

**ENSP**  
ECOLE NATIONALE DE  
LA SANTE PUBLIQUE

**RENNES**

---

**Ingénieur du Génie Sanitaire**

Promotion : **2005 - 2006**

---

**Atelier Santé Environnement**

**Qualité de l'air dans les parcs de stationnement fermés**

**Référent pédagogique :**  
**Philippe GLORENNEC**

---

**Justine BURG**  
**Emilie FARAMA**  
**Guillaume WEBER**

---

## **R e m e r c i e m e n t s**

---

Nous tenons tout d'abord à remercier notre référent Philippe Glorennec pour sa disponibilité et les conseils qu'il nous a apportés. Nos échanges réguliers ont été constructifs et nous ont permis d'élaborer cette étude.

Nous souhaitons également remercier Madame Charlotte Hugrel de l'INRETS pour nous avoir fourni les éléments nécessaires à la partie modélisation de cette étude.

---

# S o m m a i r e

---

<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Problématique</b> .....	<b>3</b>
1.1 <i>La réglementation concernant la qualité de l'air dans les parkings fermés et leurs systèmes de ventilation</i> .....	3
1.2 <i>Problématique : La réglementation actuelle est elle satisfaisante ?</i> .....	6
<b>2 Evolution du parc automobile français et des émissions de polluants</b> .....	<b>7</b>
2.1 <i>Évolution du parc automobile en France</i> .....	7
2.1.1 Le parc automobile .....	7
2.1.2 La motorisation des véhicules particuliers.....	8
2.1.3 Les classes de cylindrée des véhicules particuliers.....	8
2.1.4 Le kilométrage annuel des véhicules particuliers .....	9
2.2 <i>Polluants émis par le parc automobile français et facteurs influençant leurs émissions</i> .....	10
2.2.1 Evolution des normes d'émission .....	10
2.2.2 Différences d'émissions pour les motorisations diesel et essence : .....	11
2.2.3 Les technologies antipollution .....	12
2.2.4 L'évolution des carburants .....	14
2.2.5 Etat de fonctionnement du moteur.....	15
<b>3 Evaluation des risques sanitaires</b> .....	<b>17</b>
3.1 <i>Méthodologie</i> .....	17
3.2 <i>Identification des dangers et choix des valeurs toxicologiques de référence (VTR)</i> .....	19
3.3 <i>Evaluation de l'exposition</i> .....	20
3.3.1 Voies d'exposition et population retenues .....	20
3.3.2 Quantification de l'exposition .....	20
A) Détermination des concentrations en polluants dans le parking .....	20
B) Détermination des facteurs d'émission des polluants grâce au logiciel Copert.....	22
C) Paramètres de sortie de Copert III.....	25
3.4 <i>Caractérisation des risques</i> .....	25
3.4.1 Caractérisation du risque et classification des substances non cancérigènes pour une exposition aiguë par inhalation.....	27
3.4.2 Caractérisation du risque et classification des substances non cancérigènes pour une exposition chronique par inhalation .....	28

3.4.3	Caractérisation du risque et classification des substances cancérigènes pour une exposition chronique par inhalation .....	29
3.4.4	Analyse de sensibilité du modèle Copert .....	29
3.5	<i>Discussion</i> .....	31
3.5.1	Interprétation des résultats .....	31
3.5.2	Degré de confiance des VTR.....	34
3.5.3	Limites liées à l'utilisation du logiciel Copert .....	35
A)	Facteurs d'émission .....	35
B)	Conditions d'application de Copert .....	36
3.5.4	Discussion sur les hypothèses de calcul .....	36
<b>4</b>	<b>Gestion des risques</b> .....	<b>39</b>
4.1	<i>Actions sur le milieu</i> .....	39
4.2	<i>Actions sur les émissions</i> .....	43
4.3	<i>Actions sur les expositions</i> .....	44
4.4	<i>Surveillance</i> .....	45
4.5	<i>Communication et perception du risque</i> .....	45
4.6	<i>Coût efficacité</i> .....	46
	<b>Conclusion</b> .....	<b>47</b>

---

## Liste des tableaux et des figures

---

Tableau 1 : Valeurs guides de l’OMS.....	4
Tableau 2 : Valeurs réglementaires à l’émission.....	10
Tableau 3 : Spécification des carburants .....	15
Tableau 4 : Parc automobile des véhicules particuliers diesel et kilométrage annuel total en 2006 .....	23
Tableau 5 : Parc automobile des véhicules particuliers essence et kilométrage annuel total en 2006.....	23
Tableau 6 : Classification des substances non cancérigènes.....	27
Tableau 7 : Classification des substances non cancérigènes.....	28
Tableau 8 : Classification des substances cancérigènes .....	29
Tableau 9 : Valeurs testées pour l’analyse de sensibilité .....	30
Tableau 10 : Sensibilité du modèle aux paramètres bêta, vitesse et kilométrage.....	30
Tableau 11 : Résumé des expositions à risque par inhalation pour les .....	31
Tableau 12 : Comparaison des concentrations en CO, NO <sub>2</sub> et PM <sub>10</sub> mesurées dans l’agglomération parisienne et dans le parking .....	33
Tableau 13 : Contribution de l’exposition du parking sur l’exposition totale concernant l’exposition chronique pour deux substances non cancérigènes (QD chronique).....	33
Tableau 14 : Degré de fiabilité des facteurs d’émissions donnés par Copert .....	35
Tableau 15 : Comparaison des concentrations maximales du CO mesurées dans le parking et estimées à partir des FE de Copert.....	37
Tableau 16 : Techniques de mesures automatiques.....	42
Figure 1 : Systèmes de ventilation à double flux .....	5
Figure 2 : Détermination des concentrations à partir des facteurs d’émission.....	18

<i>Graphique 1 : Evolution du parc automobile français de 1970 à 2025, selon le type de motorisation.....</i>	<i>8</i>
<i>Graphique 2 : Evolution du kilométrage annuel des véhicules particuliers en France.....</i>	<i>9</i>
<i>Graphique 3 : Evolution des réglementations concernant les émissions des véhicules essence (à gauche) et diesel (à droite).....</i>	<i>11</i>
<i>Graphique 4 : Emissions de CO, NOx, HC et Particules par rapport au diesel .....</i>	<i>12</i>
<i>Graphique 5 : Emissions particulaires en masse.....</i>	<i>13</i>
<i>Graphique 6 : Distribution de la taille des particules .....</i>	<i>14</i>
<i>Graphique 7 : Evolution des concentrations de CO et NO<sub>2</sub> sur un pas de 5 min.....</i>	<i>21</i>

---

## Liste des sigles utilisés

---

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie  
ATSDR : Agency for Toxic Substances and Disease Registry  
CAS (N° CAS) : Chemical Abstract Service  
CSHPF : Conseil Supérieur d'Hygiène Public de France  
CIRC : Centre International de la Recherche sur le Cancer  
DGEMP : Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières  
DIREM : Direction des Ressources Énergétiques et Minérales  
EEA : European Environment Agency  
EQRS : Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires  
ERI : Excès de Risque Individuel  
ERP : Etablissement Recevant du Public  
ERU : Excès de Risque Unitaire  
FAP : Filtre A Particules  
FE : Facteur d'Emission  
FET : Facteur d'Equivalence Toxique  
GNV : Gaz Naturel Véhicule  
GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié  
HAP : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique  
HC : Hydrocarbure  
ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement  
ID : Injection Directe  
IDI : Injection indirecte  
INRETS : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité  
INVS : Institut de Veille Sanitaire  
IRIS : Integrated Risk Information System  
NEDC : New European Driving Cycle (cycle normalisé européen)  
OEHHA : Office of Environmental Health Hazard Assessment  
OMS : Organisation Mondiale de la Santé  
PM : particulate matter, particule  
PM<sub>10</sub> : particule de diamètre aérodynamique inférieur à 10 micromètres  
RIVM : Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (Institut national de la santé publique et de l'environnement hollandais)  
USEPA : United States Environmental Protection Agency  
VP : Véhicule Particulier  
VTR : Valeur Toxicologique de Référence

---

## G l o s s a i r e

---

**Numéro CAS (Chemical Abstract Service)** est un code numérique utilisé pour l'identification d'une substance chimique et permettant ainsi d'éviter les confusions entre différents libellés de cette même substance. Elle a été mise au point par le Chemical Abstract Service Registry de l'American Chemical Society.

**Facteur d'Emission (FE)** est la quantité de polluant émis par la source et rapporté au km parcouru. Il s'exprime en mg/véhicule/km. Le véhicule est représentatif d'un parc automobile donné, circulant dans des conditions de circulation prédéfinies.

**Valeur toxicologique de référence (VTR)** est une appellation générique regroupant tous les types d'indices toxicologiques qui permettent d'établir une relation quantitative entre une dose et un effet indésirable pour la santé.

Nous avons employé ce terme pour des polluants obéissant à des relations exposition / risque à seuil dont la gravité des effets est croissante avec la dose. Pour l'exposition par inhalation qui a été considérée dans cette étude, la VTR est alors une concentration de référence en dessous de laquelle l'exposition est considérée sans risque compte tenu des connaissances scientifiques du moment.

**Quotient de danger (QD)** : Rapport entre le niveau d'exposition en un composé (concentration dans l'air pour la voie respiratoire) et sa VTR, pour la voie et la durée d'exposition correspondantes. Le QD (sans unité) concerne uniquement les effets à seuil.

**Excès de Risque Unitaire (ERU)** est la probabilité de survenue de l'effet chez un individu pour une exposition à une unité de dose ( $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour l'inhalation) durant toute la vie (70 ans) et 24 heures sur 24. Il est utilisé pour des toxiques obéissant à des relations exposition / risque sans seuil comme la plupart des produits cancérigènes.

*Exemple* :  $10^{-6}$  ( $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>-1</sup>. C'est la probabilité (supplémentaire) de survenue de l'effet pour un individu soumis à une exposition de  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  durant toute sa vie (assimilée à 70 ans). Cette valeur peut également se lire comme la survenue d'un cas supplémentaire de maladie sur 1 million de personnes exposées pendant toute leur vie.

**Excès de Risque Individuel (ERI)** est la probabilité (supplémentaire) de développer l'effet associé à la substance du fait de l'exposition chronique considérée. Il est utilisé pour caractériser des effets sans seuil.

## Introduction

L'exode rural observé depuis près d'un demi siècle a rapidement augmenté la taille des villes ainsi que la densité de population qui y réside. De plus, l'automobile est devenue un des symboles de nos sociétés modernes. Il s'est alors rapidement posé la question de savoir comment satisfaire les besoins suffisants en stationnement dans les centres urbains denses. Une des solutions a été la construction de parcs de stationnements souterrains.

Or il est désormais avéré que les automobiles rejettent une certaine quantité de polluants divers et variés. Les immenses progrès réalisés ces dernières années dans les techniques d'analyses chimiques ont mis en évidence la quantité et la diversité des polluants émis par les véhicules.

Pour éviter la stagnation de ces polluants au sein des parkings fermés, des systèmes de ventilation asservis sur les concentrations en monoxyde de carbone ont été mis en place.

Il se pose la question d'une meilleure connaissance de la qualité de l'air dans les microenvironnements que sont les parkings fermés. Les préoccupations en santé environnementale allant croissant, il est intéressant de déterminer si ces dispositifs mis en place permettent d'assurer à la population une sécurité sanitaire satisfaisante à l'intérieur de ces enceintes fermées.

Après avoir clairement défini la problématique de l'étude, les dangers liés aux polluants rejetés par les automobiles seront identifiés. Pour cela, il sera nécessaire de décrire rapidement l'évolution du parc automobile français ainsi que les techniques existantes pour limiter l'émission des polluants à l'échappement. La méthodologie d'évaluation des risques sera explicitée et permettra d'introduire la démarche d'évaluation proprement dite. Une discussion sera nécessaire pour mettre en relief les conclusions à retenir de cette évaluation des risques avant de proposer différentes mesures de gestion permettant de limiter le risque.

# 1 Problématique

## 1.1 La réglementation concernant la qualité de l'air dans les parkings fermés et leurs systèmes de ventilation

Actuellement, les parkings fermés sont soumis à la législation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). La réglementation spécifique aux parcs de stationnement vise à maintenir à l'intérieur de ces espaces clos une qualité d'air assurée par une ventilation suffisante pour s'opposer efficacement à la stagnation, même locale, de gaz nocifs ou inflammables.

La « nouvelle » nomenclature des ICPE désigne sous la rubrique n°2935 (décret du 29 décembre 1993) les parcs de stationnement couverts et garages d'hôtels à véhicules à moteur qui sont classables. Si la capacité est comprise entre 250 et 1000 véhicules, l'ouvrage relève du régime de la déclaration et au-delà de 1000 véhicules, il est soumis à autorisation. Toutefois, au 1<sup>er</sup> avril 2006, les parkings souterrains deviendront des Etablissements Recevant du Public (ERP).

La réglementation concernant la qualité de l'air est fixée par la **circulaire et instruction technique du 3 mars 1975 relatives aux parcs de stationnement couverts**. Elle fixe les critères de qualité présentés ci-dessous, avec un asservissement de la ventilation pour les parkings de capacité supérieure à 500 places. L'indicateur de pollution est le CO. Sa teneur ne doit pas dépasser les valeurs suivantes :

- 50 ppm (60 mg/m<sup>3</sup>) sur toute période de 8 heures,
- 100 ppm (110 mg/m<sup>3</sup>) sur toute période de 20 minutes,
- 200 ppm (230 mg/m<sup>3</sup>) en valeur instantanée.

La ventilation peut être naturelle ou mécanique. Elle doit être obligatoirement mécanique dans les niveaux en sous sol, à l'exception des cas où existent de larges ouvertures à l'air libre.

**En 1998, le Conseil Supérieur d'Hygiène Public de France (CSHPF) s'est réuni.** Ses membres ont **émis différentes recommandations** concernant les critères de qualité dans ces ouvrages :

- L'ouvrage est fréquenté par des véhicules dont moins de 50 % sont des véhicules diesel et la capacité de l'ouvrage est **inférieure à 500 véhicules** : L'indicateur de pollution est le CO. Sa teneur ne doit pas dépasser les valeurs suivantes :
  - 50 ppm (60 mg/m<sup>3</sup>) sur toute période de 30 minutes,
  - 90 ppm (100 mg/m<sup>3</sup>) sur toute période de 15 minutes,

- 150 ppm (170 mg/m<sup>3</sup>) en valeur instantanée.

- L'ouvrage est fréquenté par des véhicules dont moins de 50 % sont des véhicules diesel et la capacité de l'ouvrage est **supérieure à 500 véhicules** : Les indicateurs de pollution sont le CO et le NO<sub>2</sub>. La teneur en CO ne doit pas dépasser les valeurs suivantes :

- 50 ppm (60 mg/m<sup>3</sup>) sur toute période de 30 minutes,
- 90 ppm (100 mg/m<sup>3</sup>) sur toute période de 15 minutes,
- 150 ppm (170 mg/m<sup>3</sup>) en valeur instantanée.

La teneur en NO<sub>2</sub> ne doit pas dépasser 0,4 ppm (0,8 mg/m<sup>3</sup>) sur toute période de 15 minutes.

Le CSHPF a également émis les avis suivants :

- Les teneurs en particules fines en suspension PM étant un paramètre important de la qualité d'air, il convient de développer des études pour la prise en compte de ce critère dans le fonctionnement de la ventilation des parkings.

- L'implantation de l'ouvrage et notamment de ses orifices de rejet à l'atmosphère ne doit pas entraîner des teneurs supérieures aux valeurs réglementaires fixées dans l'air ambiant extérieur pour les indicateurs de pollution automobile (CO, NO<sub>x</sub>, PM), sur les sites d'exposition à longue durée de la population (immeubles d'habitation, hôpitaux, écoles, ...) et sur les sites destinés aux loisirs de jeunes enfants (jardins, cours, ...) ou réservés aux sports de plein air (stades, courts de tennis, ...).

D'autre part, en terme de qualité de l'air, il convient de respecter les recommandations de l'OMS présentées ci-dessous. Les concentrations sont données en µg/m<sup>3</sup> d'air.

Tableau 1 : Valeurs guides de l'OMS  
(Source : OMS, 2005)

	10 min	15 min	30 min	1 h	8 h	24 h	Semaine	1 an
<b>CO</b>		100 000	60 000	30 000	10 000			
<b>Pb</b>								0,5
<b>NO<sub>2</sub></b>				200				40
<b>O<sub>3</sub></b>					100			
<b>SO<sub>2</sub></b>	500					20		50
<b>PM 2.5</b>						25		10
<b>PM 10</b>						50		20
<b>Xylène</b>						4800		
<b>Toluène</b>							260	
<b>Ethylbenzène</b>								22 000

Différentes techniques de ventilation mécanique sont utilisées. La ventilation peut être mécanique en soufflage ou mécanique double flux. Il existe 2 types de systèmes de ventilation à double flux, présentés ci-dessous.

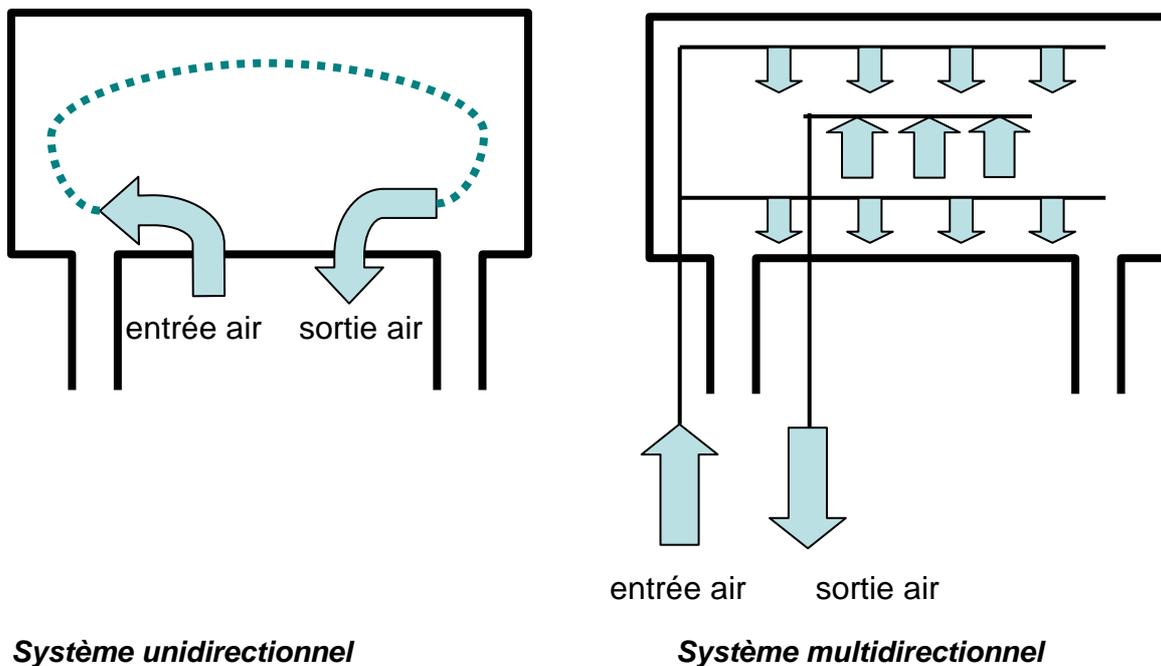


Figure 1 : Systèmes de ventilation à double flux  
(Source : Burnett et Chan, 1997)

La pollution est davantage contrôlée dans un parking équipé d'une ventilation multidirectionnelle. En effet, cette technique limite le gradient de pollution généré par le système de ventilation. Dans le cas d'un système unidirectionnel, la pollution est ainsi plus importante près du système d'évacuation.

A noter que le vent peut court-circuiter le système et qu'il est préférable dans tous les cas d'éloigner au maximum l'entrée et la sortie d'air. Bien évidemment, l'air utilisé en entrée doit être de bonne qualité.

Burnett et Chan (1997) recommandent un taux de ventilation de 6 changements de volume d'air par heure.

Actuellement, la réglementation en vigueur concernant la ventilation est la suivante :

- Si la capacité est inférieure à 250 véhicules, les parcs sont non classables ; l'arrêté du 31 janvier 1986 stipule qu'en cas de ventilation naturelle, la section minimale doit être de 6 dm<sup>2</sup>/véhicule. En cas de ventilation mécanique, le renouvellement d'air doit être de 600 m<sup>3</sup>/h/véhicule.
- Si la capacité des parcs est supérieure à 250 véhicules, ils sont classables. A partir du 1<sup>er</sup> janvier 1993 ont été imposées des dispositions en matière d'installation de système de ventilation. Si la ventilation est naturelle, la section minimale des orifices de ventilation doit être de 6 dm<sup>2</sup>/véhicule. En cas de ventilation mécanique, le débit minimum d'extraction doit être de 600 m<sup>3</sup>/h/véhicule.

## 1.2 Problématique : La réglementation actuelle est elle satisfaisante ?

La substance réglementée (monoxyde de carbone) est utilisée comme indicateur de pollution. Les limites de concentration dans les parkings sont donc des valeurs de gestion. En effet, elles sont utilisées pour indiquer la présence d'autres substances dont les concentrations leur sont corrélées.

Bien qu'il semblerait que la réglementation actuelle puisse assurer des concentrations en CO sans risque pour la santé des personnes qui fréquentent ces ouvrages, il est envisageable que d'autres polluants plus préoccupants se retrouvent à des concentrations qui elles peuvent présenter un problème de santé publique.

Si les véhicules deviennent de plus en plus propres notamment grâce à des normes européennes de plus en plus restrictives en ce qui concerne les polluants classiques « connus de tous », il ne faut pas négliger les autres polluants possiblement émis. De plus, jusqu'ici, seule la toxicité aiguë était habituellement prise en compte, ce qui nous semble insuffisant. Désormais, il est nécessaire de prendre en compte les polluants présentant des effets chroniques (cancérigène ou non) afin de pouvoir statuer sur leur risque.

De plus, seuls les CO et NO<sub>2</sub> sont visés actuellement par les recommandations du CSHPF. Il se pose clairement la question de savoir si la réglementation actuelle et l'avis du CSHPF assurent la protection de la santé des personnes qui fréquentent ces parkings fermés. En d'autres termes, le respect de la réglementation et des recommandations est il suffisant pour protéger la population ?

