

1.- CONNAISSANCES DE BASES

1.1.- Les polluants liés au trafic routier

1.1.1.- Présentation des principaux polluants

Les substances émises par le trafic routier sont très nombreuses et forment, à proximité des routes, un véritable cocktail de polluants dans l'air. Voici la liste des principaux polluants liés au trafic :

L'ordre dans lequel les polluants sont présentés n'a pas valeur de classement

- Les oxydes de carbones (CO et CO₂),
- Les oxydes d'azote (NO_x),
- Les Composés Organiques Volatils (COV), parmi lesquels les hydrocarbures,
- Le dioxyde de soufre (SO₂),
- Les particules,
- Les métaux lourds¹,
- L'ozone troposphérique².

Les principales caractéristiques de ces polluants sont présentées dans les paragraphes qui suivent, selon les thèmes qui nous ont semblé utiles pour une recherche sur la pollution automobile.

Les polluants cités ci-dessus se classent en grandes catégories : on distingue **les particules** (contenues dans les gaz d'échappement ou issues de l'usure des véhicules et de la chaussée) **des gaz** (gaz d'échappement ou évaporés des carburants). Les polluants émis directement sont appelés **polluants primaires** ; certains de ces polluants primaires sont également des polluants **précurseurs** de polluants secondaires : ces précurseurs participent (à travers des réactions chimiques dans l'atmosphère) à la synthèse de **polluants photochimiques**, également appelés **polluants secondaires**.

1.1.2.- Les unités de mesure de la pollution

- **La concentration d'un polluant** s'exprime de la façon suivante :

▸ Pour les gaz, en concentration relative :

- Ppm ou ppmv = Partie par million en volume (10⁻⁶) soit 1cm³/m³, c'est-à-dire : sur un million de molécules d'air, on trouve une molécule du polluant en question.
- Ppb ou ppbv = Partie par milliard (billion en anglais) en volume (10⁻⁹) soit = 1mm³/m³
- Ppt ou pptv = Partie par trillion en volume (10⁻¹²), unité rarement employée dans le rapport.

¹ On appelle habituellement **métaux lourds** tous les métaux **toxiques**, sans rapport avec leur densité [SCHÜTZ, 1995, p. 236].

² Si dans les hautes couches de l'atmosphère, au niveau de la stratosphère, la couche d'ozone fait écran à la partie nocive des UV et constitue donc un élément indispensable de l'écosystème terrestre, l'ozone dans les basses couches atmosphérique (troposphère) est un polluant nocif tant pour la santé humaine que pour la végétation.

▸ Pour les gaz et particules, en masse par unité de volume :

- $\text{mg/m}^3 = 10^{-3}$ g par m^3 d'air (milligramme)
- $\mu\text{g/m}^3 = 10^{-6}$ g par m^3 d'air (microgramme)
- $\text{ng/m}^3 = 10^{-9}$ g par m^3 d'air (nanogramme)

On peut convertir une unité en une autre grâce au facteur de conversion masse/volume en volume/masse et vice-versa (tableau 1).

Polluant	Facteur de conversion
D'une manière générale : $1\text{mg/m}^3 \approx (22,4 \div \text{PM})$ en ppm. PM = poids moléculaire du polluant gazeux [CITEPA, 1989, p. 2].	
CO	1 ppm = 1,145 mg/m^3 1 $\text{mg/m}^3 = 0,873$ ppm
Ozone	1 ppb $\approx 2\mu\text{g/m}^3$ [CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 1] 1 ppm = 2 mg/m^3 1 $\text{mg/m}^3 = 0,5$ ppm
SO ₂	1 ppm = 1,88 mg/m^3 1 $\text{mg/m}^3 = 0,53$ ppm
Acétaldéhyde	(à 25°C et 1066 mbar) : 1 ppm = 1,8 mg/m^3 1 $\text{mg/m}^3 = 0,56$ ppm
Acroléine	(à 25°C et 1066 mbar) : 1 ppm = 0,4 mg/m^3 1 $\text{mg/m}^3 = 2,5$ ppm
Benzène	1 ppm = 3,19 mg/m^3 1 $\text{mg/m}^3 = 0,31$ ppm
Formaldéhyde	(à 25°C et 1066 mbar) : 1 ppm = 1,2 mg/m^3 1 $\text{mg/m}^3 = 0,83$ ppm
Source : SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 246	

Tableau 1 : Facteur de conversion masse/volume en volume/masse

▪ **La masse de polluant** émise dans l'atmosphère

- A petite échelle (mondiale ou nationale), cette masse est exprimée en Mt/an = millions de tonnes par an.
- En ce qui concerne la pollution automobile, cette masse est souvent ramenée à la distance :
 - g/km = masse moyenne émise en grammes par véhicule pour 1 km,
 - mg/km = masse moyenne émise en milligrammes par véhicule pour 1 km.
- Pour les poids lourds, les normes sont exprimées en g/kWh = masse moyenne émise en grammes par véhicule par unité d'énergie dépensée³.

³ Le kilowattheure (kWh) est une unité d'énergie ou de travail, équivalant au travail exécuté pendant une heure par une machine dont la puissance est de 1 kilowatt [BIBLIOROM LAROUSSE, 1996, Cédérom].

1.1.3.- Formation et dispersion des polluants

CO - CO₂

- Le CO, toxique puissant qui peut bloquer la fixation de l'oxygène par les globules rouges (anoxie) est émis lors de la combustion incomplète d'hydrocarbures : « Lors de sa combustion, le carbone est d'abord oxydé en gaz carbonique (CO₂). Si l'on ajoute à cette molécule un nouvel atome de carbone, dans certaines conditions de température et de pression, il y a formation de deux molécules de monoxyde de carbone (CO). S'il y a suffisamment d'oxygène en présence, le monoxyde s'oxyde à nouveau en dioxyde de carbone. [...] Si un carburateur est mal réglé, le manque de comburant (oxygène) donne lieu à la production et l'émission de gaz d'échappement plus riche en CO » [SCHÜTZ, 1995, p. 78], c'est-à-dire que le CO₂ est émis dès lors qu'il y a combustion d'hydrocarbures, alors que le CO est émis essentiellement lorsque cette combustion est incomplète.
- « Le pot catalytique permet, entre autres choses, l'oxydation du monoxyde de carbone toxique en gaz carbonique, beaucoup moins dangereux » [SCHÜTZ, 1995, p. 80].
- La diffusion du CO est très rapide. Il disparaît rapidement dès que l'on s'éloigne d'une source d'émission [ESCOURROU, 1996, p. 83]. Cela tient au fait que le CO a une densité voisine à celle de l'air.

NO_x

- L'azote (N) et l'oxygène (O) entrent en réaction dans les conditions de hautes températures et de pression des moteurs pour former du monoxyde d'azote (NO) [SCHÜTZ, 1995, p. 88]. Une fois rejetée dans l'atmosphère, NO s'oxyde pour former du dioxyde d'azote (NO₂) [PARMETIER et GARREC, 1994, p. 3]. NO est le plus abondant dans l'atmosphère : il représente ≈ 95 % des émissions NO + NO₂ [DEGOBERT, 1992, p. 23].
- L'azote et l'oxygène peuvent s'associer sous différentes formes : N₂O (protoxyde d'azote), N₂O₃, N₂O₅, [SCHÜTZ, 1995, p. 88], HNO₃ (acide nitrique), émis directement par les véhicules diesel [MALBREIL, 1997, p. 33].
- Ces diverses associations sont désignées par le terme « **Oxydes d'azote** » (NO_x).
- Dans la pratique, on simplifie souvent la réalité en considérant que NO_x = NO + NO₂.
- Les catalyseurs 3 voies permettent une réduction des NO_x [PARMETIER et GARREC, 1994, p. 3].
- Le **protoxyde d'azote** (N₂O) est engendré par l'azote présent initialement dans les combustibles ; peu actif dans la troposphère, c'est un agent actif d'attaque de la couche d'ozone stratosphérique [PARMETIER et GARREC, 1994, p. 3 ; DEGOBERT, 1992, p. 26].

COV

- Les composés organiques sont constitués par le carbone et ses combinaisons ; parmi ces combinaisons, les hydrocarbures sont des composés binaires constitués de carbone et d'hydrogène.
- Les COV sont émis :
 - par évaporation à la pompe, au niveau du carburateur et du réservoir (provoquée par les variations de températures : marche/arrêt du moteur ou jour/nuit ; ce sont les pertes par « respiration »),
 - par perte (éclaboussures à la pompe ou au niveau du réservoir),
 - dans les gaz d'échappement [DEGOBERT, 1992, p. 29-33].
- La composition spécifique des émissions de COV, qu'elles soient produites par combustion ou évaporation, varie très fortement en fonction des carburants et de leurs additifs. C'est pourquoi les véhicules à essence et diesel (ou autre carburant) donnent différents spectres d'émissions. Cependant, les émissions totales de COV sont équivalentes car, si les véhicules diesel émettent beaucoup moins de COV par kilomètre, leur rejets contiennent une forte concentration des COV les plus réactifs (composés aromatiques, aldéhydes et oléfines) qui fait que les moteurs diesel contribuent de manière beaucoup plus importante à la formation d'ozone [OCDE, 1995, p. 28].
- Les concentrations de COV sous forme gazeuse sont généralement 10 à 100 fois supérieures aux concentrations de COV sous forme de particules [OCDE, 1995, p. 28].
- « De nombreux COV ne se dispersent que localement, c'est-à-dire à proximité de leurs sources ; d'autres sont persistants et largement dispersés dans l'atmosphère » [OCDE, 1995, p. 28].

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

- Les HAP, dangereux pour la santé car cancérogènes, sont des hydrocarbures aromatiques constitués de plusieurs cycles benzéniques (de 2 à 6, voire 8) accolés selon diverses formes. La majorité des HAP proviennent des processus de pyrolyse et en particulier de la combustion incomplète de matière organique ou de composés carbonés [DEGOBERT, 1992, p. 33-34 ; SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 105].
- Les HAP sont la plupart du temps adsorbés⁴ sur des particules carbonées. Ils sont également détectés en phase gazeuse, en particulier dans les gaz d'échappement des moteurs à essence ; il s'agit dans ce cas des HAP de masse moléculaire la plus faible (jusqu'à 3 cycles*), qu'on appelle HAP légers. Dans les émissions Diesel, une grande partie de ces HAP légers est adsorbée sur les particules en compagnie de HAP de masse beaucoup plus grande (4 cycle et plus) : les HAP lourds. [DEGOBERT, 1992, p. 34 ; SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 105 ; CUNY, 1995, p. 4 ; SETRA-MAZOUÉ, 1994, p. 19].
- Parmi les HAP, le **benzo(a)pyrène** (BaP) est le plus étudié des HAP car il est particulièrement dangereux pour la santé [SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 105] ; il est émis pratiquement au même taux par un véhicule essence ou Diesel [DEGOBERT, 1992, p. 34].

* si le poids moléculaire < 252, la récupération se fait essentiellement sous forme gazeuse ; si le poids moléculaire > 252, la récupération se fait essentiellement sous forme particulaire [HAUTALA & al., 1995, p. 47].

