

Actes de la Journée Scientifique

organisée par l'APPA (Inter
Comité Rhône-Alpes)
Eurexpo Lyon - 14/10/1996

Transport et Qualité de l'Air Quels carburants pour nos véhicules ?

Une journée scientifique organisée par l'Inter Comité Rhône-Alpes de l'APPA, le 24 octobre 1996 à Lyon, dans le cadre du Salon Pollutec 95, sur ce thème, avait permis de présenter une série de communications dont la revue avait publié les résumés dans son précédent numéro.

Depuis, certains auteurs nous ont fait parvenir des textes plus complets, certains illustrés par des tableaux ou figures, que le comité de rédaction a jugé utile de reproduire car ils constituent, notamment en ce qui concerne les carburants, une documentation intéressante.

Sur le problème de la pollution automobile et santé, le Pr D. ZMIROU avait, compte tenu du temps qui lui était imparti, présenté un condensé forcément très réduit d'une étude récente très importante. La rédaction a cru nécessaire de placer dans ce cadre une synthèse beaucoup plus complète que le Dr D. ZMIROU, Mme M. CHIRON et M. P. QUENEL nous ont fait parvenir. Il s'agit d'un document dont la valeur et l'actualité n'échapperont pas à nos lecteurs. Il figurera donc en première place parmi la reproduction de quelques-uns des actes de cette journée scientifique.

La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique

Mireille CHIRON(*), Philippe QUÉNEL (**), Denis ZMIROU (***)

A l'heure de l'élaboration, prévue par la " loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie " des plans régionaux pour la qualité de l'air, plans de protection de l'atmosphère des agglomérations et plans de déplacements urbains, la nécessité de connaître la nature et l'ordre de grandeur des effets sur la santé de la pollution urbaine est plus que jamais d'actualité.

La Société Française de Santé Publique, à la demande des ministères chargés de la Santé, de l'Environnement et des Transports, a récemment publié un rapport intitulé " La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique, bilan de 15 ans de recherche internationale " [SFSP, 1996]. Dix-neuf auteurs (1) ont participé à sa rédaction. Cet article en est largement issu et présente principalement l'évaluation des risques sanitaires qui en constitue la partie originale.

1. Les polluants atmosphériques d'origine automobile

Les transports routiers et l'automobile pèsent d'un poids important dans la consommation énergétique française (environ 36 Mtep par an, soit près du quart de la consommation énergétique finale) et les transports représentent près de 60 % de la consommation nationale de produits pétroliers [ADEME, 1994].

Les principaux polluants atmosphériques émis par les véhicules sont :

- le dioxyde de carbone (CO_2) produit par l'oxydation du carbone des carburants ;
- le monoxyde de carbone (CO) provenant d'une combustion incomplète du carburant ;
- les oxydes d'azote (NO_x) formés à haute température par oxydation de l'azote de l'air, principalement NO et NO_2 ;
- les particules résultant d'une part d'une combustion incomplète du carburant-lubrifiant (notamment par les véhicules diesel) et d'autre part de phénomènes d'usure et de frottement ;
- les composés organiques volatils (COV) comprenant des hydrocarbures (alcane, alcène, aromatiques monocycliques et notamment benzène et toluène, certains HAP légers...) et des composés oxygénés (aldéhydes, acides, cétones, éthers...). L'évaporation du carburant lors du remplissage du réservoir et au niveau de l'alimentation des véhicules est également une source d'émission, notamment pour l'essence, plus volatile que le gazole ;
- les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), tels que le benzo(a)pyrène, le benzo(k)fluoranthène, le benzo(b)fluoranthène, le benzo(g,h,i)pérylène et le benzo(a)anthracène. Ces composés lourds se retrouvent, pour certains, à la surface des particules, alors que les plus volatils, émis en moins grande quantité, sont présents dans la phase gazeuse ;
- le dioxyde de soufre (SO_2) formé à partir du soufre contenu dans le gazole ;
- les métaux (plomb notamment) présents initialement dans les huiles et les carburants.

En outre CO, NO_x et les COV évoluent chimiquement dans la troposphère sous l'effet du rayonnement solaire et sont à l'origine d'une pollution photochimique caractérisée par une production d'ozone et d'autres espèces dangereuses pour la santé et l'environnement (peroxyacétylnitrates, aldéhydes, acide nitrique, eau oxygénée...). L'ozone, dont les teneurs de fond dans les basses couches de l'atmosphère (troposphère) d'Europe de l'ouest croissent régulièrement sur le long terme (+ 1,5% par an depuis 20 ans [Académie des Sciences, 1993]), se distingue des principaux autres polluants associés

(*) INRETS, LÉAT, Lyon-Bron.

(**) Réseau National de Santé Publique, Unité Santé Environnement, Paris, Saint-Maurice.

(...) Université Joseph Fourier, Faculté de Médecine, Laboratoire de Santé Publique, Grenoble.

(1) Guy AUBURTIN, Jean-Paul BERTHELOT, Jean BIGNON, Mireille CHIRON, Anne DELORAINE, Jacques DONATI, Christian ELICHEGARAY, Bernard FESTY, Jean-François GONNET, Michel JOUAN, Dominique LAFON, Yvon LE MOULLEC, Sylvia MEDINA, Isabelle MOMAS, Annick PICHARD, Philippe QUÉNEL, Rémy STROEBEL, Benoît WALLAERT, Denis ZMIROU.

Ce travail a aussi bénéficié d'une aide de l'APPA, de l'ADEME, de Renault, de Rhône-Poulenc et de l'Union Française de l'Industrie Pétrolière.

aux transports en ce qu'il se distribue sur de larges échelles géographiques, à l'échelon régional voire, suite à des périodes d'ensoleillement prolongé, sur de vastes espaces à travers l'Europe [Royal Commission on Environmental Pollution, 1994].

Les bilans d'émissions montrent le poids de plus en plus important du trafic automobile dans les rejets de polluants atmosphériques, notamment en matière de CO, NO_x et COV dont il constitue la principale source.

En milieu urbain, la circulation est responsable en France d'environ 40 % des émissions de CO₂, de 60 % des émissions de NO_x et de 70 % des émissions de CO. La contribution relative des véhicules légers ou des véhicules utilitaires varie selon les polluants. Les véhicules utilitaires sont responsables d'une part prédominante des émissions de particules et d'oxydes d'azote ; cette contribution est particulièrement lourde pour les transports inter-urbains [ADEME, 1994].

La part du trafic automobile dans les émissions polluantes a progressé en France comme dans d'autres pays, en raison de la conjonction de deux facteurs : d'une part la diminution des rejets des sources fixes (amplifiée en France par le recours massif à l'électricité d'origine électro-nucléaire), d'autre part la croissance du trafic et du parc. Le durcissement des réglementations a pu freiner cette évolution, mais non l'inverser. La part croissante des véhicules diesel a également un effet sur les évolutions : si le diesel émet, par comparaison au moteur à essence catalysé, moins de CO, de CO₂ et de COV, le bilan est défavorable en matière de particules et de NO_x, du moins en l'état actuel de la technologie des moteurs, des carburants et des dispositifs d'épuration.

Bien que non soumis à la réglementation actuelle, les COV, et notamment le benzène, le 1-3 butadiène et les aldéhydes sont très importants d'un point de vue sanitaire. Les émissions de benzène sont plus élevées pour les véhicules à essence. C'est l'inverse pour les autres COV.

Pour autant, les émissions représentent de manière très imparfaite les expositions des personnes. Celles-ci sont déterminées par les concentrations des polluants dans l'air inspiré et par le volume inhalé, les teneurs ambiantes (ou "moyennes") des différents polluants, qu'ils soient directement émis (polluants primaires) ou qu'ils résultent de réactions chimiques plus ou moins différées (polluants secondaires), par le temps passé dans différents milieux au cours de la journée : air extérieur dans lequel, pour la majorité des personnes, les séjours sont brefs par rapport aux milieux intérieurs, espaces clos plus ou moins bien ventilés, tabagisme actif et passif. À cet égard, la pollution atmosphérique d'origine automobile influence dans une certaine mesure la qualité de l'air dans les espaces clos

proches des voiries, les teneurs intérieures (en l'absence de sources propres) étant le reflet des valeurs en façade, avec une inertie dépendant du taux de renouvellement de l'air intérieur (écrêtement des valeurs). D'autres facteurs déterminent également l'importance de la réaction des systèmes biologiques à cette exposition (susceptibilité individuelle, état de l'appareil respiratoire...). C'est l'ensemble de ces paramètres qu'il faut considérer pour apprécier les risques liés aux émissions des véhicules automobiles.

Or les polluants issus des transports automobiles ont la caractéristique d'être émis à proximité immédiate des individus, notamment des personnes les plus fragiles. Au niveau des rues, on observe pour les polluants primaires un gradient décroissant en toutes directions, depuis un niveau maximum observé au niveau des pots d'échappement. En moyenne, l'automobiliste est le plus exposé (6 à 10 ppm de CO, maxima 20 à 25, 12 ppm dans Paris intra-muros, THAM (2) 550 1Jg/m³), devant le cycliste (de l'ordre de 5 ppm CO et 350 1Jg/m³ de THAM), le piéton (CO : 3, THAM : 180), l'usager de bus ou de métro (respectivement CO 4 et 3, THAM 220 et 170). L'enfant, en situation basse sur le trottoir, est exposé plus (30 %) que l'adulte. Si l'on compare les concentrations mesurées à celles fournies par les capteurs des réseaux, on observe que les sites de "fond" sous-estiment largement l'exposition des usagers, d'autant plus que ces derniers sont plus proches du flux automobile et que les sites de "proximité" sont assez représentatifs, en général, de l'exposition du piéton, mais moins des usagers des transports.