Pour tenter d'y répondre, une évaluation des risques sanitaires est réalisée. Elle permettra de déterminer si le respect de la réglementation actuelle garantit des concentrations sans risque des autres polluants. Si ce n'est pas le cas, cette étude permettra d'éclairer sur les nouveaux indicateurs à utiliser pour assurer des concentrations de tous les polluants émis suffisamment faibles pour être sans risque.

Elle proposera enfin des mesures de gestion à mettre en œuvre afin de réduire le risque.

## **2 Evolution du parc automobile français et des émissions de polluants**

### **2.1 Évolution du parc automobile en France**

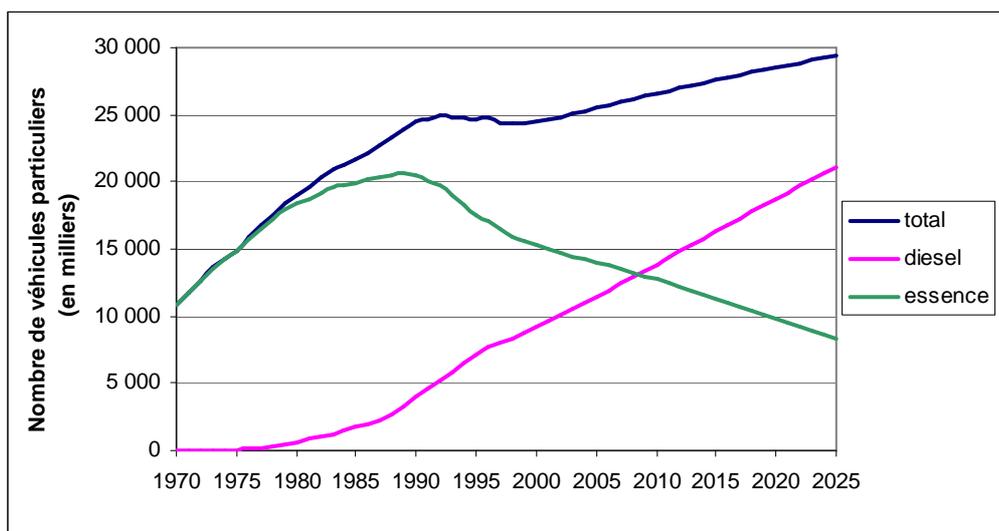
Depuis les années 1970, la mobilité des personnes et des marchandises a fortement progressé, ce qui est dû notamment à l'urbanisation et aux besoins de l'activité économique. Ce phénomène se manifeste par un accroissement très important de la circulation et du parc automobile (Société Française de Santé Publique, 1996). Ainsi, on dénombre actuellement un peu plus de 34 millions de véhicules (véhicules particuliers, véhicules utilitaires légers, poids lourds et deux roues), dont environ 25,5 millions de véhicules particuliers.

L'objectif de cette partie est d'étudier l'évolution du parc automobile de véhicules particuliers, puisque ses caractéristiques ont largement changé au fil des années. Comme il n'existe pas de statistiques réelles précises et complètes sur le parc automobile français, nous nous sommes basés sur les résultats d'une étude menée par Béatrice Bourdeau en 1998, et réactualisée en 2004 par C. Hugrel et R. Joumard (INRETS). Cette étude nous permet de suivre l'évolution du parc automobile français de 1970 à 2025 grâce à un modèle informatique qui a été mis au point pour calculer le parc annuel statique (nombre de véhicules existant sur le territoire) et roulant (nombre de véhicules circulant sur le territoire) en fonction de divers paramètres : la méthode employée fait appel aux données d'immatriculation des véhicules ainsi qu'à des lois de survie permettant d'apprécier le rythme de mise à la casse d'une classe d'âge de véhicules en fonction du temps (INRETS, 2004).

#### **2.1.1 Le parc automobile**

Le Graphique 1 montre l'augmentation progressive du nombre de véhicules particuliers en France de 1970 à 2025. On constate globalement une nette augmentation du parc automobile, marquée par trois phases :

- une très forte augmentation entre 1970 et 1990 : en 1970, le parc automobile comptait 10,9 millions de véhicules particuliers, contre 24,4 millions en 1990, soit une augmentation de plus de 120% ;
- une légère baisse entre 1990 et 2000 ;
- une ré augmentation à partir de 2000. Les prévisions de l'INRETS montrent que cette augmentation se poursuit lentement jusqu'en 2025, où le parc atteindrait 29,4 millions de véhicules particuliers.



Graphique 1 : Evolution du parc automobile français de 1970 à 2025, selon le type de motorisation  
(Source : INRETS, 2004)

### 2.1.2 La motorisation des véhicules particuliers

Cette accroissement du parc s'est accompagnée d'une évolution des types de motorisation rencontrés (Graphique 1). En effet, en 1970, seuls 0,34% des véhicules particuliers sont des véhicules diesel. En 2005, les véhicules particuliers diesel représentent 45% du parc automobile particulier. Le parc automobile diesel a augmenté régulièrement jusqu'à aujourd'hui, et les prévisions indiquent que cette tendance va se poursuivre jusqu'en 2025, où les véhicules diesel devraient représenter 70% des véhicules particuliers.

Concernant le parc des véhicules particuliers essence, on observe de 1970 à 1990 une nette augmentation, suivie d'une baisse progressive jusqu'en 2025. On peut noter que selon les prévisions de l'INRETS, les véhicules particuliers diesel deviendraient majoritaires devant les véhicules particuliers essence à partir de 2009.

### 2.1.3 Les classes de cylindrée des véhicules particuliers

La répartition des véhicules particuliers selon leur classe de cylindrée a aussi fortement évolué entre 1970 et 2025 (Annexe 1).

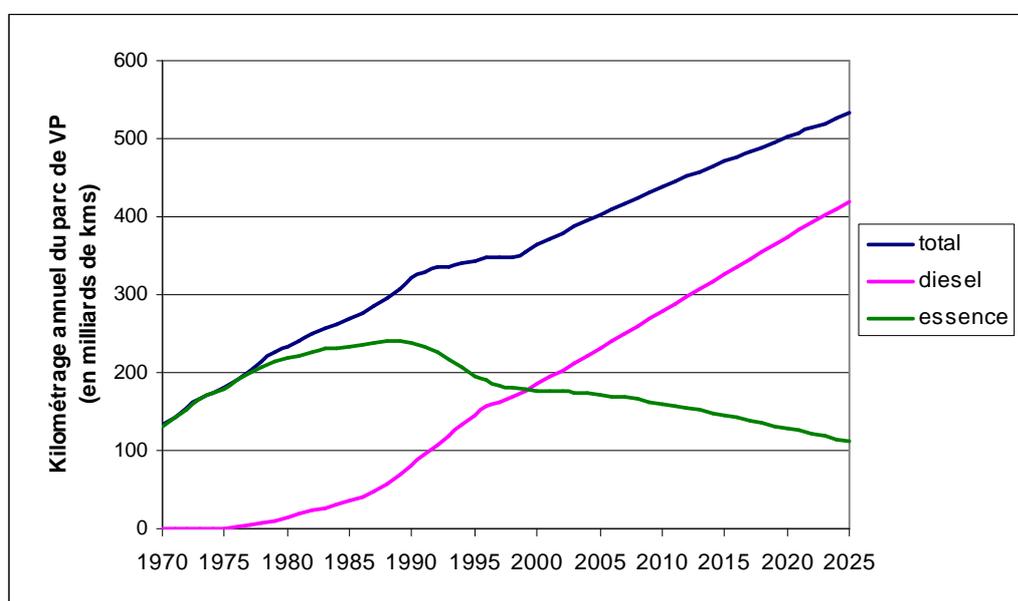
Pour les véhicules particuliers diesel, deux classes de cylindrées sont étudiées (>2L et <2L). L'évolution a été très irrégulière de 1970 à 2005. A partir de 2005, l'INRETS prévoit une répartition assez stable entre ces classes de cylindrée, avec un avantage pour les cylindrées inférieures à 2L (62% en 2025).

Pour les véhicules particuliers essence, trois classes de cylindrées sont étudiées (<1,4L ; 1,4 à 2L ; > 2L). On observe deux périodes très différentes. De 1970 à 1997, la répartition entre les cylindrées est restée sensiblement la même avec une faible part des

cylindrées supérieures à 2L. A partir de 1998, cette dernière classe se développe fortement.

#### 2.1.4 Le kilométrage annuel des véhicules particuliers

Le Graphique 2 présente l'évolution entre 1970 et 2025 du kilométrage annuel parcouru par l'ensemble des véhicules particuliers en France. On constate une nette augmentation de ce kilométrage pour l'ensemble du parc de VP. Cependant, on observe une différence notable entre les VP diesel et essence. On note en effet une forte augmentation du kilométrage des véhicules diesel, alors que celui des véhicules essence diminue à partir de 1990. Ceci traduit en fait l'évolution du nombre de véhicules diesel et essence du parc automobile et non une augmentation du kilométrage annuel moyen par véhicule. Il est en effet important de noter que le kilométrage moyen annuel par véhicule n'a que très peu évolué entre 1970 et 2025.



Graphique 2 : Evolution du kilométrage annuel des véhicules particuliers en France de 1970 à 2025  
(Source : INRETS 2004)

Globalement, le parc automobile a donc beaucoup évolué depuis 1970. De plus, les projections établies par l'INRETS jusqu'en 2025 semblent montrer que les tendances observées jusqu'à aujourd'hui vont se poursuivre dans le futur. Ces données sont très importantes ; en effet, l'état du parc automobile conditionne les émissions de polluants.

Afin de caractériser la pollution dans les parkings et dans le but de définir des indicateurs de pollution adaptés, il convient d'étudier les polluants émis par le parc automobile fréquentant les parkings. Afin d'établir une étude complète, il est nécessaire d'identifier l'ensemble des polluants en tenant compte des différentes sources de

pollution : **échappement et évaporation**. De plus, il convient d'appréhender les paramètres influençant ces émissions.

## 2.2 Polluants émis par le parc automobile français et facteurs influençant leurs émissions

De nombreux paramètres peuvent exercer une influence variable sur les quantités mais également sur la nature des polluants à l'échappement automobile. Ces paramètres peuvent être propres à la conception des véhicules comme les motorisations essence ou diesel qui ne présentent pas les mêmes caractéristiques et ne sont pas soumis aux mêmes normes d'émission. Les technologies antipollution ou encore l'évolution des spécifications des carburants agissent également sur les émissions. D'autres paramètres se rapportent au fonctionnement des véhicules et à leur usage.

### 2.2.1 Evolution des normes d'émission

Des normes européennes fixent les valeurs limites d'émission à l'échappement pour les véhicules particuliers. Ces normes portent les appellations EURO I à IV selon leur date de mise en application et imposent les nouvelles limites réglementaires avec une sévérité croissante.

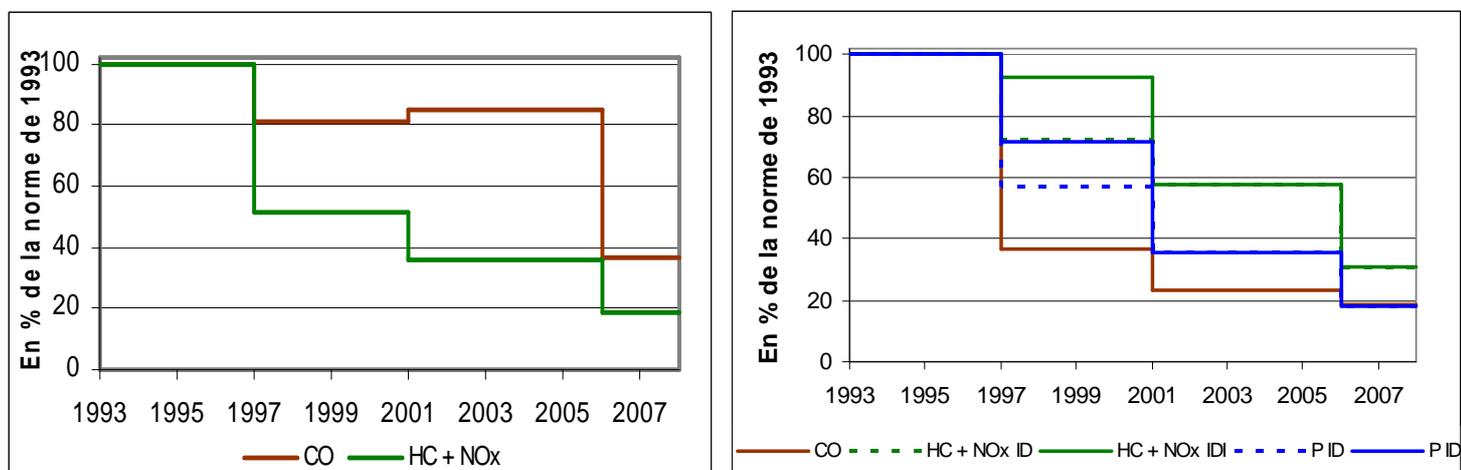
Les composés réglementés sont le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures (HC), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), ainsi que les particules pour les voitures diesel (PM). Le Tableau 2 présente les valeurs réglementaires.

Tableau 2 : Valeurs réglementaires à l'émission

Normes (g/km)	CO		HC+Nox			HC	Nox		Particules	
	Essence	Diesel	Essence	Diesel		Essence	Essence	Diesel	Diesel	
		ID/IDI		ID*	IDI**			ID/IDI		
Euro 1 1993	2,72		0,97			-	-		0,140	
Euro 2 1997	2,20	1,00	0,50	0,70	0,90	-	-	-	0,080	0,100
Euro 3 2001	2,30	0,64	-	0,56		0,20	0,15	0,50	0,050	
Euro 4 2006	1,00	0,50	-	0,30		0,10	0,08	0,23	0,025	

\* ID = injection directe \*\* IDI = injection indirecte

Il est possible de visualiser l'évolution de la réglementation sur le Graphique 3, afin de prendre conscience des contraintes successives quant à la réduction des émissions pour les voitures essence et diesel.



Graphique 3 : Evolution des réglementations concernant les émissions des véhicules essence (à gauche) et diesel (à droite)

### 2.2.2 Différences d'émissions pour les motorisations diesel et essence :

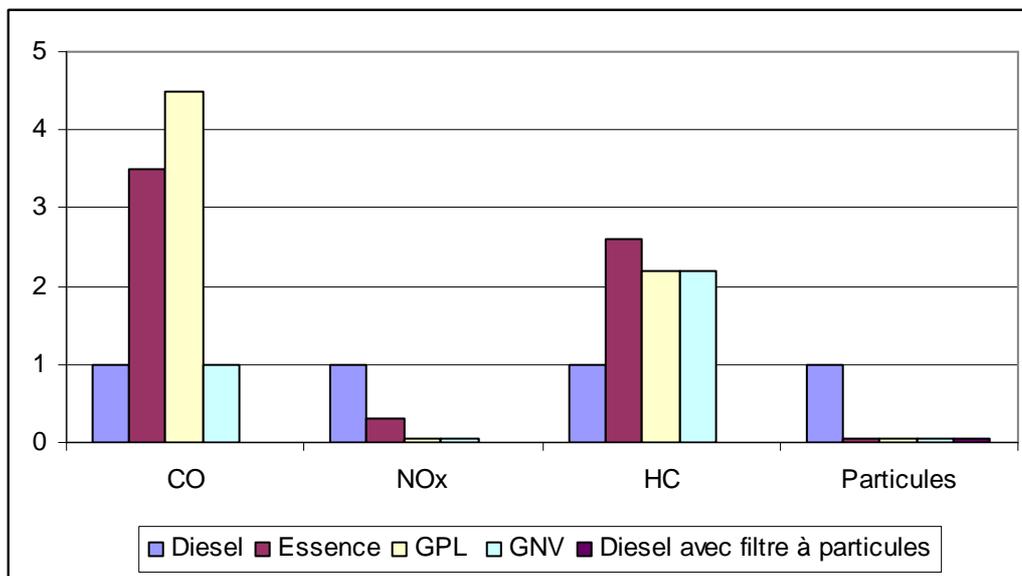
De strictes réglementations régissent les émissions de polluants. Depuis la norme EURO II, une différenciation a été faite pour les émissions des véhicules diesel et essence afin de tenir compte des spécificités de chacun de ces modèles. En effet, des différences entre les systèmes de combustion des moteurs essence et diesel expliquent les différentes émissions de ces modèles. Il est possible de faire apparaître les spécificités de chacune des motorisations.

Les émissions des quatre polluants réglementés (monoxyde de carbone, les oxydes d'azote, les hydrocarbures et les particules) sont étroitement liées au fonctionnement des moteurs essence ou diesel. Plus de détails sur leur origine et leur processus de formation sont donnés en Annexe 2; cependant, on peut résumer ceci :

- les moteurs essence émettent plus de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures que les moteurs diesel.
- Les moteurs diesels émettent plus d'oxydes d'azote et de particules que les moteurs essence.

La motorisation est un critère extrêmement important pour la composition des gaz à l'échappement. Le Graphique 4 permet de visualiser facilement les différences entre ces deux filières. A titre de comparaison, sont présentées les filières GNV (gaz naturel véhicule) et GPL. Les valeurs sont adimensionnées par la valeur obtenue pour les véhicules diesel. Les mesures ont été réalisées pour des véhicules Euro 3 sur le cycle

d'homologation européen NEDC, qui comprend une partie urbaine et extra-urbaine effectué avec un démarrage à moteur froid (ADEME, 2005).



Graphique 4 : Emissions de CO, NOx, HC et Particules par rapport au diesel (Source : ADEME, 2005)

Cependant, les véhicules GNV (moins de 10 000 véhicules en France) et GPL (environ 180 000 véhicules en France) sont négligeables dans le parc automobile français, comparés aux véhicules essence et diesel. Par conséquent, nous ne les intégrerons pas à l'étude.

### 2.2.3 Les technologies antipollution

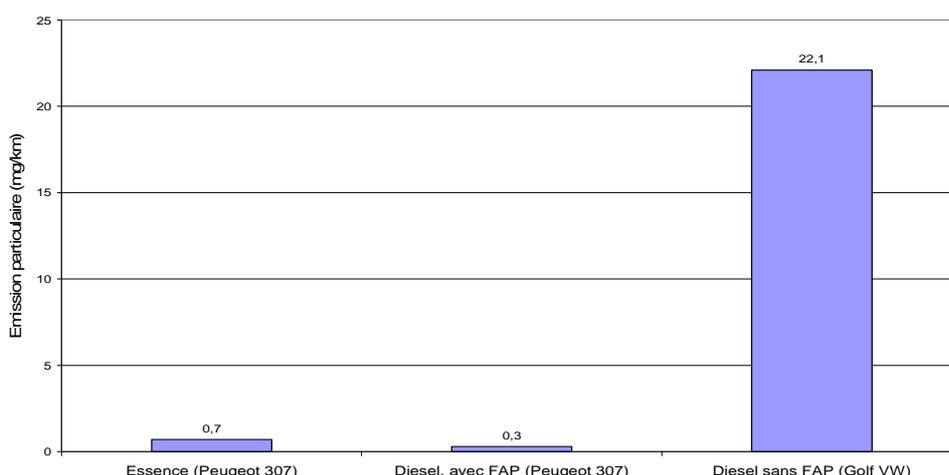
De nouvelles technologies ont été mises en place pour réduire les émissions de polluants. Il est intéressant de voir quels sont leurs effets bénéfiques, et les progrès présagés. Cependant, certaines études font apparaître que ces technologies peuvent engendrer d'autres formes de pollution.

Divers dispositifs de post-traitement des gaz ont été mis au point, tels les pots catalytiques. Ils sont positionnés à la sortie de l'échappement du moteur. Les pots catalytiques trois voies permettent la réaction chimique de certains composés (CO, HC, NO<sub>x</sub>) pour former du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), de l'azote (N<sub>2</sub>) et de la vapeur d'eau. La catalyse d'oxydation qui est utilisée pour les moteurs diesel depuis 1997, n'a que peu d'action sur les NO<sub>x</sub>. Les voitures essence doivent être équipées d'un pot catalytique depuis 1993. Il est utile de préciser que la catalyse trois voies augmente les taux d'émission de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), qui est un puissant gaz à effet de serre. (INRETS, 2001 ; Comité interministériel pour les véhicules propres, 2003).

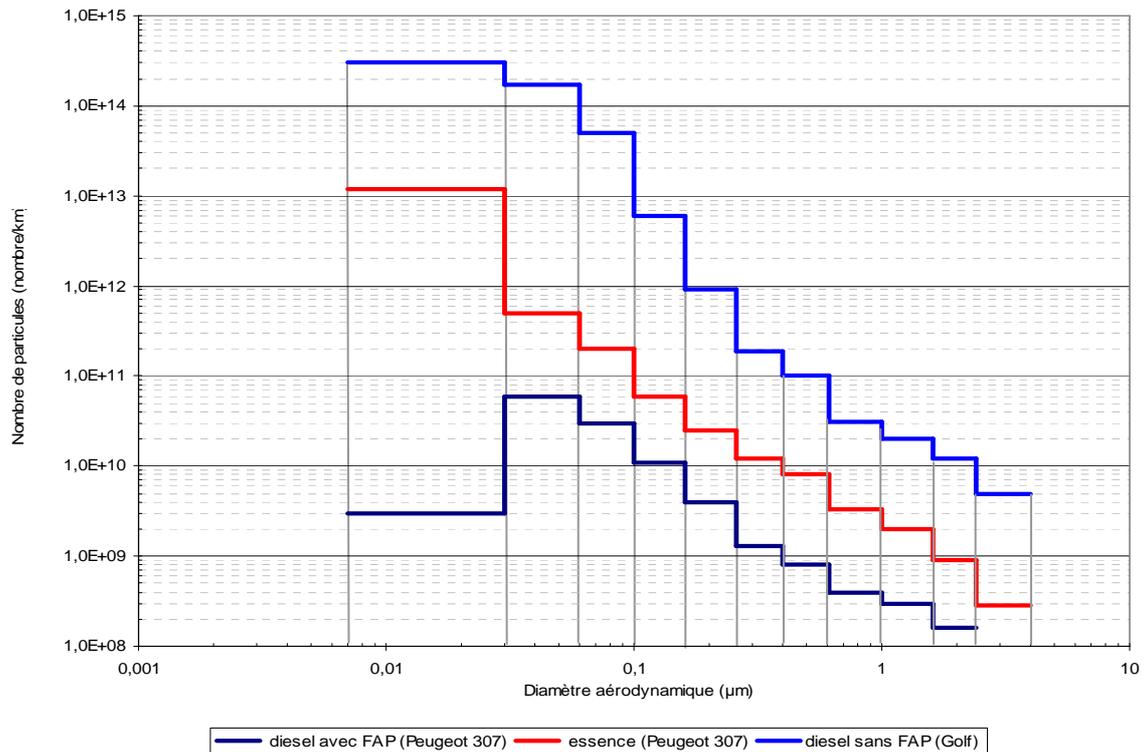
Des inquiétudes ont été exprimées vis-à-vis des moteurs dernière génération qui, certes produisant moins de particules en masse, émettraient un plus grand nombre de particules très fines. Comme cela a pu être constaté précédemment, les normes en vigueur réglementent uniquement la masse de particules émises. Certains estiment que les futures réglementations devraient non seulement porter sur la masse, mais aussi le nombre des particules émises, afin de mieux caractériser les émissions particulaires et de relativiser les avancées technologiques des nouveaux moteurs.