BTEX

- Les BTEX (ou BTX) : Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylènes sont des HAM (hydrocarbures aromatiques monocycliques). Ce sont des hydrocarbures imbrûlés. Le benzène est produit par désalkylation des composés aromatiques [MALBREIL, 1997, p. 33], si bien que même si on limite sa teneur dans les carburants, la présence de composés aromatique entraîne sa formation [DEGOBERT, 1992, p. 32].
- Les BTX sont les principaux COV émis par la circulation automobile essence [ARGOPOL, 1994, p. 73], surtout depuis l'introduction de nouveaux antidétonants : les aromatiques remplaçant le plomb tétraéthyl [ESPAGNO, comm. verbale, 1998].
- Les BTX sont très dangereux pour la santé (atteinte du système nerveux central entre autres) [SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 97].
- Les émissions de benzène diminuent sensiblement avec un pot catalytique [DEGOBERT, 1992, p. 33].

PCB

- Le PCB (polychlorobiphényles) est un composé aromatique organochloré non biodégradable, comme le DDT (dichlorodiphényl-trichloréthane) [ENCYCLOPEDIA UNIVERSALIS, 1995, Cédérom ; BIBLIOROM LAROUSSE, 1996, Cédérom]. Il s'agit d'une substance très toxique. Le PCB est probablement présent dans les huiles, l'essence et le gazole. Si le rapport entre les concentrations de PCB dans l'air et le trafic routier a été prouvée par GRANIER et CHEVREUIL (1991), l'origine de cette pollution n'est pas démontrée. Le PCB est présent sous forme gazeuse et particulaire. Dans le tunnel des Tuileries (Paris), les auteurs mesurent des concentrations de l'ordre de 2,1 ng/m³ de PCB sous forme gazeuse et 5,2 ng/m³ de PCB sous forme particulaire.

1,3-butadiène (hydrocarbure)

- Élément très réactif, le 1,3-butadiène se forme par combustion incomplète du carburant. Son émission augmente proportionnellement à celle des hydrocarbures, mais n'est pas émis par évaporation. 1,3-butadiène est un précurseur d'aldéhydes [SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 119-120].
- 1,3-butadiène serait de loin, le polluant atmosphérique toxique le plus dangereux (en terme de risques de cancer) émis par les véhicules [EPA, 1993 in OCDE, 1995, p. 31].
- L'utilisation de pots catalytiques permet sa réduction [SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 119].

⁴ **adsorption, nom féminin** - Pénétration superficielle d'un gaz ou d'un liquide dans un solide ou dans un autre liquide [BIBLIOROM LAROUSSE, 1996, Cédérom].

CFC

- Les Chloro-fluoro-carbones (CFC ou Fréon dans le langage courant) sont utilisés dans les systèmes de climatisation des voitures, notamment les CFC-11 et CFC-12 [PNUJ, 1989 in OCDE, 1995, p. 36 ; ESCOURROU, 1996, p. 89].

Ozone

- « L'ozone et les autres oxydants photochimiques ne sont pas émis directement par les véhicules mais ils dérivent pour une bonne part – difficile à quantifier – des polluants primaires présents dans les gaz d'échappement » [SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE SANTÉ PUBLIQUE, 1996, p. 87]. Les rayonnements solaires (UV), entraînent une dissociation du dioxyde d'azote (NO₂) qui forme du monoxyde d'azote (NO) et libère un atome d'oxygène qui s'associe dès que possible avec de l'oxygène (O₂) pour former de l'ozone (O₃) [SCHUTZ, 1995, p. 93]. La production d'ozone peut être limitée par sa réaction avec NO : $O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2$ [CONSEIL SUPÉRIEUR D'HYGIÈNE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 3].
- Globalement, les niveaux de NO_x dans l'air ont surtout une influence sur les **quantités d'ozone formé**, les COV agissent plutôt sur **la vitesse des réactions** [CONSEIL SUPÉRIEUR D'HYGIÈNE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 4].
- Une des caractéristiques importantes de cette chimie est son caractère non linéaire : **la production d'ozone n'est pas proportionnelle aux teneurs initiales en précurseurs**. Selon la proportion des divers réactifs, ce sont des réactions de destruction ou de production qui s'instaurent :
 - Si NO_x < 30 ppt (niveau moyen des atmosphères des zones isolées et peu influencées par les activités humaines), ↗ du CO et des COV = ↘ production ozone,
 - Si NO_x = quelques ppb (cas habituel dans nos régions), ↗ du CO et des COV = ↗ production ozone,
 - Si NO_x est très élevée (notamment NO : plusieurs dizaines de ppb (cas des zones urbaines), ↘ production ozone par action du NO en excès sur l'ozone formé. [CONSEIL SUPÉRIEUR D'HYGIÈNE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 5].
- La concentration d'ozone est en relation directe avec l'ensoleillement (UV). Les concentrations sont donc les plus importantes en période estivale (mai à septembre) et l'après-midi. Pendant la nuit, la production est stoppée et l'ozone produit dans la journée est piégé par la végétation ou détruit [MALBREIL, 1997, p. 6-7].
- On observe au bord des (auto)routes, des dépressions locales d'ozone dues essentiellement à l'émission en NO_x par les véhicules, qui détruit les molécules d'O₃ [PLEIJEL & al., 1994 ; KUHNER & al., 1994 ; MALBREIL, 1997, p. 23 ; TOUPANCE, 1994, p. 4], ce qui explique que les concentrations maximum se rencontrent à la périphérie des villes [GARREC, 1996, p. 374].
- Les précurseurs de pollution photochimique : CO, NO_x, COV (les plus réactifs des COV sont : formaldéhyde, éthylène et xylènes [OCDE, 1995, p. 28].).

Pour plus de détails, on peut se reporter à :

CONSEIL SUPÉRIEUR D'HYGIÈNE PUBLIQUE DE FRANCE, Section de l'Évaluation des risques de l'environnement sur la santé, 1996, « L'ozone, indicateur majeur de la pollution photochimique en France : évaluation et gestion du risque de santé », Ministère du travail et des Affaires Sociales - Direction Générale de la Santé, Technique & Documentation, Paris, 164 pages.

Métaux

Les divers métaux sont émis sous forme de particules. Les métaux toxiques (à différents degrés) sont soulignés.

- Le **plomb**, élément très toxique, est issu de la combustion des carburants contenant du **plomb** tétraéthyl et/ou du **plomb** tétraméthyl; il provient également, à un moindre degré, des substances anti-usure des lubrifiants [MALBREIL, 1997, p. 33]. Cette pollution est vouée à disparaître avec le renouvellement du parc automobile français.
- Dans les villes, 90 % du **plomb** est émis par les véhicules ; 10% du **plomb** retombe dans un rayon de 100 m autour de la route, le reste est largement dispersé [OCDE, 1995, p. 32].
- Le **manganèse** est issu des carburants contenant du MMT (methyl cyclopentadienyl manganèse tricarbonyl), substitut antidétonant du **plomb**. Le **manganèse** est un polluant étudié essentiellement au Canada, un des seuls pays où il a été adopté comme antidétonant [LYTLE, SMITH et MCKINNON, 1995, p. 105].
- Ce composé entraîne des risques de bouchage des supports catalytiques [DEGOBERT, 1992, p. 44].
- En France, du **manganèse** est émis du fait de l'usure de certaines pièces mécaniques [PARMENTIER et GARREC, 1994, p. 8].
- Le **zinc** et le **cadmium** sont produits par l'usure des pièces mécaniques, galvanisées, des pneumatiques et des lubrifiants ; ils sont issus également de la dégradation des glissières de sécurité [MALBREIL, 1997, p. 33].

- Le zinc et le cadmium sont souvent associés car le cadmium est l'impureté associée au zinc [DEGOBERT, 1992, p. 44].
- Des poussières sont émises par les pots catalytiques : des **métaux précieux** (platine, palladium, rhodium, cérium, etc.) [MALBREIL, 1997, p. 33], mais aussi du nickel, du cuivre, du chrome (faibles quantités) [PARMENTIER et GARREC, 1994, p. 8].

Autres métaux : magnésium, aluminium, fer, chrome (usure des roches et des sols) ; molybdène (lubrifiant) ; baryum, cobalt (huiles de graissage), sélénium (lubrifiant, plaquettes de frein); arsenic, chrome (garnitures de frein, disques d'embrayage, transmissions automatique, etc.) [PARMENTIER et GARREC, 1994, p. 7-8].

Particules

- « Le terme "particule" concerne, en général, les aérosols créés par la dispersion dans l'air de solides et de liquides atomisés, poudres ou gouttelettes et implique donc les termes de poussières, fumées, suies, brumes, brouillards, smog. [...] »
- Le terme "particules en suspension" concerne essentiellement les poussières de taille inférieure à 10 µm dont la vitesse de sédimentation est lente, les particules plus grosses ayant tendance à retomber rapidement près de la source d'émission. » [DEGOBERT, 1992, p. 44-45].
- Les particules en suspension constituent un ensemble très hétérogène dont la qualité, sur le plan physique, chimique et/ou biologique est fort variable selon que les sources d'émissions sont locales ou plus éloignées, selon la saison (variation de la chimie atmosphérique) [SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 58] ; les diverses méthodes de mesures employées donnent des résultats eux-mêmes très hétérogènes.
- Les principaux composés des particules sont :
 - Des éléments minéraux liés à l'érosion de la chaussée et des sols,
 - La remise en suspension de particules déposées au sol,
 - Des noyaux carbonés (issus de composés organiques produits lors des combustions incomplètes),
 - Des sulfates SO₄⁻ ou des nitrates NO₃ résultants des transformations de SO₂ ou NO_x,
 - Des ions métalliques adsorbés ou condensés à la surfaces des particules,
 - Des sels d'ammonium produits par la neutralisation des aérosols acides par l'ammonium présent dans l'air du fait de l'activité biologique [SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 58].
- Les particules sont classées selon leur taille ; les particules ayant un diamètre inférieur à 10 µm sont désignées par le terme PM₁₀, diamètre inférieur à 2,5 µm: PM_{2,5}, etc.
- Les poussières libérée dans l'atmosphère participent à divers processus :
 - Dépôt sur le sol et la végétation,
 - Formation d'aérosol,
 - Catalyseurs de réactions chimiques [SANEF-ARGOPOL, 1995, p. 25].
- D'un point de vue biologique et sanitaire, ce sont les particules les plus fines qui sont les plus préoccupantes ; or les particules émises par les pots d'échappement sont de très petite taille (notamment pour les particules diesel qui sont responsables de 87 % des particules émises par le trafic) [LUCAS, 1995 in SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 58].

Particules diesel

- « Les particules diesel présentes dans l'atmosphère sont de très petite taille, inférieure au micron. Leur composition et leur granulométrie ne sont pas parfaitement connues. Leur composition peut être schématiquement décrite comme un squelette de carbone recouvert d'une phase organique composée principalement d'imbrûlés provenant du carburant et du lubrifiant. Cette phase imbrûlée comprend plusieurs centaines de composés avec, notamment, des HAP. [...] Ces particules diesel, de très petite taille (diamètre aérodynamique moyen de 0,5 µm) constituent aujourd'hui la plus grande part des poussières en suspension en milieu urbain. C'est-à-dire que, par delà la diminution qui a pu être observée, depuis 20 ans, des valeurs d'immission (teneurs atmosphériques) des particules (mesurées alors par la technique des fumées noires), la nature des particules a aussi évolué. Tout laisse à penser que les particules présentes aujourd'hui dans l'air urbain présentent, par leur taille et leur composition chimique, une nocivité plus marquée que celles qui étaient historiquement associées aux processus de combustion industriels et du chauffage résidentiel traditionnel. » [SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 63-64].

