup Health. 2007 Mar; 49(2):140-51.
6. **Dang SS, Serafino A, Müller JO, Rolf E, Jentoft, Schlögl R et al.** Cytotoxicity and Inflammatory Potential of Soot Particles of Low-Emission Diesel Engines Environ. Sci. Technol. 2008, 42 (5), 1761-1765
7. **Doornaert B, Pichard A.** Analyse et proposition de méthodes d'évaluation de la relation dose-réponse des effets cancérigènes induits par un mélange d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, Environnement, Risques & Santé. 2005; 4 (3) : 205-220
8. **Farfaletti A, Astorga C, Martini G, Manfredi U, Mueller A, Rey M, De Santi G, Krasenbrink A, Larsen BR.** Effect of water/fuel emulsions and a cerium-based combustion improver additive on HD and LD diesel exhaust emissions. Environ Sci Technol. 2005 Sep 1;39(17):6792-9.
9. **Garshick E, Laden F, Hart JE, Rosner B, Davis ME, Eisen EA, Smith TJ.** Lung cancer and vehicle exhaust in trucking industry workers. Environ Health Perspect. 2008 Oct; 116 (10) : 1327-32. Epub 2008 May 30
10. **Göen T, Gündel J, Schaller KH, Angerer J.** The elimination of 1-hydroxypyrene in the urine of the general population and workers with different occupational exposures to PAH. Sci Total Environ. 1995 Feb 24; 163(1-3):195-201.
11. **Granella M, Clonfero E.** Urinary excretion of 1-pyrenol in automotive repair workers. Int Arch Occup Environ Health. 1993;65(4):241-5.
12. **Green FH, Boyd RL, Danner-Rabovsky J, Fisher MJ, Moorman WJ, Ong TM et al.** Inhalation studies of diesel exhaust and coal dust in rats. Scand J Work Environ Health. 1983 Apr;9(2 Spec No):181-8.

13. **Hara K, Hanaoka T, Yamano Y, Itani T.** Urinary 1-hydroxypyrene levels of garbage collectors with low-level exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Sci Total Environ.* 1997 Jun 20;199(1-2):159-64.
14. **Hemminki K, Söderling J, Ericson P, Norbeck HE, Segerbäck D.** DNA adducts among personnel servicing and loading diesel vehicles. *Carcinogenesis.* 1994 Apr;15(4):767-9.
15. **IARC.** IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans vol 46. *Diesel and gasoline engine exhausts and some nitroarenes.* Lyon, France, 1989 ; 458 p
16. **Institut National de l'Environnement et des Risques,** Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, Acétaldéhyde, Formaldéhyde, Verneuil en Halatte : INERIS, 2008, disponible sur <http://www.ineris.fr> (consulté le 15/04/2009)
17. **Institut National de l'Environnement et des Risques,** Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, Benzène, Verneuil en Halatte : INERIS, 2007, disponible sur <http://www.ineris.fr> (consulté le 15/04/2009)
18. **Institut National de l'Environnement et des Risques,** Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, Formaldéhyde, Verneuil en Halatte : INERIS, 2005, disponible sur <http://www.ineris.fr> (consulté le 15/04/2009)
19. **Institut National de l'Environnement et des Risques,** Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, 1,3 butadiène, Verneuil en Halatte : INERIS, 2005, disponible sur <http://www.ineris.fr> (consulté le 15/04/2009)
20. **Institut National de l'Environnement et des Risques.** Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs) : Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets cancérigènes : Approche substance par substance (facteurs d'équivalence toxique - FET) et approche par mélanges. Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets non cancérigènes : Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR), Rapport final (en ligne) Paris : INERIS, 2006. disponible sur <http://www.ineris.fr> (consulté le 17/04/2009)
21. **Jongeneelen FJ.** Benchmark guideline for urinary 1-hydroxypyrene as biomarker of occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Ann Occup Hyg.* 2001 Jan;45(1):3-13.
22. **Lesage J, Ostiguy C.** Les émissions de moteurs Diesel : revue sommaire de leur composition et des risques de développement de cancer pulmonaire, Etude et Recherche. Rapport R-194. Montréal : IRSST ; 1998 : 32p
23. **Jacob J, Seidel A .** Biomonitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons in human urine. *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci.* 2002 Oct 5; 778(1-2):31-47.