Le filtre à particule (FAP) a été développé pour les véhicules diesel pour répondre à ces normes de plus en plus exigeantes. Il a pour objectif de filtrer les gaz d'échappement au travers d'un substrat filtrant (généralement en carbure de silicium) réduisant notamment les émissions de particules solides. Des résultats ont montré la diminution de la masse des particules émises à des valeurs du même ordre de grandeur qu'avec un moteur essence. Ils ont également montré leur capacité à réduire à la fois le nombre des particules. (Conférence européenne des ministres des transports, 2000).

Les deux graphes suivants illustrent ces résultats. Pour trois véhicules (Peugeot 307 2.0 HDi diesel avec FAP ; Peugeot 307 1,6L essence, et VW Golf 1,9 TDI diesel sans FAP), ont été mesurées, en cycle NEDC, la masse des particules émises (Graphique 5) ainsi que leur distribution en taille (Graphique 6). Les échelles sont logarithmiques. L'efficacité du filtre à particules est clairement observable.



Graphique 5 : Émissions particulaires en masse  
(Source: Swedish national road administration, 2002)



*Graphique 6 : Distribution de la taille des particules  
(Source: Swedish national road administration, 2002)*

PSA Peugeot Citroën a été le premier constructeur à proposer un filtre à particules. C'est en 2000 que les premières voitures équipées ont été commercialisées. Aujourd'hui, plusieurs marques de voitures proposent des diesels avec filtre à particules. Cependant, le coût d'un filtre est élevé, environ 1500 euros. Ainsi le parc automobile français ne présente que 377000 véhicules équipés, soit une très faible fraction des véhicules diesel.

#### 2.2.4 L'évolution des carburants

Les relations entre la formulation des carburants et la composition des émissions sont complexes et ont fait l'objet de programmes internationaux dans le but de définir les spécifications des futurs carburants. La qualité des carburants est assurée par des directives européennes (98/70/CE et 2003/17/CE) qui limitent leur teneur en différents éléments. Ces directives s'appliquent en trois étapes.

Au 1er janvier 2000, la teneur en benzène des essences a été divisée par 5 et la teneur en soufre par 3,3. Parallèlement la teneur en soufre a été divisée par 1,5 pour le gazole. C'est à cette date également que les carburants plombés ont été interdits à la vente. Au 1er janvier 2005, de nouvelles spécifications sont entrées en vigueur. Ces dernières concernent notamment le soufre dont la teneur est abaissée à 50 mg/kg pour les deux carburants. L'objectif global des directives est la mise sur le marché de carburants à la teneur maximale de 10 mg/kg de soufre en 2009 (DGEMP – DIREM, 2005).

Le Tableau 3, ci-dessous présente une synthèse de l'évolution des spécifications des carburants :

*Tableau 3 : Spécification des carburants  
(Source : DGEMP DIREM, 2005)*

Teneurs limites	Spécifications			
	<01/01/2000	01/01/2000	01/01/2005	01/01/2009
<b>Essences</b>				
Soufre (mg/kg)	500	150	50	10
Benzène % en volume	5	1	1	1
Oléfines % en volume	-	42	35	35
<b>Gazole</b>				
Soufre (mg/kg)	500	350	50	10
Polyaromatiques % en masse	-	11	11	11

### 2.2.5 Etat de fonctionnement du moteur

Les émissions de polluants dépendent, en plus du facteur vitesse, du stade de fonctionnement du véhicule. Ainsi, un moteur dit «froid» n'émettra pas les polluants en même proportion que le moteur à chaud. On entend par «moteur froid» la période pendant laquelle la température du véhicule n'est pas optimale. Une surémission a été démontrée au démarrage à froid, également conditionnée par l'état thermique du moteur et les performances du catalyseur. En effet, tant que le moteur n'a pas atteint la température optimale, la combustion est incomplète et engendre une surémission de certains polluants. Il a été montré que les surémissions sont particulièrement observées pour les véhicules essence (HC, CO). Les surémissions sont moindres pour les moteurs diesel, à l'exception du CO<sub>2</sub> et HAP (*INRETS, 2001*). Ce paramètre aura de l'importance pour considérer les déplacements dans les parkings fermés.

D'autre part, l'âge du véhicule, l'usure ou l'entretien sont autant de paramètres influençant les émissions. Ces paramètres sont difficiles à prendre en compte sans l'utilisation d'un logiciel modélisant les émissions d'un parc automobile singulier.

Ainsi, on comprend que les évolutions couplées du parc automobile, des réglementations relatives aux émissions et à la qualité de carburants, ainsi que les avancées technologiques autorisent à envisager la reconsidération de ces indicateurs.

## 3 Evaluation des risques sanitaires

### 3.1 Méthodologie

**La méthode utilisée est celle d'une évaluation quantitative des risques sanitaires.** En effet, cette démarche semble la plus adaptée pour notre étude. Il s'agit d'une problématique d'exposition à faibles doses, pour de multiples composés et à différents types d'effets. Le risque est à priori faible mais la population exposée est potentiellement importante. L'évaluation des risques est la méthode la plus adaptée pour l'étude des effets subaigus ou chroniques ; elle présente comme intérêt d'émettre un résultat quantifié et commenté sans l'utilisation de gros moyens. Une étude épidémiologique n'était pas envisageable dans notre cas puisque le délai d'obtention des résultats aurait été beaucoup trop important. De plus, compte tenu de l'ubiquité de l'exposition aux polluants, une stratification des expositions aurait été difficile à réaliser, et une erreur de classification aurait eu de fortes répercussions sur les résultats obtenus. L'évaluation de risques sanitaires est ainsi une bonne alternative et ses résultats pourront conclure quant à la nécessité d'effectuer d'autres études complémentaires.

Plusieurs étapes sont nécessaires pour l'évaluation des risques:

- i. Identifier les dangers**
- ii. Rechercher et choisir leur valeur toxicologique de référence**
- iii. Evaluer l'exposition aux polluants dans les parkings**
- iv. Calculer le quotient de danger ou l'excès de risque individuel puis interpréter les résultats.**

i. Les polluants sont identifiés grâce au rapport du groupe de travail « Sélection des agents dangereux à prendre en compte dans l'évaluation des risques sanitaires liés aux infrastructures routières » de Novembre 2004. Afin de réaliser une évaluation des risques sanitaires, il est indispensable de connaître les effets sur la santé des composés ainsi que leur concentration dans l'environnement considéré.

ii. Parmi les nombreux polluants identifiés, seuls quelques uns ont fait l'objet d'études toxicologiques ou épidémiologiques permettant de caractériser leurs effets sur la santé. Il convient de rechercher les valeurs toxicologiques disponibles et d'effectuer un choix si plusieurs données sont présentées.

iii. Pour la détermination des concentrations des polluants, nous disposons des résultats d'une campagne de mesures effectuée dans un parking de la région parisienne. Les composés mesurés, à intervalle de 5 minutes, sont les CO, NO, NO<sub>2</sub> et PM. En plus de ces quatre éléments, nous avons besoin des concentrations pour l'ensemble des autres polluants. Mais leur nombre très élevé ne rend pas leur mesure réalisable.

Pour s'affranchir de ces difficultés expérimentales, nous allons utiliser le modèle Copert III qui permet de déterminer des facteurs d'émissions (FE) pour l'ensemble des polluants. Le FE d'un composé représente la masse de ce composé émis par une voiture représentative d'un parc automobile donné, lorsqu'elle parcourt un kilomètre. Il faut ensuite transformer les FE en concentrations. Pour cela, nous choisissons le NO<sub>x</sub> comme composé de référence, pour lequel nous disposons à la fois du FE par Copert, et de la concentration dans le parking (addition du NO et du NO<sub>2</sub>). Nous avons fait l'hypothèse suivante : on considère que les FE et les concentrations de tous les polluants suivent une même relation proportionnelle. Il est alors possible de déterminer l'ensemble de toutes les autres concentrations.

La Figure 2 ci-dessous représente de manière schématisée l'évaluation des concentrations à partir des FE. Le rapport  $k$  permettant de passer du FE du composé  $y$  à sa concentration dans le parking, est obtenu en divisant la concentration en NO<sub>x</sub> directement mesurée par le FE de Copert du NO<sub>x</sub>.

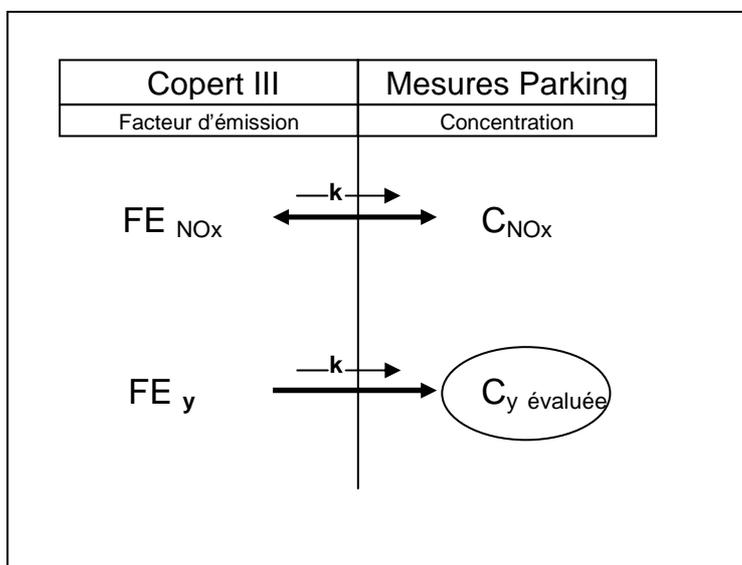


Figure 2 : Détermination des concentrations à partir des facteurs d'émission

iv. Seuls les composés présentant à la fois une VTR et un FE peuvent faire l'objet d'une d'évaluation des risques. Ainsi, sur les 330 composés émis à l'échappement et à l'évaporation, seulement 30 pourront faire l'objet d'une telle étude. Pour ces polluants, il conviendra de caractériser les risques par le calcul de quotients de danger pour les effets

à seuil, et d'excès de risque individuels pour les effets sans seuil. Il sera donc possible d'identifier des polluants les plus préoccupants pour les populations empruntant les parkings.

Dans une deuxième partie, les composés sélectionnés seront étudiés plus précisément. Une analyse qualitative et quantitative des incertitudes sera réalisée sur ces composés, grâce notamment à une analyse de sensibilité. Il s'agira de vérifier que la sélection est justifiée et d'interpréter les résultats.

### **3.2 Identification des dangers et choix des valeurs toxicologiques de référence (VTR)**

Très peu de polluants sont réglementés à l'émission des véhicules parmi l'ensemble des composés émis. Il s'agit uniquement des CO, NO<sub>x</sub>, HC et particules. Ces quatre éléments se retrouvent à l'échappement des véhicules.

Cependant l'échappement n'est pas l'unique source de pollution à considérer. En effet, il existe des polluants émis par évaporation, par les équipements automobiles ou encore par l'entretien des parkings et des voies. Dans leur rapport intitulé « *Sélection des agents dangereux à prendre en compte dans l'évaluation des risques sanitaires liés aux infrastructures routières* » de Novembre 2004, un groupe de travail interministériel piloté par l'INVS recense de manière exhaustive l'ensemble des substances émises pour chacune de ces sources. Pour s'inscrire dans le domaine d'application du logiciel Copert que nous utiliserons par la suite, **seules les sources échappement et évaporation ont été retenues**. Pour ces deux sources d'émissions, une multitude de composés sont recensés (≈ 330). L'ensemble de ces polluants est présenté en Annexe 3.

Dans un premier temps, le groupe de travail a recensé l'existence de VTR pour l'ensemble des polluants sur les bases de données suivantes : IRIS de l'US-EPA, ATSDR, CIRC, OMS, RIVM, Health Canada. Pour les composés disposant de plusieurs VTR pour une même voie et même durée d'exposition, le groupe a sélectionné celle à retenir selon les critères suivants :

- sources de données validées, mode de calcul et hypothèses explicitées par les auteurs
- voie d'exposition et danger spécifique en cohérence avec des émissions automobiles et/ou valeur issue d'études chez l'homme et/ou valeur la plus récente
- valeur la plus conservatrice pour la santé.

Ainsi, les VTR utilisées dans note étude correspondent aux résultats de ce groupe de travail. Nous avons considéré que les critères de choix sont satisfaisants, et basés sur des recherches complètes. L'étude réalisée en Novembre 2004 présente des résultats récents. Il nous semblait donc cohérent et justifié d'utiliser ces VTR. Certaines VTR ont fait l'objet d'une réactualisation (l'acroléine par exemple). Certains composés ne disposent pas de VTR. Les recommandations OMS ont donc été choisies (CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>).

Dans l'environnement des parkings, deux expositions pourraient être considérées : ce sont les voies respiratoire et orale (ingestion par déglutition de particules en suspension). Cependant, pour une question de temps, nous avons restreint notre étude à la **voie respiratoire**, qui est la **voie majeure d'exposition** dans le cadre des parkings.

L'Annexe 4 présente pour chaque polluant considéré les effets observés, la valeur de la VTR, ainsi que la source et la date d'information.

### 3.3 Evaluation de l'exposition

#### 3.3.1 Voies d'exposition et population retenues

Nous avons retenu comme voies d'exposition l'inhalation d'air dans le parking et l'inhalation de particules en suspension.

On peut également retenir deux populations distinctes qui ne sont pas exposées sur des durées identiques :

- Le personnel salarié des parkings
- Le citoyen lambda qui se rend quotidiennement dans un parking dans le cadre de son travail par exemple.

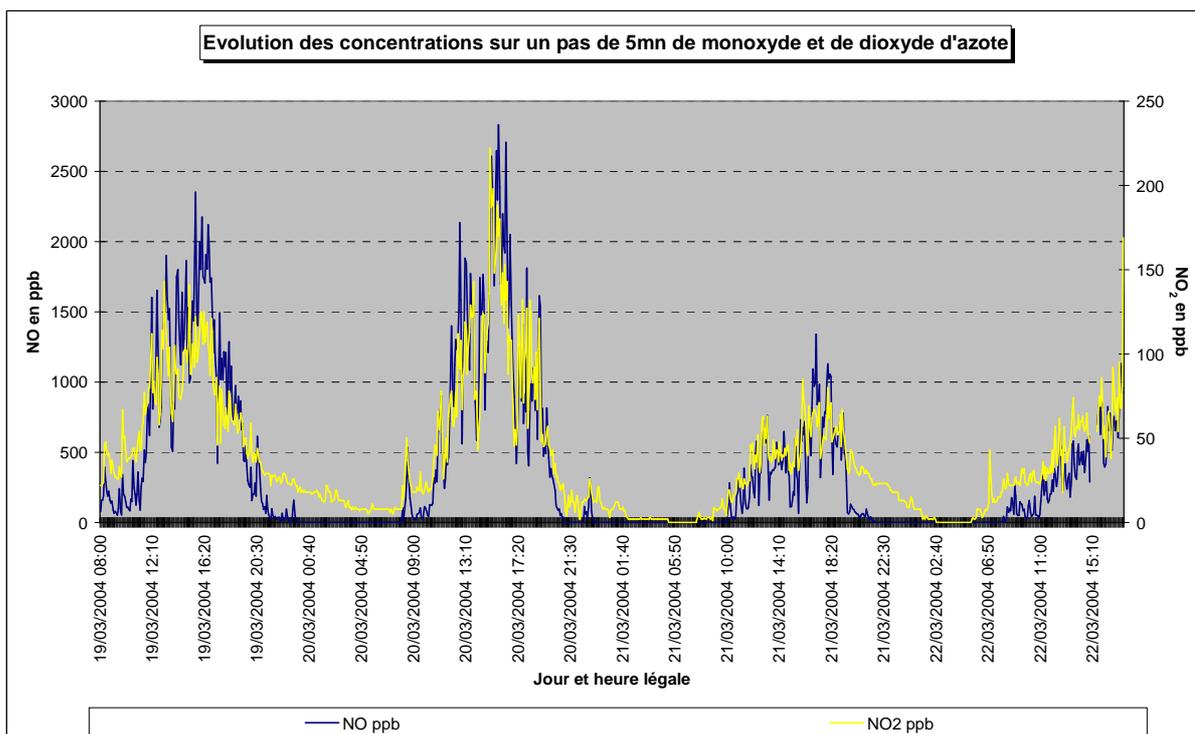
Par manque de temps, nous avons choisi de **nous intéresser seulement au cas de l'usager**.

#### 3.3.2 Quantification de l'exposition

##### A) Détermination des concentrations en polluants dans le parking

Nous disposons des résultats d'une campagne de mesures effectuée par le laboratoire central de la préfecture de Police de Paris, réalisée du 18 au 23 mars 2004 dans un parking souterrain de la région parisienne. Le parking est ventilé en conditions normales d'utilisation et sa capacité est comprise entre 1000 et 1500 places. Les CO, NO, NO<sub>2</sub> et PM<sub>10</sub> sont mesurés toutes les 5 minutes.

A titre indicatif, le Graphique 7 présente les concentrations de NO et NO<sub>2</sub> observées sur quatre de ces journées. On observe des variations périodiques caractérisées par des pics en début d'après-midi puis des concentrations nulles durant la nuit.



Graphique 7 : Evolution des concentrations de CO et NO<sub>2</sub> sur un pas de 5 min

Nous avons choisi les NO<sub>x</sub> comme référence pour calculer les concentrations des composés non mesurés. Les NO<sub>x</sub> correspondent à la somme des NO et des NO<sub>2</sub>. Pour savoir sur quelle durée moyenner les concentrations de NO<sub>x</sub> à utiliser pour les calculs, il faut étudier les VTR de chaque composé.

- Exposition aiguë :

Dans le cas des effets aigus, les VTR sont données pour des durées d'exposition précises (pour 10 minutes, 15 minutes, ... 1 heure, 2 heures, ...). Pour un composé y, nous calculons l'ensemble des moyennes mobiles pour la durée d'exposition précisée pour ce composé. La concentration de NO<sub>x</sub> que nous avons choisi d'utiliser est la moyenne mobile journalière maximale afin de caractériser l'exposition journalière la plus importante. La valeur maximale a été choisie pour se placer dans le cas le plus préjudiciable. Il a été vérifié que ce maximum ne correspond pas à des mesures aberrantes ni à des erreurs de mesures sur les analyses effectuées.

- Exposition chronique :

Pour les effets chroniques, les VTR ou ERU sont donnés pour des expositions vie entière (ou plus généralement longue durée). Deux scénarios d'exposition sont alors envisageables.

La première option consiste à utiliser la moyenne des concentrations en NOx sur les journées (8h-21h) de la période de la campagne de mesure. Il nous a paru préférable de considérer les journées et non les jours entiers comme unité de temps, afin de tenir compte des horaires plausibles d'utilisation des parkings. Nous appellerons cette exposition « Concentration moyenne journée » dans nos résultats.

La deuxième option est de se placer dans des conditions plus conservatrices. Nous estimons qu'un utilisateur passe en moyenne 30 minutes (2\*15 minutes) par jour dans un parking et cela 5 jours par semaine. Dans le scénario le plus pessimiste, l'utilisateur est dans le parking lorsque les concentrations sont les plus élevées. Dans ce cas, on choisira la valeur maximale des moyennes mobiles sur 30 minutes. Celle-ci s'appellera « Concentration maximale sur 30 min » dans notre présentation des résultats.

## B) Détermination des facteurs d'émission des polluants grâce au logiciel Copert

COPERT est une méthodologie européenne permettant le calcul des émissions du transport routier. Elle a été développée dans le but d'aider les experts nationaux à estimer la pollution due au trafic routier dans les inventaires d'émissions nationaux. Incorporée dans un programme informatique pour faciliter son utilisation (EEA, 2000), elle a été utilisée pour calculer les facteurs d'émissions des polluants sélectionnés par l'échappement et l'évaporation uniquement. **Nous ne pouvons donc pas tenir compte des émissions qui peuvent être dues aux équipements automobiles** (garniture de freins et pneumatiques notamment).

### a) Paramètres d'entrée du modèle Copert III

Les paramètres nécessaires à l'utilisation de ce logiciel sont très nombreux. Ils peuvent être classés en trois catégories : les caractéristiques du parc automobile, les conditions de circulation et la composition des carburants. Les données que nous avons utilisées sont présentées et expliquées ci-dessous.

### b) Caractérisation du parc automobile

La composition précise du parc national de véhicules a été déterminée par l'INRETS, selon la nomenclature Copert, pour toutes les grandes familles du parc français. Le modèle de l'INRETS fournit les projections des structures du parc automobile roulant et statique, année par année, jusqu'à l'horizon 2025. Comme cela a déjà été évoqué dans la partie 2.1, nous avons choisi de nous fier à ces données car il n'existe en France aucune

statistique réelle complète sur la composition du parc français. Dans un premier temps, nous utilisons les données de parc automobile pour l'année en cours, c'est-à-dire 2006.

Le parc automobile se caractérise par le **nombre de véhicules** qui circulent en 2006 (parc statique), ces véhicules étant stratifiés selon leur année de mise sur le marché, et donc selon la réglementation en vigueur concernant les limites d'émissions au moment de leur mise sur le marché. Ainsi, un véhicule circulant en 2006 mis sur le marché en 1995 respecte la norme Euro I alors que le même véhicule circulant en 2006 mais mis sur le marché en 2004 respecte la norme Euro III (l'Annexe 5 donne les correspondances entre l'année de mise en circulation et la norme concernée).