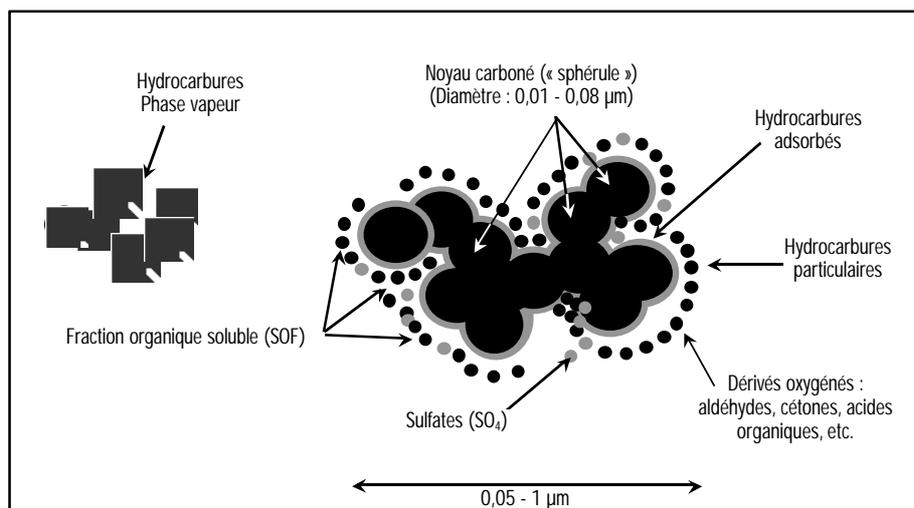


Figure 1 : Schéma des particules diesel

Adaptée de HEALTH EFFECTS INSTITUTE (HEI), 1995 in SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE SANTÉ PUBLIQUE, 1996, p. 64.

- Le temps de séjour pour les poussières de l'ordre de 1 µm (particules diesel essentiellement) est proche de 10 jours [SETRA-MAZOUÉ, 1994, p. 19].

Particules minérales

- Le passage des véhicules use la chaussée et met en suspension des **particules de quartz** (phénomène accru lors de l'utilisation de pneus cloutés) [DEGOBERT, 1992, p. 46].
- L'**amiante** était jusqu'à peu utilisé dans la fabrication des voitures, notamment pour les garnitures de friction (freins et embrayages) et des transmissions automatiques. L'usure de ces éléments provoque le rejet de particules d'amiante [DEGOBERT, 1992, p. 46 ; OCDE, 1995, p. 32 ; MALBREIL, 1997, p. 33]. Très toxique (danger de l'amiante contenu dans les locaux), dans l'état actuel des connaissances, seul un seuil de 0 est sécuritaire.

Des oxydes métalliques sont présents dans les gaz d'échappement mais ne sont pas liés à la combustion : ils proviennent de l'usure du moteur ou des systèmes de dépollution [ADEME, 1996, p. 7].

Fondants chimiques

- En hiver, des sels sont déversés sur les routes pour diminuer le point de congélation de l'eau (jusqu'à 30t/an/km sur une autoroute en zone d'hiver rigoureux ou 70 à 210 kg/km de route à 2 voies [CETUR, 1986, in SETRA-MAZOUÉ, 1994, p. 21]).
- Les fondants chimiques utilisés sont de deux types : chlorure de sodium (NaCl) ou chlorure de calcium (CaCl₂). En France, on utilise essentiellement du chlorure de sodium [PARMENTIER et GARREC, 1994, p. 8], dont la granulométrie varie de 0 à 4 mm [SETRA-MAZOUÉ, 1994, p. 20].
- 5 % des sels épandus sont déposés sur les bas-côtés ; les 95 % effectivement sur la chaussée peuvent atteindre le terre-plein central et les accotements :
 - par ruissellement avec les eaux de surface,
 - par projection, sous forme de dépôt sec ou humide jusqu'à de grandes distances par rapport à l'autoroute [PARMENTIER et GARREC, 1994, p. 8].

(Paragraphe présenté sous forme de tableau dans la version papier)

Tableau 2 : Formation et dispersion des polluants

1.1.4.- Proposition de classement des polluants automobile

Certains termes génériques cités plus haut regroupent parfois de nombreuses substances chimiques. Les tableaux 3 et 4 recensent et proposent un classement des principaux polluants. Seuls les HAP (Hydrocarbures aromatiques polycycliques) sont détaillés ci-dessous, en s'en tenant aux principaux, les 16 HAP généralement étudiés dans les analyses.

HAP	Poids moléculaire
▪ Naphtalène	128
▪ Acenaphtylène	152
▪ Acenaphtène	154
▪ Fluorène	166
▪ Phénanthrène	178
▪ Anthracène	
▪ Fluoranthène	202
▪ Pyrène (P)	
▪ Chrysène	
▪ Benzo(a)anthracène (BaA)	228
▪ Benzo(a)pyrène (BaP)	
▪ Benzo(b)fluoranthène (BbF)	252
▪ Benzo(k)fluoranthène (BkF)	
▪ Dibenzo anthracène	276
▪ Indéno (1,2,3)pyrène (IP)	278
▪ Benzo(g,h,i)pérylène (BghiP)	

HAP légers : La récupération sous forme gazeuse est la plus importante [HAUTALA *et al*, 1993, p. 47]

HAP lourds : La récupération sous forme particulaire est la plus importante [HAUTALA *et al*, 1993, p. 47]

Tableau 3 : Liste des 16 principaux HAP (Hydrocarbures aromatiques polycycliques)

Tableau 4 : Proposition de classement des divers polluants d'origine automobile

Polluants non émis par la combustion	Polluants gazeux	Polluants particulaires	Liquides
Polluants primaires, émis par la combustion	<p>Non précurseurs de polluants secondaires</p> <ul style="list-style-type: none"> CO₂, Dioxyde de carbone SO₂, Dioxyde de soufre <p>Précurseurs de polluants secondaires</p> <ul style="list-style-type: none"> CO, Monoxyde de carbone NO_x, Oxydes d'azote : <ul style="list-style-type: none"> ⇒ NO, Monoxyde d'azote ⇒ NO₂, Dioxyde d'azote ⇒ N₂O, Protoxyde d'azote ⇒ HNO₃, Acide nitrique ⇒ N₂O₃ ⇒ N₂O₅ ⇒ ... COV les plus réactifs : les aldéhydes, éthylène, xylènes... <p>Réactions photochimiques</p> <p>Ozone (O₃)</p> <p>Peroxyacétylnitrate (PAN)</p> <p>Peroxypropionynitrate (PPN)</p> <p>Peroxybutyrylnitrate (PBN)</p> <p>Acroléine, Radicaux d'hydroxyl</p> <p>COV : issus de réactions entre HC imbrûlés et NO_x</p>	<p>Fondants chimiques</p> <p>Chlorure de sodium (NaCl) Chlorure de calcium (CaCl₂)</p> <p>Particules minérales</p> <p>Quartz; Amiante; Oxyde de calcium; Oxydes métalliques</p> <p>Particules métalliques</p> <p>Zinc (Zn); Cadmium (Cd); Magnésium (Mg); Aluminium (Al); Fer (Fe); Chrome (Cr); Molybdène (Mo); Phosphore (P); Baryum (Ba); Cobalt (Co); Sélénium (Se); Arsenic (As); Nickel (Ni); Cuivre (Cu); Platine (Pt); Palladium (Pd); Rhodium (Rh); Cérium (Ce)</p> <p>Métaux</p> <ul style="list-style-type: none"> Plomb (Pb) Manganèse (Mn) COV (surtout les HAP lourds) <p>Les particules les plus fines (PM₁₀) se comportent comme un gaz. (loi de STOCKES)</p> <p>COV : non issus combustion, particules, précurseurs d'ozone polluants secondaires</p> <p>Les Composés Organiques Volatils (COV) sont constitués de tous les composés organiques gazeux de l'atmosphère. Ils comprennent des hydrocarbures, des aldéhydes, des composés nitrés et sulfurés, etc. [MOUVIER, 1994, p. 114].</p> <p>Hydrocarbures Aromatiques Monocycliques (les HAM)</p> <p>Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) - Voir tableau 3</p> <p>Méthane ; Alcanes ; 1,3-butadiène ; Chloro-fluoro-carbones (CFC)</p> <p>1,2,4 triméthylbenzène, Etc.</p> <p>Benzène</p> <p>Toluène (ou méthylbenzène)</p> <p>Ethylbenzène</p> <p>Xylènes</p> <p>Aldéhydes</p> <p>Formaldéhyde ou « formol »</p> <p>Acétaldéhyde</p> <p>Acroléine</p> <p>PAN ; PPN ; PBN</p> <p>Cétones</p> <p>Acides Ethers</p> <p>Polychlorobiphényles (PCB)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Combustible, Huile, Lubrifiant, Antigel, Liquide de frein. <ul style="list-style-type: none"> Acide nitrique
Polluants secondaires			

Source : DELÉTRAZ, 1998.

1.1.5.- COV et hydrocarbures : quelle différence ?

Il nous a semblé important de nous attarder sur ce point précis, car dans la très grande majorité des références bibliographiques traitées pour la réalisation de ce rapport, nous avons perçu un « flottement » concernant les définitions des COV et des hydrocarbures, surtout en ce qui concerne le lien qui rapproche ces deux groupes :

- dans la plupart des cas, les auteurs parlent exclusivement de l'une ou l'autre de ces deux catégories alors que les substances qui les composent sont les mêmes : il est alors difficile de savoir s'ils sont équivalents ou si l'un des deux groupes englobe l'autre ;
- dans d'autres cas, plus rares, ces deux termes sont utilisés indifféremment, ils sont considérés comme équivalents (« ... hydrocarbures (COV)... »).

Pour tenter d'éclaircir le problème, nous prenons comme référence Paul DEGOBERT (1992), le **seul auteur** de notre corpus bibliographique à aborder précisément le **problème des définitions** :

« [La catégorie des composés organiques volatils] recouvre une grande variété de produits différents. On peut utiliser comme définition celle de l'EPA [Environmental Protection Agency] aux Etats-Unis : " *On appelle composés organique volatil (COV) tout composé organique qui, une fois libéré dans l'atmosphère, peut y demeurer pendant un temps suffisamment long pour y participer à des réactions photochimiques. Bien qu'il n'y ait pas de démarcation nette entre composés volatils et non volatils, les composés qui s'évaporent rapidement aux températures ambiantes constituent la part principale des COV. La quasi-totalité des composés organiques qui peuvent être considérés comme des COV ont une tension de vapeur > 0,1 mm Hg dans des conditions normales (20°C et 1 atm.)* ". La définition des "hydrocarbures" diffère un peu de celle des COV: ce sont en général les composés organiques tels que mesurés par la méthode FID⁵. » [DEGOBERT, 1992, p. 28].

Si ces définitions ont le mérite d'apporter une réponse au problème, elles apparaissent cependant elles-mêmes assez floues : "*pas de démarcation nette*", "*la part principale*", "*la quasi-totalité*", "*peuvent être considérés comme*", "*ce sont en général*", et, pour un non-spécialiste, il semble toujours aussi difficile de saisir sur quels critères on distingue les COV des hydrocarbures.