24. **Jongeneelen FJ.** Benchmark guideline for urinary 1-hydroxypyrene as biomarker of occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Ann Occup Hyg.* 2001 Jan;45(1):3-13.
25. **Joumard R, Lambert J.** Evolution des émissions de polluant par les transports en France de 1970 à 2010. Rapport INRETS n°143. Bron : juillet 1991
26. **Karahalil B, Burgaz S, Fişek G, Karakaya AE.** Biological monitoring of young workers exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons in engine repair workshops. *Mutat Res.* 1998 Feb 13;412(3):261-9.
27. **Khan AB, Clark.** Idle emissions from heavy-duty diesel vehicles. Review and recent Data. *J Air waste Manag Assoc.* 2006 ;56 (10) : 1404-19
28. **Kuusimaki L, Peltonen K, Mutanen P, Savela K.** Analysis of particle and vapour phase PAHs from the personal air samples of bus garage workers exposed to diesel exhaust. *Ann Occup Hyg.* 2003 Jul;47(5):389-98.
29. **Lafontaine M, Champmartin C, Simon P, Delsaut P, Funck-Brentano C.** 3-Hydroxybenzo[a]pyrene in the urine of smokers and non-smokers. *Toxicol Lett.* 2006 Apr 10;162(2-3):181-5. Epub 2006 Jan 6.
30. **Leoz-Garziandia E.** Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques dans l'air ambiant (HAP) Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air. DRC/AIRE - 00-23448 - ELe - n°570. Verneuil en Halatte : INERIS , Décembre 2000 : 52p
31. **Levin JO, Rhén M, Sikström E.** Occupational PAH exposure: urinary 1-hydroxypyrene levels of coke oven workers, aluminium smelter pot-room workers, road pavers, and occupationally non-exposed persons in Sweden. *Sci Total Environ.* 1995 Feb 24;163(1-3):169-77.
32. **Lewtas J.** Evaluation of the mutagenicity and carcinogenicity of motor vehicle emissions in short-term bioassays. *Environ Health Perspect.* 1983 Jan;47:141-52.
33. **Liu Y, Tao S, Yang Y, Dou H, Yang Y, Coveney RM.** Inhalation exposure of traffic police officers to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) during the winter in Beijing, China. *Sci Total Environ.* 2007 Sep 20;383(1-3):98-105. Epub 2007 Jun 19.
34. **Lipsett M, Campleman S.** Occupational exposure to diesel exhaust and lung cancer: a meta-analysis. *Am J Public Health.* 1999 July; 89(7): 1009–1017.
35. **Ma JYC, Ma JKH.** The dual effect of the particulate and organic components of Diesel exhaust particles on the alteration of pulmonary immune/inflammatory responses and metabolic enzymes. *J Environ Sci Health C Environ Carcinog Ecotoxicol Rev* 2002 ; 20 (2) : 117-147
36. **Maître A, Soulat JM, Masclet P, Stoklov M, Marquès M, De Gaudemaris R.** Exposure to carcinogenic air pollutants among policemen working close to traffic in an urban area. *Scand J Work Environ Health.* 2002 Dec; 28(6):402-10.

37. **Nielsen PS, Andreassen A, Farmer PB, Ovrebo S, Autrup H.** Biomonitoring of diesel exhaust-exposed workers. DNA and hemoglobin adducts and urinary 1-hydroxypyrene as markers of exposure. *Toxicol Lett.* 1996 Jul; 86(1):27-37.
38. **Nielsen T, Jørgensen HE, Larsen JC, Poulsen M.** City air pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons and other mutagens: occurrence, sources and health effects. *Sci Total Environ.* 1996 Oct 28;189-190:41-9.
39. **Ong T, Whong WZ, Xu J, Burchell B, Green FH, Lewis T.** Genotoxicity studies of rodents exposed to coal dust and diesel emission particulates. *Environ Res.* 1985 Aug;37(2):399-409.
40. **Pastorelli R, Guanci M, Restano J, Berri A, Micoli G, Minoia C, Alcini D, Carrer P, Negri E, La Vecchia C, Fanelli R, Airoidi L.** Seasonal effect on airborne pyrene, urinary 1-hydroxypyrene, and benzo(a)pyrene diol epoxide-hemoglobin adducts in the general population. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev.* 1999 Jun; 8(6):561-5.
41. **Pereira PA, De Andrade JB, Miguel AH.** Measurements of semivolatile and particulate polycyclic aromatic hydrocarbons in a bus station and an urban tunnel in Salvador, Brazil. *J Environ Monit.* 2002 Aug;4(4):558-61.
42. **Perico A, Gottardi M, Boddi V, Bavazzano P, Lanciotti E.** Assessment of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in police in Florence, Italy, through personal air sampling and biological monitoring of the urinary metabolite 1-hydroxypyrene. *Arch Environ Health.* 2001 Nov-Dec;56(6):506-12.
43. **Pośniak M, Makhniashvili I, Kozieł E, Kowalska J.** Occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons during Diesel combustion. *Int J Occup Saf Ergon.* 2003;9(1):17-26.
44. **Sauvain JJ, Vu Duc T, Guillemin M.** Exposure to carcinogenic polycyclic aromatic compounds and health risk assessment for diesel-exhaust exposed workers. *Int Arch Occup Environ Health.* 2003 Jul;76(6):443-55. Epub 2003 May 16.
45. **Schoket B, Poirier MC, Mayer G, Török G, Kolozsi-Ringelmann A, Bognár G, Bigbee WL, Vincze I.** Biomonitoring of human genotoxicity induced by complex occupational exposures. *Mutat Res.* 1999 Sep 30;445(2):193-203.
46. **Song CL, Huang RJ, Wang YQ, Liu KM, Dong SR, Dai Bull SG.** Determination of in Vitro Biototoxicity in Exhaust Particulate Matter from Heavy-Duty Diesel Engine, *Bull Environ. Contam. Toxicol.* 2006; 76:24–32
47. **Szaniszló J, Ungváry G.** Polycyclic aromatic hydrocarbon exposure and burden of outdoor workers in Budapest. *J Toxicol Environ Health A.* 2001 Mar 9;62(5):297-306.
48. **Turrio-Baldassarri L, Battistelli CL, Conti L, Crebelli R, De Berardis B, Iamiceli AL, Gambino M, Iannaccone S.** Emission comparison of urban bus engine fueled with diesel oil and 'biodiesel' blend. *Sci Total Environ.* 2004 Jul 5;327(1-3):147-62.