2. La nocivité des polluants associés à l'automobile

2.1. Nature et importance des effets des différents polluants atmosphériques d'origine automobile

Un rappel des risques identifiés pour les polluants principalement émis par les véhicules automobiles ou issus secondairement de leur transformation est présenté, afin de faciliter la compréhension de l'évaluation du risque.

Le CO se fixe sur l'hémoglobine, formant l'oxyhémoglobine. Dans l'objectif de protéger des effets aigus cardio-vasculaires, les personnes âgées et les adultes non fumeurs atteints de maladies coronariennes, ainsi que pour prévenir les effets hypoxiques sur les fœtus de femmes enceintes ne fumant pas, un niveau de carboxyhémoglobine de 2,5 % ne devrait pas être dépassé. Ce niveau est en équilibre avec une

(2) THAM : hydrocarbures aromatiques monocycliques totaux (données issues de travaux du Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris, (LHVP) doc. interne).

teneur ambiante de 12 ppm environ ; il est atteint en deux heures par un homme marchant exposé à 30 ppm de CO.

Les effets à court terme des particules fines, bien quantifiés par de nombreuses études épidémiologiques dans divers pays et avec différentes natures de particules, sont résumés dans le tableau 1.

Les particules diesel font partie des particules et contribuent aux effets pathologiques décrits ci-dessus, bien qu'elles ne soient sans doute pas les seules en cause. Par leur taille, elles peuvent pénétrer très profondément dans les voies respiratoires inférieures d'où, selon les modèles communément adoptés, une fraction seulement pourra être éliminée [TGLD, 1966]. En l'état actuel des travaux scientifiques, les études épidémiologiques ne permettent pas de conclure de manière certaine sur l'effet cancérigène des émissions diesel chez l'homme, pas plus qu'elles ne permettent d'incriminer spécifiquement les particules dans cet effet. C'est par la prise en compte à la fois des données expérimentales et des travaux épidémiologiques que les organismes scientifiques compétents se sont prononcés sur la carcinogénicité des émissions diesel. Ainsi, sur la base de ces données sur l'animal et sur l'homme, le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) et l'Agence Américaine de l'Environnement ont classé les émissions diesel comme étant « probablement cancérigènes », (classe 2a du CIRC) chez l'homme (IARC, 1989 ; US EPA, 1994).

En dehors des particules diesel, l'usage de l'automobile génère-t-il des particules présentant par leur nature un risque potentiel pour la santé ? La réponse à cette question est très mal connue. Le trafic provoque tout d'abord un brassage des

particules déposées sur la chaussée. Ces particules sont en partie issues des pots d'échappement (suies, plomb.), du matériau constituant la chaussée, ainsi que des pneumatiques et des matériaux de friction des freins.

De nombreux travaux expérimentaux sur différentes espèces animales ont été publiés sur la toxicité du NO₂. Des effets sur la fonction pulmonaire, sur la morphologie du poumon, sur les mécanismes biochimiques, sur le système antioxydant de défense du poumon sont observés. Enfin des effets systémiques, génotoxiques et cancérigènes ont été étudiés [MOLDÉUS, 1993]. Les informations obtenues à partir des études humaines contrôlées indiquent cependant une relative résistance de l'appareil respiratoire au NO₂ seul, pour des concentrations faibles. Les résultats des études épidémiologiques ne sont pas probants. Dans les conditions réelles de la vie courante, cet indicateur représente une exposition complexe, principalement d'origine automobile en milieu extérieur, liée aux combustions domestiques en milieu intérieur. L'effet de cette exposition est peu observable en termes de santé.

Les altérations biologiques observées chez l'animal et chez l'homme exposé à l'ozone sont généralement attribuées à sa capacité d'oxyder diverses molécules biologiques soit directement soit indirectement par formation de radicaux libres (MUSTAFA, 1990). A faible concentration, l'ozone induit une réaction inflammatoire, caractérisée par l'accumulation de polynucléaires et de cellules mononucléées près des bronchioles terminales et des canaux alvéolaires. L'altération des cellules ciliées est responsable de perturbations du système d'épuration mucociliaire. Les études à long terme ont permis de

Tableau 1.
Effets à court terme associés à la pollution atmosphérique particulaire [DOCKERY et POPE, 1994]

Indicateur sanitaire	Changement(%) de l'indicateur sanitaire associé à une augmentation de 10 1Jg/m ³ des PM10.
Accroissement de la mortalité quotidienne	
– décès totaux	1,0
– décès respiratoires	3,4
– décès cardio-vasculaires	1,4
Accroissement du recours aux soins respiratoires hospitaliers	
– hospitalisation	0,8
– urgences	1,0
Exacerbation de l'asthme	
– crises d'asthme	3,0
– usage de broncho-dilatateurs	2,9
– urgences hospitalières	3,4 (1 seule étude)
– hospitalisation	1,9
Dépression de la fonction pulmonaire	
– volume expiratoire maximum par seconde	0,15
– flux expiratoire de pointe	0,08

préciser le rôle potentiel de l'ozone sur le développement de tumeurs bronchopulmonaires [HASSET, 1985]. On retrouve dans le liquide de lavage broncho-alvéolaire ou de lavage nasal de médiateurs variés connus par leurs puissants effets pro-inflammatoires [KOREN, 1991 ; Mc BRIDE 1994; SCHELEGLE, 1991]. Il existe cependant des moyens de protection naturelle vis-à-vis de l'ozone et d'une façon plus générale vis-à-vis des gaz oxydants. Plusieurs travaux ont montré la grande variabilité de toxicité de l'ozone chez des sujets apparemment identiques, alors que la réponse chez le même individu resterait identique [Mc DONNELL, 1985]. Il pourrait donc exister une population humaine sensible à des faibles concentrations d'ozone. En épidémiologie, on dispose de résultats portant sur un ensemble complet de manifestations sanitaires, allant de la plus grave, la mortalité, à l'atteinte la plus précoce, la fonction ventilatoire. La cohérence des associations retrouvées entre tous ces critères et les teneurs ambiantes en ozone confère globalement à ces études une valeur convaincante [BATES, 1992]. Elles ont pu quantifier les relations "dose-réponse" entre la diminution de la fonction ventilatoire et les expositions à l'ozone observées en milieu ambiant. Elles indiquent que les sujets asthmatiques constituent un groupe de population sensible. Les études temporelles montrent l'existence de relations entre des effets sur la santé (consultations d'urgence, admissions hospitalières, mortalité) et les niveaux journaliers d'ozone dans l'air ambiant. On peut ainsi estimer que chaque augmentation de 100 ng/m^3 d'ozone est associée, en moyenne, à 0,65 admission hospitalière en excès et à 0,3 décès en excès par million de personnes exposées [CSHPF, 1995].

La toxicité hématologique du benzène par atteinte de la moelle osseuse est connue depuis longtemps. Elle touche toutes les lignées sanguines et peut se manifester par une anémie ou, plus rarement, une polyglobulie (lignée des globules rouges), une leucopénie ou parfois une hyperleucocytose (globules blancs), une thrombopénie (plaquettes). Des atteintes de l'immunité humorale et cellulaire ont été décrites. Les effets leucémogènes du benzène ont été établis par des études épidémiologiques en milieu de travail et ont été la base de l'évaluation réalisée par le Centre International de Recherche sur le Cancer qui considère le benzène comme présentant des preuves suffisantes de cancérogénicité chez l'homme (groupe 1) [IARC, 1982]. La question actuellement débattue est de déterminer la relation exposition-effets aux concentrations rencontrées actuellement aussi bien en milieu de travail (production et distribution de produits pétroliers) que pour les expositions faibles de l'environnement. Le bureau Europe de l'Organisation Mondiale de la Santé [WHO, 1987] a choisi un modèle avec absence de seuil et estime que pour une concentration dans l'air de 1 ng de benzène par

m^3 , le risque de leucémie vie-entière est de 4.10^{-6} (4 leucémies pour un million de personnes exposées). Le toluène et le xylène n'ont pas d'effet hémato-toxique et ne provoquent pas, au contraire du benzène, de leucémies. L'hématotoxicité attribuée autrefois à ces substances étaient en fait due aux impuretés de benzène contenu dans les mélanges.

Six des HAP présents dans les effluents automobiles sont classés comme des « cancérogènes probables pour l'homme » (groupe 2A : Benzo (a) pyrène (BaP), Benzo(a)anthracène, Dibenzo(a,h)anthracène) ou comme des " cancérogènes possibles pour l'homme ", (groupe 2B : Benzo(b)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène, Indéno(c,d)pyrène). D'autres agents ne sont pas classifiés (groupe 3) ou n'ont pas été évalués. Le bureau Europe de l'Organisation Mondiale de la Santé, utilisant le BaP comme index des mélanges de HAP, a proposé un excès de risque unitaire de cancer respiratoire de $8,7.10^{-5}$ par ng de BaP par m^3 d'air. Cet indice signifie qu'environ 9 personnes sur 100 000 pourraient présenter un cancer respiratoire si elles étaient exposées, leur vie durant, à une concentration moyenne de 1 ng de BaP par m^3 mélangé aux autres HAP de type " cokerie ",...

Le formaldéhyde est un puissant irritant : le seuil absolu de détection de son odeur se situe selon les individus entre 0,06 et 12 mg/m^3 [OMS, 1989]. Chez certains, l'irritation oculaire commence avant que l'odeur ne soit perçue ; entre 5 et $6,2 \text{ mg/m}^3$ apparaît un larmoiement au bout de trente minutes d'exposition. Le formaldéhyde a un puissant effet irritant des yeux et des muqueuses respiratoires. Le CIRC, l'OMS, l'OSHA (3) et l'EPA ont classé, depuis 1987, le formaldéhyde comme « probablement cancérogène pour l'homme » (classe 2A du CIRC). L'acétaldéhyde a été classé comme " potentiellement cancérogène pour l'homme ", (classe 2B du CIRC). L'acroléine a les effets irritants les plus intenses des 3 aldéhydes cités ; ils sont connus par l'exposition professionnelle, mais aussi par l'exposition de la population générale lors d'épisodes de smog photochimique et par l'expérimentation sur des sujets sains volontaires [BEAUCHAMP, 1985].