Finalement, insatisfaits des diverses informations glanées dans toute les sources bibliographiques spécialisées, ce sont dans les définitions les plus simples que nous avons trouvé les clés de compréhension : les composés organiques sont constitués par du carbone, sous toutes les combinaisons ; parmi ces combinaisons, les hydrocarbures sont des composés binaires constitués de carbone et d'hydrogène [BIBLIOROM LAROUSSE, 1996, Cédérom].

Les COV regroupent donc tous les composés organiques (c'est-à-dire les composés constitués de carbone C, d'hydrogène H, d'oxygène O, et éventuellement d'azote N, de soufre S, de fluor F, de chlore Cl..) qui s'évaporent facilement dans l'atmosphère où ils participent à des réactions photochimiques ; parmi toutes les combinaisons à base de carbone, les hydrocarbures (composés binaires constitués de carbone et d'hydrogène) constituent le sous-groupe le plus important (pour la pollution automobile).

1.1.6.- Polluants persistants

Les polluants « classiques » sont émis en grandes quantités, mais ont une durée de vie relativement brève dans l'atmosphère. Les polluants persistants au contraire, même s'ils ne sont émis qu'à de très faibles doses annuellement, ne sont pas éliminés par réduction ou par réactions chimiques. Leur persistance durant plusieurs centaines d'années, voire plus entraîne leur accumulation dans l'environnement, atteignant ainsi des concentrations nocives. Il s'agit des métaux lourds, notamment le plomb et le cadmium, des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques, des composés organochlorés, notamment des dioxines, des Chloro Fluoro Carbonates [OCDE, 1995, p. 36], des PCB.

⁵ voir paragraphe 2.1.5.

1.1.7.- Présence à l'état naturel des polluants liés à l'automobile

Au bord des routes, en milieu rural surtout, il semble assez aisé (en tout cas plus facile qu'en milieu urbain) de connaître les différentes sources de pollution des alentours. Par contre, il est un aspect qu'on pourrait vite oublier, c'est que la Nature elle-même est source de polluants. Le tableau 5 qui suit donne quelques indications.

Polluant	Présence à l'état naturel
CO	<ul style="list-style-type: none"> CO issu de la combustion de la biomasse, de l'oxydation du méthane et des hydrocarbures émis par la végétation et les océans, et par l'activité biologique de la végétation terrestre et aquatique [CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 8]. Normalement présent à l'état de traces dans l'atmosphère [SCHÜTZ, 1995, p. 78].
CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> Rejeté par les plantes, les volcans [MOUVIER, 1994, p. 10].
COV	<ul style="list-style-type: none"> Les COV sont largement présents à l'état naturel : les COV émis par les végétaux sont très nombreux ; ils sont regroupés en 4 familles : isoprène, α-pinène, monoterpènes et autres composés inconnus [CITEPA, 1989, p. 2] ; les émissions sont essentiellement facteurs du type de végétaux, de l'intensité lumineuse et de la température ambiante [CITEPA, 1989, p. 5]. La proportion de COV d'origine naturelle varie donc selon les pays : « En Finlande très boisée, les COV d'origine naturelle interviennent pour 71 % et le trafic pour 11 % ; ces chiffres sont au contraire respectivement de 5 % et de 42 % aux Pays-Bas » [DEGOBERT, 1992, p. 29]. Les océans émettent du diméthyl sulfure [CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 8].
Méthane	<ul style="list-style-type: none"> Principales sources de méthane : marais et fermentation dans les zones tropicales, rumination du bétail ou des autres ruminants, déjections ; il est comptabilisé à part aux Etats-Unis du fait qu'il s'agit d'un hydrocarbure photochimiquement peu réactif et peu toxique [CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 8 ; ACADEMIE DES SCIENCES, 1996, p. 8] ; il ne participe pas à la formation d'ozone [BIRRAUX, 1995, p. 8]. On parle alors de COVNM (COV non méthaniques). En Europe, le méthane est comptabilisé avec les autres COV, ce qui apparaît moins pertinent [ACADEMIE DES SCIENCES, 1996, p. 8].
NO _x	<ul style="list-style-type: none"> Issus des combustions (incendies), éclairs des orages, décomposition partielle des nitrates [MOUVIER, 1994, p. 12-13] NO est émis par l'activité bactérienne des sols [DEGOBERT, 1992, p. 23].
Ozone	<div style="text-align: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">formation</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">destruction</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center;"> <div style="text-align: center; margin-right: 20px;"> <p>Arrivées stratosphériques</p> <p>20 %</p> </div> <div style="text-align: center; margin-right: 20px;"> <p>Photochimie</p> <p>80 %</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <p>ozone troposphérique</p> </div> <div style="margin-left: 20px;"> <p>67 % photochimie</p> <p>33 % dépôt sol, végétation</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 20px;"> <p>COV</p> <p>Naturels 51 %</p> <p>Anthropiques 49 %</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>NO_x</p> <p>Naturels 10 %</p> <p>Anthropiques 90%</p> </div> </div> <p style="text-align: right; margin-top: 10px;">Source : MOUVIER, 1994, p. 94</p> </div>
SO ₂	<ul style="list-style-type: none"> Le SO₂ est un rejet exclusivement anthropique, mais d'autres composés soufrés sont émis naturellement (hydrogène sulfuré, composés organo-soufrés, etc.) [MOUVIER, 1994, p. 114]
Particules	<ul style="list-style-type: none"> Volcans, érosion éolienne [ARGOPOL, 1995, p. 24] ; feux de forêts [DEGOBERT, 1992, p. 45].

Tableau 5 : Présence à l'état naturel des divers polluants

1.1.8.- Evolution à moyen ou long terme des teneurs

Polluant	Evolution à moyen ou long terme des teneurs
CO	<ul style="list-style-type: none"> Entre 1980 et 1994, \searrow de 32 % des émissions globales en France, et \searrow de 33% des apports du secteur des transports [CITEPA 1994, in CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 66 ; OCDE, 1997, p. 79].
CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> 280 ppm vers 1850 (avant l'ère industrielle) ; 350 ppm aujourd'hui [MOUVIER, 1994, p. 10]. Croissance constante au niveau mondial d'environ 0,5 % par an, malgré les mesures de limitation [MOUVIER, 1994, p. 11]. En France, \searrow de 27 % entre 1980 et 1994 due à l'ensemble des secteurs excepté les transports [OCDE, 1997, p. 77]. 80 % de la \nearrow des émissions CO₂ en France (\nearrow de 6 % prévue entre 1990 et 2005) sont imputables aux transports [OCDE, 1997, p. 173].
COVNM	<ul style="list-style-type: none"> \searrow de 10 % des émissions totales en France entre 1990 et 1994 [OCDE, 1997, p. 79].
Méthane	<ul style="list-style-type: none"> La concentration moyenne du méthane a doublé depuis l'ère préindustrielle et \nearrow régulièrement, de 0,7 % par an [Mouvier, 1994, p. 98].
NO _x	<ul style="list-style-type: none"> Globalement, entre 1980 et 1994 \searrow de 14 % (France) [OCDE, 1997, p. 79]. De 1980 à 1988, en légère augmentation dans le secteur des transports ; depuis, niveau stable [Citepa 1994, in Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, 1996, p. 66].
Ozone	<ul style="list-style-type: none"> Teneurs actuelles 5 fois supérieures à celles mesurées à la fin du siècle dernier (10 ppb) [CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 7] Teneurs de fond \nearrow 1,5 % par an depuis 20 ans [ACADEMIE DES SCIENCES, 1993 in SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 15] ; \nearrow 1 à 3 % par an depuis 30 ans [SCHEEREN et ADEMA, 1996, p. 335].
SO ₂	<ul style="list-style-type: none"> \searrow de 27 % entre 1991 et 1994 ; \searrow de 72 % entre 1980 et 1994 ; évolution due à l'ensemble des secteurs excepté les transports dont les émissions ont \nearrow de 17 % entre 1980 et 1994 (France) [OCDE, 1997, p. 77]. Depuis 1980, légère \nearrow dans le secteur des transports [CITEPA 1994, in CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 66].
Plomb	<ul style="list-style-type: none"> Depuis milieu des 80's, \searrow de 60 % (France) [OCDE, 1997, p. 79]. A Paris, la concentration moyenne annuelle a \searrow de 8 mg/m³ à moins de 1 mg/m³ entre 1978 et 1991 [MOUVIER, 1994, p. 40].
Particules	<ul style="list-style-type: none"> Entre 1980 et 1994 \searrow de 52 % environ ; évolution due à l'ensemble des secteurs excepté les transports dont les émissions ont \nearrow de 50 % depuis 1980 (France) [OCDE, 1997, p. 79]. Depuis 1980, forte \nearrow dans le secteur des transports [CITEPA 1994, in CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 66] ; à Vienne (Autriche), l'indice Fumées Noires a \nearrow de 27 % entre 1985-1986 et 1994 [HITZENBERGER & al., 1996, p. 275].

Tableau 6 : Evolution des teneurs

1.1.9.- Quelques concentrations comme point de repère

Le réseau de surveillance de la qualité atmosphérique en France est essentiellement implanté en milieu urbain et industriel [ARGOPOL, 1994, p. 28]. Les capteurs mesurent essentiellement du SO₂ (47 % des machines), des poussières (24 %), mais sans doute pour une bonne part selon la technique des « fumées noires », technique peu adaptée à la pollution actuelle, des NO_x (13 %) et de l'ozone (5 %) [ADEME, 1994 in HOLLIGTON, 1996, p. 4]. Bien que les réseaux s'adaptent petit à petit à l'évolution de la pollution, les mesures pour certains polluants sont donc relativement rares, notamment en milieu rural ou à proximité des grands axes routiers et lorsque ces mesures existent, les séries sont encore un peu courtes pour être véritablement exploitables. Le tableau qui suit présente néanmoins quelques valeurs susceptibles de donner des ordres de grandeurs sur les niveaux de concentration de tel polluant, dans tel environnement.

Polluant	Quelques valeurs comme points de repère
CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concentration actuelle dans l'atmosphère : 350 ppm [MOUVIER, 1994, p. 10]
COV	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ensemble des stations françaises : <ul style="list-style-type: none"> ▶ Moyennes annuelles : 1,2 à 2,2 mg/m³, ▶ Percentiles 98 : 1,5 à 3,9 mg/m³, ▶ Moyenne horaire maxi : 2,2 à 18,5 mg/m³ [SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 32].
HAP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Dans l'air urbain</u> : 1,5 ng/m³ = teneurs moyennes à la Tour St-Jacques (Paris, 1994) [SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 33]. ▪ <u>Dans le sol, zone isolée</u> : 100 ppb dans les couches superficielles du sol (litière et humus) des zones éloignées de toute source de pollution [BERTEIGNE, LEFEVRE, ROSE, 1988, in SETRA-MAZOUÉ, 1994, annexe 4].
HC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Taux naturel (Nord de la France) ≈ 1000 µg/m³ [ARGOPOL, 1995, p. 31].
Benzène	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Zone boisée ou agricole</u> : 0,001 ppm ▪ <u>Autoroutes</u> : 0,016 ppm [CONCAWE, 1981, in ESCOURROU, 1996, p. 89].
Ozone	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La concentration moyenne annuelle dans l'hémisphère Nord est actuellement de 50 ppb avec une moyenne mensuelle maximale au printemps (60 ppb) et minimale en automne (40 ppb) [MOUVIER, 1994, p. 100]. ▪ Zones isolées = 20-60 µg/m³ (moy.) ▪ Zones rurales et suburbaines = 35-90 µg/m³ (moy.), 150-400 µg/m³ (max. sur 1h), 100-350 µg/m³ (max. sur 8h), 100-250 µg/m³ (max. sur 24h), ▪ Zones urbaines = 20-60 µg/m³, 100-350 µg/m³ (max. sur 1h), 50-200 µg/m³ (max. sur 24h), [CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 7].
SO ₂	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En France, le niveau mesuré dans les stations rurales est ≈ 10 µg/m³ [SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 30].
Métaux	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concentrations moyennes « naturelles » dans les sols : <ul style="list-style-type: none"> ▶ Plomb : 10 à 20 ppm [MULLER, 1994, p. 10], ▶ Cadmium : généralement inférieur à 1 ppm [MULLER, 1994, p. 10].
Particules	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En France, les « concentrations moyennes annuelles réseaux de fumées noires sont généralement < à 40 µg/m³[...]. [Mais] il existe un problème d'harmonisation des méthodes de mesure pour les particules ». [SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 30].