Une donnée complémentaire à ce parc statique est le parc roulant. Il est en effet important de connaître, pour chacune de ces catégories, le **kilométrage annuel parcouru** par l'ensemble des véhicules.

Enfin, il est nécessaire de renseigner le **type de cylindrée** des véhicules. Deux types de cylindrée sont proposés pour les véhicules particuliers diesel (inférieure ou supérieure à 2L), trois pour les véhicules particuliers essence (inférieure à 1,4L, entre 1,4 et 2L, supérieure à 2L).

On constate donc que de très nombreuses catégories de véhicules doivent être renseignées. Ceci est toutefois logique. En effet, comme nous l'avons vu dans la partie 2, le parc automobile connaît de nombreux changements, qui peuvent avoir des répercussions importantes sur les émissions de polluants. Il est donc important de renseigner le plus précisément possible ce parc.

Les valeurs des données d'entrée que nous avons utilisées (parc statique, parc roulant) pour chaque classe sont présentées dans les tableaux suivants.

*Tableau 4 : Parc automobile des véhicules particuliers diesel et kilométrage annuel total en 2006 (Source : INRETS, 2004)*

	VP diesel < 2 litres		VP diesel > 2 litres	
	nombre de véhicules	kilométrage total (km)	nombre de véhicules	kilométrage total (km)
<b>Pré-Euro I</b>	602 168	9 334 132 701	195 859	3 103 630 680
<b>Euro I-91/441/EEC</b>	1 301 420	22 575 151 730	323 806	5 831 187 749
<b>Euro II-94/12/EEC</b>	1 600 233	30 553 495 702	1 239 938	24 793 278 966
<b>Euro III-98/69/EEC étape 2000</b>	2 868 192	61 324 026 225	2 605 247	57 611 437 390
<b>Euro IV-98/69/EEC étape 2005</b>	669 417	13 185 194 062	548 672	11 198 332 366
<b>Euro V (post 2005)</b>	0	0	0	0

*Tableau 5 : Parc automobile des véhicules particuliers essence et kilométrage annuel total en 2006 (Source : INRETS, 2004)*

	VP essence < 1.4 litres		VP essence 1.4 à 2 litres		VP essence > 2 litres	
	nombre de véhicules	kilométrage total (km)	nombre de véhicules	kilométrage total (km)	nombre de véhicules	kilométrage total (km)
<b>Pré-ECE</b>	0	0	0	0	0	0
<b>ECE 15/00-01</b>	5 265	18 224 181	0	0	0	0

<b>ECE 15/02</b>	11 064	40 506 004	0	0	0	0
<b>ECE 15/03</b>	129 859	557 344 105	29 467	171 643 715	4 339	26 636 819
<b>ECE 15/04</b>	999 483	6 024 988 784	392 691	3 117 049 976	44 507	378 240 797
<b>Pré-Euro I amélioré</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Catalyse boucle ouverte</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Euro I-91/441/EEC</b>	1 426 876	11 393 788 305	493 014	5 196 030 056	44 874	491 133 946
<b>Euro II-94/12/EEC</b>	1 864 655	18 321 135 334	1 060 316	13 720 012 953	692 963	9 856 827 623
<b>Euro III-98/69/EEC étape 2000</b>	2 301 367	28 895 841 895	1 443 789	24 066 751 092	1 771 420	31 388 971 869
<b>Euro IV-98/69/EEC étape 2005</b>	395 595	5 051 586 376	280 733	4 738 393 832	372 809	6 659 538 044
<b>Euro V (post 2005)</b>	0	0	0	0	0	0

*c) Caractérisation des conditions de circulation*

Il convient de fixer les conditions de circulation du parc automobile considéré. Copert dispose de 3 conditions de circulation : urbain, rural et voie rapide (EEA, 2000).

Etant donné les conditions de circulation dans un parking, et donc les faibles vitesses de circulation, le mode urbain a été retenu. Il nous faut alors fixer la vitesse de circulation. Cette vitesse doit être d'autant plus faible qu'une part importante de la circulation dans les parkings est en fait constituée de manœuvres pour le stationnement. Toutefois, Copert n'est utilisable que pour des vitesses supérieures à 10 km/h. La vitesse de circulation retenue est donc celle-ci.

*d) Caractérisation de la température des moteurs des véhicules.*

Un véhicule chaud n'émet pas les mêmes quantités de polluants qu'un véhicule froid. Ce paramètre est donc également utilisé comme donnée d'entrée dans Copert.

COPERT propose des facteurs d'émission à chaud. Il s'agit de fonctions « émission à chaud » de véhicules dont le moteur et le catalyseur ont atteint des conditions de fonctionnement stabilisées après démarrage.

Les surémissions dues aux démarrages à froid sont conditionnées par l'état thermique du moteur et les performances du catalyseur qui, à leur tour, dépendent de la distance parcourue depuis un démarrage à froid et de la température ambiante. COPERT III propose des facteurs de surémission multiplicatifs à appliquer aux émissions à chaud pour la fraction de roulage parcourue à froid par les véhicules ; cette fraction de roulage à froid est appelée « facteur bêta ». Le facteur bêta dépend de la longueur moyenne de parcours des véhicules, mais également de la température ambiante (EEA, 2000 ; INVS, 2004). Faute de données, nous avons ici fait l'hypothèse que le facteur bêta conserve la même valeur quel que soit le type de véhicule.

La longueur moyenne de trajet en France est de 12 km, et 3 km en agglomération (INVS, 2004). Plus cette longueur moyenne est réduite, plus le logiciel considère que le nombre de démarrages des voitures augmente. Ainsi, pour tenir compte du nombre

important de démarrages dans les parkings, nous avons choisi une longueur moyenne de trajet de l'ordre de 1 km.

Nous avons fait l'hypothèse simplificatrice que le nombre de véhicules entrant et sortant d'un parking se compensent. Ainsi, la moitié d'entre eux arrivent à moteur chaud, l'autre moitié sort à moteur froid. Dans ces conditions, nous avons retenu un facteur bêta de 50%. Toutefois, il est plus probable que la plupart des véhicules entrent dans le parking le matin (à moteur chaud) et en ressortent le soir (à moteur froid).

Concernant la température ambiante, nous ne disposons pas des données dans le parking étudié. Toutefois, nous considérons que la température du parking est fortement liée à la température ambiante extérieure. Les températures entrées dans le modèle sont donc des températures moyennes mensuelles extérieures, données par défaut par Copert pour la France.

#### e) *Caractérisation de la composition des carburants*

Les émissions des véhicules sont fonction de la composition des carburants. Les données que nous avons utilisées pour 2006 nous ont été fournies par l'INRETS et sont consignées dans l'Annexe 6.

#### C) Paramètres de sortie de Copert III

A partir des données d'entrée présentées ci-dessus, le logiciel calcule les quantités de polluants émis pour la totalité des kilomètres effectués par le parc automobile caractérisé. Les résultats sont présentés selon trois types d'émission : émission à chaud, émission à froid et évaporation. Il convient alors de diviser les émissions totales par les kilomètres effectués. Nous obtenons alors des flux de polluant, appelés **facteurs d'émission**, en mg/km/véhicule.

### 3.4 Caractérisation des risques

La concentration d'un composé  $y$  est estimée par rapport au facteur d'émission donné par Copert de ce même composé  $y$ . Le rapport  $k$  permet de passer d'un facteur d'émission à une concentration dans un parking selon la relation suivante :

$$C_y = FE_y \times \left( \frac{C_{NO_x}}{FE_{NO_x}} \right) = FE_y \times k$$

Nous obtenons donc une concentration « estimée ».

- Exposition aiguë :

Les effets sont avec seuil. Il s'agit de calculer un quotient de danger :  $QD = \frac{C_y}{VTR_y}$

Le risque est acceptable si  $QD < 1$ .

- Exposition chronique, effet non cancérigène :

Il s'agit là aussi de calculer un quotient de danger, puisque l'on se situe toujours dans un effet avec seuil.

Nous avons distingué deux types d'expositions; puis calculé deux concentrations différentes :

- « Concentration maximale sur 30 min » pour une exposition 5 jours par semaine, 30 minutes par jour pendant les 30 minutes où la concentration est la plus importante.
- « Concentration moyenne journée » pour une exposition 5 jours sur 7, 30 minutes par jour pour une concentration moyenne calculée sur les horaires de bureau. Cela correspond à une personne se rendant 5 jours sur 7 dans un parking à horaires irréguliers.

Le QD s'exprime de la façon suivante :  $QD = \frac{C_y}{VTR_y} \times \frac{5 \text{ jours}}{7 \text{ jours}} \times \frac{30 \text{ min}}{60 \text{ min} \times 24 \text{ h}}$ .

Ce calcul permet d'obtenir le risque de développer tel symptôme pour la substance donnée, ce risque étant uniquement lié à la fréquentation des parkings. En effet, il est très complexe d'estimer l'exposition de la population aux substances sur une journée entière.

- Exposition chronique, effet cancérigène :

Nous calculons un excès de risque individuel attribuable. Les calculs sont les mêmes que pour les effets non cancérigènes mais les ERU étant calculés sur 70 ans, nous considérons deux cas de figure. La personne fréquente les parkings pendant 10 ou 45 ans de sa vie (vie active). Il convient donc d'appliquer un facteur correctif de 10 / 70 ou 45 / 70.

Comme pour les expositions chroniques non cancérigènes, deux expositions différentes sont caractérisées. Une exposition pendant le pire moment de la journée (pic de pollution) appelée « Concentration maximale sur 30min » et une exposition normale calculée à partir d'une concentration normale journalière que l'on nomme « Concentration moyenne journée ».

L'ERI se calcule de la façon suivante :

$$ERI = ERU \times C_y \times \frac{5j}{7j} \times \frac{30 \text{ min}}{60 \text{ min} \times 24 \text{ h}} \times \frac{\text{durée exp}(10 \text{ ou } 45 \text{ ans})}{70 \text{ ans}}$$

La dose et donc le risque est augmenté selon une quantité donnée par ce calcul. Il s'agit de la probabilité supplémentaire de développer l'effet associé à la substance pour la surexposition liée au parking.

Le calcul d'effet cancérigène nécessite de statuer sur l'acceptabilité du risque. L'OMS utilise généralement une valeur de  $10^{-5}$ .

Les résultats obtenus sont présentés dans les Tableau 6, Tableau 7 et Tableau 8. Les composés sont classés par risque décroissant.

### 3.4.1 Caractérisation du risque et classification des substances non cancérigènes pour une exposition aiguë par inhalation

Tableau 6 : Classification des substances non cancérigènes pour une exposition aiguë par inhalation

	Substance	Concentration	VTR	Durée d'exposition pour la VTR	Quotient de danger	Effet sanitaire
		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
1	acrolein	3,77E+01	6,98E+00	1h	5,40E+00	irritation oculaire et nasale
2	formaldéhyde	1,40E+02	6,00E+01	2h	2,33E+00	congestion des muqueuses
3	NO <sub>2</sub> <sup>(1)(2)</sup>	3,30E+02	2,00E+02	1h	1,65E+00	diminution fonction respiratoire
4	benzene	1,31E+02	1,10E+02	6h	1,19E+00	dégradation immunologiques
5	CO <sup>(1)(2)</sup> 30 minutes	3,65E+04	6,00E+04	30min	6,08E-01	effets neurologiques
6	CO <sup>(1)(2)</sup> 15 minutes	4,50E+04	1,00E+05	15min	4,50E-01	effets neurologiques
7	SO <sub>2</sub> <sup>(2)</sup> 10 minutes	8,54E+01	5,00E+02	10min	1,71E-01	diminution fonctions respiratoires
8	NH <sub>3</sub>	1,71E+02	1,20E+03	2h	1,42E-01	irritation voies respiratoires
9	m,p-xylene	1,20E+02	4,30E+03	4h	2,80E-02	
10	o-xylene	6,20E+01	4,30E+03	4h	1,44E-02	
11	toluene	2,15E+02	1,52E+04	6h	1,41E-02	effets neurologiques

<sup>(1)</sup> Composés dont la concentration a été directement mesurée dans le parking

<sup>(2)</sup> Il ne s'agit pas de VTR mais de valeurs guide de l'OMS

Quatre composés disposent de quotients de danger non acceptables présentant ainsi le risque de développer les effets sanitaires associés. **Le système de ventilation actuel n'assure donc pas la protection de la santé** car il ne permet pas de contrôler les effets de ces quatre composés. De surcroît, le QD est très nettement supérieur à 1 pour 2 composés autres que le polluant réglementé (CO) à savoir l'acroléine et le formaldéhyde. D'autre part, il faut remarquer que les recommandations en CO et NO<sub>2</sub> du CSHPF sont vérifiées. Cependant, il existe tout de même un risque.

Si la recommandation OMS était respectée pour le NO<sub>2</sub>, ces polluants pourraient tout de même être problématiques. En effet, une concentration en NO<sub>2</sub> abaissée à 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ramène les QD de l'acroléine, du formaldéhyde et du benzène à 3.3, 1.4 et 0.72 respectivement. Les recommandations OMS ne semblent donc pas protectrices au vu des émissions concomitantes d'autres polluants non visés par ces recommandations.

Rappelons toutefois que, dans ce cas, les QD ont été calculés à partir des facteurs d'émission et non des mesures directes de ces polluants. Plus que la prédiction d'un risque, ces résultats plaident pour l'inclusion de ces polluants dans la réflexion.

### 3.4.2 Caractérisation du risque et classification des substances non cancérigènes pour une exposition chronique par inhalation

Deux quotients de danger ont été calculés, selon que l'exposition se fasse durant les 30 « pires » minutes de la journée ou selon que l'exposition ait lieu pour une concentration moyenne journalière.

Tableau 7 : Classification des substances non cancérigènes pour une exposition chronique par inhalation

	Substance	Concentration $\mu\text{g}/\text{m}^3$		VTR $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Quotient de danger		Effet sanitaire
		moyenne journée	maximale sur 30min		moyenne journée	maximal sur 30min	
1	naphtalene	2,79E+03	8,21E+03	3,00E+00	1,38E+01	4,07E+01	effets respiratoires
2	acrolein	1,50E+01	4,43E+01	2,00E-02	1,12E+01	3,30E+01	lésions nasales
3	1,3-butadiene	1,32E+01	3,88E+01	2,00E+00	9,79E-02	2,89E-01	reproduction (atrophie ovarienne)
4	formaldehyde	6,10E+01	1,80E+02	9,84E+00	9,23E-02	2,72E-01	altération de l'épithélium nasal
5	NO <sub>2</sub> <sup>(1) (2)</sup>	1,49E+02	3,86E+02	4,00E+01	5,54E-02	1,44E-01	diminution de la fonction respiratoire
6	acetaldehyde	3,01E+01	8,87E+01	9,00E+00	4,98E-02	1,47E-01	dégénérescence de l'épithélium olfactif
7	PM 10 <sup>(1) (2)</sup>	6,38E+01	1,40E+02	2,00E+01	4,75E-02	1,04E-01	effets respiratoires
8	benzene	6,51E+01	1,92E+02	3,00E+01	3,23E-02	9,51E-02	diminution du nombre de lymphocytes
9	Ni	2,23E-02	6,56E-02	1,80E-02	1,84E-02	5,43E-02	effets sur le poumon
10	NH <sub>3</sub>	7,47E+01	2,20E+02	1,00E+02	1,11E-02	3,28E-02	effets respiratoires et irritatifs
11	Cd	3,19E-03	9,38E-03	5,00E-03	9,48E-03	2,79E-02	altération de la fonction rénale
12	Pb	2,84E-01	8,38E-01	5,00E-01	8,46E-03	2,49E-02	effets neurologiques
13	m,p-xylene	5,52E+01	1,63E+02	1,00E+02	8,21E-03	2,42E-02	troubles neurologiques
14	hexane	1,10E+02	3,25E+02	2,00E+02	8,20E-03	2,42E-02	neurotoxique
15	SO <sub>2</sub> <sup>(2)</sup>	2,55E+01	7,50E+01	5,00E+01	7,58E-03	2,23E-02	diminution des fonctions respiratoires
16	toluene	1,07E+02	3,15E+02	3,00E+02	5,31E-03	1,56E-02	effets neurologiques
17	o-xylene	2,84E+01	8,37E+01	1,00E+02	4,23E-03	1,25E-02	troubles neurologiques
18	Cr	1,59E-02	4,69E-02	1,00E-01	2,37E-03	6,98E-03	anomalie du liquide bronchoalvéolaire
19	Aromatics C9	3,35E+01	9,88E+01	4,00E+02	1,25E-03	3,67E-03	hypertrophie rénale
20	styrene	8,05E+00	2,37E+01	2,60E+02	4,61E-04	1,36E-03	effets neurologiques
21	ethylbenzene	2,79E+01	8,21E+01	1,00E+03	4,14E-04	1,22E-03	pb développement squelettique
22	methylethylcetone	5,20E+00	1,53E+01	5,00E+03	1,55E-05	4,56E-05	effets sur le développement foetal
23	acetone	1,47E+01	4,32E+01	3,09E+04	7,06E-06	2,08E-05	effets neurologiques (troubles visuels)

<sup>(1)</sup> Composés dont la concentration a été directement mesurée dans le parking

<sup>(2)</sup> Il ne s'agit pas de VTR mais de valeurs guide de l'OMS

**Pour 2 polluants**, à savoir le naphtalène, l'acroléine, **le risque est inacceptable** selon nos estimations. Ces risques sont à rapprocher des effets sanitaires qui leur sont associés : des effets respiratoires et des lésions nasales.

Ces quotients de danger montrent clairement que la réglementation actuelle ne suffit pas à protéger une personne exposée aux polluants d'un parking fermé, 5 jours par

semaine et à raison de 30 minutes par jour pendant 1 an, même en négligeant l'exposition extérieure.

### 3.4.3 Caractérisation du risque et classification des substances cancérigènes pour une exposition chronique par inhalation

Tableau 8 : Classification des substances cancérigènes pour une exposition chronique par inhalation

	Substance	Concentration $\mu\text{g}/\text{m}^3$		ERU $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$	ERI sur 10 ans d'exposition		ERI sur 45 ans d'exposition		Type de cancer
		moyenne journée	maximale sur 30min		moyenne journée	maximal sur 30min	moyenne journée	maximal sur 30min	
1	benzo(a)pyrene	3,09E+00	9,09E+00	1,10E-03	7,22E-06	2,13E-05	3,25E-05	9,57E-05	tumeurs du tractus
2	naphtalene	2,79E+03	8,21E+03	1,10E-06	6,52E-06	1,92E-05	2,93E-05	8,64E-05	données insuffisantes
3	Ni	2,23E-02	6,56E-02	3,80E-02	1,80E-06	5,30E-06	8,10E-06	2,39E-05	cancer pulmonaire
4	formaldéhyde	6,10E+01	1,80E+02	1,30E-05	1,69E-06	4,97E-06	7,59E-06	2,24E-05	cancer cavité nasale
5	Cr	1,59E-02	4,69E-02	4,00E-02	1,35E-06	3,99E-06	6,09E-06	1,79E-05	cancer pulmonaire
6	benzene ERU 1	6,51E+01	1,92E+02	2,20E-06	3,11E-07	8,89E-07	1,40E-06	4,00E-06	leucémie
	benzene ERU 2	idem	idem	7,80E-06	1,09E-06	3,33E-06	4,90E-06	1,50E-05	idem
7	1,3-butadiene	1,32E+01	3,88E+01	3,00E-05	8,39E-07	2,47E-06	3,78E-06	1,11E-05	leucémie
8	benzo(ghi)perylene	6,21E+00	1,83E+01	1,10E-05	1,45E-07	4,28E-07	6,54E-07	1,93E-06	données insuffisantes
9	acetaldéhyde	3,01E+01	8,87E+01	2,20E-06	1,41E-07	4,15E-07	6,34E-07	1,87E-06	cancer cavité nasale
10	acenaphtene	5,42E+01	1,60E+02	1,10E-06	1,27E-07	3,73E-07	5,70E-07	1,68E-06	données insuffisantes
11	anthracene	5,08E+00	1,50E+01	1,10E-05	1,19E-07	3,50E-07	5,35E-07	1,57E-06	données insuffisantes
12	fluoranthene	4,82E+01	1,42E+02	1,10E-06	1,13E-07	3,32E-07	5,07E-07	1,49E-06	données insuffisantes
13	pyrene	4,23E+01	1,25E+02	1,10E-06	9,90E-08	2,92E-07	4,46E-07	1,31E-06	données insuffisantes
14	Cd	3,19E-03	9,38E-03	1,80E-03	1,22E-08	3,59E-08	5,49E-08	1,62E-07	cancer pulmonaire

Remarque : nous disposons de 2 ERU pour le benzène. Deux ERI sont donc calculés.

Pour certains polluants comme le **benzo(a)pyrène** et le **naphtalène**, le risque n'est pas acceptable pour une exposition sur 45 ans à des concentrations moyennes journalières.

Si on se place dans des conditions défavorables d'exposition, à savoir une exposition de 30 minutes par jour pendant les pics de pollution, la liste de polluants dont le ERI est supérieur à  $10^{-5}$  est bien plus longue. Il faut alors y ajouter le nickel, le formaldéhyde, le chrome, le benzène et le 1,3-butadiène.

Dans cette évaluation, nous nous sommes placés dans des conditions limites, mais envisageables. Une analyse de sensibilité permet de compléter cette étude mais on peut néanmoins déjà penser que la réglementation actuelle ne permet pas de garantir un risque suffisamment bas pour être acceptable.

### 3.4.4 Analyse de sensibilité du modèle Copert

Nous avons réalisé une analyse de sensibilité du modèle, pour voir si les valeurs choisies pour ces paramètres ont un rôle important ou non sur les résultats. Trois

paramètres ont été testés (Tableau 9) : le facteur bêta, la vitesse moyenne de circulation et le kilométrage annuel moyen. Nous avons choisi ces paramètres car ce sont ceux pour lesquels l'incertitude nous semble la plus élevée : en effet, il s'agit de valeurs non fixées, qui dépendent des conditions de circulation dans le parc.