L'EPA (1993) et le CIRC ont classé le 1,3 butadiène comme cancérogène probable pour l'homme. Pour l'EPA, le coefficient de risque unitaire est de $2,8.10^{-4}(\text{g/m}^3)^{-1}$. Cette évaluation du risque de cancer est basée sur les études sur animaux et le niveau de risque déterminé est considéré comme la limite supérieure du risque chez l'homme.

Le méthanol et l'éthanol, dans l'éventualité de leur ajout dans les carburants, ne seraient pas à

(3) Occupational Safety and Health Administration.

l'origine de problèmes toxiques par leur action directe dans le cadre de l'utilisation normale des véhicules. C'est surtout par l'intermédiaire de l'augmentation dans l'échappement des véhicules des aldéhydes, produits de leur oxydation partielle, ainsi que de divers précurseurs de l'ozone, que les alcools pourraient avoir une influence sur la santé.

Le plomb est un toxique cumulatif qui se distribue dans l'organisme au niveau des tissus mous et du sang [Ministère des Affaires Sociales, de la Santé et de la Ville, 1993]. Le système osseux constitue l'organe de réserve stockant jusqu'à 90 % du plomb présent dans l'organisme avec une demi-vie estimée à plus de 10 ans. Le plomb s'accumule également dans les dents et les phanères. Ces organes de stockage sont la source de relargage de plomb dans le sang et les tissus mous. En épidémiologie, les méta-analyses réalisées sur ces différentes études ont démontré sans équivoque que le plomb à faible dose altère le quotient intellectuel des enfants [NEEDLEMAN, 1990]. Ces travaux sont confortés par les résultats des études neurophysiologiques qui ont mis en évidence des altérations de potentiels corticaux lents pour des plombémies inférieures à 150 J.Jg/l [BENIGNUS, 1981], des altérations de potentiels évoqués visuels, une augmentation des seuils auditifs à partir de plombémies aussi faibles que 60 J.Jg/l, sans qu'un seuil puisse être précisé.

2.2. Nocivité de la pollution automobile en tant que mélange complexe de polluants

L'air respiré en milieu urbain comporte un grand nombre de substances susceptibles d'avoir des effets biologiques et sanitaires défavorables. Rares sont celles qui sont spécifiques des effluents automobiles. En outre, leurs teneurs évoluent le plus souvent parallèlement, en lien avec les conditions météorologiques et les rythmes du trafic. Il importe donc de faire le point sur les études visant à apprécier la dangerosité de l'air pollué de manière globale.

C'est du point de vue de la cancérogénicité que les produits d'échappement ont particulièrement été testés expérimentalement, *in vivo* et *in vitro*. Rappelons qu'en 1989 déjà, le CIRC [IARC, 1989] estimait que :

- " les preuves sont suffisantes pour la cancérogénicité des produits d'échappement complets des moteurs diesel sur les animaux de laboratoire, elles sont insuffisantes si l'on ne prend que la phase gazeuse (suppression des particules), elles sont suffisantes pour la cancérogénicité d'extraits de particules diesel sur les animaux de laboratoire;
- il n'y a pas de preuves suffisantes pour la cancérogénicité des produits d'échappement complets des moteurs à essence, par contre la

cancérogénicité est prouvée pour certains condensats ou extraits. "

L'épidémiologie a permis d'observer la pollution dans ses conditions réelles de vie. Un premier type d'approche épidémiologique utilisé consiste à observer l'état de santé de la population ou de certains sous-groupes, en liaison avec les variations de la pollution atmosphérique urbaine générale. On observe une même population alors que la pollution varie dans le temps (études temporelles pour l'analyse des effets à court terme), ou on compare des groupes ou des individus différemment exposés. Les progrès dans les méthodes d'analyse permettent des distinctions de plus en plus fines entre l'action des différents polluants et des paramètres météorologiques mesurés. L'attribution de la pollution observée à l'automobile dépend de l'existence ou non d'autres sources (chauffage, industries).

Ces études mettent en évidence une liaison à court terme forte et incontestable entre l'évolution du niveau de pollution de fond mesuré par les réseaux et, avec un léger décalage, de la mortalité et de l'incidence de pathologies (surtout respiratoires) à caractère irritatif, allergique ou infectieux, surtout chez les enfants et les personnes âgées. Les corrélations entre les variations de la pollution atmosphérique urbaine et celles de la santé à court terme sont particulièrement constantes, même pour les faibles teneurs, en toutes saisons (c'est-à-dire même en l'absence de chauffage), et indépendamment des variables météorologiques (température, humidité).

L'avancée des connaissances a été très importante dans ce domaine depuis douze ans, notamment en raison des progrès méthodologiques en épidémiologie, permettant une quantification des effets observés, même lorsqu'ils sont faibles [MOMAS, 1993; QUÉNEL, 1993; DOCKERY et POPE, 1993; SCHWARTZ, 1994; SPIX, 1993; TOULOUMI, 1994; MEDINA, 1994; KATSOUYANNI, 1997; ZMIROU, 1997; QUÉNEL, 1995; MORRIS, 1995 ou bibliographie complète dans SFSP 1996]. L'importance de ces résultats, en terme de santé publique, tient au fait qu'ils concernent de grandes populations urbaines au sein desquelles, même pour des niveaux modestes de pollution, le nombre d'événements de santé attribuables à la pollution est élevé.

Un deuxième type d'approche, encore peu développé, consiste à rechercher une liaison entre un indicateur sanitaire et l'exposition à la circulation automobile elle-même. On peut faire ici un parallèle avec la fumée de tabac dont on étudie en épidémiologie l'effet global, plutôt que composant par composant. On peut ainsi prendre comme mesure d'exposition la distance à une voie de circulation, le trafic dans la rue d'habitation ou dans le quartier. L'automobile est ainsi plus directement mise en cause. Sur les dix

dernières années, sept auteurs seulement à notre connaissance ont tenté d'étudier les effets sur la santé de la pollution d'origine automobile en tant que source de pollution responsable de l'émission d'un mélange de polluants. Les effets étudiés sont pour cinq d'entre eux axés sur la sphère respiratoire et pour deux autres études sur les leucémies ou cancers. Les résultats montrent une association des symptômes respiratoires avec la proximité du trafic relativement constante, surtout pour les symptômes de toux et rhino-pharyngite, et de façon plus variable pour les symptômes de dyspnée ou sifflement chronique. [WJ8T, 1993; EDWARD8, 1994; NITTA, 1993 ; MURAKAMI, 1991 ; MAEDA, 1991]. Par ailleurs 8avitz [8AVITZ, 1989] a montré une relation positive entre la densité de trafic dans la voie d'habitation et les cancers de l'enfant et plus spécifiquement les leucémies, avec une relation dose-réponse. D'autres études sont nécessaires pour confirmer ou non cette association, mise en évidence dans une étude portant sur un autre facteur de risque (exposition aux champs électromagnétiques).

Un troisième type d'étude se déroule en milieu de travail. Il est ainsi possible d'observer les effets sur la santé de travailleurs exposés aux gaz d'échappement, aux vapeurs ou aux carburants eux-mêmes. Ces groupes ont l'avantage d'être facilement identifiables et l'on peut, pour eux, disposer d'un indicateur d'exposition cumulée (années d'exposition, années.ppm...). Les travailleurs ne sont cependant pas forcément exposés à des teneurs en polluants beaucoup plus fortes que certains riverains de voiries à fort trafic, de garages ou de stations de distribution de carburant. Il est à noter que la sous-population des travailleurs est composée de personnes adultes, relativement jeunes et en meilleure santé que la population générale, laquelle comprend notamment des malades chroniques. De l'ensemble des résultats des études sur les professionnels supposés exposés aux carburants ou aux échappements, on retire une impression de confusion. Pour l'exposition à l'essence (pompiers, mécaniciens), l'incidence des leucémies semble augmentée. En France, le tableau IV des maladies professionnelles " hémopathies provoquées par le benzène et tous les produits en renfermant " cite expressément la préparation, le transvasement et la manipulation des carburants renfermant du benzène dans la liste indicative des travaux susceptibles d'être responsables des hémopathies benzéniques. A l'exception des travailleurs en tunnel, l'estimation de l'exposition aux échappements des véhicules semble imprécise. Ainsi un conducteur d'engin est-il plus exposé aux échappements de moteur diesel qu'un simple riverain d'une voie à fort trafic ? Malheureusement diverses professions sont souvent mélangées dans les études épidémiologiques. L'appartenance à une " branche trans-

ports " est une notion insuffisante pour caractériser l'exposition.

3. Caractérisation des risques sanitaires associés aux polluants atmosphériques d'origine automobile

Il s'agit ici d'un essai de bilan et de quantification non plus par polluant mais par pathologie.

Les tableaux II et III résument la qualité des informations disponibles pour estimer cet impact, respectivement pour les effets observables à court terme et pour les manifestations se produisant à plus longue échéance. Dans certaines situations, l'effet biologique ou sanitaire n'est constaté qu'au sein de groupes particuliers de la population, plus susceptibles. C'est le cas par exemple des conséquences cardia-vasculaires à court terme de teneurs élevées en monoxyde de carbone, qui affectent essentiellement les personnes souffrant de troubles cardiaques, ou encore des altérations cliniques associées au dioxyde d'azote pour lesquelles les données scientifiques ne sont concluantes que chez l'enfant.