Tableau 7 : Quelques concentrations comme points de repère

1.1.10.- Normes actuelles concernant les émissions des véhicules neufs

Tableau 8 : Normes européennes à l'émission pour homologation des véhicules neufs (Mesures sur bancs et cycles d'essai normalisés)

Type de véhicule		Rejets de NO _x	Rejets de HC	Rejets de CO	Rejets de particules
Véhicules particuliers masse < 2,5 t moins de 7 places (depuis le 01/01/1997)	Essence*	0,6 g/km		2,2 g/km	Pas de normes
	Diesel**	0,8 g/km		1 g/km	1 g/km
Véhicules utilitaires légers masse < 3,5 t ou nombre de places (depuis le 01/10/1994)	< 1,25 t	0,97 g/km		2,72 g/km	0,14 g/km
	< 1,7 t	1,4 g/km		5,17 g/km	0,19 g/km
	> 1,7 t	1,7 g/km		6,9 g/km	0,25 g/km
Poids lourds (depuis le 01/01/1997)		7 g/kWh	1,1 g/kWh	4 g/kWh	0,15 g/kWh
2 roues (depuis le 01/01/1996)		3 g/km		6 g/km	Pas de normes
3 roues (depuis le 01/01/1996)		1,2 g/km		Pas de normes	

Source : SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE SANTÉ PUBLIQUE, 1996, p. 21.
 * Le catalyseur 3 voies est obligatoire sur les véhicules neufs [OCDE, 1997, p. 74].
 ** Les pots d'oxydation seront bientôt obligatoire en France pour les véhicules diesel neufs (voir paragraphe 1.2.1.2.).

1.1.11.- Polluants traceurs des rejets automobile

Les polluants traceurs (ou « marqueurs », mais le terme est plutôt employé pour des substances biologiques) sont des polluants **caractéristiques de la pollution routière**. Leur présence dans l'écosystème permet de détecter le dépôt et le cheminement de la pollution automobile le plus distinctement possible des autres sources de pollution.

- Pollution automobile en général :

Les oxydes d'azote : Très bien corrélée au trafic, la teneur en NO_x ($r = 0,98$ pour NO et $r = 0,93$ pour NO₂) est un très bon indicateur de la pollution automobile, d'autant plus qu'il tient compte du parc des véhicules diesel [ALARY & al., 1994, p. 63]. « *Le monoxyde d'azote peut être considéré actuellement comme le meilleur indicateur de la pollution automobile* » [HOLLINGTON, 1996, p. 49]. Malheureusement, les NO_x réagissent dans l'atmosphère et se transforment : des mesures de dépôt ou de concentrations dans les divers éléments de l'environnement ne sont pas envisageables.

Le benzène : Il peut être considéré comme un traceur puisqu'on estime que 80 à 85% du benzène dans l'atmosphère provient du trafic routier [DEGOBERT, 1992, p. 32].

Steranes et triperpanes pentacycliques : En conclusion de leur étude, ROOGE & al. [1993, p. 649] proposent comme traceurs de la pollution automobile, les steranes⁶ et les triperpanes pentacycliques (17 α (H),21 β (H)-hopane). Ces deux groupes sont des composés organiques qui ne font pas partie des constituants de l'essence ou du gazole. Ils sont introduit dans les rejets par les huiles. Relativement abondants, ils conviennent bien pour le marquage de la pollution routière.

⁶ Sont compris, dans les steranes étudiés par les auteurs : (20S and R)-5 α (H),14 β (H),17 β (H)-cholestanes ; (20R)-5 α (H),14 β (H),17 β (H)-cholestanes ; (20S and R)-5 α (H),14 β (H),17 β (H)-ergostanes ; (20S and R)-5 α (H),14 β (H),17 β (H)-sitostanes.

- Pollution particulaire :

Le plomb : 75 à 85 % des teneurs en plomb de l'atmosphère proviennent des gaz d'échappement. Sa détection est aisée [SCETAUROUTE, 1992, p. 22]. Actuellement, la quantité de plomb provenant du trafic routier tend à diminuer depuis l'introduction de l'essence sans plomb et l'augmentation du nombre des véhicules diesel sur le marché, mais l'évolution reste lente vu le faible renouvellement du parc automobile [MALBREIL, 1997, p. 2]. En 1995, ≈ 50 % des véhicules fonctionnaient encore à l'essence plombée. De plus, le plomb est un polluant persistant qui s'accumule (dans le sol notamment). Ce dernier constitue donc un traceur de la pollution automobile. Les quantités de plomb ne sont plus ou pas représentatives du trafic, mais sa dispersion correspond à celle des particules.

Cependant, une étude récente basée sur la détermination des isotopes du plomb explique comment déterminer précisément l'origine du polluant. Le plomb ajouté comme anti-détonnant est caractérisé par le rapport isotopique $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} \approx 1,061 - 1,094$ [MONNA & al., 1997, p. 43]. En milieu urbain notamment, d'autres sources de plomb contribuent à la pollution (voir graphique 1- *Non reproduit dans la version en ligne*).

Les HAP : On a vu que les HAP sont adsorbés en grande partie sur les particules (voir paragraphe 1.1.3. ; figure 1). On peut être plus précis :

- Les HAP légers (3 noyaux), émis en moins grande quantité, restent en majorité dans la phase gazeuse pour les véhicules à essence. 50 % des HAP légers sont adsorbés dans le cas des diesel,
- Les HAP à 4 noyaux (comme le fluoranthène et le pyrène) se retrouvent à 90 % adsorbés sur les particules diesel,
- Les HAP lourds (5 noyaux et plus) sont adsorbés à plus de 99 % dans les particules émises, que ce soit un véhicule à essence ou diesel [DEGOBERT, 1992, p. 208].

Or, 87 % des émissions de particules liés au trafic routier sont issus de véhicules diesel. Les HAP constituent donc de bons traceurs de la pollution automobile particulaire (notamment diesel), mais en valeurs absolues, les véhicules essences non-catalysés émettent des quantités beaucoup plus importantes de HAP que les diesels [ROGGE & al., 1993, p. 649 ; INRETS, 1990, p. 107-109].

Non reproduit dans la version en ligne

Graphique 1 : Part des HAP particuliers et des HAP en phase gazeuse (en % de la masse totale) pour les véhicules essence et diesel, mesurées sur cycle Inrets urbain lent chaud in INRETS, 1990, p. 106.

Abréviations : **P** = Pyrène ; **BaA** = Benzo(a)anthracène ; **BbF** = Benzo(b)fluoranthène ; **BjF** = Benzo(j)fluoranthène ; **BkF** = Benzo(k)fluoranthène ; **BaP** = Benzo(a)pyrène ; **Per** = Pérylène ; **IP** = Indéno(1,2,3-cd)pyrène ; **BghiP** = Benzo(g,h,i)pérylène

On peut aller encore plus loin, comme le suggèrent HAUTALA & al. (1993, p. 48) : à la suite d'une étude portant — entre autre — sur l'analyse des HAP, les auteurs concluent qu'il n'est pas utile, dans l'état actuel des connaissances de mesurer 16 HAP et proposent que les prochaines études se focalisent sur 1 composé comme marqueur de la pollution automobile. Cependant, dans la pratique, une certaine méconnaissance ainsi que des difficultés d'échantillonnage font qu'il est recommandé de mesurer la totalité des HAP sous formes particulaire et gazeuse (voir paragraphe 2.3.1.2).

Enfin, il faut garder à l'esprit que :

1. les émissions de HAP sont plus importantes, unitairement, pour les véhicules essence (notamment sans catalyseur) que pour les diesel,
2. les émissions de HAP résultent notablement des rejets automobiles, mais pas seulement : toutes les combustions de fuel sont des sources de HAP : chauffage résidentiel, procédés industriels, production d'électricité, incinération des déchets [WILD et JONES, 1995 in TREMOLADA & al., 1996, p. 3570].

- Pollution photochimique:

L'ozone : La pollution photochimique est constituée d'un mélange complexe des substances en proportions très variables (ozone, PAN, aldéhydes, acide nitrique, eau oxygénée, etc.). L'ozone est généralement le seul polluant photochimique mesuré en tant que traceur et indicateur de cette pollution [CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE, 1996, p. 4].

Remarque générale concernant l'utilisation de traceurs : Les polluants que nous venons de présenter sont, à différents degrés, caractéristiques de la pollution automobile, à l'exception de l'ozone. Cependant, même ceux d'entre eux qui paraissent les plus intéressants (plomb pendant longtemps, HAP actuellement) peuvent avoir d'autres origines. Il semble donc primordial, sur un site d'étude, de répertorier toutes les sources locales de ces polluants à prendre en compte (ou mieux à mesurer) pour l'interprétation des résultats. Pour les HAP par exemple : incinérateurs, centrales et chauffage (mais heureusement, seulement en hiver : c'est une source de moins durant l'été).

1.2.- Facteurs influençant l'émission de polluants

Les quantités de polluants rejetées par chaque véhicule sont appelées « émissions unitaires ». Ces émissions sont la résultante de la superposition de toute une série de variables que nous allons présenter sommairement.

1.2.1.- Facteurs liés aux véhicules

Les caractéristiques du véhicule ont une grande influence sur les émissions unitaires :

1.2.1.1.- Le type de véhicule

Il existe des classifications très détaillées des divers véhicules (notamment pour les poids lourds⁷), mais on peut se contenter de distinguer les catégories suivantes :

- ⇒ Véhicule particulier (VP)
- ⇒ Véhicule utilitaire (VU)
- ⇒ Poids lourds (PL)
- ⇒ Deux roues

- ⁷Catégories proposées par l'INRETS :

- ⇒ **véhicule articulé** ou **ensemble articulé** = ensemble « tracteur + semi-remorque », souvent contracté en « semi-remorque » et même « semi » (langage courant) qui deviennent alors tous deux masculins. Un « semi » désigne le véhicule articulé complet que l'on essayera de ne pas confondre avec la « semi » ou la semi-remorque lorsqu'on évoque par exemple une semi-remorque citerne ou frigorifique. Une semi-remorque comporte 1, 2 ou 3 essieux, le tracteur en a 2 voire 3, et l'ensemble peut donc avoir de 3 à 6 essieux. Longueur limite : 16m50.
- ⇒ **train routier** = ensemble "porteur + remorque", le porteur étant un camion solo à 2 ou 3 essieux et la remorque, attelée au camion, a également 2 ou 3 essieux. Au total, le train routier dispose au minimum de 4 essieux et au maximum de 6 essieux. Longueur limite : 18m50.
- ⇒ **maxi-code** = véhicule lourd disposant d'au moins 5 essieux pour être autorisé au poids maximal de 40 tonnes.
- ⇒ **« ensemble routier »** = véhicule articulé ou train routier : désigne l'un ou l'autre de ces grands poids lourds ("Long Vehicle" en anglais).
- ⇒ **véhicule utilitaire** ou **VU** = tout véhicule utilisé pour des activités commerciales, industrielles (et non privées) et assuré par une société. Cela s'applique aussi bien à une voiture qu'un car ou un camion.
- ⇒ **véhicule utilitaire lourd** = VU d'au moins 3,5 tonnes, ce qui permet de ne pas prendre en compte les voitures, breaks, 4x4, fourgonnette. Egalement appelé « véhicule industriel » [INRETS, 1994, p. 6].