Tableau 9 : Valeurs testées pour l'analyse de sensibilité

Facteur	Valeur de référence (utilisée dans l'étude)	Valeurs testées	
Bêta	50 %	20 %	80 %
Vitesse moyenne de circulation	10 km/h	-	20 km/h
Kilométrage annuel moyen par véhicule	16 000 km	10 000 km	20 000 km

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant (les HAP ne figurent pas dans le tableau car aucun changement n'est observé sur leurs émissions) :

Tableau 10 : Sensibilité du modèle aux paramètres bêta, vitesse et kilométrage (exprimé en % de surémissions ou sous émissions par rapport à la situation de référence)

		Facteur bêta	Vitesse	Kilométrage	
		80 %	20 km/h	10000 km	20000 km
Substances réglementées	CO	+ 27%	-21%	-	-
	NOx	+ 5%	-13%	-	-
	PM	+ 21%	-24%	-	-
	NH <sub>3</sub>	-	-	-	-
	SO <sub>2</sub>	+ 3%	-	17%	-2%
métaux	Pb	+ 11%	-	24%	5%
	Cd	+ 3%	-	17%	-2%
	Cr	+ 3%	-	17%	-2%
	Ni	+ 3%	-	17%	-2%
alcane	hexane	- 30%	- 2%	4%	-1%
alcène	1,3-butadiene	+ 29%	-24%	-	-
aldéhydes	formaldehyde	+ 24%	-24%	-	-
	acetaldehyde	+ 24%	-24%	-	-
	acrolein	+ 23%	-24%	-	-
cétones	acetone	+ 26%	-22%	-	-
	methylethylketone	+ 22%	-25%	-	-
aromatiques	toluene	+ 29%	-20%	-	-
	ethylbenzene	+ 29%	-28%	-	-
	m,p-xylene	+ 29%	-21%	-	-
	o-xylene	+ 30%	-26%	-	-
	styrene	+ 35%	-17%	-	-
	benzene	+ 25%	-20%	-	-
	Aromatics C9	+ 35%	-18%	-	-

Remarque : Pour  $\beta = 20\%$ , on observe les mêmes valeurs que pour  $\beta = 80\%$ , sauf qu'il s'agit de sous-émissions au lieu de surémissions, hormis pour les composés SO<sub>2</sub>, Pb, Cd, Ni, et hexane ou il s'agit de surémissions.

On constate que la variation du facteur bêta entraîne une variation des émissions de la plupart des polluants, même si ces variations sont très faibles pour certains d'entre eux. Les variations les plus fortes atteignent 35 %. Le facteur vitesse n'a pas d'influence sur les émissions de NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> et métaux. La variation maximale atteint 28 % pour l'éthylbenzène. Enfin, le facteur kilométrage n'exerce une influence significative que sur le SO<sub>2</sub> et les métaux.

De manière générale, les variations observées peuvent sembler relativement faibles. Toutefois, il s'agit de variations unitaires (par véhicule) ; si l'on applique ces pourcentages à l'ensemble d'un parc, les variations d'émissions peuvent alors devenir significatives.

Il faut noter que nous n'avons pas étudié ici l'effet de la variation simultanée des différents facteurs, qui entraîne certainement des antagonismes ou synergies entre les polluants.

### 3.5 Discussion

#### 3.5.1 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus pour les différentes expositions selon nos hypothèses de calcul sont sans appel. Les parkings posent un problème de santé publique, que ce soit pour les expositions aiguës ou chroniques. Même si les recommandations OMS en matière de CO et NO<sub>2</sub> étaient respectées, les risques ne seraient pas acceptables.

Le tableau ci-dessous résume les polluants pour lesquels les risques sont inacceptables, dans des conditions moyennes d'exposition (concentrations moyennes sur une journée) sur 45 ans :

*Tableau 11 : Résumé des expositions à risque par inhalation pour les polluants les plus préoccupants*

substance	Exposition aiguë	Exposition chronique Effet non cancérigène	Exposition chronique Effet cancérigène
naphtalène		X	X
benzo(a)pyrène			X
formaldéhyde	X		
acroléine	X	X	
NO <sub>2</sub>	X		
benzène	X		

Rappelons qu'en ce qui concerne les expositions chroniques, seules les expositions dans les parkings ont été considérées par manque de donnée des concentrations de tous les polluants à l'extérieur des parkings.

Or il est clair que l'air présent en milieu extérieur, notamment en milieu urbain, n'est pas exempt de pollution. Cette pollution atmosphérique urbaine contribue également à l'exposition de la population pour des expositions chroniques.

Si l'on prend l'exemple du calcul du QD chronique pour un composé y, le calcul serait le suivant si toutes les expositions étaient considérées :

$$QD = \underbrace{\frac{C_{y,parking}}{VTR_y} \times \frac{5 \text{ jours}}{7 \text{ jours}} \times \frac{30 \text{ min}}{60 \text{ min} \times 24 \text{ h}}}_{\text{1er terme}} + \underbrace{\frac{C_{y,extérieur}}{VTR_y} \times \frac{5 \text{ jours}}{7 \text{ jours}} \times \frac{23,5 \text{ h}}{24 \text{ h}}}_{\text{2ème terme}} + \underbrace{\frac{C_{y,extérieur}}{VTR_y} \times \frac{2 \text{ jours}}{7 \text{ jours}}}_{\text{3ème terme}}$$

Le 1<sup>er</sup> terme représente le QD lié à l'exposition dans le parking, donc 5 jours sur 7 et 30 minutes par jour.

Le 2<sup>ème</sup> terme représente le QD lié à l'exposition à l'extérieur du parking pendant ces mêmes 5 jours. Il reste donc 23 h 30 d'exposition.

Le 3<sup>ème</sup> terme représente le QD lié à l'exposition à l'extérieur du parking les 2 jours restant de la semaine et ce 24 h sur 24.

Cette expression montre clairement qu'en ne considérant que l'exposition dans le parking, les risques sont sous estimés. En effet, les autres termes s'additionnent et donc le QD augmente. Malgré cette sous estimation, les résultats montrent que la fréquentation des parkings engendre des risques inacceptables selon nos hypothèses.

De plus, en ce qui concerne les excès de risques individuels, le calcul a été légèrement majoré. En effet, un ERI est l'excès de risque de développer telle pathologie liée à l'exposition supplémentaire. Il aurait donc fallu calculer les ERI à partir des concentrations des polluants dans les parkings soustraites des concentrations présentes à l'extérieur, que l'on nomme bruit de fond.

Un individu uniquement exposé au bruit de fond présente un ERI suivant :

$$ERI_{ext} = ERU_y \times \frac{10 \text{ ou } 45 \text{ ans}}{70 \text{ ans}} \times C_{y,ext} \times \frac{24 \text{ h}}{24 \text{ h}} \times \frac{7 \text{ j}}{7 \text{ j}} \quad (1)$$

Un individu exposé au parking en plus du bruit de fond présente un ERI suivant :

$$ERI = ERU_y \times \frac{10 \text{ ou } 45 \text{ ans}}{70 \text{ ans}} \times \left( C_{y,ext} \times \frac{23,5 \text{ h}}{24 \text{ h}} \times \frac{5 \text{ j}}{7 \text{ j}} + \left( C_{y,ext} + \Delta C_{y,parking} \right) \times \frac{0,5 \text{ h}}{24 \text{ h}} \times \frac{5 \text{ j}}{7 \text{ j}} + C_{y,ext} \times \frac{2 \text{ j}}{7 \text{ j}} \right) \quad (2)$$

L'excès de risque dû à l'exposition dans le parking est donc la soustraction de ces deux expressions (2) – (1).

$$\text{Il est égal à : } ERI_{parking} = ERU_y \times \frac{10 \text{ ou } 45 \text{ ans}}{70 \text{ ans}} \times \Delta C_{y,parking} \times \frac{0,5 \text{ h}}{24 \text{ h}} \times \frac{5 \text{ j}}{7 \text{ j}}$$

$\Delta C_{y,parking}$  étant bien la **concentration en excès** présente dans le parking.

Il est intéressant de comparer les concentrations dans les parkings mesurées sur une journée entière aux concentrations en milieu urbain. Pour cela, des concentrations en milieu urbain fournies par Airparif permettent d'évaluer le ratio des concentrations dans le parking sur les concentrations à l'extérieur :

Tableau 12 : Comparaison des concentrations en CO, NO<sub>2</sub> et PM<sub>10</sub> mesurées dans l'agglomération parisienne et dans le parking

(Source : Airparif, 2005)

Polluant	Unité	Concentration moyenne dans Paris de février à mars	Concentration moyenne dans le parking étudié	Ratio concentration parking / concentration agglomération
NO <sub>2</sub>	µg/m <sup>3</sup>	49	94	2
CO	µg/m <sup>3</sup>	1024	8050	8
PM <sub>10</sub>	µg/m <sup>3</sup>	23	45.9	2

Ce tableau montre que les concentrations sont plus élevées dans les parkings que dans l'air extérieur en milieu urbain.

On peut approfondir la question en prenant en compte l'exposition extérieure et calculer la contribution des parkings sur le risque chronique non cancérigène (QD chronique).

Tableau 13 : Contribution de l'exposition du parking sur l'exposition totale concernant l'exposition chronique pour deux substances non cancérigènes (QD chronique)

Polluant	VTR (µg/m <sup>3</sup> )	QD lié à l'exposition hors parking	QD total lié à toutes les expositions	Contribution du parking pour le QD
NO <sub>2</sub>	40	1,23	1,26	3,0%
PM <sub>10</sub>	20	1,15	1.18	2,7%

En ce qui concerne les expositions chroniques, les parkings ne contribuent que faiblement aux risques (3% environ). Il est évident que le problème n'est pas le même pour un travailleur qui fréquente les parkings 8 heures par jour.

Toutefois, ce calcul prouve que le risque lié à l'exposition quotidienne aux PM<sub>10</sub> et au NO<sub>2</sub> n'est absolument pas acceptable.

Ceci conforte un fait déjà bien établi : **la pollution atmosphérique en milieu urbain est inacceptable et pose un réel problème de santé publique**, et les parkings fermés n'ont pas été construits pour arranger la situation.

### 3.5.2 Degré de confiance des VTR

La plausibilité des VTR des substances pour lesquelles le quotient de danger est supérieur à 0,1 ou l'excès de risque unitaire supérieur à  $10^{-6}$  est commentée ci-après afin de classer les différentes substances en fonction du degré de confiance de leur VTR.

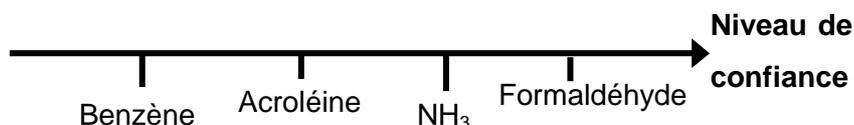
Nous avons établi une hiérarchisation des différentes VTR pour les expositions aiguës et chroniques. Nos critères de classement sont les suivants :

- Etude humaine ou animale
- Etude épidémiologique versus étude toxicologique
- Nombre d'études précédentes ayant contribué à la détermination de la VTR
- Facteur de correction appliqué pour passer de l'animal à l'homme, ou pour la variabilité interhumaine, etc.
- Indice de confiance de la USEPA si la VTR du composé provient de cette base de donnée

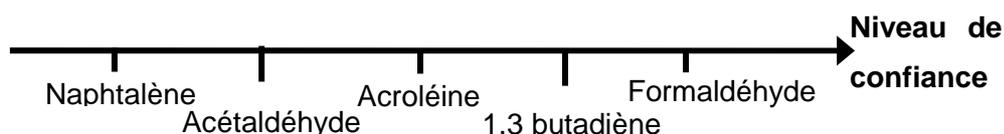
Pour chaque polluant, ces critères sont détaillés en Annexe 7.

Le classement des substances par rapport à la plausibilité de leur VTR est établi pour les 3 types d'exposition :

- Substances concernées pour une exposition aiguë

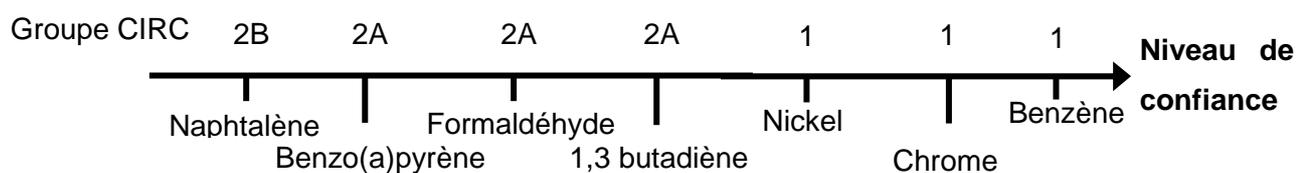


- Substances non cancérigènes concernées pour une exposition chronique



- Substances cancérigènes concernées pour une exposition chronique

L'appartenance aux groupes définis par le CIRC est également renseignée (Groupe 1 : cancérogène pour l'homme, Groupe 2A : cancérogène probable pour l'homme, Groupe 2B : cancérogène possible pour l'homme, Groupe 3 : inclassable).



### 3.5.3 Limites liées à l'utilisation du logiciel Copert

#### A) Facteurs d'émission

Tous les polluants considérés dans la méthodologie Copert ne sont pas pris en compte avec le même degré de fiabilité. Les polluants sont répartis en quatre groupes (EEA, 2000) :

- **Groupe 1** : polluants pour lesquels une méthodologie détaillée a pu être établie ; pour ceux-ci, des facteurs d'émission ont été établis pour différentes conditions de circulation et différents états de fonctionnement du moteur et du système de post-traitement des polluants émis (catalyseurs).
- **Groupe 2** : polluants quantifiés à partir de la consommation de carburant, avec le même « niveau de méthodologie » que le groupe 1.
- **Groupe 3** : polluants dont la quantification est basée sur une méthodologie simplifiée, car le nombre de véhicules et de conditions de circulation pris en compte pour les estimations des FE est assez faible.
- **Groupe 4** : une soixantaine de COV individualisés, dont les émissions sont exprimées sous forme d'une fraction des COV non méthaniques totaux ; une répartition distincte des COVNM émis à l'échappement est fournie pour différentes technologies de véhicules (VL essence non catalysés, VL essence catalysés, VL diesel, PL diesel) ; les émissions de 26 substances de la famille des HAP sont fournies pour différentes technologies (VL essence non catalysés, VL essence catalysés, VL diesel à injection directe, VL diesel à injection indirecte, PL diesel).

*Tableau 14 : Degré de fiabilité des facteurs d'émissions donnés par Copert pour les polluants étudiés (Source : EEA, 2000)*

Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
Fiabilité élevée	Fiabilité moyenne	Fiabilité faible	Fiabilité très faible
CO NOx COV totaux PM	SO2 Métaux lourds (Pb, Cd, Cr, Ni)	NH3 HAP totaux	<b>COVNM</b> : hexane, 1,3-butadiène, acétaldéhyde, acroléine, acétone, formaldéhyde, méthyléthylcétone, toluène, éthylbenzène, m,p-xylène, o-xylène, benzène, styrène, aromatiques C9 <b>HAP</b> : benzo(a)pyrène, acenaphthène, naphthalène, anthracène, pyrène, fluoranthène, benzo(ghi)perylène

Remarques :

- Les valeurs d'émission de NH<sub>3</sub> sont basées sur des études bibliographiques. Les valeurs indiquées doivent donc être considérées comme de premières estimations, et refaire l'objet de campagnes de mesures.

- Les valeurs retenues pour les spéciations de COV résultent d'une étude bibliographique publiée par le BUWAL (Ministère de l'Environnement Suisse) en 1994. Il faut donc rester prudent sur les résultats obtenus.

## B) Conditions d'application de Copert

Copert III ne propose que le paramètre « vitesse moyenne de circulation » pour décrire les conditions de circulation. Il ne prend pas en compte les variations de vitesse qui conduisent à cette valeur moyenne. Ainsi, dans le cadre de notre étude, cela semble constituer une limite importante puisque les accélérations et décélérations au sein d'un parking sont fréquentes. Ainsi, il semble que le modèle sous-estime les facteurs d'émission dans de telles conditions de circulation.

De plus, il reste des incertitudes quant aux surémissions dues aux fréquents démarrages à froid. Le modèle n'est pas fait, à priori, pour calculer les émissions dans un parking. Pour pallier ce problème, nous avons choisi de diminuer le trajet moyen de parcours des véhicules. Il semblerait toutefois que là encore, les émissions soient sous-estimées.

Enfin, il faut rappeler que le modèle Copert ne permet pas de calculer les émissions dues aux équipements des véhicules, comme les pneumatiques ou les freins. Ainsi, les émissions de certains polluants seront sous-estimées. Sont concernés par cette sous-estimation le cadmium, le baryum, le nickel, le chrome et le benzo(a)pyrène.

Des incertitudes existent donc sur ce modèle quant aux résultats variables selon les polluants étudiés et les situations de trafic analysées. Toutefois, il présente l'avantage d'avoir fait l'objet d'une large coopération européenne pour son développement et de mises à jour régulières, au fur et à mesure de l'avancée des connaissances. Il fait l'objet d'un large consensus d'acteurs européens en faveur de son utilisation pour de nombreuses applications d'estimation d'émissions de polluants du transport routier.

### 3.5.4 Discussion sur les hypothèses de calcul

➤ Les valeurs de concentrations utilisées pour les calculs de QD et ERI découlent directement (mesures directes pour NO<sub>2</sub>, CO) ou indirectement (FE dans Copert et concentration en NO<sub>x</sub> mesurées) des résultats de la campagne de mesure effectuée. Or cette campagne de mesure a été effectuée dans un seul parking. On peut donc se poser la question de la validité de nos résultats dans d'autres parkings et de la légitimité à transposer les concentrations obtenues à d'autres parkings. **Pour savoir si le parking**

**étudié est représentatif de l'ensemble des parkings, il faudrait faire d'autres campagnes de mesures sur d'autres établissements et comparer les résultats.**

- Par manque de temps, nous n'avons considéré que l'exposition par la voie respiratoire. Toutefois, il serait **intéressant de prendre en compte la voie orale**. En effet, l'ingestion de certains polluants n'est peut-être pas négligeable.
- Les polluants qui ont pu faire l'objet d'un calcul de risque disposent d'une VTR et d'un facteur d'émission. Comme il a été constaté précédemment, il ne s'agit que d'une faible fraction de l'ensemble des polluants émis à l'échappement et à l'évaporation. Il convient donc de rappeler que tous les polluants n'ont pas été pris en compte. Les résultats pourront être complétés pour ces autres polluants suivant l'acquisition de connaissance relative à leur dangerosité et à leur concentration dans les parkings.
- Les excès de risque et les quotients de danger sont calculés pour chaque polluant. Cependant, les personnes sont exposées à l'ensemble des polluants étudiés. Nous n'avons pas tenu compte ici de cette exposition à un **cocktail de polluants**. En effet, il n'y a pas de consensus actuel sur une méthode permettant de prendre en compte les effets des mélanges (synergie, antagonisme). Il s'agit d'une limite méthodologique de l'évaluation des risques sanitaires.
- Afin de calculer les concentrations dans le parking à partir des FE du modèle, le facteur de corrélation k a été utilisé. Ceci a engendré une hypothèse : **les concentrations de tous les polluants sont corrélées à celles en NOx**. Or rien ne permet concrètement de l'affirmer.

Il est intéressant de comparer les concentrations mesurées dans le parking aux concentrations évaluées à partir des FE de Copert (Tableau 15). Il est uniquement possible de faire cette comparaison pour le CO (il n'est pas possible de comparer les concentrations en particules car Copert évalue l'émission de la totalité des particules, alors que seules les PM<sub>10</sub> ont été mesurées dans le parking).

*Tableau 15 : Comparaison des concentrations maximales du CO mesurées dans le parking et estimées à partir des FE de Copert*

Substance	Concentration maximale de la substance sur la période considérée (µg/m <sup>3</sup> )		Pourcentage d'erreur	Ratio concentration calculée/mesurée
	mesurée dans le parking	calculée à partir du FE de Copert		
CO 15 min	4,50E+04	5,62E+04	25%	1,2
CO 30 min	3,65E+04	5,02E+04	38%	1,4

Les pourcentages d'erreur du CO sont relativement faibles. Nous vérifions ainsi une adéquation entre les mesures du parking et les concentrations évaluées par Copert. Il est à rappeler que le FE du CO appartient au groupe de polluants présentant un FE fiable (groupe1). Cette comparaison nous permet de valider l'utilisation de Copert, et conforte les résultats obtenus notamment pour les polluants du groupe1.

➤ Concernant les expositions chroniques, l'évolution des émissions au fil du temps n'a pas été prise en compte. En effet, nous avons considéré que la personne était exposée pendant 10 à 45 ans à la même concentration. Toutefois, du fait de l'évolution des normes d'émission, cette hypothèse ne se vérifie pas. Il semblerait donc que cela surestime le risque.

Afin de mieux caractériser les évolutions des concentrations, on se propose de calculer quel sera le risque en 2020. Les tableaux de résultats sont présentés en Annexe 8.

- Pour une exposition aiguë

Les calculs effectués montrent clairement que les risques associés à une exposition aiguë diminuent au cours du temps.

- Pour une exposition chronique concernant les substances non cancérigènes

De manière générale, les concentrations et donc les risques diminuent au cours du temps.

Pour trois autres polluants, on constate également une augmentation du risque, mais la tendance n'est pas représentative compte tenu des incertitudes de l'étude.

- Pour une exposition chronique concernant les substances cancérigènes

Les concentrations des polluants cancérigènes, dont les risques sanitaires sont les plus préoccupants, sont en baisse ou en augmentation non significative (seuil de variation de 30 %). Seul l'acénaphthène présente un risque en augmentation significative.

## 4 Gestion des risques

Les résultats obtenus, ainsi que leur discussion permettent d'aboutir à des recommandations et à des propositions de mesures de gestion.

### 4.1 Actions sur le milieu

L'évaluation a mis en avant plusieurs composés présentant un quotient de danger ou un excès de risque individuel non acceptable. Nous avons donc discuté la fiabilité de ces résultats au travers de l'étude de fiabilité des VTR et des facteurs d'émissions.

Afin de proposer des moyens de gestions les plus adaptés, il faut connaître le degré de confiance que l'on porte aux résultats. Quatre cas sont envisageables.

- VTR fort degré de confiance et FE fiable

Pour un composé présentant un risque inacceptable, c'est la combinaison d'un FE fiable et d'une VTR à fort degré de confiance, qui confortera et appuiera les valeurs de QD ou d'ERI calculées. Pour ces composés, des **mesures de prévention** peuvent être proposées pour réduire leurs concentrations dans les parkings et garantir une atmosphère sans risque.