Ces tableaux indiquent que les connaissances nécessaires à l'évaluation de l'impact de la pollution atmosphérique d'origine automobile sont encore fort lacunaires. A court terme, l'impact de l'exposition de la population urbaine aux particules en suspension et du SO_2 sur la mortalité, principalement respiratoire et cardio-vasculaire, et sur les manifestations inflammatoires des voies respiratoires peut être estimé avec une incertitude acceptable. A long terme, les informations nécessaires sont encore plus rares. En l'état actuel des connaissances en France, seul l'impact de la pollution acido-particulaire sur la fonction et l'état des voies respiratoires, l'impact du benzène à hautes concentrations sur le risque de leucémie et celui du plomb inhalé sur le développement psychomoteur de l'enfant peuvent être raisonnablement caractérisés.

3.1. Impact de la pollution d'origine automobile sur la mortalité

Le risque à court terme associé aux émissions automobiles peut être caractérisé pour les particules en suspension et le SO_2 . L'un et l'autre de ces deux polluants doit être ici considéré comme un indicateur d'une exposition plus complexe, même si leur rôle propre a pu être établi dans certaines conditions particulières. Pour évaluer l'impact à court terme de ces indicateurs sur la mortalité, il est possible d'utiliser les données publiées par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air car le nombre de capteurs mesurant les particules et le SO_2 est habituellement élevé. Les données les plus récentes datent de

Tableau II.
Qualité de l'information disponible pour l'évaluation du risque à court terme, pour la santé de l'homme, des polluants atmosphériques d'origine automobile dans l'environnement général [SFSP, 1996]

Ce tableau prend en compte des informations issues d'études expérimentales, d'études épidémiologiques en milieu professionnel ou général, ou d'études relatives à l'exposition. Il ne s'agit pas d'une mesure de l'importance du problème en terme de santé publique mais d'un jugement d'expert porté sur l'existence et la fiabilité des données nécessaires à l'évaluation de l'impact de la pollution d'origine automobile.

Polluant-indicateur	Particules	SO ₂	NO ₂	O ₃	Aldéhydes	CO
	E2	E2	E2	E1	E?	E1
	A1	A1	A1	A?	A1	A1
Mortalité générale	++	++	?	?	?	?
Mortalité respiratoire	++	++	?	?	?	?
Mortalité par asthme	+	+	?	?	?	?
Mortalité cardio-vasculaire	++	++	?	?	?	+
Fonction respiratoire	++	+OU++	++	++	?	0
Voies aériennes supérieures	+	++	+	+	+	0
Voies aériennes inférieures	++	++	+	++	+	0
Crises d'asthme	+	++	+	+	+	0
Affections cardio-vasculaires	++	?	?	?	?	++
Troubles neuro-vasculaires	?	?	?	?	?	?
Troubles ophtalmologiques	?	?	?	?	+	0

Tableau III.
Qualité de l'information disponible pour l'évaluation du risque sanitaire à long terme des polluants atmosphériques d'origine automobile [SFSP, 1996]

Ce tableau prend en compte des informations issues d'études expérimentales, d'études épidémiologiques en milieu professionnel ou général, ou d'études relatives à l'exposition. Il ne s'agit pas d'une mesure de l'importance du problème en terme de santé publique mais d'un jugement d'expert porté sur l'existence et la fiabilité des données nécessaires à l'évaluation de l'impact de la pollution d'origine automobile.

Polluant-indicateur	Particules	SO ₂	NO ₂	O ₃	Benzène	HAP	Aldéhydes	CO	CO
	E2	E2	E2	E1	E?	E?	E?	E2	E2
	A1	A1	A1	A?	A1	A?	A1	A1	A1
Mortalité générale	+	?	?	?	?	?	?	?	?
Mortalité respiratoire	+	?	?	?	?	?	?	?	?
Mortalité par asthme	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Mortalité cardio-vasculaire	+	?	?	?	?	?	?	?	?
Mortalité par cancer	+	?	?	?	?	?	?	?	?
Incidence cancers respiratoires	+	? ou 0	?	?	? ou 0	+	?	0	0
Incidence leucémies	?	? ou 0	?	?	++	?	+	0	0
Incidence autres cancers	?	? ou 0	?	?	?	+	+	0	0
Fonction respiratoire	++	+	?	+	?	?	?	0	?
Voies aériennes supérieures	+	+	?	?	?	?	?	0	?
Voies aériennes inférieures	++	++	+	?	?	?	?	0	?
Prévalence de l'asthme	?	+	+	+	?	?	?	0	?
Affections cardio-vasculaires	?	?	?	?	?	?	?	?	+
Troubles neuro-comportementaux	?	?	?	?	?	?	?	?	++

Légendes pour les tableaux II et III

Exposition de la population	E?	inconnue
	E1	connue ponctuellement
	E2	peut être estimée
Part de la source automobile dans l'exposition	A?	Inconnue
	A1	peut être estimée
Qualité de l'information sur les effets sanitaires	0	absence d'effet
	?	pas d'effet établi
	+	effet connu mais non quantifié
	++	effet connu et quantifié

Tableau IV.
Part des teneurs ambiantes des particules et du SO₂ attribuable aux émissions automobiles.
Moyenne nationale en % et en concentrations attribuables (1Jg/m³)

	Particules %	Concentrations attribuables	SO ₂ %	Concentrations attribuables
Estimation basse	50	13,5	15	2,8
Estimation moyenne	67	18,1	20	3,7
Estimation haute	80	21,6	25	4,7

1993-1994. S'agissant des particules, une difficulté supplémentaire se présente du fait de l'utilisation par les réseaux de deux méthodes de mesure : les particules en suspension sont mesurées principalement par méthodes gravimétriques, parfois par jauge β , tandis que les fumées noires sont appréciées par réflectométrie. La relation, sur un même site, entre ces deux mesures, est variable selon la saison et les types d'émission. Elles sont souvent proches. Pour les calculs, les deux méthodes ont été jugées équivalentes. Sur cette base, la moyenne annuelle des concentrations mesurées sur 24 heures sur l'ensemble des villes françaises métropolitaines équipées en 1993-1994 s'élevait à 27 jJg/m³ de particules et 19 1Jg/m³ de SO₂. La part attribuable aux véhicules automobile est estimée dans une fourchette : de 50 à 80 % pour les particules et de 15 à 25 % pour le SO₂.

En toute rigueur, ces valeurs ne peuvent être extrapolées à l'ensemble des agglomérations urbaines de France métropolitaine. Sous réserve de la représentativité des capteurs actuellement en place en terme d'estimation de la pollution atmosphérique dite " de fond " on se contentera d'appliquer ces résultats à l'exposition de la population résidant en France dans les 21 agglomérations de plus de 250 000 habitants, soit 19,5 millions d'habitants.

Les travaux conduits à Lyon et en région parisienne dans le cadre du programme de recherche européen APHEA permettent d'estimer les risques relatifs de décès prématurés associés à ces concentrations ainsi que les risques attribuables (ou fractions étiologiques du risque) [QUENEL, 1995]. Seuls les décès à court terme pour affections respiratoires et cardio-vasculaires peuvent être aujourd'hui associés avec fiabilité à la pollution due aux particules en suspension et au SO₂. Les risques relatifs calculés dans ces deux études fournissent une estimation que l'on peut appliquer à la population résidant dans les grandes agglomérations urbaines en France métropolitaine, si l'on considère, comme le laisse à penser la littérature, que les liens entre la pollution atmosphérique et la santé sont comparables dans les différentes zones urbaines par delà la diversité des populations concernées. Dans cette population, le nombre annuel de décès pour

causes respiratoires et cardio-vasculaires s'élève approximativement à 14 000 et 60 000, respectivement (source INSERM, 1993). Les hypothèses de calcul sont les suivantes. Les risques relatifs utilisés sont les moyennes pondérées (par les effectifs des populations) des RR calculés à Paris et Lyon. Les risques attribuables sont estimés pour la moyenne annuelle des valeurs journalières de la qualité de l'air dans l'ensemble des grandes agglomérations ($RA = [RR - 1]/RR$), appliquée à 19,5 millions d'habitants. La référence de la qualité de l'air pour le risque attribuable a été fixée à 0, car les fonctions exposition-réponse apparaissent sans seuil et les niveaux de pollution les plus bas observés sont proches de zéro.

Le nombre annuel de décès prématurés attribuables à la pollution particulaire et soufrée d'origine automobile peut ainsi être estimé autour de 220 et 650 respectivement pour la mortalité respiratoire et cardia-vasculaire associée aux particules dans les grandes villes, et autour de 35 et 180 respectivement pour le SO₂ (tableau V). S'agissant dans les deux cas d'indicateurs le plus souvent très corrélés, ces nombres de morts prématurées ne peuvent être simplement additionnés. L'ensemble des décès cardio-respiratoires a, par contre, un sens réel : ce total est en moyenne de l'ordre de 900 morts prématurées par an. pour l'indicateur particules (200 pour le SO₂).

Dans une optique d'aide à la décision, il est intéressant d'estimer le nombre de décès précipités évitables par une réduction donnée de la pollution particulaire moyenne d'origine automobile. Seule cette forme de pollution est prise en compte ici, car elle s'avère avoir un impact attribuable plus marqué que la pollution soufrée. Le gain en terme de décès précipités serait par exemple de près de 200 pour une réduction de 20 % de la pollution particulaire moyenne d'origine automobile.