- Catégories proposées par CORINAIR :

- ⇒ Véhicules utilitaires < 3,5 tonnes
- ⇒ Poids lourds dont le tonnage est compris entre 3,5 et 16 tonnes
- ⇒ Poids lourds > 16 tonnes.

Bien entendu, plus les véhicules sont lourds, plus les besoins énergétiques sont élevés, plus la consommation de carburant augmente et plus les émissions sont importantes (voir tableau 9).

On note également le rôle de la cylindrée des véhicules pour certains polluants [INRETS, 1990, p. 11].

L'émission de polluants de certains deux-roues (ou trois-roues) de petite cylindrée peut atteindre un niveau plus élevé que celui des voitures (CO, HC + NO_x) [ACADEMIE DES SCIENCES, 1996, p. 8].

Véhicule	Charge	Vitesse km/h	Conso. l/100 km	CO ₂ g / km	CO g / km	HC g / km	NO _x g / km	Particules g / km
Fourgon 3,5 T	Vide	123,7	16,4	378	1,7	1,6	1,9	2,0
	Pleine charge	117,7	17,0	391		1,8		2,3
Camion 19 T	Vide	88,4	25,7	668	2,8	0,7	12,0	0,4
	Pleine charge	84,7	29,5	755	3,8		13,4	0,5
Tracteur 40 T	Vide	88,0	27,0	623	1,7	1,0	7,4	0,9
	Pleine charge	75,6	42,1	940	3,0		10,1	1,3

Source : INRETS/ADEME in ADEME-CARRIE, n.d., p. 11.

Tableau 9 : Emissions des véhicules lourds sur autoroutes, selon la charge in ADEME-CARRIE, n.d., p. 11.

Non reproduit dans la version en ligne

Graphique 2 : Profil des émissions des transports routiers par type de véhicule in EUROSTAT, 1995, p. 6.

1.2.1.2.- Variations entre les carburants et les diverses technologies

a) Les carburants

Etant donné leur très faible part dans le parc des véhicules en circulation, nous ne nous attarderons pas sur les carburants des substitutions ou carburants alternatifs⁸ : GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié), GNV (Gaz Naturel pour Véhicules), gaz « de récupération », carburants « verts » de biomasse (« biocarburants »), électricité, autres « carburants » (hydrogène, essences de synthèse) [BIRRAUX, 1995, p. 15]... Ces carburants font partie de

⁸ Le lecteur plus spécialement intéressé par ces aspects pourra se reporter aux documents suivants :

- 1) [BIRRAUX, 1995, Mission ministérielle « Sources d'énergie non polluantes pour les transports collectifs », 135 pages].
- 2) [OCDE, 1995, « La pollution des véhicules à moteur - Stratégies de réduction au-delà de 2010 », chapitre « Carburants de substitution », pp. 78-85].
- 3) [ACADEMIE DES SCIENCES, 1996, p. 9]
- 4) La revue Arguments, Lettre d'information de l'union française des industries pétrolières (UFIP), ISSN 1164-7450, et notamment les numéros suivants : 1992, n°7 : « Biocarburants : clarifier le débat » ; 1996, n°19 : « Oxygénés, biocarburants et lutte contre la pollution : mythes et réalités ».
- 5) Science et Avenir, août 1994, « Carburants : le plein de changements », pp. 80-82.
- 6) Sur le thème des émissions de précurseurs de polluants secondaires par les carburants alternatifs :
 - GABELE PETER, 1994, Ozone precursor emissions from alternatively fueled vehicles (Emissions de précurseurs d'ozone par les véhicules à carburant alternatifs), SAE, pp. 1-8.
 - CHANG T.Y., RUDY S.J., 1990, Ozone-forming potential of organic emissions from alternative-fueled vehicles (Potentiel de formation d'ozone à partir des émissions organiques des véhicules à carburant alternatif), Atmospheric Environment, 24A, 9, pp. 2421-2430.
 - DUNKER ALAN M., 1990, Relative reactivity of emissions from methanol-fueled and gasoline fueled vehicles in forming ozone (Réactivité des émissions des véhicules alimentés au méthanol et au gazole pour la formation d'ozone), Environmental Science and technology, 24, pp. 853-862.
 - MCNAIR LAURIE, RUSSELL ARMISTEAD, ODMAN MEHMET T., 1992, Airshed calculation of the sensitivity of pollutant formation to organic compound classes and oxygenates associated with alternative fuels (Dilution de la sensibilité des composés organiques et oxygénés émis par les carburants alternatifs pour la formation de polluants), Journal of the Air and waste management association, 42, 2, pp. 174-178.

la panoplie des mesures possibles pour réduire la pollution automobile ; nous nous contentons de présenter (voir le tableau 10) les émissions de polluants liées à quelques-uns des ces carburants de substitution.

Composé (mg/km)	Essence	ER (essence recherche)	M85 (essence-méthanol 85%)	M100 (méthanol pur)	E85 (essence-éthanol 85 %)	GNC (Gaz naturel comprimé)	GPL (Gaz de pétrole liquéfié)
Benzène	7,95	4,88	4,38	0,32	1,21	0,242	0,242
Toluène	33,66	3,45	8,66	2,11	0,75	0,695	0,695
Méta & paraxylène	4,57	4,77	1,54	0,30	1,30	0,705	0,033
Orthoxylènes	1,95	1,58	0,46	0,16	0,39	0,399	0,101
1,3-butadiène	0,19-0,50	0,24	0,44	2,05*	0,12	0,093-0,404	–
Formaldéhyde	4,78	0,60	13,87	21,76	3,15	2,712	4,870
Acétaldéhyde	0,94	0,50	10,02	0,27	13,32	0,529	0,641
Acroléine	1,12	–	4,44	0,09	–	0,330	0,118

* selon d'autres sources (US EPA, 1993) les émissions de 1,3-butadiène produites par ce carburant pourraient être quasiment nulles. Source : [RADIAN, 1992 in OCDE, 1995, p. 79].

Tableau 10: Émissions de polluants toxiques liées à certains carburants de substitution (mg/km) pour les véhicules essence.

Dans ce rapport, nous nous concentrerons sur les trois carburants qui alimentent la très grande majorité des véhicules en France : l'essence plombée, l'essence sans plomb et le gazole :

	Essence plombée	Essence sans plomb
Benzène	1,5 %	2,3 %
Aromatiques	32,3 %	43,2 %

Source : OCTEL, 1993, pp. 8-9 in COURSIMAULT & al., 1995, p. 20.

Tableau 11 : Moyenne des teneurs en benzène et aromatiques calculées dans 14 carburants sans plomb, et 14 carburants avec plomb.

b) Comparaison moteur à essence / moteur diesel et systèmes de dépollution associés

Les véhicules à essence et les véhicules diesel rejettent à peu près les mêmes polluants, mais dans des proportions différentes : les véhicules diesel légers émettent nettement moins de polluants gazeux primaires que les véhicules à essence, particulièrement pour le CO, les HC et, à froid, pour les HAP. La pollution des diesel est d'une autre nature [INRETS, 1990, p. 65] : **particule**, NO_x, et pollution acide soufrée [ACADEMIE DES SCIENCES, 1996, p. 8] car les normes sont moins contraignantes pour le gazole que pour l'essence [ESPAGNO, communication verbale, 1998] (voir tableau 12).

Sur les véhicules à essence, l'utilisation d'un **pot catalytique** permet de réduire les émissions de certains polluants, notamment avec les pots catalytiques 3 voies montés sur les véhicules récents [ACADEMIE DES SCIENCES, 1996, p. 8]. Il faut cependant savoir que :

1. le pot catalytique entraîne une surconsommation de 5 % environ [SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE SANTÉ PUBLIQUE, 1996, p. 17],
2. le pot catalytique ne fonctionne efficacement que lorsque le moteur est chaud or ; et c'est vrai surtout en ville où les trajets sont courts, plus de 25 % du kilométrage total en France est effectué moteur froid (voir paragraphe 1.2.5.). Pour faire face à ce problème, certains véhicules récents sont équipés d'un « petit catalyseur annexe, dit « catalyseur allumette », placé en sortie du moteur et qui monte en régime très rapidement ; des catalyseurs à chauffage électrique au départ sont également proposés. » [ACADEMIE DES SCIENCES, 1996, p. 8].

Pour les véhicules diesel, un système de dépollution, dit « pot d'oxydation », permet de réduire considérablement les émissions d'HC et les mauvaises odeurs ; ces systèmes sont déjà montés en série dans certains pays européens [ACADEMIE DES SCIENCES, 1996, p. 8] (en Allemagne notamment), ils seront bientôt obligatoire en France pour les véhicules diesel neufs [Emission de télévision "C'EST PAS SORCIER" (France 3) du 04/02/1998 (17 h 45), consacrée à la pollution automobile]. Pour les particules et les NO_x, on ne dispose pas encore de dispositif d'élimination simple et efficace [ACADEMIE DES SCIENCES, 1996, p. 8].

Polluant		Essence		Diesel
		sans catalyseur	avec catalyseur	
CO**				
CO ₂ ***				 (mais pour le même taux d'émission, la distance parcourue est plus grande)
COV	COVNM**			
	10 HAP**			
	Benzène*			
	1,3-butadiène*			
	Formaldéhyde*			
	Acétaldéhyde*			
NO _x **				
N ₂ O**				
Pb****		Emissions nulles		
Particules [LUCAS, 1995 in SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 59]				
SO ₂ ****		Emissions nulles		

Sources : * [d'après EPEFE in SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 17] ; ** [d'après INRETS in ADEME, 1996, p. 6] ; *** [d'après JOURMARD, 1994 in SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, 1996, p. 18] ; **** [d'après CEMT, 1990, p. 25-26].

Tableau 12 : Comparaison des émissions des voitures à essence et diesel (proportion respectées ligne par ligne, pour chaque polluant indépendamment des autres)

c) Pollution liée à la climatisation des véhicules

La climatisation des véhicules provoque une double aggravation des émissions de polluants :

1. la climatisation fonctionne avec des CFC sous forme de fluide, dangereux pour la couche d'ozone ; ceci est d'autant plus vrai que les contraintes d'implantation sous le capot implique l'utilisation de divers tuyaux et joints non parfaitement étanches, et source d'une grande part des pertes de fluide [ENERPRESS 6639, 1996, p. 1],
2. la climatisation prélève « *de la puissance directement au moteur thermique du véhicule et lui fait émettre plus de polluants* » [ENERPRESS 6639, 1996, p. 1]. Les écarts de consommation de carburants s'avèrent considérables (voir graphiques ci-dessous).