Le moyen d'action présentant la plus grande faisabilité consiste à **asservir les systèmes de ventilation à la concentration en polluant**. Il y a deux possibilités pour assurer cet asservissement :

- le composé en question est facilement **mesurable en routine**, il peut alors commander directement la ventilation
- le composé n'est pas facilement mesurable, on corrèle sa concentration à la concentration d'un composé (**indicateur de pollution**) facilement mesurable en routine qui commandera alors la ventilation.

Les concentrations et périodes à respecter seront calculées en fonction des VTR ou des valeurs guide à respecter pour ce polluant.

Appartenant à cette catégorie de polluant, on peut recenser

- le *Nickel*, le *Chrome* qui sont deux cancérigènes certains, et dont les FE appartiennent au 2ème groupe. Certes les FE sont relativement fiables, mais concernent exclusivement l'évaporation et l'échappement. Leurs concentrations sont certainement sous-estimées. On ne peut donc pas envisager directement des mesures de gestions basées sur nos valeurs. Nous préconisons donc des

analyses en Ni et en Cr pour conforter nos résultats, et justifier les mesures de prévention.

- VTR fort degré de confiance et FE non fiable

Un composé à risque dont la VTR dispose d'une assez bonne confiance mais dont le FE n'est pas fiable (polluant des groupes 3 ou 4 selon Copert), nécessite une phase d'étude complémentaire. Des études scientifiques ont bien caractérisé le danger, cependant l'exposition n'est pas bien définie.

Des **campagnes de mesures de ce polluant** peuvent ainsi être préconisées (plusieurs campagnes de mesure dans des parkings différents seraient nécessaires pour obtenir une bonne représentativité). Les concentrations obtenues aboutissent au calcul de nouveaux QD ou ERI. Les composés présentent alors une VTR et une exposition fiables. Si un risque inacceptable est calculé, ils pourront faire l'objet des mesures de gestion exposées précédemment.

Les composés de ce groupe sont :

- le *benzène* qui est un cancérigène certain mais dont le facteur d'émission utilisé pour le calcul d'ERI appartient au groupe 4, le moins fiable.
- le *formaldéhyde* pour ses effets chroniques et aigus
- l'*acroléine* et le  $NH_3$  pour leurs effets aigus
- le *1-3 butadiène* pour ses effets chroniques.

- VTR faible degré de confiance et FE fiable

Les composés de ce groupe disposent de VTR ne bénéficiant pas d'un fort degré de confiance. Il existe donc une incertitude scientifique quant à la valeur de la VTR. Selon les composés, deux possibilités sont envisageables :

- le composé présente un QD ou ERI calculé élevé et le danger concerne une pathologie grave. On estime qu'**il faut agir par principe de précaution**. Dans ce cas, on détermine les objectifs de la ventilation par rapport à ce composé en utilisant la VTR disponible. En parallèle, on doit surveiller l'avancement des recherches sur ce composé.
- L'ERI est de l'ordre de  $10^{-6}$  ou le QD est compris entre 0.1 et 1. On estime qu'il n'y a pas urgence à agir, et qu'il n'est pas nécessaire d'agir par précaution. Dans

ce cas, suivre l'avancement des recherches toxicologiques ou épidémiologiques pour une meilleure confiance du danger est à préconiser.

Il n'y a pas de composés appartenant à cette catégorie.

- VTR faible degré de confiance et FE non fiable.

Dans le cas de composés dont le calcul de risque a été effectué avec des VTR et FE à faible degré de confiance, on estime que les incertitudes sont telles qu'aucune action n'est directement envisagée. Des **recherches supplémentaires** doivent être préconisées tant sur l'exposition (mesure de concentrations), que sur le danger (suivi des recherches scientifiques sur la dangerosité du polluant).

Parmi ces composés, on peut citer :

- l'*acétaldéhyde*.
- le *benzo(a)pyrène* et le *naphtalène*. Ces deux composés ne disposent pas d'une VTR ni d'un FE fiable. (L'ERU du naphtalène est notamment déterminé à partir d'un facteur d'équivalence toxique). Cependant, les risques calculés sont très élevés :  $ERI \approx 2.10^{-5}$  pour les deux composés et  $QD \approx 14$  pour le naphtalène en exposition chronique. Ainsi, nous pouvons préférentiellement préconiser des campagnes de mesures spécifiques à ces deux polluants. Si des concentrations élevées sont observées, alors des mesures de précaution devront être envisagées.

- Cas particulier des polluants à valeur guide.

Pour le  $NO_2$ , le CO et les  $PM_{10}$ , les concentrations utilisées pour les calculs de risque proviennent de mesures directes dans le parking. L'exposition à ces composés est donc fiable. D'autre part, ils disposent de valeurs guides définies par l'OMS. Ces valeurs guide sont des valeurs de gestion qui doivent être respectées dans les parcs de stationnement fermés. Il s'agit donc de **mesures de prévention pour s'assurer du respect des recommandations**

- Le  $NO_2$  pour ses effets aigus et chroniques, le CO pour ses effets aigus. Le CO fait déjà l'objet de mesures en routine et le CSHPF recommande également la mesure du  $NO_2$ . Il existe des risques non négligeables, notamment pour le  $NO_2$ . Il semble donc cohérent de maintenir les systèmes déjà en place et de le compléter par la mesure du  $NO_2$ .
- Les  $PM_{10}$ , pour ses effets chroniques ont directement été mesurées dans le parking ; quant au  $SO_2$  (effets aigus), il bénéficie d'un FE du deuxième groupe.

Selon les méthodes d'analyses disponibles, il conviendra de choisir entre un asservissement de la ventilation direct ou via l'utilisation d'un indicateur.

Pour les composés que nous proposons de mesurer en routine, le Tableau 16 présente les techniques utilisées. Pour les composés pour lesquels nous avons préconisé des campagnes de mesures complémentaires, l'Annexe 9 présente la faisabilité des mesures.

Tableau 16 : Techniques de mesures automatiques  
(Sources : Robin D., 2004 et AFNOR 1999)

Composé	NO2	PM 10		CO	SO2
Méthode	Analyseur à chimiluminescence	TEOM <sup>(1)</sup>	Jauge bêta	Analyseur par corrélation IR	Analyseur fluorescence UV
Norme	NFX 43-018			NFX 43-044	NFX 43-019
Coût	Elevé : - Investissement : ≈ 15000 € - Fonctionnement : 2000 €/mois	Elevé	Elevé		Elevé
Incertitude	< 15%	< 25%	< 25%		< 15 %
Mise en oeuvre	Enceinte climatisée – électricité Bonne maîtrise du raccordement des gaz	Enceinte climatisée Bonne maîtrise du raccordement des débits	Enceinte climatisée Bonne maîtrise du raccordement des débits	Enceinte climatisée – électricité	Enceinte climatisée Bonne maîtrise du raccordement des gaz
Donnée	Quart horaire	Quart horaire à tri horaire	Quart horaire à tri horaire		Quart horaire
Teneurs	0,35 ppb à 10 ppm			50 ppb à 200 ppm	Quelques µg/m <sup>3</sup> (>1ppb)

<sup>(1)</sup> TEOM : Tapered Element Oscillating Microbalance

#### Choix entre mesures directes et utilisation d'un indicateur :

Il convient donc de faire un choix entre les systèmes d'asservissement de la ventilation. Si le composé est facilement mesurable et à faible coût, on peut envisager d'équiper chaque parking de ces méthodes automatiques. On peut également envisager d'utiliser un **unique indicateur** qui contrôlerait l'ensemble des polluants en régulant le polluant le plus à risque.

Il est légitime d'utiliser un des deux composés recommandés par le CSHPF, à savoir le NO<sub>2</sub> ou le CO : en effet, la mesure en continu des autres composés présente des incertitudes plus importantes.

Rappelons que le CO est majoritairement émis par les moteurs essence, alors que le NO<sub>2</sub> est plus spécifique aux moteurs diesel. Or, la tendance de la part des véhicules diesel est à l'accroissement. Ainsi une hausse de la proportion de NO<sub>2</sub> par rapport au CO est à envisager. De ce fait, il semble que le NO<sub>2</sub> soit un indicateur plus pertinent à long terme. D'autre part, le risque attribuable au NO<sub>2</sub> est plus élevé que pour le CO ; ceci conforte le **choix du NO<sub>2</sub> comme indicateur**.

Cependant, nous ne pouvons déterminer à l'heure actuelle quels polluants il conviendra de contrôler. En effet, des mesures directes complémentaires et réalisées dans plusieurs parcs de stationnement fermés sont indispensables.

Dans la mesure où on ne peut mesurer en routine les composés à gérer, l'utilisation d'un indicateur semble une bonne solution. Le NO<sub>2</sub>, pour les raisons présentées ci-dessus semble un indicateur approprié. Cependant nous ne sommes pas en mesure de proposer une concentration limite qui déclencherait la ventilation. En effet, il convient de valider le classement des polluants et de retenir le plus à risque pour définir cette concentration limite. Ainsi, **si le plus dangereux est contrôlé, les autres polluants le seront également.**

### La ventilation

Agir sur la ventilation pour réduire les concentrations dans le milieu est une solution technique satisfaisante. Elle ne comporte pas de difficultés particulières de mise en oeuvre et s'appuie sur des **équipements préexistants**. Cette solution n'engage donc **pas de gros investissements**.

Les asservissements ont deux vitesses de ventilation. Cependant, les derniers modèles sont équipés de variateurs de vitesse et permettent ainsi une ventilation proportionnelle à la concentration observée. La Fédération Nationale des Métiers du Stationnement estime que la systématisation de la ventilation accroîtrait la consommation des systèmes électriques. De plus, on peut reconnaître l'inutilité d'aérer en continu, si les concentrations ne présentent pas de risques.

Pour assurer une meilleure efficacité de la ventilation, il est nécessaire d'extraire l'air là où il est le plus pollué et d'insuffler un air de qualité aux endroits les plus critiques.

## **4.2 Actions sur les émissions**

### Réglementation des émissions :

Cette étude a révélé que le risque lié à la fréquentation des parkings fermés n'est pas négligeable. La première solution de gestion qui vient immédiatement à l'esprit est de diminuer les concentrations à l'émission des véhicules. En effet, si les concentrations sont diminuées, les expositions le sont donc également (si on valide le même scénario d'exposition) et les risques baissent également. De plus, les polluants retenus sont principalement émis à l'échappement comparé à l'évaporation (Annexe 3).

Toutefois, si les normes d'émission des véhicules en circulation extérieure sont établies pour garantir une certaine protection sanitaire de la population, il est utopique de vouloir abaisser ces normes pour la seule utilisation des véhicules en enceintes fermées.

Cet argument est donc une contrainte. Les normes EURO sont planifiées plusieurs années à l'avance et on ne peut remettre en question l'établissement de ces normes pour la seule problématique des parcs de stationnement fermés.

#### Conception du parking pour réduire les émissions

Il est possible de diminuer les polluants émis en moyenne dans une enceinte fermée comme un parking. On ne peut certes pas modifier le pourcentage de véhicules démarrant à froid, ce qui reviendrait à modifier les habitudes des utilisateurs. On peut néanmoins réduire les flux de polluants en **réduisant les temps de circulation des véhicules**. En effet, plus un véhicule se gare rapidement et quitte rapidement son stationnement, moins il passe de temps dans le parking et plus les quantités de polluants émises sont faibles. Pour y parvenir, il convient de dimensionner et de « dessiner » le parking de telle manière qu'il n'y ait **pas d'embouteillage** à l'intérieur même du parking, que la **place de stationnement soit facile d'accès et intuitive à trouver**, et aussi que les **sorties** soient **bien indiquées**.

Il faut également rappeler que l'accès au parking est interdit quand celui-ci est déjà complet. Il est en effet absurde de chercher x minutes une place qui n'existe pas.

### **4.3 Actions sur les expositions**

On sait que la pollution ne se répartit pas de manière uniforme dans un parking. Afin de diminuer les concentrations inhalées par les personnes exposées, des mesures ont déjà été proposées : par exemple, **les voies piétonnes signalisées ont été conçues là où les concentrations sont les plus faibles**. Inutile en effet de faire traverser les personnes les secteurs où la pollution est plus importante. C'est à ces endroits que de l'air de bonne qualité doit être insufflé.

Seuls les usagers des parcs de stationnement fermés ont été pris en compte dans cette étude et le calcul du risque a été basé sur des habitudes de fréquentation de 30 minutes par jours, cinq jours sur sept. Cependant, les usagers ne sont pas les uniques personnes à emprunter ces enceintes et il faudrait également **considérer les personnes travaillant dans ces environnements**. On peut ainsi citer les gardiens de parkings, des loueurs de voitures ou encore des laveurs de glaces de voiture.

Or, la présence de polluants à risque a été montrée. Il ne s'agit pas uniquement de risque aigu mais également des risques chroniques, cancérigènes ou non. Les populations citées ci-dessus sont donc particulièrement exposées. Une fois l'obtention

d'analyses complémentaires sur les polluants dangereux, de nouveaux calculs de risques pourront être déterminés, éventuellement pour des expositions professionnelles.

Des mesures pour protéger les gardiens ont été prises. Pour des parcs de stationnement de plus de 1000 places, une surveillance humaine est obligatoire. Le gardien dispose d'un local comportant un système de renouvellement d'air frais.

#### **4.4 Surveillance**

Une question se pose quant à la nécessité d'établir un système de surveillance des effets sur la santé. Deux types de surveillances pourraient être envisageables.

Une étude de cohorte au sein des travailleurs de ces enceintes fermées pourrait être réalisée. C'est une population d'un nombre réduit de personnes, qui nécessiterait l'observation d'une forte incidence pour être significatif. On peut penser que les effets aigus attribuables aux parkings sont facilement repérables et nombreux. Cependant, en ce qui concerne les effets chroniques, le nombre de cas, ainsi que le temps de latence ne permettrait pas d'obtenir une bonne puissance statistique.

Une étude sur les usagers des parkings offrirait une population de taille plus grande. Cependant, cela ne semble pas une étude judicieuse du fait de la complexité des paramètres. En effet, compte tenu de l'ubiquité des polluants, il serait difficile de tenir compte exclusivement de la contribution des parkings dans les risques relatifs.

#### **4.5 Communication et perception du risque**

Avant d'envisager toute communication, les calculs de risque doivent être appuyés par des mesures directement réalisées dans les parkings. On peut s'interroger quant à la nécessité de communiquer, et, le cas échéant, de la forme à employer pour la communication.

Communiquer sur le risque est une nécessité quand il y a un risque. Ici, un risque existe à l'état actuel des choses mais des mesures techniques de prévention peuvent réduire des risques inacceptables en risques acceptables.

D'autre part, quel serait le contenu d'une campagne de communication à l'attention des usagers ? Les parkings permettent uniquement de simplifier le stationnement et de se garer facilement sans perdre de temps. Ils offrent donc des avantages pratiques et sont conçus comme des espaces de pure fonction.

Cependant, ces endroits sont souvent considérés comme des endroits sales, sans lumière, mal fréquentés ; ils véhiculent parfois une image d'insécurité. Il ne s'agit donc en aucun cas d'un lieu convivial, accueillant où les usagers flânent ou déambulent. Rien n'incite donc l'utilisateur à y prolonger son temps de séjour. Il n'est donc pas possible de conseiller aux usagers de réduire le temps passé dans ces enceintes.

#### **4.6 Coût efficacité**

L'asservissement de la ventilation est la solution la plus satisfaisante pour faire diminuer les risques à un niveau acceptable. Elle ne nécessite pas de gros investissements dans la mesure où les systèmes d'extraction et d'insufflation d'air existent. Cependant, il sera nécessaire d'équiper les parkings de nouveaux analyseurs pour l'indicateur choisi (sauf si l'indicateur choisi est le CO), ce qui engendre donc un coût supplémentaire d'investissement et de fonctionnement. Afin de diminuer les concentrations en polluants, il sera certainement nécessaire de faire fonctionner plus régulièrement la ventilation. (Cela paraît indispensable dans le parking dont sont tirés nos résultats, puisque même les recommandations de l'OMS ne sont pas respectées). Ainsi, on peut prévoir également une hausse des consommations en électricité.

Ces dépenses semblent facilement compensables. En effet, il ne faut pas oublier que les personnes empruntant les parkings ne sont pas uniquement des usagers mais également des clients. Le client peut donc exiger une qualité de l'air, telle une qualité de prestation. L'augmentation des dépenses énergétiques ou des investissements éventuels d'appareils de mesure peut faire l'objet d'une étude financière. Une augmentation des tarifs pourrait équilibrer les dépenses.

## CONCLUSION

L'étude a montré que d'un point de vue sanitaire, il peut être dangereux de fréquenter les parcs de stationnement fermés. Des risques inacceptables ont été calculés tant pour des expositions aiguës que chroniques.

D'autre part, l'étude a fait apparaître la nécessité de se préoccuper de polluants qui n'étaient pas gérés jusqu'à présent. Une hiérarchisation et sélection des polluants ont pu être établies.

Cependant, l'étude est basée sur l'utilisation d'un modèle. Les résultats présentent donc certaines limites et nécessitent l'appui de campagnes de mesures dans divers parkings et sur plusieurs polluants sélectionnés. Ces analyses complémentaires permettraient de renforcer la représentativité des résultats et de mettre en place les moyens de gestion requis. Une action directe sur le milieu par l'asservissement des systèmes de ventilation semble le moyen le plus adapté pour réduire les risques.

Cependant, la problématique de la qualité de l'air dans les parcs de stationnement fermés ou autres enceintes fermées ou semi-ouvertes, doit être reliée à la problématique plus large de la pollution atmosphérique urbaine. Certes, les concentrations en polluants mesurées dans le parking sont plus élevées que celles observées à l'extérieur. Mais compte tenu de la faible durée d'exposition des usagers, la fréquentation des parkings ne contribue qu'à 3% au risque global. En effet, le bruit de fond auquel est confrontée en permanence la population urbaine joue un rôle bien plus important. Il convient donc d'appréhender le problème d'une manière plus globale en considérant l'ensemble du système des déplacements urbains. La voiture particulière est un moyen de transport très emprunté et également très polluant. Or les parkings fermés en simplifiant le stationnement, contribuent pleinement à ce trafic routier, et entretiennent indirectement cette pollution. Il semblerait donc judicieux de raisonner de manière plus globale sur la qualité de l'air urbain, véritable enjeu sanitaire.

---

## Bibliographie

---

ADEME, 2005 - Les véhicules légers : bilan des filères, Laurent Gagnepain

Arrêté du 31 Janvier 1986 relatif à la protection contre l'incendie des bâtiments d'habitation.

Association Française de Normalisation, 1999 – Qualité de l'air. Tome 2 : Air ambiant, Air intérieur.

Bourdeau B., 1998 – Evolution du parc automobile français entre 1970 et 2020. Thèse ingénierie de l'environnement. Université de Savoie. 377 p.

Burnett J., Chan M. Y., 1997 - Criteria for air quality in enclosed car parks. Proceedings Institution of Civil Engineers, Transp., **123**, 102-107

Circulaire et instruction technique du 3 mars 1975 relatives aux parcs de stationnement couverts.

Comité interministériel pour les véhicules propres, 2003 - Etat des filières de véhicules propres et impact des politiques publiques d'accompagnement

Conférence européenne des ministres des transports, 2000 - L'évolution des émissions des véhicules.

Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, 1998 – Qualité de l'air dans les ouvrages souterrains ou couverts.

Décret n° 93-1412 du 29 décembre 1993 modifiant la nomenclature des installations classes.

Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières, Direction de la Demande et des Marchés Energétiques, 2005 - L'évolution de la qualité des produits pétroliers et les carburants de substitution. Extrait de l'industrie pétrolière en 2004.

European Environment Agency, 2000 – Copert III : Computer program to calculate emissions from road transport. Methodology and emissions factors (Version 2.1).

INERIS, 1999 - Toxicité des particules émises par la circulation automobile, Dr Sylvie Tissot

INRETS, 2001 - Mesure des émissions automobiles de composés organiques volatils et de dérivés carbonylés. Rapport LTE n°0210.

INRETS, 2004 - Transport routier : Parc, usage et émissions des véhicules en France de 1970 à 2025. Rapport LTE n°0420.

InVS, 2004 - Sélection des agents dangereux à prendre en compte dans l'évaluation des risques sanitaires liés aux infrastructures routières

OMS, 2000 - Guidelines for air quality. Geneva 2000

OMS, 2005 - Guidelines for air quality. Geneva 2005 update

Robin D., 2004 – Air et santé dans les projets d'infrastructures routières : évolutions. Extrait d'un colloque organisé par la DGS.

Swedish national road administration, 2002 - Environmental and health impact from modern car.