Ces estimations d'impact sont fondées sur des RR issus des travaux français dans le cadre de l'étude APHEA. Les RR associés aux particules dans ces travaux européens pour les villes d'Europe de l'ouest sont similaires [ZMIROU, 1997] mais il faut noter qu'ils sont moindres que ceux estimés dans les études conduites aux

Tableau V.
Estimation du nombre annuel de décès prématurés attribuables aux particules et au SO₂ d'origine automobile, dans la population urbaine des agglomérations de plus de 250 000 habitants en France

	Particules			SO ₂		
	Estimation basse	Estimation moyenne	Estimation haute	Estimation basse	Estimation moyenne	Estimation haute
Décès respiratoires	170	220	270	30	35	40
Décès cardio-vasculaires	490	650	780	140	180	230
Total	660	870	1 050	170	215	270

États-Unis, selon des approches identiques et résumés par Dockery et Pope (1994).

La pollution atmosphérique peut également avoir un effet sur la mortalité à long terme. A ce jour, deux études longitudinales ont été publiées. La première a été conduite dans le cadre de la « Six cities study » et a permis l'analyse de la survie, à 15 ans (de 1974 à 1991) de quelque 8 000 adultes résidant dans des villes connaissant des niveaux très contrastés de pollution atmosphérique [DOCKERY, 1993]. La seconde s'est intéressée aux statistiques de mortalité pendant 10 ans de 552 000 sujets habitant dans 151 zones urbaines des États-Unis [POPE, 1995]. Dans les deux cas, les relations mises en évidence concernent principalement les particules fines (< 2,5 µm) et les sulfates particulaires et leur impact sur la mortalité cardio-respiratoire. Les risques relatifs de décès, à 10 ou 15 ans, sont de l'ordre de 1,17 à 1,26 pour des écarts de concentrations particulaires de l'ordre de 20 à 25 µg/m³ entre les villes les plus et les moins polluées. Bien que non statistiquement significatifs, les risques relatifs de décès par cancers des poumons (1,37) sont également évocateurs d'un rôle possible d'une exposition prolongée à la pollution atmosphérique urbaine sur le risque carcinogène. Plusieurs études au cours des dernières années ont tenté d'utiliser les résultats des travaux toxicologiques et épidémiologiques pour caractériser le risque de cancer lié à la pollution urbaine, en soulignant le rôle joué par les transports [PEPELKO, 1993 ; HEMMINKI, 1994, TORNQVIST, 1994]. Ce calcul n'est guère possible encore en France, compte tenu des carences des données météorologiques disponibles.

Les nombreux travaux montrant le rôle de la pollution atmosphérique, notamment particulaire, sur un large spectre de manifestations cardio-respiratoires sérieuses, donnent du poids à ces publications suggérant un impact mortel à long terme. Cependant, il est encore trop tôt, aujourd'hui, pour utiliser les quelques résultats sur la mortalité à long terme en vue d'une évaluation quantitative du risque pour la France.

3.2. Impact de la pollution d'origine automobile sur la morbidité

3.2.1. Morbidité respiratoire (hors cancers)

3.2.1.1. Affections respiratoires non spécifiques

Les phénomènes inflammatoires résultant de l'irritation de la muqueuse respiratoire par les polluants atmosphériques d'origine automobile se manifestent par des modifications de la mécanique ventilatoire. La réduction du diamètre intérieur des conduits aériens et l'accroissement de la motilité des muscles tapissant ceux-ci dans les étages supérieurs sont mesurables par divers tests d'exploration de la fonction respiratoire [PREFAUT, 1993 ; PERDRIX, 1994]. Le volume expiratoire maximum par seconde (VEMS) est l'index fonctionnel qui a été le plus souvent étudié. Il témoigne de l'état des voies bronchiques de taille moyenne. Une méta-analyse de 41 études épidémiologiques sur l'impact de la pollution particulaire sur le VEMS [ZMIROU, 1997] indique que les enfants sont plus sensibles aux particules que les sujets plus âgés. Pourtant, il faut atteindre de fortes concentrations, devenues aujourd'hui rares, pour mesurer des amputations fonctionnelles susceptibles d'être ressenties par les sujets, sauf en cas d'état fonctionnel déjà très dégradé. Les fonctions dose-réponse décrites pour le SO₂ suggèrent une réduction moins nette du VEMS que pour les particules, bien que celle-ci soit statistiquement significative, chez l'enfant comme chez l'adulte.

Le VEMS peut être utilisé dans le cadre d'études testant l'hyper-réactivité bronchique, c'est-à-dire la réponse bronchomotrice exagérée à une stimulation de nature physique, chimique ou pharmacologique. Une hyper-réactivité bronchique est présente chez la quasi totalité des sujets asthmatiques, même si elle n'est pas spécifique de l'asthme. Or plusieurs études récentes, notamment chez les enfants, ont montré que des sujets vivant en zone polluée avaient une réactivité bronchique plus marquée et une hyper-réactivité plus fréquente que les sujets testés dans

des régions moins exposées. Ces résultats sont retrouvés avec divers indicateurs de pollution, le SO₂, l'ozone ou les particules [SOYSETH, 1995 ; FORASTIERE, 1994 ; TAM, 1994]. Une hyper-réactivité bronchique n'est pas prédictive automatiquement d'un risque d'asthme ultérieur car elle peut, pour partie, avoir un caractère transitoire et réversible. Cependant, la répétition d'agressions peut entraîner une sensibilisation de la muqueuse respiratoire et peut exagérer, au long cours, sa réaction à des stimulants non spécifiques (froid, humidité...) ou des allergènes spécifiques (pollens, acariens, toxiques...) et faire ainsi le lit de l'asthme. Il s'agit là d'une hypothèse faisant l'objet de nombreux travaux scientifiques.

Ces phénomènes inflammatoires, aux mécanismes initiaux divers, se traduisent aussi, à court terme et à long terme, par des manifestations cliniques qui peuvent entraîner une augmentation de la fréquence ou la durée d'épisodes de toux, avec ou sans expectoration ou surinfection. L'incidence ou la prévalence de ces troubles respiratoires est corrélée avec le niveau de pollution. Elle a été mesurée dans maintes circonstances : lors d'enquêtes par sondages ou d'études spécifiques réalisées dans la population générale, par l'accroissement des consultations médicales de ville, ou encore par l'augmentation du recours aux soins hospitaliers. S'agissant de la morbidité ressentie et déclarée en population générale, disposant d'une relation dose-effet [ZMIROU, 1997], on pourrait estimer l'impact de la pollution particulaire sur la prévalence de cette symptomatologie irritative, dès lors que serait connue la situation " de base », hors de tout contexte de pollution. Cette donnée est évidemment une vue de l'esprit. Ce " bruit de fond », peut être cependant estimé de l'ordre de 5 à 10% au minimum chez l'enfant de 7 à 10 ans en extrapolant vers de faibles concentrations les résultats de diverses enquêtes conduites en population générale à des niveaux de pollution de l'ordre de 30 à 50 1g/m³ de particules [DOCKERY, 1989; VIEGI, 1991]. Dès lors, en considérant ici encore la part de la pollution particulaire d'origine automobile, la prévalence de cette morbidité attribuable dans les grandes agglomérations urbaines serait de l'ordre de 1 à 2 %. Ce chiffre modeste au niveau individuel doit être apprécié en fonction de la taille de la population concernée (de l'ordre de un million d'enfants habitant les grandes cités, en se limitant à la tranche d'âge correspondant aux données de la littérature). pour mesurer l'ampleur des conséquences médico-sociales (y compris en terme de consommation médicale, pharmaceutique et d'absentéisme scolaire ou parental pour la garde de l'enfant malade).

Il en est de même de la morbidité respiratoire hospitalière pour laquelle l'utilisation des estimations des risques relatifs associés aux particules

fournies par DOCKERY (1994) demandent de connaître l'incidence des entrées hospitalières pour causes respiratoires dans les établissements publics ou privés français. En rapportant les 840 000 entrées annuelles pour affection respiratoire, France entière (source : SESI) aux seuls habitants des grandes agglomérations, on peut estimer cette incidence autour de 290 000. Le risque relatif associé aux concentrations particulières attribuables aux véhicules serait de l'ordre de 1,02, compte tenu des valeurs moyennes des particules en suspension dans les villes suivies par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air. Cela aboutit à une estimation de quelque 5 700 hospitalisations annuelles pour affections respiratoires attribuables aux particules d'origine automobile. Ce chiffre est à considérer comme un ordre de grandeur car, hormis quelques enquêtes françaises ponctuelles [MEDINA, 1995 ; ZMIROU, 1995], les systèmes d'information sanitaires actuels ne permettent pas encore d'estimer avec une acceptable fiabilité l'impact de la pollution particulaire attribuable aux véhicules automobiles en terme de recours hospitalier.

Cependant, en utilisant des estimations très globales publiées à partir de statistiques néerlandaises par le bureau régional européen de l'OMS (1995) dans le document préparatoire à ses recommandations sur la qualité de l'air, le calcul aboutit à des chiffres très voisins. En effet, le nombre d'admissions hospitalières pour cause respiratoire attribuables aux particules d'origine automobile serait en France de l'ordre de 2 par million d'habitant après une exposition de 3 jours, soit une évaluation de l'ordre de 5 100 admissions hospitalières annuelles pour la population des grandes agglomérations urbaines.

3.2.1.2. Asthme

Au cours des années 1970, une diminution de la mortalité liée à l'asthme a été observée, mais depuis le début des années 1980, les résultats de nombreuses études épidémiologiques ont attiré l'attention sur une nouvelle augmentation de la mortalité dans la plupart des pays industrialisés, y compris en France.

Une des questions importantes concernant l'interprétation de cette nouvelle évolution de la mortalité liée à l'asthme est de savoir si celle-ci est liée à de réels changements de la morbidité de cette maladie, ou au contraire liées à des artefacts en rapport avec les pratiques de diagnostic et/ou de codage de la maladie, ou de déclaration. Au cours des dernières années, la réalité de cette évolution a été largement discutée, en particulier du fait de la modification de la Classification Internationale des Maladies (CIM) introduite en 1978, mais des études récentes prenant en compte les changements potentiels liés aux modifications diagnostic, de codage, ou

de modification de la CIM, ont confirmé la réalité de l'augmentation de la mortalité liée à l'asthme.