Non reproduit dans la version en ligne

Graphique 3 : Consommation de la climatisation sur cycle urbain CEE
Véhicules Essence

Non reproduit dans la version en ligne

Graphique 4 : Consommation de la climatisation sur cycle extra-urbain CEE - Véhicules Essence

Non reproduit dans la version en ligne

Graphique 5 : Consommation de la climatisation sur cycle urbain CEE
Véhicules Diesel

Non reproduit dans la version en ligne

Graphique 6 : Consommation de la climatisation sur cycle extra-urbain CEE
Véhicules Diesel

Pour plus de précision, on peut se reporter à ENERPRESS, 6639, 1996, pp. 1-9 qui propose un compte-rendu d'un document rédigé par BARBUSSE Stéphane (ADEME), 1996 : « Climatisation automobile et environnement ».

1.2.1.3.- Etat / entretien du véhicule

L'âge du véhicule est un facteur très important : en France, les voitures de plus de 10 ans représentent 18% du parc, 12 % du kilométrage mais 40 à 60 % des émissions polluantes [OCDE, 1997, p. 175] ; selon d'autres sources, 20 % du parc est responsable de 80 % de la pollution [ACADEMIE DES SCIENCES, 1996, p. 8]. L'entretien des véhicules joue également pour une bonne part dans les rejets : on estime que 1 voiture sur 3 est mal réglée ; dans le pire des cas, « *un moteur mal entretenu peut produire jusqu'à 10 ou 15 fois plus de particules et de HC qu'un moteur correctement entretenu* » [OCDE/ENV, 1993 in OCDE, 1995, p. 59]. Ce réglage tient essentiellement à deux points : la composition du mélange air/carburant et le réglage du point d'allumage. S'il y a manque l'oxygène, la combustion est incomplète et le moteur rejette de grande quantité de CO et d'HC, mais un réglage optimum des rejets de CO et HC entraîne l'augmentation de la température du moteur et provoque une hausse des émissions de NO_x. S'il y a trop d'oxygène par rapport au carburant, les taux de HC augmentent en raison de combustion plus difficile [CEMT, 1990, p. 62].

Le graphique 8 qui suit, bien qu'il s'agisse de test américains (véhicules et normes), montre bien la relation entre l'entretien et les émissions d'un véhicule.

Non reproduit dans la version en ligne

Graphique 7: Dépassements de limites pour le cycle US FTP-75 (urbain fluide) selon l'entretien du véhicule in BECKER K., & al., 1993, p. 95. Traduction : Valeurs moyennes pour 112 véhicules ; *as-supplied* = tel quel ; *after-adjustment* = après réglage ; *after-repair* = après réparation.

1.2.1.4.- Niveau de chargement / aérodynamisme

Un véhicule chargé (ou dont l'aérodynamisme est réduit : galerie sur le toit, fenêtres ouvertes, etc.) émet une plus grande quantité de polluant puisque son moteur doit développer, pour atteindre une vitesse donnée, plus de puissance (d'où hausse de la consommation de carburant) que lorsque le véhicule est vide ou plus aérodynamique.

1.2.2.- Facteurs liés au conducteur

Il s'agit essentiellement du style de conduite. Un véhicule conduit de manière dite « agressive ou performante » (forte augmentation des rapports entre les vitesses, accélération, freinage, vitesse volontairement élevés) émettra une quantité de polluants supérieure au même véhicule conduit de manière « normale ou économique ». Les écarts entre les deux styles de conduite sont significatifs dans la plupart des cas, et se fait essentiellement dans la montée en vitesse [PILLOT, 1997, p.179].

Ce facteur « style de conduite » est important car d'une part les variations engendrées sont loin d'être négligeables, et d'autre part parce qu'il s'agit d'un des rares facteurs humains (avec l'accroissement général de l'utilisation des véhicules particuliers) qui intervienne directement sur les émissions. Le style de conduite, bien que propre à chacun, semble cependant avant tout lié à la culture du pays; il s'agit donc d'un facteur sur lequel la société peut agir.

1.2.3.- Facteurs liés aux conditions de circulation

Les émissions varient énormément selon les conditions de circulation : urbain lent, urbain fluide, route, autoroute, etc... En effet, les phases d'accélération et de décélération, la durée des arrêts aux feux (moteur au ralenti) ont un grand effet sur les niveaux d'émissions. Or, **la vitesse**, bien plus liée aux conditions de circulation qu'au style de conduite, qu'on a évoqué au dessus, **est le paramètre essentiel des émissions** : dans des trafics urbains congestionnés, les émissions de HC, de CO, de CO₂, de NO_x sont essentiellement le fait des véhicules diesel tandis que les émissions de NO_x des véhicules à essence sont moins influencées par les conditions de circulation tout en étant près de deux fois plus élevées sur autoroute rapide qu'en circulation urbain très congestionnée [INRETS, 1990, p. 63].

Malgré de fortes augmentations de la consommation d'énergie ces 15 dernières années, le transport interurbain consomme 29,3 Mtep contre 16 Mtep pour la ville [ENERPRESSE 5959, 1993, p. 2].

Selon les conditions de circulation (ville ou interurbain), les émissions de polluants sont différentes :

	CO	CO ₂	HC	NO _x
VP, essence et diesel	66 %	75 %	35 %	49 %
VU, essence et diesel	71 %	70 %	12 %	26 %

Source : ADEME/INRETS, n.d., in ENERPRESSE 5959, 1993, p. 2.

Tableau 13 : Part des émissions en ville par rapport aux émissions totales

	Type de circulation	Vitesse en km/h	CO en g/km	HC en g/km	NO _x en g/km	CO ₂ en g/km	Consom. en g/km
Voitures et petits utilitaires essence	Bouchon (g/h)	0	206	25,5	2,1	1435	585
	Urbain lent	5	72	8,5	1,7	425,5	182
	Urbain fluide	25	0,25	3	2	174	65
	Voie express lente	40	20	2,3	2,2	148	54,5
	Autoroute urbaine	70	16,4	1,6	2,7	140	51,5
Voitures et petits utilitaires diesel	Bouchon (g/h)	0	8,6	3,2	7,2	1473	475
	Urbain lent	5	2,6	0,8	2,1	485	156
	Urbain fluide	25	0,9	0,2	0,6	200	63
	Voie express lente	40	0,7	0,15	0,5	171	54
	Autoroute urbaine	70	0,6	0,1	0,5	159	52

Source : ADEME/INRETS, n.d., in ENERPRESSE 5959, 1993, p. 5.

Tableau 14: Emissions de polluants et consommation des véhicules et petits utilitaires (essence et diesel) selon le type de circulation

Les émissions sont bien plus importantes lorsque le véhicule est froid (démarrage). Il s'agit d'un paramètre de première importance, d'autant plus qu'en France, plus de 25 % du kilométrage total est effectué moteur froid [INRETS, 1990, p. 65] ; la distance parcourue à froid est en moyenne proche de 6 km [INRETS, 1995, Fiche résultat rapport 197].

Non reproduit dans la version en ligne

Graphique 8 : Distance parcourue à froid (avant la stabilisation des émissions) in INRETS, 1995, Fiche résultat rapport 197.

1.2.4.- Facteurs liés à la route

La route sur laquelle se déplace un véhicule constitue elle aussi une variable expliquant les émissions d'un véhicule. Deux paramètres sont à prendre en compte: l'altitude et la pente.

Les voitures sont réglées pour que les émissions soient minimum au niveau de la mer ; elles augmentent considérablement avec l'altitude : elles émettent 4 fois plus de CO à 2500 m [BRIMBLECOMBE, 1986 in SETRA-MAZOUÉ, 1994, p. 54]. La pente, qui va souvent de pair avec les hautes altitudes, aggrave le niveau d'émission des véhicules : comme le poids ou la limitation de l'aérodynamisme, la pente oblige le moteur à développer plus de puissance, donc sa consommation et finalement à rejeter plus de polluants. La pente entraîne une augmentation considérable des émissions [INRETS, 1990, p. 56].

Polluant	CO	CO ₂	HC	NO _x	Cons.
Surémission (g/km) pour 1 %	0,85	17	0,061	0,49	5,52
Source : INRETS, 1990, p. 56					

Tableau 15 : Surémissions pour chaque 1 % de pente supplémentaire

1.2.5.- Facteurs climatiques

Lors du démarrage à froid, et tant que le moteur n'a pas atteint 70°C [DEGOBERT, 1992, p. 163], les émissions sont plus importantes. La température de l'air joue donc un rôle puisqu'elle conditionne la durée qu'il faudra au moteur pour atteindre cette température. Le temps de chauffe sera d'autant plus long que la température ambiante est basse.

Aux émissions de polluants supérieures en hiver s'ajoute le dépôt de nombreux polluants gazeux sous l'effet du faible ensoleillement et des basses températures [ETTALA & al., 1986 ; LUNDE, 1976 ; MARKLUND & al., 1991 in HAUTALA & al., 1995, p. 45].

Le vent, en ralentissant ou en facilitant le déplacement des véhicules constitue un autre paramètre influençant les émissions.

Enfin, l'ensoleillement ne joue pas de rôle sur les émissions directes des véhicules, mais les rayonnements UV sont les déclencheurs de la chimie atmosphérique à l'origine de la formation de polluants secondaires, l'ozone essentiellement.

1.2.6.- Comment mesure-t-on les émissions unitaires des véhicules ?

Nous venons de présenter les principaux paramètres agissant sur le niveau des émissions d'un véhicule. Ces paramètres sont nombreux et difficiles à mesurer. Or, toute mesure doit être effectuée dans des conditions parfaitement contrôlées, ce qui est — à l'heure actuelle — techniquement impossible à mettre en œuvre dans les conditions réelles de circulation. C'est pourquoi tous les pays du monde utilisent le même « stratagème » pour effectuer des mesures d'émissions.

Les émissions unitaires sont mesurées la plupart du temps selon des cycles de conduite reproduits sur banc à rouleaux [INRETS, 1987, p. 9]. Ces cycles (voir graphique 10), sont établis après de nombreux essais et statistiques. Ils sont considérés comme représentatifs de la circulation de leur pays [INRETS, 1987, p. 10] et leur mise en œuvre est très rigoureuse: tous les paramètres sont prédéfinis très précisément (voir tableau 14). Les changements de rapports de boîte de vitesse sont déterminés automatiquement [INRETS, 1987, p. 21].

« Malheureusement, jusqu'à présent aucune unanimité ne s'est fait jour pour adopter des procédures universellement appliquées et on se trouve en présence de plusieurs types de cycles d'essai [...] pour lesquels il n'existe pas de corrélation permettant de passer de l'un à l'autre. » [DEGOBERT, 1992, p. 108]. L'auteur présente et compare dans le détail les cycles utilisés dans le monde, notamment les cycles américains FTP (Federal Test Procedure) mis au point par l'EPA ; les cycles européens : ECE (urbain), EUDC (péri-urbain), ... [DEGOBERT, 1992, p. 107 à 127].

Non reproduit dans la version en ligne

Tableau 16 : Description des 10 cycles français (INRETS) in INRETS, 1987, p. 19.