Site Internet :

International Toxicity Estimates for Risk Database

[www.tera.org/iter](http://www.tera.org/iter)

Surveillance de la Qualité de l'Air en Ile de France

[www.airparif.asso.fr](http://www.airparif.asso.fr)

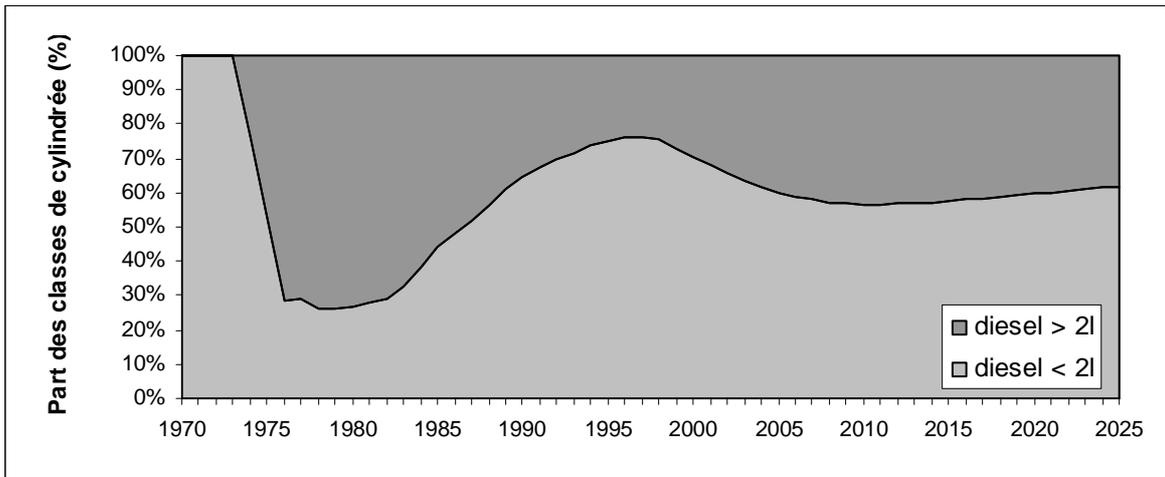
---

## Liste des annexes

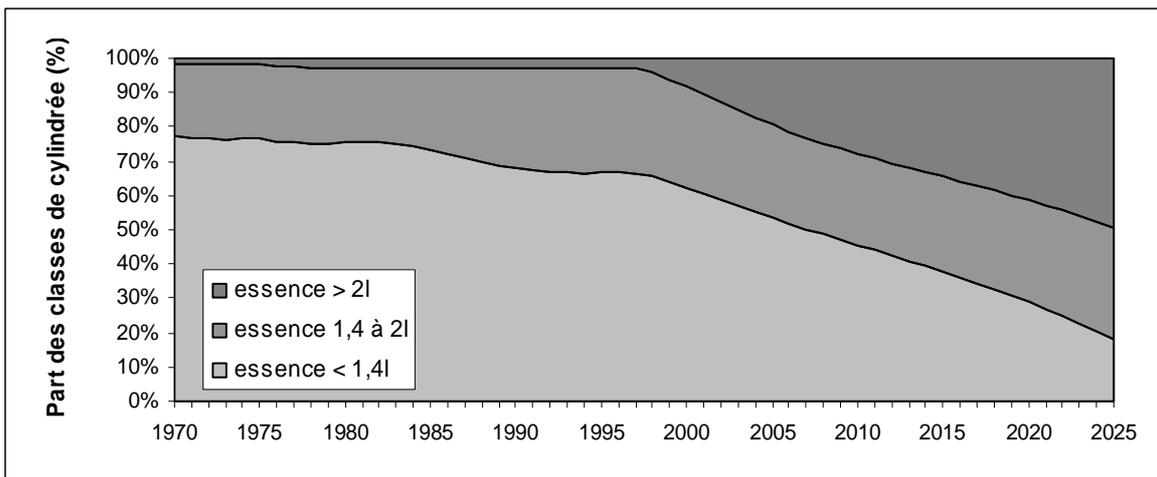
---

Annexe 1 : Evolution de la classe de cylindrée des véhicules particuliers de 1970 à 2025	II
Annexe 2 : Origine et processus de formation des polluants réglementés .....	III
Annexe 3 : Ensemble des composés émis à l'échappement et à l'évaporation.....	V
Annexe 4 : Valeurs toxicologiques de référence .....	XV
Annexe 5 : Equivalence entre catégories dans Copert et années d'immatriculation pour les véhicules particuliers .....	XIX
Annexe 6 : Consommation annuelle et composition des carburants en 2006.....	XX
Annexe 7 : Critères de classement des VTR.....	XXI
Annexe 8 : Evolution des FE déterminés par Copert entre 2006 et 2020 .....	XXIII
Annexe 9 : Techniques d'analyse pour les polluants à mesurer .....	XXIV

Annexe 1 : Evolution de la classe de cylindrée des véhicules particuliers de 1970 à 2025



*Répartition du parc de véhicules particuliers diesel selon leur classe de cylindrée  
(Source : INRETS 2004)*



*Répartition du parc de véhicules particuliers essence selon leur classe de cylindrée  
(Source : INRETS 2004)*

## Annexe 2 : Origine et processus de formation des polluants réglementés

Les différences entre les modes de combustion des moteurs essence et diesel expliquent les différences d'émissions. Chacune des deux motorisations a des spécificités vis-à-vis des émissions des quatre polluants réglementés (CO, NO<sub>x</sub>, HC et particules). On peut présenter brièvement leurs origines et leurs processus de formation.

### Le monoxyde de carbone :

Il est principalement formé lors de l'oxydation incomplète de composés carbonés. Une combustion en mélange riche, c'est-à-dire en excès de carburant, favorise la formation de cette molécule. Les moteurs essences sont ainsi de plus gros émetteurs de CO que les véhicules diesel qui fonctionnent dans des conditions mélanges carburant/air pauvres (*INRETS, 2001*). Des taux élevés sont donc rencontrés lorsque le moteur tourne au ralenti dans un espace couvert (*Air Santé Normandie, www.chu-rouen.fr*).

### Les oxydes d'azote :

Cette famille regroupe le NO, monoxyde d'azote, et le NO<sub>2</sub>, dioxyde d'azote. La principale source du NO est la réaction, à haute température, de l'azote et oxygène de l'air utilisé comme comburant. Le NO prédomine donc largement la composition des NO<sub>x</sub>, à l'échappement ; puis le NO est oxydé pour former le NO<sub>2</sub>. Le rapport NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> est généralement de l'ordre de 0.1 à 0.2 (*INRETS, 2001*).

### Les hydrocarbures :

Ils peuvent être de deux origines différentes : des produits contenus dans le carburant non transformé par la combustion, les « imbrûlés » ou produits obtenus à la suite de réactions. Les imbrûlés sont émis à l'échappement par différentes voies qui les détournent de leur combustion. La composition du mélange air/carburant est également un paramètre important. Le moteur diesel qui opère avec des mélanges carburant/air pauvres est un faible émetteur de HC. A l'opposé, le fonctionnement du moteur à essence favorise leur formation. De nouvelles technologies permettent de réduire les émissions d'HC des voitures essences.

### Les particules :

Comme pour la pollution gazeuse, c'est la qualité de la combustion qui conditionne la formation des polluants particulaires. Contrairement au moteur essence, le mélange carburant air est hétérogène et pauvre pour les moteurs diesel favorisant la formation de produits solides riches en carbone, les particules.

Les particules constituent un complexe de substances organiques (hydrocarbures aliphatiques à haute masse moléculaire, polyaromatiques) et/ou minérales (sous forme de sels ou d'oxydes métalliques) (*INRETS, 2001*).

On peut caractériser une émission particulaire par la masse ou par la taille des particules. Leur taille varie de quelques nanomètres à plusieurs micromètres, mais la majeure partie des particules est de taille inférieure à 1µm. Les particules proviennent de l'agrégation de particules primaires sous forme de grappe. Cette structure irrégulière offre une vaste surface sur laquelle viennent s'adsorber divers composés. (*INERIS, 1999*). De nouvelles technologies permettent de réduire les émissions particulaires.

### Annexe 3 : Ensemble des composés émis à l'échappement et à l'évaporation

Les tableaux ci-après présentent l'ensemble des polluants émis par échappement et évaporation. Les polluants sont classés par famille distinctes : composés organiques volatils (alcanes, alcènes, alcynes, hydrocarbures aromatiques mono et polycycliques, aldéhydes et cétones), hydrocarbures aromatiques lourds, dioxines, furanes, métaux et autres. Pour chaque polluant, il est précisé si un facteur d'émission (FE) ou une valeur toxicologique de référence (VTR) est disponible. Nous constatons qu'une très faible proportion des polluants présente à la fois un FE et une VTR.

#### **COV – Alcanes**

<b>NOM</b>	<b>N°CAS</b>	<b>Echap.</b>	<b>Evap.</b>	<b>FE</b>	<b>VTR</b>
<b>Hexane</b>	110-54-3	X	X	X	X
<b>méthane</b>	74-82-8	X	X	X	
<b>éthane</b>	74-84-0	X	X	X	
<b>propane</b>	74-98-6	X	X	X	
<b>isobutane</b>	75-28-5	X	X	X	
<b>butane</b>	106-97-8	X	X	X	
<b>diméthylpropane</b>	463-82-1	X	X	X	
<b>isopentane</b>	78-78-4	X	X	X	
<b>pentane</b>	109-66-0	X	X	X	
<b>cyclopentane</b>	287-92-3	X	X	X	
<b>méthylcyclopentane</b>	96-37-7	X	X	X	
<b>2,2-diméthylbutane</b>	75-83-2	X	X	X	
<b>2,3-diméthylbutane</b>	79-29-8	X	X	X	
<b>2-méthylpentane</b>	107-83-5	X	X	X	
<b>3-méthylpentane</b>	96-14-0	X	X	X	
<b>cyclohexane</b>	110-82-7	X	X	X	
<b>2,4-diméthylpentane</b>	108-08-7	X		X	
<b>2-méthylhexane</b>	591-76-4	X		X	
<b>2,3-diméthylpentane</b>	565-59-3	X		X	
<b>2,2diméthylpentane</b>	590-35-2	X		X	
<b>2,2,3-triméthylbutane</b>	464-06-2	X		X	
<b>3,3-diméthylpentane</b>	562-49-2	X		X	
<b>triméthylpentane</b>	29222-48-8	X		X	
<b>3-méthylhexane</b>	589-34-4	X		X	
<b>3-éthylpentane</b>	617-78-7	X		X	
<b>2,3-Diméthylhexane</b>	584-94-1	X		X	
<b>2,2-diméthylhexane</b>	590-73-8	X		X	
<b>2,4-diméthylhexane</b>	589-43-5	X		X	
<b>2,5-diméthylhexane</b>	592-13-2	X		X	
<b>3,4-diméthylhexane</b>	583-48-2	X		X	
<b>méthyl-octane</b>	61193-19-9	X		X	

NOM	N°CAS	Echap.	Evap.	FE	VTR
2-méthylheptane	592-27-8	X		X	
3-méthylheptane	589-81-1	X		X	
4-méthylheptane	589-53-7	X		X	
methylcyclohexane	108-87-2	X		X	
éthylcyclopentane	1640-89-7	X		X	
1,3-diméthylcyclohexane	591-21-9	X		X	
1,4-diméthylcyclohexane	589-90-2	X		X	
1,2-diméthylcyclohexane	583-57-3	X		X	
cycloheptane	291-64-5	X		X	
butylcyclohexane	1678-93-9	X		X	
C6-cyclohexane	110-82-7	X		X	
méthylnonane	63335-87-5	X		X	
octane	111-65-9	X		X	
nonane	111-84-2	X		X	
décane	124-18-5	X		X	
undécane	1120-21-4	X		X	
dodécane	112-40-3	X		X	
tridécane	629-50-5	X		X	
tetradécane	629-59-4	X		X	
pentadécane	629-62-9	X		X	
hexadécane	544-76-3	X		X	
heptadécane	629-78-7	X		X	
octadécane	593-45-3	X		X	
nonadécane	629-92-5	X		X	
icosane	112-95-8	X		X	
hénicosane	629-94-7	X		X	
docosane	629-97-0	X		X	
1,2-dibromoéthane	106-93-4	X			X
methyl heptane	50985-84-7	X			X
hexane (n-hexane)	110-54-3		X		

## COV-Alcènes et Alcynes

NOM	N°CAS	Echap.	Evap.	FE	VTR
1-3 butadiène	106-99-0	X	X	X	X
éthylène	74-85-1	X	X	X	
propène	115-07-1	X	X	X	
propadiène	463-49-0	X	X	X	
1-butène	106-98-9	X	X	X	
isobutène	115-11-7	X	X	X	
cis-2-butène	590-18-1	X	X	X	
1-butyne	107-00-6	X	X	X	
2-butyne	503-17-3	X	X	X	
trans-2-butène	624-64-6	X	X	X	
isopentène	563-45-1	X	X	X	
1-pentène	109-67-1	X	X	X	
trans-2-pentène	646-04-8	X	X	X	
cis-2-pentène	627-20-3	X	X	X	
2-méthyl-1-butène	563-46-2	X	X	X	
1-hexène	592-41-6	X	X	X	
cis-2-hexène (+1-hexyne)	7688-21-3	X	X	X	
trans-2-hexène	4050-45-7	X	X	X	
trans-3-hexène	13269-52-8	X	X	X	
2-méthyl,2-pentène	625-27-4	X	X	X	
3-méthyl-1-pentène	760-20-3	X	X	X	
cis-4-méthyl-2-pentène	691-38-3	X	X	X	
cis-3-méthyl,2-pentène	922-62-3	X	X	X	
trans-3-méthyl,2-pentène	616-12-6	X	X	X	
2-méthyl,1-pentène	763-29-1	X	X	X	
2-méthyl,1,4-pentadiène	763-30-4	X	X	X	
trans-2-méthyl-1,3-pentadiène	926-54-5	X	X	X	
2,3,3-triméthyl,1-butène	594-56-9	X		X	
3-méthyl-1-hexène	3404-61-3	X		X	
1-méthylcyclopentène	693-89-0	X		X	
cyclohexène	110-83-8	X		X	
2-méthyl,1-hexène	6094-02-6	X		X	
heptène	25339-56-4	X		X	
2-méthyl-1-hexène	6094-02-6	X		X	
3-méthyl-1-hexène	3404-61-3	X		X	
4-méthyl-1-hexène	3769-23-1	X		X	

NOM	N°CAS	Echap.	Evap.	FE	VTR
<b>5-méthyl-1-hexène</b>	3524-73-0	X		X	
<b>trans-2-heptène</b>	14686-13-6	X		X	
<b>cycloheptène</b>	628-92-2	X		X	
<b>1-octène</b>	111-66-0	X		X	
<b>1,1-diméthylcyclohexane</b>	590-66-9	X		X	
<b>trans-2-octène</b>	13389-42-9	X		X	
<b>cis-2-octène</b>	7642-04-8	X		X	
<b>1-nonène</b>	124-11-8	X		X	
<b>cis-4-nonène</b>	10405-84-2	X		X	
<b>trans-4-nonène</b>	10405-85-3	X		X	
<b>trans-3-nonène</b>	20063-92-7	X		X	
<b>1-undécène</b>	821-95-4	X		X	
<b>1-dodécène</b>	112-41-4	X		X	
<b>acétylène</b>	74-86-2	X	X	X	
<b>propyne</b>	74-99-7	X	X	X	
<b>isoprène</b>	78-79-5	X	X	X	
<b>2-méthyl-2-butène</b>	513-35-9	X	X	X	
<b>diméthylhexène</b>	78820-82-3	X		X	
<b>3-méthyl,1-butène</b>	563-45-1	X	X	X	
<b>1,3-butadiène (circ)</b>	106-99-0		X		X
<b>cyclopentadiène</b>	542-92-7	X	X		
<b>cyclopentène</b>	142-29-0		X		

## COV- Hydrocarbures Aromatiques Monocycliques

NOM	N°CAS	Echap.	Evap.	FE	VTR
benzène	71-43-2	X	X	X	X
toluène	108-88-3	X	X	X	X
éthylbenzène	100-41-4	X	X	X	X
xylène	1330-20-7	X	X	X	X
styrène	100-42-5	X	X	X	X
isopropylbenzène	98-82-8	X		X	X
propylbenzène	103-65-1	X		X	
3-éthyltoluène	620-14-4	X		X	
4-éthyltoluène	622-96-8	X		X	
butyl benzène	104-51-8	X		X	
1,3,5-triméthylbenzène	108-67-8	X		X	
2-éthyltoluène	611-14-3	X		X	
1,2,4-triméthylbenzène	95-63-6	X		X	
tert-butylbenzène	98-06-6	X		X	
isobutylbenzène	538-93-2	X		X	
sec-butylbenzène	135-98-8	X		X	
butylbenzène	104-51-8	X		X	
1,2,3-triméthylbenzène	526-73-8	X		X	
cymène	99-87-6	X		X	
indane	496-11-7	X		X	
1,2-diéthylbenzène	135-01-3	X		X	
1,3-diéthylbenzène	141-93-5	X		X	
méthylindane	27133-93-3	X		X	
1,4-diéthylbenzène	105-05-5	X		X	
n-butylbenzène	104-51-8	X		X	
1-méthyl-3-propylbenzène	1074-43-7	X		X	
1-méthyl-3-isopropylbenzène	535-77-3	X		X	
1-méthyl-4-propylbenzène	1074-55-1	X		X	
1,4-diméthyl-2-éthylbenzène	1758-88-9	X		X	
1,3-diméthyl-4-éthylbenzène	874-41-9	X		X	
1,2-diméthyl-4-éthylbenzène	934-80-5	X		X	
1,3-diméthyl-2-éthylbenzène	2870-04-4	X		X	
1,2-diméthyl-3-éthylbenzène	933-98-2	X		X	
1,2,4,5-tétraméthylbenzène	95-93-2	X		X	
1,2,3,5-tétraméthylbenzène	527-53-7	X		X	

## COV Polycycliques

NOM	N°CAS	Echap.	Evap.	FE	VTR
benzo(a)pyrène	50-32-8	X		X	X
naphtalène	91-20-3	X		X	X
acénaphène	83-32-9	X		X	X
anthracène	102-12-7	X		X	X
fluoranthène	206-44-0	X		X	X
pyrène	129-00-0	X		X	X
Benzo(ghi)pérylène	191-24-2	X		X	X
2-méthylnaphtalène	91-57-6	X		X	
1-méthylnaphtalène	90-12-0	X		X	
2-éthylnaphtalène	939-27-5	X		X	
ethyl naphtalène	27138-19-8	X		X	
fluorène	86-73-7	X		X	
diphénylméthane	101-81-5	X		X	
phénanthrène	85-01-08	X		X	
2-isopropylnaphtalène	2027-17-0	X		X	
méthyléthylnaphtalène	29253-36-9	X		X	
triméthylnaphtalène	28652-77-9	X		X	
1-nitronaphtalène	86-57-7	X			
2-nitronaphtalène	581-89-5	X			
2- nitrofluorène	607-57-8	X			

## COV- aldéhydes et cétones

NOM	N°CAS	Echap.	Evap.	FE	VTR
acétaldéhyde	75-07-0	X		X	X
acétone	67-64-1	X		X	X
acroléine	107-02-8	X		X	X
2-butanone	78-93-3	X		X	X
formaldéhyde	50-00-0	X		X	X
propionaldéhyde	123-38-6	X		X	
crotonaldéhyde	4170-30-3	X		X	
méthacroleine	78-85-3	X		X	
butyraldéhyde	123-72-8	X		X	
isobutanaldéhyde	78-84-2	X		X	
isovaléraldéhyde	590-86-3	X		X	
valéraldéhyde	110-62-3	X		X	
o-tolualdéhyde	529-20-4	X		X	
m-tolualdéhyde	620-23-5	X		X	
p-tolualdéhyde	104-87-0	X		X	
hexaldéhyde	66-25-1	X		X	
2,5-diméthylbenzaldéhyde	5779-94-2	X		X	
1,2-éthanedione	107-22-2	X		X	
propanedione	78-98-8	X		X	
méthylvinylcétone	78-94-4	X		X	

## Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques "lourds"

NOM	N°CAS	Echap.	Evap.	FE	VTR
anthanthrène	191-26-4	X		X	
chrysène	218-01-9	X		X	
benzo[b]fluorène	243-17-4	X		X	
benzo[a]anthracène	56-55-3	X		X	
benzo[b]fluoranthène	205-99-2	X		X	
benzo[k]fluoranthène	207-08-9	X		X	
benzo[j]fluoranthène	205-82-3	X		X	
benzo[e]pyrène	192-97-2	X		X	
dibenzo[a,h]anthracène)	53-70-3	X		X	
dibenzo[a,j]anthracène	224-41-9	X		X	
dibenzo[a,l]pyrène	191-30-0	X		X	
3,6-diméthylphénanthrène	1576-67-6	X		X	
pérylène	198-55-0	X		X	
triphénylène	217-59-4	X		X	
indéno[1,2,3-cd]pyrène	193-39-5	X		X	
benzo[e]pyrène	192-97-2	X		X	
coronène	191-07-1	X		X	
9-nitroanthracène	602-60-8	X			
benzo[a]fluorène	86-73-7	X			
benzo[ghi]fluoranthène	4670-86-4	X			
benzo[c]phénanthrène	195-19-7	X			
cyclopenta[cd]pyrène	27208-37-3	X			
dibenzo[a,e]pyrène	192-65-4	X			
dibenzo[a,h]pyrène	189-64-0	X			
1,4-diméthylphénanthrène	22349-59-3	X			
2-méthylchrysène	3351-32-4	X			
3-méthylchrysène	3351-31-3	X			
4-méthylchrysène	3351-30-2	X			
5-méthylchrysène	3697-24-3	X			
6-méthylchrysène	1705-85-7	X			
1-méthylphénanthrène	832-69-9	X			
propylène	115-07-1	X			
3,7-dinitrofluoranthène	105735-71-5	X			
3,9-dinitrofluoranthène	22506-53-2	X			
1-nitropyrène	5522-43-0	X			
3-nitrofluoranthène	892-21-7	X			
1,3-dinitropyrène	75321-20-9	X			
1,6-dinitropyrène	42397-64-8	X			
1,8-dinitropyrène	42397-65-9	X			
6-nitrobenzo[a]pyrène	63041-90-7	X			

## Dioxines et les furanes

NOM	N°CAS	Echap.	Evap.	FE	VTR
1,2,3,7,8-pentachlorodibenzo-para-dioxine	40321-76-4	X		X	
1,2,3,4,7,8-hexachlorodibenzo-para-dioxine	39227-28-6	X		X	
1,2,3,6,7,8-hexachlorodibenzo-para-dioxine	57653-85-7	X		X	
1,2,3,4,6,7,8-heptachlorodibenzo-para-dioxine	35822-46-9	X		X	
1,2,3,4,7,8,9-heptachlorodibenzo-para-dioxine	55673-89-7	X		X	
octachlorodibenzo-para-dioxine	3268-87-9	X		X	
2,3,7,8-tetrachlorodibenzofurane	51207-31-9	X		X	
1,2,3,7,8-pentachlorodibenzofurane	57117-41-6	X		X	
2,3,4,7,8-pentachlorodibenzofurane	57117-31-4	X		X	
1,2,3,4,7,8-hexachlorodibenzofurane	70648-26-9	X		X	
1,2,3,6,7,8-hexachlorodibenzofurane	57117-44-9	X		X	
1,2,3,7,8,9-hexachlorodibenzofurane	72918-21-9	X		X	
2,3,4,6,7,8-hexachlorodibenzofurane	60851-34-5	X		X	
octachlorodibenzofurane	39001-02-0	X		X	

## Métaux

NOM	N°CAS	Echap.	Evap.	FE	VTR
Cadmium	7440-43-9	X		X	X
Chrome	7440-47-3	X		X	X
Nickel	7440-02-0	X		X	X
plomb	7439-92-1	X		X	X
Cuivre	7440-50-8	X		X	
Sélénium	7782-49-2	X		X	
Zinc	7440-66-6	X		X	
Manganèse	7439-96-5	X			X
Baryum	7440-39-3	X			X
Platine	7440-06-4,	X			X
Palladium,	7440-05-3,	X			
Rhodium	7440-16-6	X			

## Autres

NOM	N°CAS	Echap.	Evap.	FE	VTR
<b>Méthyl-Tertiobuthyl-Ether (MTBE)</b>	1634-04-4		X		X
<b>acide nitrique</b>	7697-37-2	X			
<b>nitrate de peroxyacyle</b>	85-85-8	X			
<b>trioxyde de soufre</b>	7446-11-9	X			
<b>acide sulfurique</b>	7664-93-9	X			
<b>sulfate d'ammonium acide</b>	7803-63-6	X			
<b>sulfate d'ammonium neutre</b>	7783-20-2	X			
<b>acide formique</b>	64-18-6	X			
<b>acide acétique</b>	64-19-7	X			
<b>Ethyl-Tertiobuthyl-Ether (ETBE)</b>	637-92-3	X			
<b>thiofène</b>	110-02-1	X			
<b>Méthyl-Tertio-Amyl-Ether (TAME)</b>	994-05-8	X			
<b>Particule diesel</b>		X		X	X
<b>PM2,5</b>		X			
<b>PM0,1</b>		X			
<b>dioxyde de soufre</b>	7446-09-5	X			
<b>monoxyde de carbone</b>	630-08-0	X			
<b>dioxyde de carbone</b>	37210-16-5	X			
<b>ammoniac</b>	7664-41-7	X		X	X
<b>dioxyde d'azote [2]</b>	10102-44-0	X			
<b>monoxyde de diazote</b>	10024-97-2	X			

#### Annexe 4 : Valeurs toxicologiques de référence

Les tableaux suivants donnent par polluant (n°CAS), les effets observés (aiguë/chronique), la VTR des effets à seuil (exprimé  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  d'air), la VTR des effets sans seuil (ERU exprimé en  $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$  pour une exposition vie entière) ainsi que la source et date d'information. Pour les effets cancérogènes, l'appartenance aux groupes définis par le CIRC est également renseignée (Groupe 1 : cancérogène pour l'homme, Groupe 2A : cancérogène probable pour l'homme, Groupe 2B : cancérogène possible pour l'homme, Groupe 3 : inclassable).