49. **Turrio-Baldassarri L, Battistelli CL, Conti L, Crebelli R, De Berardis B, Iamiceli AL et al.** Evaluation of emission toxicity of urban bus engines: compressed natural gas and comparison with liquid fuels. *Sci Total Environ.* 2006 Feb 15;355(1-3):64-77. Epub 2005 Apr 14.
50. **Viau C, Maître A, Marie C, De Méo M, Douki T, Camus M, et al.** Les hydrocarbures aromatiques polycycliques, de la recherche à la prévention. **Actes du colloque francophone international, Montréal, 3-4 septembre 2008. Bulletin d'information en santé environnementale de l'Institut national de santé publique du Québec**, 2008, 19 (5) : 1-48
51. **Westerholm R, Egeback KE.** Exhaust Emissions from Light- and Heavy-duty Vehicles : Chemical Composition, Impact of Exhaust after Treatment, and Fuel Parameters, *Environ Health Perspect.* 1994 Oct;102 Suppl 4:13-23
52. **Zhang WT, Dou H, Liu YN, Zhang XL, Tao S.** Exposure of traffic police in Haidian district to PAHs. *Huan Jing Ke Xue.* 2006 Feb;27(2):224-7 [article in Chinese]
53. **Zmirou D, Masclet P, Boudet C, Dor F, Déchenaux J.** Personal exposure to atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in a general adult population and lung cancer risk assessment. *J Occup Environ Med.* 2000 Feb;42(2):121-6.



Serment des Apothicairez

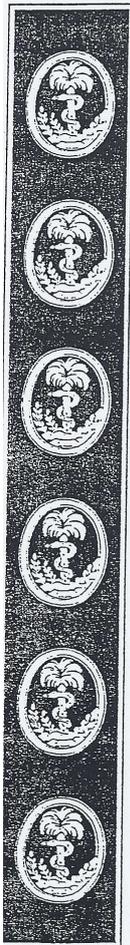
Je jure, en présence des maîtres de la faculté, des conseillers de l'ordre des pharmaciens et de mes condisciples :

D'honorer ceux qui m'ont instruit dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle à leur enseignement.

D'exercer, dans l'intérêt de la santé publique, ma profession avec conscience et de respecter non seulement la législation en vigueur, mais aussi les règles de l'honneur, de la probité et du désintéressement.

De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers le malade et sa dignité humaine ; en aucun cas je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser des actes criminels.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses. Que je sois couvert d'opprobres et méprisé de mes confrères si j'y manque.



TITRE : Expositions professionnelles aux substances cancérigènes émises par les transports.

MOTS-CLES : Hydrocarbures aromatiques polycycliques, exposition professionnelle, émission moteur, diesel.

RESUME : Les émissions issues des moteurs sont un mélange complexe de substances plus ou moins cancérigènes (HAP, particules, benzène, aldéhydes, 1,3 butadiène, métaux) pouvant agir en synergie. L'exposition de la population à ces polluants est un problème majeur de santé publique et afin d'évaluer et de prévenir les risques encourus pour l'homme, il est important de comprendre leurs mécanismes d'action et d'identifier les différents paramètres favorisant leur formation au sein des véhicules.

Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), issus de la combustion incomplète des combustibles fossiles, font partie des polluants cancérigènes retrouvés dans les gaz d'échappement. Les niveaux atmosphériques auxquels est exposée la population générale sont relativement faibles. Néanmoins, certaines personnes peuvent, via leur profession, être exposées à des niveaux plus élevés et la surveillance et la quantification de cette exposition est importante pour déterminer le risque encouru par ces travailleurs. Les travaux présentés dans ce document évaluent cette exposition pour des populations exposées professionnellement aux émissions moteurs : garagistes, chauffeurs, péagers, salariés travaillant en zones urbaines ou en tunnels. Les résultats obtenus montrent des niveaux d'exposition faibles et semblables à ceux de la population générale et seule la catégorie des garagistes retient l'attention avec des niveaux atmosphériques et biologiques plus élevés.

THESE SOUTENUE PAR : M^{lle} Philippat Claire

DATE DE SOUTENANCE : 24 Novembre 2009

JURY : - Mme Maître Anne : Président du jury et directeur de thèse

- Mr Allenet Benoît

- Mme Schiele Clarisse

COORDONNEES :

20, Av du Général Champon

38 000 Grenoble

Tel : 06 37 96 07 51

Mèl : clairephilippat@yahoo.fr