Non reproduit dans la version en ligne

Graphique 9 : Les 10 cycles Inrets regroupés en 4 classes
(Echelle des ordonnées : 0-60 et 0-140 km/h) *in* INRETS, 1987, p. 20.

1.2.7.- Emissions unitaires des véhicules

1.2.7.1.- Variations des émissions de voitures particulières sur routes urbaines, rurales et autoroutes

Les résultats présentés dans les graphiques qui suivent sont issus d'une étude dont le but est de contribuer à une estimation réaliste des émissions [METZ, 1993, p. 226].

Les mesures ont été effectuées en mélangeant divers cycles de conduite (EDC, FTP 75, M3 et M4 du TÜV, etc.) selon diverses proportions pour les émissions urbaines, sur routes rurales et autoroutes [METZ, 1993, p. 228].

Non reproduit dans la version en ligne

Graphique 10 : Emissions typiques du parc pour le **monoxyde de carbone** (CO) en milieu urbain, sur route rurale et sur autoroute avec différents types de combustions, et pour différentes années de références *in* METZ, 1993, p. 228.

Non reproduit dans la version en ligne

Graphique 11 : Emissions typiques du parc pour les **oxydes d'azote** (NO_x) en milieu urbain, sur route rurale et sur autoroute avec différents types de combustions, et pour différentes années de références *in* METZ, 1993, p. 230.

Non reproduit dans la version en ligne

Graphique 12 : Emissions typiques du parc pour les **hydrocarbures** (HC) en milieu urbain, sur route rurale et sur autoroute avec différents types de combustions, et pour différentes années de références *in* METZ, 1993, p. 229.

Non reproduit dans la version en ligne

Graphique 13 : Emissions typiques du parc pour les **particules** en milieu urbain, sur route rurale et sur autoroute avec différents types de combustions, et pour différentes années de références *in* METZ, 1993, p. 231.

1.2.7.2.- COV : pertes par évaporation

	Véhicule essence	Véhicule Diesel
Sur véhicule 	0,8 g/km ≈ 7,4 g/l/véhicule	5 kg/t gazole
Au remplissage 	2,54 g/m ³ (44 % au remplissage des citernes, 47 % au plein des voitures, 5 % par respiration, 5 % par éclaboussures)	
Source : DEGOBERT, 1992, p. 29		

La composition spécifique des émissions de COV, qu'elles soient produites par combustion ou évaporation, varie très fortement en fonction des carburants et de leur additifs. C'est pourquoi les véhicules à essence et diesels (ou autre carburant) donnent différents spectres d'émissions.

Cependant, les émissions totales de COV sont équivalentes car, si les véhicules diesel émettent beaucoup moins de COV par kilomètre, leur rejets contiennent une forte concentration des COV les plus réactifs (composés aromatiques, aldéhydes et oléfines) qui fait que les moteurs diesels contribuent de manière beaucoup plus importante à la formation d'ozone [OCDE, 1995, p. 28].

Une étude très poussée sur les sources des fines particules organiques en suspension (PM₂) a quantifié plus de 100 composés organiques dans les émissions de véhicules (tout types confondus) du parc utilisé : 6 voitures sans pot catalytique, 7 voitures équipées et 2 poids lourds, sur cycle [ROGGE & al., 1993, p. 649]. On note que les véhicules utilisés pour les mesures sont assez anciens, et essentiellement de marques américaines (transposition en Europe ?) : les voitures non catalysées datent de 1965 à 1976 ; les voitures catalysées de 1977 à 1983 ; les camions de 1987 tous les deux.

Cette recherche a montré que les véhicules essences non catalysés sont les plus gros émetteurs de HAP et d'oxy-HAP⁹ : 26 fois plus que les véhicules essences catalysés. Paradoxalement, les véhicules catalysés sont cependant presque les principaux émetteurs d'alcaloïde (« *alkanoic* » en anglais). Les poids lourds quant à eux émettent 4 fois plus de HAP que les véhicules catalysés, mais 7 fois moins que les non-catalysés (voir tableau 15) [ROGGE & al., 1993, p. 649].

⁹ Les oxy-HAP sont les HAP oxygénés [ROGGE *et al.*, 1993, p. 636].

	Taux d'émission ($\mu\text{g} / \text{km}$)		
	Voitures		Poids Lourds
	Non-catalysées	Catalysées	
n-Alkanes	689,4	108,8	3754,6
n-Alkanoic Acids	46,68	616,28	1237,4
n-Alkanoic Acid	1,2	5,0	8,0
Benzoic Acid	4,82	107,6	185,1
Substituted Benzaldehydes	124,97	27,65	19,0
HAP	1405,5	52,47	209,9
Carboxaldéhydes Arom. Poly.	81,5	27,7	Non détectés
Ketones et Quinones Aromatiques Polycycliques	309,9	44,08	207,0
Steranes Réguliers	37,0	17,1	189,4
Triterpanes Pentacycliques	57,7	25,5	271,9
N-Containing Compounds	69,3	57,67	28,56
Total autres composés	87,2	65,2	65,8

NB : L'intitulé de certains groupes n'est pas traduit. En effet, trop spécifiques pour que cette traduction soit contrôlée, nous avons choisi de les laisser dans leur langue d'origine. Source : ROGGE & al., 1993, p. 640-641.

Tableau 17 : Taux d'émission de divers composés organiques pour les voitures avec et sans catalyseur et les poids lourds in ROGGE & al., 1993, p. 640-641.

On a vu que les émissions de polluants sont fonction des conditions de circulation. Des mesures de HAP effectuées par l'INRETS [1990, p. 107] mettent en évidence ces variations (graphique 15).

Non reproduit dans la version en ligne

Graphique 14 : Émissions de HAP (en $\mu\text{g}/\text{km}$) pour des véhicules essence et diesel, selon 4 cycles Inrets et la moyenne de ces 4 cycles in INRETS, 1990, p. 107.

1.2.7.3.- Émissions des poids lourds

Les résultats présentés dans les graphiques qui suivent ont été obtenus dans les conditions suivantes : 6 véhicules lourds sélectionnés (voir tableau 16) pour leurs critères de représentativité (puissance et poids, émissions moyennes déterminées lors de tests préliminaires), cycles de conduite spécifiques aux véhicules lourds et à chaque type de véhicule, établis d'après des enregistrements réalisés sur route. Les camions sont lestés. Les mesures sont effectuées pour 4 vitesses moyennes (20, 40, 60 et 80 km/h) et pour deux styles de conduite : économique ou performant [PILLOT, 1997, p. 179-180].

Véhicule type	1 fourgon	2 camions solo		2 ensembles articulés		1 bus
Puissance	75 ch	150 ch	230 ch	340 ch	380 ch	200 ch
PTC ou PTP ¹⁰	2,5 t	9 t	12 t	25 t	37 t	13 t
Type de moteur	Aspiration naturelle	Suralimenté bridé refroidi	Suralimenté refroidi			

Source : PILLOT, 1997, p. 181.

Tableau 18 : Caractéristiques des véhicules retenus représentant le trafic lourd.

¹⁰ PTC = Poids total en charge ; PTR = Poids total roulant.

Non reproduit dans la version en ligne

Graphique 15 : Emissions en g/km des polluants réglementés mesurés selon 4 vitesses moyennes, pour 4 véhicules lourds de 150 à 380 chevaux (poids total de 9 à 37 tonnes) in PILLOT, 1997, p. 182.

1.2.8.- Part des transports dans les émissions totales en France

Les estimations concernant l'évaluation des émissions globales et la contribution de telles ou telles activités de transport présentent de grandes variations selon les sources. Nous avons choisis de présenter ici les données les plus récentes en notre possession : celles de l'OCDE et du CITEPA.

Globalement, malgré les progrès réalisés pour réduire les émissions et pour un plus grand respect de l'environnement, les résultats obtenus au niveau des émissions unitaires ont été « *plus que compensés par l'augmentation des volumes de circulation routière urbaine et interurbaine de passagers et de marchandises. La part des transports dans les émissions polluantes a augmenté* » [OCDE, 1997, p. 180].

Polluant	Emissions totales en France en 1994	Part des transports (tout type confondu) en %	
		Données OCDE	Données CITEPA
CO	9 Mt/an	64 %	59 %
CO ₂	371 Mt/an	32 %	28 %
COVNM	2,1 Mt/an	45 % dont 82 % dus aux gaz d'échappement	42 %
Méthane	2,7 Mt/an		
NO _x	1,5 Mt/an	76 %	63 %
SO ₂	1 Mt/an	17 %	13,5 %
Plomb		80 %	
Particules	0,2 tonnes/an	33 %* (90 % des particules fines du secteur des transports proviennent des diesel)	44 %

Les transports routiers représentent à eux seuls plus de 90 % des diverses émissions des transports [OCDE, 1997, p. 172]

Sources : OCDE, 1997, pp. 77-79 sauf * p. 172 ; CITEPA, 1997 in ADEME-MORCHEOINE, 1997, p. 3.

Tableau 19 : Part des transports dans les émissions en France

1.3.- Facteurs influençant la dispersion, le transport des polluants

Les facteurs influençant la dispersion des polluants émis par les véhicules sont présentés dans le paragraphe 2.5.3. *Modélisation de la dispersion des polluants*.

1.4.- Le dépôt des polluants

Les dépôts de polluants gazeux et particulaires présents dans l'atmosphère se réalisent selon divers processus (voir figure 2) :

Non reproduit dans la version en ligne

Figure 2 : Processus concourant à la déposition atmosphérique des gaz et aérosols *in* SETRA-MAZOUÉ, 1994, p. 6

- **La déposition sèche** correspond aux retombées au sol des particules, en l'absence de précipitation. Ces dépôts se produisent sous l'effet conjugué de la diffusion, de la gravité et de l'interception des polluants par le sol et la végétation [MALBREIL, 1997, p. 3],
- **La déposition humide** correspond aux retombées au sol des particules par les précipitations. Ces dépôts résultent de la solubilisation des polluants au sein de gouttelettes formées autour de fines particules, ou de l'entraînement mécanique, au cours d'événements pluvieux. Les précipitations permettent donc le lavage de l'atmosphère [MALBREIL, 1997, p. 3],
- **La sédimentation** désigne le dépôt des particules les plus grosses (diamètre > 50-100 μm) sous leur propre poids (force gravitaire) [SETRA-MAZOUÉ, 1994, p. 6],
- **L'enlèvement sec** (« dry removal ») désigne un processus de coagulation et d'agglomération de fines particules sur d'autres particules, plus grosses [SETRA-MAZOUÉ, 1994, p. 6],
- **L'enlèvement humide** (« wet removal ») correspond à l'absorption de gaz et d'aérosols par les microgouttelettes des nuages et du brouillard.

Les enlèvements (sec et humide) entraînent la concentration des polluants dans l'air et concourent ainsi à diminuer les teneurs. Le dépôt peut se faire par interception : flux d'air plus ou moins humide frottant la végétation qui capte alors les polluants [SETRA-MAZOUÉ, 1994, p. 6].

Diverses études cherchent à définir et à modéliser la déposition (sèche ou humide) des polluants sur la canopée des forêts (le sommet des arbres). On renvoie le lecteur intéressé par ces aspects à trois articles relativement récents : KINNERSLEY & *al.*, 1994 ; KINNERSLEY & *al.*, 1996 et WYERS et DUYZER, 1997 (références complètes dans la bibliographie).