NOM (N°CAS)	VTR	Source (date)	Effet critique	type d'étude
<b>COV – Alcanes, Alcènes</b>				
Hexane (110-54-3)	exposition chronique : effets non cancérogènes			
	VTR= 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	US-EPA 1993	neurotoxique (diminution de la vitesse de conduction motrice)	épidémiologique (cohorte professionnelle)
1,3 Butadiène (106-99-0)	exposition chronique : effets cancérogènes			
	ERU= $3,0 \cdot 10^{-5}$ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$	US-EPA 2002	augmentation de l'incidence de leucémies (CIRC:2A)	épidémiologique (cohorte professionnelle)
	exposition chronique : effets non cancérogènes			
	VTR= 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	US-EPA 2002	reproduction (atrophie ovarienne)	animale (souris)
<b>COV – Hydrocarbures aromatiques monocycliques</b>				
Benzène (71-43-2)	exposition aiguë			
	VTR= 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une exposition de 6h	ATSDR 2005	dégradation de certains mécanismes immunologiques.	animale (souris)
	exposition chronique : effets cancérogènes			
	ERU = 2,2 à 7,8 $10^{-6}$ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$	US-EPA 2003	leucémie (CIRC:1)	épidémiologique (cohorte professionnel)
exposition chronique : effets non cancérogènes				
	VTR = 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	US-EPA 2003	diminution du nombre de lymphocytes	chez l'homme en milieu professionnelle
Toluène (108-88-3)	exposition aiguë			
	VTR = 15200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une exposition de 6h	ATSDR 2000	effets neurologiques (céphalées, vertiges)	humaine
	exposition chronique : effets non cancérogènes			
	VTR = 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	ATSDR 2000	effets neurologiques (modification de la vision colorée)	humaine
Ethylbenzène (100-41-4)	exposition chronique : effets non cancérogènes			
	VTR = 1 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	US-EPA 1991	anomalies du développement squelettique	animale (rats et lapins)

Xylènes (1330-20-7)	<b>exposition aiguë</b>			
	VTR = $4,3 \cdot 10^3$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une exposition de 4h	ATSDR 1995	effets neurologiques (augmentation du temps de réaction, mémoire à court terme)	humaine
	<b>exposition chronique : effets non cancérogènes</b>			
	VTR = 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	US-EPA 2003	troubles neurologiques (perte de coordination motrice)	animale (rats)
Isopropyl- benzène (aromatiques C9 dans Copert) (98-82-8)	<b>exposition chronique : effets non cancérogènes</b>			
	VTR = 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	US-EPA 1997	hypertrophie rénale	animale (rats)
Styrène (100-42-5)	<b>exposition chronique : effets non cancérogènes</b>			
	VTR = 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	ATSDR 1992	effets neurologiques (diminution des capacités de l'élocution et des fonctions d'apprentissage)	épidémiologique (milieu professionnel)
<b>COV – Hydrocarbures aromatiques polycycliques</b>				
Benzo(a)pyrène (BaP) (50-32-8)	<b>exposition chronique : effets cancérogènes</b>			
	ERU = $1,1 \cdot 10^{-3}$ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$	OEHHA 2002	tumeurs du tractus respiratoire (CIRC:2A)	animale (hamsters)
Naphtalène (91-20-3)	<b>exposition chronique : effets cancérogènes</b>			
	ERU = $1,1 \cdot 10^{-6}$ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$	Nisbet- Lagoy 1992	données humaines et animales insuffisantes, ERU déterminé à partir d'un FET (CIRC:2B)	
	<b>exposition chronique : effets non cancérogènes</b>			
	VTR = $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$	US-EPA 1998	effets respiratoires (hyperplasie et métaplasie des épithéliums respiratoires et olfactifs)	animale (souris)
Acénaphthène (83-32-9)	<b>exposition chronique : effets cancérogènes</b>			
	ERU = $1,1 \cdot 10^{-6}$ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$	Nisbet- Lagoy 1992	données humaines et animales insuffisantes, ERU déterminé à partir d'un FET (CIRC : pas de classement)	
Anthracène (102-12-7)	<b>exposition chronique : effets cancérogènes</b>			
	ERU = $1,1 \cdot 10^{-5}$ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$	Nisbet- Lagoy 1992	données humaines et animales insuffisantes, ERU déterminé à partir d'un FET (CIRC:3)	
Fluoranthène (206-44-0)	<b>exposition chronique : effets cancérogènes</b>			
	ERU = $1,1 \cdot 10^{-6}$ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$	Nisbet- Lagoy 1992	données humaines et animales insuffisantes, ERU déterminé à partir d'un FET (CIRC:3)	
Pyrène (129-00-0)	<b>exposition chronique : effets cancérogènes</b>			
	ERU = $1,1 \cdot 10^{-6}$ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$	Nisbet- Lagoy 1992	données humaines et animales insuffisantes, ERU déterminé à partir d'un FET (CIRC:3)	
benzo(ghi)- pérylène. (191-24-2)	<b>exposition chronique : effets cancérogènes</b>			
	ERU = $1,1 \cdot 10^{-5}$ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$	Nisbet- Lagoy 1992	données humaines et animales insuffisantes, ERU déterminé à partir d'un FET (CIRC:3)	
<b>COV – Aldéhyde et cétones</b>				
Acétaldéhyde (75-07-0)	<b>exposition chronique : effets cancérogènes</b>			
	ERU = $2,2 \cdot 10^{-6}$ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$	US-EPA 1988	cancer des fosses nasales (CIRC: 2B)	animale (rats)

	<b>exposition chronique : effets non cancérigènes</b>			
	VTR = 9 µg/m <sup>3</sup>	US-EPA 1991	dégénérescence de l'épithélium olfactif	animale (rats)
Acétone (67-64-1)	<b>exposition aiguë</b>			
	VTR = 61,7. 10 <sup>3</sup> µg/m <sup>3</sup> pour une exposition de 4 h	ATSDR 1994	effets neurocomportementaux avec modification du pouvoir de discrimination auditif	humaine
	<b>exposition chronique : effets non cancérigènes</b>			
	VTR = 30,9. 10 <sup>3</sup> µg/m <sup>3</sup>	ATSDR 1994	effets neurologiques (troubles visuels)	humaine
Acroléine (107-02-8)	<b>exposition aiguë</b>			
	VTR = 6,98 µg/m <sup>3</sup> pour une exposition de 1h	ATSDR 2005	irritation oculaire et nasale	humaine
	<b>exposition chronique : effets non cancérigènes</b>			
	VTR = 2.10 <sup>-2</sup> µg/m <sup>3</sup>	US-EPA 2003	lésions nasales	animale (rats)
2-butanone (Méthyl- éthylcétone) (78-93-3)	<b>exposition chronique : effets non cancérigènes</b>			
	VTR = 5.10 <sup>3</sup> µg/m <sup>3</sup>	US-EPA 2003	effets sur le développement foetal	animale (souris)
Formaldéhyde (50-00-0)	<b>exposition aiguë</b>			
	VTR = 60 µg/m <sup>3</sup> pour exposition de 2 heures	ATSDR 1999	démangeaisons, éternuements, congestion des muqueuses	humaine
	<b>exposition chronique : effets cancérigènes</b>			
	ERU = 1,3 10 <sup>-5</sup> (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	US-EPA 1990	cancer de la cavité nasale (CIRC:2A)	animale (rats) et humaine (épidémiologique)
	<b>exposition chronique : effets non cancérigènes</b>			
	VTR = 9,84 µg/m <sup>3</sup>	ATSDR 1999	altération de l'épithélium nasal	humaine (en milieu professionnel)
<b>METAUX</b>				
Cadmium (7440-43-9)	<b>exposition chronique : effets cancérigènes</b>			
	ERU = 1,8 10 <sup>-3</sup> (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	US-EPA 1998	cancer du poumon (CIRC:1)	humaine (cohorte en milieu professionnel)
	<b>exposition chronique : effets non cancérigènes</b>			
	VTR = 5.10 <sup>-3</sup> µg/m <sup>3</sup>	OMS 2000	altération de la fonction rénale (insuffisance rénale et protéinurie)	humaine
Chrome (7440-47-3) (forme chrome considérée Chrome VI) du :	<b>exposition chronique : effets cancérigènes</b>			
	ERU = 4.10 <sup>-2</sup> (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	OMS 1990	cancer du poumon (CIRC:1)	humaine (plusieurs études épidémiologiques chez des travailleurs)
	<b>exposition chronique : effets non cancérigènes</b>			
	VTR = 0,1 µg/m <sup>3</sup>	US-EPA 1998	anomalie du liquide de lavage bronchoalvéolaire	animale (rats)
Nickel (7440-02-0)	<b>exposition chronique : effets cancérigènes</b>			
	ERU = 3,8.10 <sup>-2</sup> (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	OMS 1999	cancer du poumon (CIRC:1)	humaine (en milieu professionnel)
	<b>exposition chronique : effets non cancérigènes</b>			

	VTR = $1,8 \cdot 10^{-2}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Health Canada 1993	effets sur le poumon	animale (rats)
Plomb (7439-92-1)	exposition chronique : effets non cancérigènes			
	VTR = 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	OMS 2000	effets systémiques hématologiques	neurologiques ou humaine
<b>AUTRES</b>				
Ammoniac (7664-41-7)	exposition aiguë			
	VTR = 1,2 $\text{mg}/\text{m}^3$ pour une exposition de 2h	ATSDR 2002	irritation des voies respiratoires hautes (nez et gorge)	humaine
	exposition chronique : effets non cancérigènes			
	VTR = 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	US-EPA 1991	effets respiratoires et irritation des yeux	humaine
<b>Cas particulier des substances réglementées</b>				
PM 10	exposition chronique			
	Valeur guide = 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	OMS 2005	Calculé à partir de risque relatif de mortalité toute causes, cardio-pulmonaire, et cancer des poumons.	humaine (épidémiologique)
Dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> ) (10102-44-0)	exposition aiguë			
	VTR = 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une exposition d'une heure	OMS 2003	diminution de la fonction respiratoire	humaine
	exposition chronique : effets non cancérigènes			
	Valeur guide de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle	OMS 2003	diminution de la fonction respiratoire	humaine
Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> ) (7446-09-5)	exposition aiguë			
	Valeur guide de 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une exposition de 10 min	OMS 2000	diminution des fonctions respiratoires	humaine (chez sujets volontaires sains et asthmatiques)
	exposition chronique : effets non cancérigènes			
	Valeur guide de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle	OMS	maladies et symptômes respiratoires et diminution des fonctions respiratoires	
monoxyde de carbone (630-08-0)	exposition aiguë			
	Valeur guide de 100 $\text{mg}/\text{m}^3$ pour une exposition de 15 min	OMS 2005	effets neurologiques	
	Valeur guide de 60 $\text{mg}/\text{m}^3$ pour une exposition de 30 min	OMS 2005	effets neurologiques	

Annexe 5 : Equivalence entre catégories dans Copert et années d'immatriculation pour les véhicules particuliers

Catégorie de moteur	Dénomination	Années d'immatriculation
Essence	PRE ECE	1970
	ECE 15/00-01	1970-1978
	ECE 15/02	1979-1980
	ECE 15/03	1981-1985
	ECE 15/04	1986-1990
	91/441/EEC	1991-1996
	94/12/EEC	1997-2000
	EURO III	2001-2005
	EURO IV	2006
Diesel	Conventional	1990
	91/441/EEC	1991-1996
	94/12/EEC	1997-2000
	EURO III	2001-2005
	EURO IV	2006

Annexe 6 : Consommation annuelle et composition des carburants en 2006  
(Source : INRETS, 2004)

	<b>Essence sans plomb</b>	<b>Diesel</b>
<b>Consommation annuelle</b>	14522307	34232735
<b>Plomb</b>	0,003	0
<b>Sulfure (% massique)</b>	0,004	0,004
<b>H:C</b>	1,8	2
<b>Cadmium (mg/kg)</b>	0,01	0,01
<b>Cuivre (mg/kg)</b>	1,7	1,7
<b>Chrome (mg/kg)</b>	0,05	0,05
<b>Nickel (mg/kg)</b>	0,07	0,07
<b>Selenium (mg/kg)</b>	0,01	0,01
<b>Zinc (mg/kg)</b>	1	1

## Annexe 7 : Critères de classement des VTR

➤ Exposition aiguë :

Composé	Type de l'étude finale	Nombre d'études	Facteur d'incertitude
<b>NH<sub>3</sub></b> (ATSDR, 2004)	homme	17	30
<b>Acroléine</b> (ATSDR, 2005)	homme	4	100
<b>Benzène</b> (2005)	souris	7	300
<b>Formaldéhyde</b> (ATSDR, 1999)	homme	5	9

➤ Exposition chronique non cancérogène :

Composé	Nombre et type d'études	Facteur d'incertitude	Indice de confiance <sup>(1)</sup> dans la VTR	Indice de confiance <sup>(1)</sup> dans les études utilisées
<b>Naphtalène</b> (USEPA, 1998)	1 étude animale	3000	Faible à moyen	Moyen
<b>Acroléine</b> (USEPA, 2003)	1 étude animale	1000	Moyen	Faible à moyen
<b>1,3 butadiène</b> (USEPA, 2002)	1 étude animale	1000	Moyen	Elevé
<b>Formaldéhyde</b> (ATSDR, 1999)	4 études sur l'homme	30	-	-
<b>Acétaldéhyde</b> (USEPA, 1999)	5 études animales	1000	Faible	Moyen

<sup>(1)</sup> L'USEPA a défini des indices de confiance pour évaluer la fiabilité de la valeur de VTR choisie et de l'étude sur laquelle repose cette valeur.

➤ Exposition chronique cancérigène :

Composé	Classe CIRC	Nombre et type d'études	Eléments relatifs à la détermination des ERU
<b>Benzo(a)pyène</b> (OEHHA, 2002)	2A	1 étude animale	ERU obtenu à partir d'extrapolation de données d'expérimentation chez des hamsters sur le benzo(a)pyrène isolé, à partir d'un modèle multi étapes linéarisé.
<b>Naphtalène</b> ( Nisbet-Lagoy 1992)	2B	1 étude	Pour isoler le naphtalène parmi l'ensemble des HAP, l'approche du facteur d'équivalence toxique (FET) a été utilisée. L'ERU est obtenu à partir d'un FET=0.001 et de l'ERU du benzo(a)pyrène.
<b>Ni</b> (OMS, 1999)	1	1 étude épidémiologique	ERU obtenu à partir d'une cohorte en milieu professionnel.
<b>Formaldéhyde</b> (USEPA, 1990)	2A	1 étude animale	ERU obtenu à partir d'expérimentations chez le rat, et d'une linéarisation. Cette étude a pour avantage d'étudier des concentrations proches des concentrations d'exposition humaine attendues
<b>Cr</b> (OMS, 1990)	1	2 études épidémiologiques	ERU défini à partir de la moyenne géométrique obtenu pour trois expositions en milieu professionnel.
<b>Benzène</b> (USEPA, 2003)	1	4 études épidémiologiques	ERU obtenu à partir de 4 cohortes professionnelles qui ont pour avantage d'étudier une large gamme d'exposition et de s'intéresser exclusivement au benzène. 2 ERU sont proposés selon le modèle employé.
<b>1-3 butadiène</b> (USEPA, 2002)	2A	1 étude épidémiologique et 1 étude animale	ERU déterminé à partir d'une large cohorte de 15000 ouvriers masculins exposés au 1-3 butadiène, sur une longue période d'étude de 49ans. Correction de l'ERU par un facteur 2 pour tenir compte de résultats expérimentaux chez le rat mettant en évidence une plus grande sensibilité des rats femelles.

## Annexe 8 : Evolution des FE déterminés par Copert entre 2006 et 2020

Les facteurs d'émission (en mg/veh.km) suivants ont servi de base afin d'estimer les concentrations des différentes substances dans les parkings.

Les substances surlignées sont celles pour lesquelles les facteurs d'émission semblent augmenter d'ici 2020. Les risques qui leur sont associés seront donc en augmentation plus ou moins significative.

Substance	FE 2006	FE 2020
1,3-butadiene	4,92E-03	1,09E-03
<b>acenaphtene</b>	2,03E-02	2,58E-02
acetaldéhyde	1,13E-02	4,87E-03
acetone	5,48E-03	2,33E-03
acrolein	5,62E-03	2,59E-03
anthracene	1,90E-03	1,98E-03
Aromatics C9	1,25E-02	2,43E-03
benzene	2,43E-02	4,00E-03
<b>benzo(a)pyrene</b>	1,15E-03	1,38E-03
<b>benzo(ghi)perylene</b>	2,32E-03	2,73E-03
<b>Cd</b>	1,19E-06	1,21E-06
CO	6,38E+00	8,88E-01
<b>Cr</b>	5,95E-06	6,05E-06
ethylbenzene	1,04E-02	1,05E-03
<b>fluoranthene</b>	1,80E-02	2,17E-02

Substance	FE 2006	FE 2020
<b>formaldehyde</b>	2,28E-02	9,17E-03
hexane	4,12E-02	2,26E-03
m,p-xylene	2,06E-02	2,91E-03
methylethylcetone	1,94E-03	8,63E-04
<b>naphtalene</b>	1,04E+00	1,18E+00
NH <sub>3</sub>	2,79E-02	2,63E-03
<b>Ni</b>	8,33E-06	8,48E-06
Nox	7,41E-01	1,42E-01
o-xylene	1,06E-02	1,20E-03
<b>Pb</b>	1,06E-04	7,07E-05
<b>PM</b>	1,11E-01	5,23E-02
<b>pyrene</b>	1,58E-02	1,95E-02
SO <sub>2</sub>	9,52E-03	2,42E-03
styrene	3,01E-03	7,11E-04
<b>toluene</b>	4,00E-02	5,50E-03

Remarque pour le calcul des concentrations en 2020 : nous basons nos calculs sur le NO<sub>x</sub>, polluant de référence. Cependant, nous ne disposons pas de sa concentration en 2020 dans le parking, mais nous disposons du facteur d'émission de NO<sub>x</sub> donné par Copert. De nombreux auteurs estiment la concentration en NO<sub>2</sub> comme étant le cinquième de la concentration en NO<sub>x</sub>. Nous nous plaçons donc dans ce cas de figure. Nous avons conservé le même facteur de corrélation k que celui utilisé en 2006 pour obtenir les nouvelles concentrations de l'ensemble des polluants pour 2020.

Annexe 9 : Techniques d'analyse pour les polluants à mesurer  
(Sources : Robin D., 2004 et AFNOR, 1999)

Composé	Benzène 1-3 butadiène Naphtalène		Benzo(a)pyrène	Formaldéhyde Acroléine		Ni Cr	NH3
Méthode	Automatique : Chromatographie phase gazeuse (PID/FID)	Différée : Tube à diffusion passive, prélèvement actif, canister	Prélèvement sur filtre et analyse différée en laboratoire par CLHP	Prélèvement actif	Tube à diffusion passive	Prélèvement sur filtre et analyse différée en laboratoire	Automatique : Analyseur à chimiluminescence
Norme			NFX 43-025				
Coût	Elevé	Modéré à élevé	Elevé (préleveur + 200€ / échantillon)	Modéré	Modéré	Elevé	
Incertitude	< 25 %	< 25 %					
Mise en oeuvre	Enceinte climatisée Bonne maîtrise du raccordement des gaz		Bonne maîtrise du raccordement des débits Stockage de l'échantillon limité (24-48h) Analyse délicate	Bonne maîtrise du raccordement des débits Electricité	Facile	Bonne maîtrise du raccordement des débits Manipulation des filtres	Enceinte climatisée – électricité Bonne maîtrise du raccordement des gaz
Donnée	Quart horaire ou demi horaire	Horaire à intégrée	Journalière	Horaire, journalière	Intégrée – 8h à 7j	Journalière ou plus intégrée (échantillon stable)	
Teneurs	0 à 1000 µg/m <sup>3</sup> Limite de détection : Cycle 15min : 0,5µg/m <sup>3</sup> Cycle 30min : 0,25 µg/m <sup>3</sup>		0,01 à qq ng/m <sup>3</sup>			0 à qq dizaines de ng/m <sup>3</sup>	> 2 ppb

CLHP : Chromatographie en phase Liquide Haute Performance