L'augmentation de la mortalité liée à l'asthme malgré l'introduction sur le marché de médicaments de plus en plus efficaces constitue toujours un débat d'actualité. L'abus de médicaments, l'inadéquation des traitements en particulier lors des crises d'asthme, et/ou l'échec des patients ou des médecins à reconnaître la sévérité des crises d'asthme, ne constituent pas des raisons suffisantes pour expliquer la situation actuelle. Dans ce contexte, deux autres hypothèses ont été avancées : d'une part, une augmentation de la prévalence de la maladie asthmatique, et d'autre part, l'augmentation de sa sévérité.

Entre les années 1970 et 1980, la prévalence cumulative de l'asthme (i.e. le fait d'avoir eu au moins une crise d'asthme depuis le début de sa vie) a connu une augmentation relative de l'ordre de 100 % chez les enfants âgés de moins de 13 ans aux États Unis, au pays de Galles, en Écosse, en Nouvelle Zélande ou en France ; les taux de prévalence cumulée varient entre 5 et 15 %. Entre 1960 et 1980, une augmentation de la morbidité liée à l'asthme a également été observée dans de nombreux pays. Cela s'est traduit par une augmentation importante du nombre de visites médicales ou d'hospitalisations pour asthme. L'augmentation de ces hospitalisations semble avoir concerné essentiellement les enfants, alors que l'augmentation des consultations médicales a concerné surtout les adultes et les personnes âgées.

De nombreux travaux tentant d'apporter des explications à ces évolutions ont été publiés. Les principaux facteurs de risque explicatifs possibles sont : 1) l'augmentation de la prématurité, 2) les modifications intervenues dans l'allaitement maternel et l'alimentation, 3) l'exposition de plus en plus précoce des jeunes enfants à des virus respiratoires, 4) les changements de l'environnement physico-chimique ou allergénique ambiant, 5) les changements liés aux conditions d'habitat, 6) les évolutions socio-économiques, 7) les changements liés à l'environnement médical (accès aux soins, changements de thérapeutiques).

Concernant les hypothèses environnementales, le fait que les évolutions de la mortalité et la morbidité de la maladie asthmatique intéressent des groupes de population très disparates, supposerait qu'une modification importante commune soit survenue dans l'exposition des populations. A ce jour, il n'existe aucun changement connu de l'environnement ambiant, y compris celui de la pollution atmosphérique, qui puisse expliquer un tel phénomène. Les modifications des conditions d'habitat (espaces plus confinés et humides), survenues en particulier à la suite des grands chocs pétroliers, semblent constituer l'hypothèse la plus vraisemblable.

Si l'augmentation de la prévalence de la maladie asthmatique ne peut donc actuellement être expliquée par la pollution atmosphérique, il est au contraire clairement démontré aujourd'hui que les polluants constituent des facteurs de risque de déclenchement de crises chez les sujets asthmatiques connus. De nombreuses études épidémiologiques étudiant les relations entre les variations journalières des niveaux de polluants atmosphériques et des indicateurs de santé, ont montré en effet que de faibles variations de ces polluants étaient associées à une augmentation significative des consultations d'urgence en ville ou à l'hôpital, des admissions hospitalières pour crise d'asthme, de la consommation médicamenteuse, ainsi qu'à une diminution de la fonction ventilatoire des sujets asthmatiques.

3.2.2. Morbidité cardia-vasculaire

Le tableau II montre que, sur la base des données actuellement disponibles, le risque sanitaire à court terme associé aux émissions automobiles en termes de morbidité cardio-vasculaire ne peut être caractérisé que pour l'indicateur des particules en suspension et le monoxyde de carbone (CO). Cependant, les données épidémiologiques publiées au niveau international ou en France [MEDINA, 1994] sont encore trop peu nombreuses pour être utilisées afin d'extrapoler raisonnablement les risques estimés dans ces études au niveau national.

De plus, si les niveaux de concentrations du monoxyde de carbone dans certains micro-environnements sont relativement bien connus, en l'absence de données concernant le budget espace-temps de la population générale urbaine dans ces micro-environnements, l'estimation de l'exposition globale de la population au CO est difficile. Par ailleurs, bien que le CO soit surveillé par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air, d'une part le nombre de stations de mesure est relativement faible en France (35 sites sur l'ensemble du territoire) et d'autre part, principalement mesurés par des stations de proximité, les résultats sont très dépendants du site d'implantation de celles-ci. L'exposition moyenne au CO des citoyens est donc aujourd'hui encore difficile à caractériser.

Cependant une enquête récente sur les sept villes américaines [MORRIS, 1995] attire à nouveau l'attention sur la possibilité que la pollution par le CO aggrave le risque cardiaque, indépendamment des particules fines en suspension. L'indicateur pertinent serait les valeurs maximales horaires journalières.

3.2.3. Cancers

La cancérogénicité éventuelle de la pollution atmosphérique d'origine automobile peut être approchée de plusieurs façons. De nombreux

composants de cette pollution ont été évalués individuellement, par exemple par le CIRC, Centre International de Recherche sur le Cancer de l'OMS. D'autre part, la monographie du CIRC spécifiquement consacrée à la pollution par l'échappement des moteurs essence ou diesel tire une conclusion générale (IARC, 1989). L'US-EPA a également évalué le risque de cancer pour plusieurs composants de la pollution automobile. Le diesel a été l'objet d'une évaluation récente par le Health Effects Institute [HEI, 1995].

Un seul composant des effluents automobiles est considéré comme un cancérigène certain chez l'homme (groupe 1 du CIRC), il s'agit du benzène. Une estimation de l'EPA estime que 70 cas de décès par cancer par an sont imputables au benzène dans l'environnement aux États-Unis. On sait que ponctuellement, les teneurs peuvent être importantes, notamment dans l'enceinte de parkings souterrains, en raison de l'évaporation. En particulier le remplissage des réservoirs est à l'origine d'expositions courtes mais élevées. Chez les professionnels (mécaniciens), l'interdiction du nettoyage des mains ou des pièces mécaniques à l'essence devrait être fortement rappelée. La connaissance de la distribution des expositions de la population urbaine française est encore insuffisante pour pouvoir caractériser le risque de manière valable. On a cependant une notion de l'ordre de grandeur du « risque unitaire », qui pourrait être attribué au benzène. Le chiffre de l'OMS est de 4 cas de leucémie par million de personnes exposées une vie entière à 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (modèle linéaire).

Six composants (voir § 2.1) sont classés « probablement cancérigènes chez l'homme » (groupe 2A de l'IARC,). Pour ces corps, les données sont considérées comme suffisantes chez l'animal mais, selon le cas, limitées, insuffisantes ou absentes chez l'homme. Les effluents diesel considérés comme un tout sont également classés dans cette catégorie.

Enfin 16 molécules appartiennent au groupe 2B « potentiellement cancérigènes pour l'homme ». Parmi eux l'acétaldéhyde, quatre nitropyrénes, sept HAP. Pour ces corps, les données sont considérées comme suffisantes chez l'animal, mais soit insuffisantes soit la plupart du temps absentes chez l'homme. Les effluents des moteurs à essence, considérés comme un tout, sont classés dans cette catégorie.

Il est à noter que les composants issus de la combustion des carburants sont très proches de ceux qui composent la fumée de tabac qui, elle aussi, comporte un grand nombre de cancérigènes potentiels ou probables. Si la fumée de tabac a été classée, en tant que mélange complexe, dans le groupe des cancérigènes certains pour l'homme, c'est en partie pour la raison que la mesure de l'exposition individuelle, et la

reconstitution d'une dose totale accumulée, en sont relativement aisées. D'autre part les concentrations inhalées par les fumeurs sont très hautes, comparées aux concentrations environnementales imputables aux transports. Cependant, aujourd'hui le tabagisme passif lui-même est clairement responsable de la survenue de pathologies respiratoires ou de cancers.

L'attitude généralement admise étant de ne pas reconnaître l'existence de seuil pour les cancérigènes, toute réduction de l'exposition de la population aux effluents automobiles ne peut être que bénéfique sur le plan de la survenue des cancers. La mise en évidence d'un lien possible entre incidence des cancers d'enfants et trafic dans la voie d'habitation par Savitz et Feingold incite fortement à développer la recherche dans cette direction. L'excès de risque de cancer du poumon observé dans les villes, s'il ne peut être imputé d'emblée à la pollution automobile, notamment en raison des nombreuses différences dans les modes de vie citadin et campagnard, incite également à poursuivre les recherches. Prenant cependant comme exemple le cas des HAP cancérigènes, avec le benzo(a)pyrène comme chef de file, il convient de rappeler que l'air ne représente qu'une source relativement secondaire de l'exposition totale de l'homme, le tabac et l'alimentation étant en moyenne nettement prédominants [HEMMINKI, 1994].

3.2.4. Effets neuro-comportementaux

Deux composants de la pollution automobile sont principalement susceptibles d'altérer le fonctionnement du système nerveux aux teneurs environnementales. C'est le cas en particulier, en aigu, du CO pour des teneurs que l'on n'observe pas en plein air, mais susceptibles d'exister en milieu clos, particulièrement dans les tunnels ou parkings mal ventilés. Dans des circonstances anormales de séjour prolongé dans de telles structures, des troubles de l'humeur et de la conscience peuvent être observés.

L'intoxication au plomb des enfants, ayant des conséquences sur le développement du système nerveux, est aujourd'hui largement attribuée à d'autres sources que l'automobile, grâce au développement rendu irréversible de l'essence sans plomb. Or tous les apports de ce toxique s'additionnent car il s'accumule dans l'organisme. La baisse observée des teneurs de plomb atmosphérique est donc tout à fait favorable.

Conclusions

Grâce aux progrès de l'épidémiologie et à l'avancée remarquable des connaissances toxicologiques depuis une quinzaine d'années, on sait à présent avec certitude que santé et pollution atmosphérique urbaine sont liées, aujourd'hui

d'hui, dans nos grandes cités, même à des niveaux de concentrations relativement modestes respectant les " normes " actuelles de la qualité de l'air. La question est de savoir quelle est la part de ce risque représentée par les effluents automobiles.

C'est par la conjugaison des travaux expérimentaux, sur matériel cellulaire, sur l'animal ou chez l'homme, et d'investigations épidémiologiques, en milieu professionnel ou en population générale, que les connaissances sur l'impact biologique et sanitaire de ces polluants ont pu progresser.

En raison de la multiplicité des polluants respirés dans l'air, dont la nocivité reste mal connue pour beaucoup, et qui sont par ailleurs souvent difficiles à mesurer, les quelques composés qui apparaissent " responsables " d'une incidence accrue de troubles respiratoires doivent plutôt être considérés comme des indicateurs de la qualité de l'air, parfois aussi comme des marqueurs d'une source de pollution complexe.

La pollution d'origine automobile peut-elle être mise en cause dans de telles atteintes de la santé, la pollution urbaine ne lui étant bien évidemment pas entièrement imputable ?

Pour répondre à une telle question, quelques études ITIOntrent des relations directes entre santé et intensité ou proximité du trafic. En particulier, les symptômes de la maladie asthmatique seraient pour partie liés à l'importance de l'exposition au trafic automobile. Certains auteurs suggèrent aussi que l'incidence des cancers pourrait être augmentée par l'exposition au trafic. Ces études cependant demandent à être confirmées, du fait de leur faible nombre et de limites méthodologiques. Dans le cas des études se basant sur la pollution urbaine générale, issue de diverses sources, il faut considérer l'importance de la contribution automobile. Bien qu'elle varie d'un site à l'autre, selon l'importance du trafic et des autres sources, elle est aujourd'hui majoritaire pour le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote, les hydrocarbures mono-aromatiques, les particules fines et le plomb atmosphérique, et minoritaire pour le dioxyde de soufre. Elle est difficile à apprécier pour les polluants secondaires tels que l'ozone, l'aérosol acide et les aldéhydes. Pour apprécier l'exposition des citoyens, il faut également considérer des espaces dans lesquels, si les séjours sont habituellement d'une durée relativement brève, les concentrations des polluants émis directement par les véhicules peuvent être considérables. L'habitable des voitures ralenties par des embouteillages, les parkings en sous-sol ou les tunnels et leur immédiate proximité apparaissent des lieux de haute concentration des polluants.

Deux améliorations sensibles sont à souligner. La baisse notable des teneurs atmosphériques pour le plomb est à consolider, car il n'y a

pas de seuil reconnu pour les effets du plomb sur le développement psychomoteur de l'enfant. Le monoxyde de carbone est lui aussi en baisse, tendance qui devrait, selon toute logique, s'accroître en raison de l'extension du parc de véhicules à essence catalysés. Cependant l'aggravation du risque cardiaque existe même pour de faibles teneurs, et localement, notamment en des lieux confinés ou mal ventilés (parkings, tunnels), on peut observer des teneurs encore excessives.

Si, pour certains effets à court terme, le rôle de la pollution d'origine automobile est bien établi, d'une façon générale, pour les effets à long terme (cancers, mais aussi révélation d'un terrain potentiellement allergique ou troubles chroniques de la fonction respiratoire), la mesure ou l'estimation d'une exposition cumulée est pour l'instant nettement insuffisante, rendant l'épidémiologie impuissante à quantifier d'éventuels effets. L'expérimentation animale est également plus difficile à conduire pour ces effets différés, et ses enseignements sont souvent délicats à extrapoler à l'espèce humaine.

Malgré ces lacunes, les faits sont aujourd'hui suffisamment établis pour justifier un renforcement considérable des efforts de chacun visant à réduire la menace que constitue pour les habitants des grandes cités, et tout spécialement pour les personnes les plus fragiles, la pollution atmosphérique d'origine automobile. Il ne s'agit certes pas du principal problème de santé publique aujourd'hui en France. Mais il est bien identifié, son impact est loin d'être négligeable, ses causes sont bien cernées, ses solutions, enfin, de natures très diverses, sont bien documentées et, pour certaines, déjà mises en œuvre par les différents acteurs concernés, ici ou au delà de nos frontières. Aidé en cela par la " loi sur l'air " à chacun de prendre en considération ce problème et d'en tirer les conséquences.

Bibliographie

ADEME. Maîtrise de l'Energie en chiffres 1973-1993, Paris, 1994.

BATES D.U. Health indices of adverse effects of air pollution : a question of coherence. *Environ. Res.*, 1992, 59, 336-349.

Mc BRIDE D.E., KOENIG J.O., LUCHTEL D.L., WILLIAMS P.V., HENDERSON W.R. Inflammatory effects of ozone in the upper airways of subjects with asthma. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 1994, 149, 1192-1197.

BEAUCHAMP R.O., ANDJELKOVICH D.A. et coll. A critical review of the literature on acrolein toxicity. *Crit. Rev. Toxicol.*, 1985, 14 (4), 309-380.

BENIGNUS V.A., OTTO D.A., MULLER R.E., SEIPLE K.E. Effects of age and body lead burden on CNS function in young children. II - EEG spectra, *Electroencephal. Clin. Neurophysiol.*, 1981, 52, 240-248.

CHIRON M. Intoxication oxycarbonée, intoxication par le gaz carbonique. *Encyclopédie Médico-Chirurgicale* (toxicologie, pathologie professionnelle). n° 112, 16-002-B-50, 3^e trimestre 1996.

DOCKERY O.W., SPEIZER F.E., STRAM O.O., WARE J.H., SPENGLER J.O., FERAIS B.G. Effects of inhalable particles on respiratory health of children. *Am. Rev. Respir. Dis.*, 1989, 139, 587-594.

DOCKERY O.W., POPE C.A., XU X. et al. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *New Engl. J. Med.*, 1993, 329, 1753-1759.

DOCKERY O.W., POPE C.A. Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Am. Rev. Public Health*, 1994, 15, 107-132.

Mc DONNELL W.F., HORSTMAN O.H., ABDULSA-ZAAM S., HOUSE D.E. Reproducibility of individual responses to ozone exposure. *Am. Rev. Respir. Dis.*, 1985, 131, 36-40.

EDWARDS J., WALTERS S., GRIFFITHS R.K. Hospital Admissions for Asthma in Preschool Children : Relationship to Major Roads in Birmingham, United Kingdom. *Arch. of Environ. Health*, 1994, 49, 4, 223-227.

EPA. United States Environmental Protection Agency, Health assessment document for diesel emissions : external review draft. EPA 600/8-90/057. Office for research and development, Washington D.C., 1994.

FORASTIERE F., CORSO G., PISTELLI A. et al. Branchial responsiveness in children living in areas with different air pollution levels. *Arch. Environ. Health*, 1994, 49, 111-117.

HASSETT C., MUSTAFA M.G., COULSON W.F., ELASHOFF R.M. Murine lung carcinogenesis following exposure to ambient ozone concentrations. *J Natl Cancer Inst.*, 1985, 75, 771-777.

Health Effects Institute (HEI). Diesel exhaust : a critical analysis of emissions, exposure and health effects. A special report of the Institute's diesel working group, Cambridge, 1995, 294 p.

HEMMINKI K., PERSHAGEN G. Cancer risk of air pollution : the epidemiological evidence. *Environmental Health Perspectives*, 1994, 102 (supplement 4), 187-199.

IARC. International Agency for Research on Cancer, IARC Monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans. Benzene. Lyon. IARC, 1982.

IARC. International Agency for Research on Cancer. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Diesel and gasoline engine exhausts and some nitroarenes. Vol. 46, IARC Lyon France, 1989.

KOREN H. S., DEVLIN R.B., BECKER S., PEREZ A. AND MCDONNELL W.F. Time-dependent changes of markers associated with inflammation in the lungs of human exposed to ambient levels of ozone. *Toxicol. Pathol.*, 1991, 19, 406-411.

MAEDA K., NITTA H., NAKAI S. Exposure to nitrogen oxides and other pollutants from automobiles. *Pub. Health Rev.*, 1991/92, 19, 61-72

MEDINA S., LE TERTRE A., QUENEL P. et al. Évaluation de l'impact de la pollution atmosphérique urbaine sur la santé en Ile de France (étude « EAPURS »), Rapport OASIF observatoire régional de santé d'Ile-de-France, 1994, 104 p.

Ministère des Affaires Sociales, de la Santé et de la Ville, Direction Générale de la Santé, Commission de Toxicovigilance. Intoxication par le plomb chez l'enfant, juillet 1993, 111 p.

MOLDÉUS P. Toxicity induced by nitrogen dioxide in experimental animals and isolated cell systems. *Scand. J. Work Envir. Health*, 1993, 19, sup. 2, chap 4., p 28-34.

MOMAS I., PIAARD P., QUENEL P., MEDINA S., LE MOULLEC Y., FERRY A., DAB W., FESTY B. Pollution atmosphérique urbaine et mortalité : une synthèse des études épidémiologiques publiées entre 1980 et 1991. *Rev. Epidém. et Santé Pub.*, 1993, 41, 30-43.

MORRIS R.D., NAUMOVA E.N., MUNASINGHE R.L. Ambient Air Pollution and Hospitalization for Congestive Heart Failure among Elderly People in Seven Large U.S. Cities. *Am. J. Pub. Health*, 1995, 85, n° 10, 1361-1365.

MURAKAMI M., ONO M., TAMURA K. Road Transport Impact on the Environmental Health. *Toxicology and Industrial Health*, 1991, 7, 5/6, 105-110.

MUSTAFA M.G. Biochemical basis of ozone toxicity. *Free Radic Biol Med.*, 1990, 9, 245-265.

NEEDLEMAN H.L., GATSONIS C.A. Low level lead exposure and the IQ of children. A meta-analysis of modern studies. *J.A.M.A.*, 1990, 322, 83-88.

NITTA H., SATO T., NAKAI S., MAEDA K., AOKI S., ONO M. Respiratory Health Associated with Exposure to Automobile Exhaust. 1. Results of Cross-Sectional Studies in 1979, 1982 and 1983. 1993, 48, 53-58.

OMS. Environmental Health Criteria 89 : Formaldehyde. International Programme on Chemical Safety = IPCS. WHO, 1989.

PEPELKO W.E., CHEN C. Quantitative assessment of cancer risk from exposure to diesel engine emissions. *Regul. Toxicol. pharmacol.*, 1993, 17, 52-56.

PERDRIX A. Guide pratique d'exploration fonctionnelle respiratoire : utilisation en milieu professionnel. 1994, Masson, Paris.

POPE C.A., THUN M.J., NABOODIRIM M. et al. Particulate pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 1995, 51, 669-674.

PREFAUT C.H. Méthodes d'exploration de la fonction respiratoire In GODARD Ph., BOUSQUET J., MICHEL F.B., *Maladies respiratoires*, 1993, Masson, Paris, 41-49.

QUÉNEL P., MEDINA S., PIRARD P., MOMAS I., LE MOULLEC Y., FERRY A., FESTY B. DAB W. Impact de la pollution atmosphérique sur la consommation de soins. Revue de la littérature des études épidémiologiques publiées entre 1980-1990. *Pollution atmosphérique*, 1993, janvier-mars, 87-102.

QUÉNEL P., ZMIROU D., LE TERTRE A. et al. Impact de la pollution atmosphérique urbaine de type acidoparticulaire sur la mortalité quotidienne à Lyon et dans l'agglomération parisienne. *Santé Publique*, 1995, n° 4, 363-376.

ROYAL COMMISSION ON ENVIRONMENTAL POLLUTION. Transport and the environment. Eighteen report, oct. 1994, Londres.

SAVITZ D.A., FEINGOLO L. Association of Childhood Cancer with Residential Traffic Density. *Scand. J. Work Environ. Health*, 1989, 15, 360, 360-363.

SCHELEGLE E. S., SIEFKIN A.D. AND McDONALD R.J. Time course of ozone induced neutrophilia in normal humans. *Am. Rev. Respir. Dis.*, 1991, 143, 1353-1358.

SCHWARTZ J. Air pollution and daily mortality : a review and meta analysis. *Environmental research*, 1994, 64, 36-52.

SCHWARTZ J. What are people dying from on high pollution days ? *Environ. Res.*, 1994 c, 64, 26-35.

SFSP. Société Française de Santé Publique. La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique, bilan de 15 ans de recherche internationale. *Collection santé et Société*, no 4, 251 p.

SOYSETH V., KONGERUD J., HAARR O., BOLLE OS, BOE J. Relation of exposure to airway irritants in infancy to prevalence of bronchial hyper-responsiveness in schoolchildren. *Lancet*, 1995, 345, 217-220.

SPIX C., HENRICH J., DOCKERY O., SCHWARTZ J. et al. Air pollution and daily mortality in Erfurt, East Germany. *Environ Health Perspect.*, 1993, 101, 518-526.

TAM A.Y.C., WONG C.M., LAM T.H. et al. Bronchial responsiveness in children exposed to atmospheric pollution in Hong Kong. *Chest*, 1994, 106, 1056-1060.

TGLD (Task group on Lungs Dynamics). Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory track. *Health Physics*, 1966, 12, 173-207.

TORNQVIST M., EHRENBERG L. On cancer risk estimation of urban air pollution. *Enviro. Health Perspect.*, 102 (sup 4), 173-181.

TOULOUMI G., POCOCK S.J., KATSOUYANNI K. et al. Short-term effects of air pollution on daily mortality in Athens : a time-series analysis. *International Journal of Epidemiology*, 1994, 23 (5), 957-967.

WHO. Air Quality Guidelines for Europe Benzene. Chap. 6. Genova. *World Health Organization*, 1987, 45p.

WJST M., REITMER P., DOLO S., WULFF A., NICOLA T., FREIFRAU VON LOEFFELHOLZ-COLBERG E., VON MUTIUS E. Road Traffic and adverse Effects on Respiratory Health in Children. *BMJ*, 1993, 307, 596-600.

ZMIROU O., BALOUCCIF., PIRAS A. et al. Méta-analyse et fonctions dose-réponse des effets respiratoires de la pollution. Soumis pour publication dans *Epidemiology*, 1997.

ZMIROU O., OELORAINE A., BALDUCCI F. et al. Coût médico-social à court terme de la pollution atmosphérique en milieu urbain. Une étude dans la région Rhône-Alpes. *Rapport de l'Institut Universitaire de Santé Publique de Grenoble pour la DGS, l'ADEME et le RNSP*, décembre 1995b.

ZMIROU O., SCHWARTZ D., SAEZ M. et al. Time-series analysis of air pollution and cause-specific mortality : a quantitative summary in Europe (APHEA study). Soumis pour publication dans la *Rev. Epidemiol. et Santé*, Pub. 1997.

Les carburants : marché, qualité, émissions en France

André PHILIPPON (*)

Les marchés des carburants

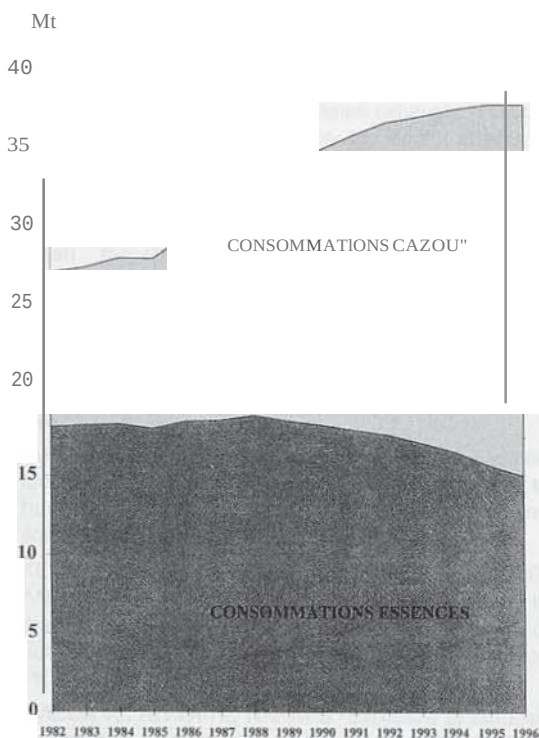
Pour comprendre l'évolution du marché des carburants-essences en France il faut suivre l'ensemble des produits :

- essence ordinaire et supercarburant avec plomb;
- supercarburants sans plomb apparus en 1989 (eurosper 95 et super 98) ;
- gazole moteur (en se rappelant que le gazole de chauffage – ou le fioul domestique – est aussi utilisé dans des moteurs, pour l'agriculture, le secteur du BTP, les moteurs fixes). A cela il faut ajouter le GPL carburant correspondant à des usages spécifiques qui devrait prendre plus d'importance à l'avenir dans des usages locaux. Le total des carburants routiers est en croissance très faible, au niveau d'un peu moins de 39 Mt/an aujourd'hui (graphique 1). Cette stabilité s'accom-

pagne d'évolutions contrastées pour chacune de ces catégories : disparition de l'essence ordinaire, réduction du super plombé, maintenant nettement dépassé par le super sans plomb, forte croissance du gazole avec le progrès des transports routiers et la diésélisation croissante du parc des voitures particulières (graphique 2). Ce dernier point n'est pas sans rapport, évidemment, avec la disparité existant entre la fiscalité des véhicules et du carburant diesel d'une part et celle des véhicules et des carburants essence d'autre part. De telles évolutions ont une grande importance tant pour l'industrie du raffinage (rentabilité de l'outil industriel et orientation des investissements), que pour la nature des émissions liées au transport routier (graphiques 3, 4, 5).

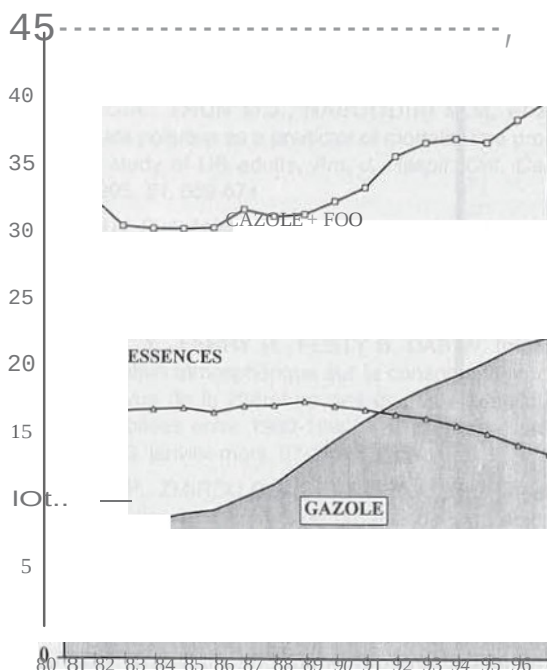
L'évolution de la qualité des carburants

Pour les essences la révolution du carburant sans plomb – d'abord conçu pour permettre le fonctionnement des pots catalytiques – a requis des investissements très importants, plus de

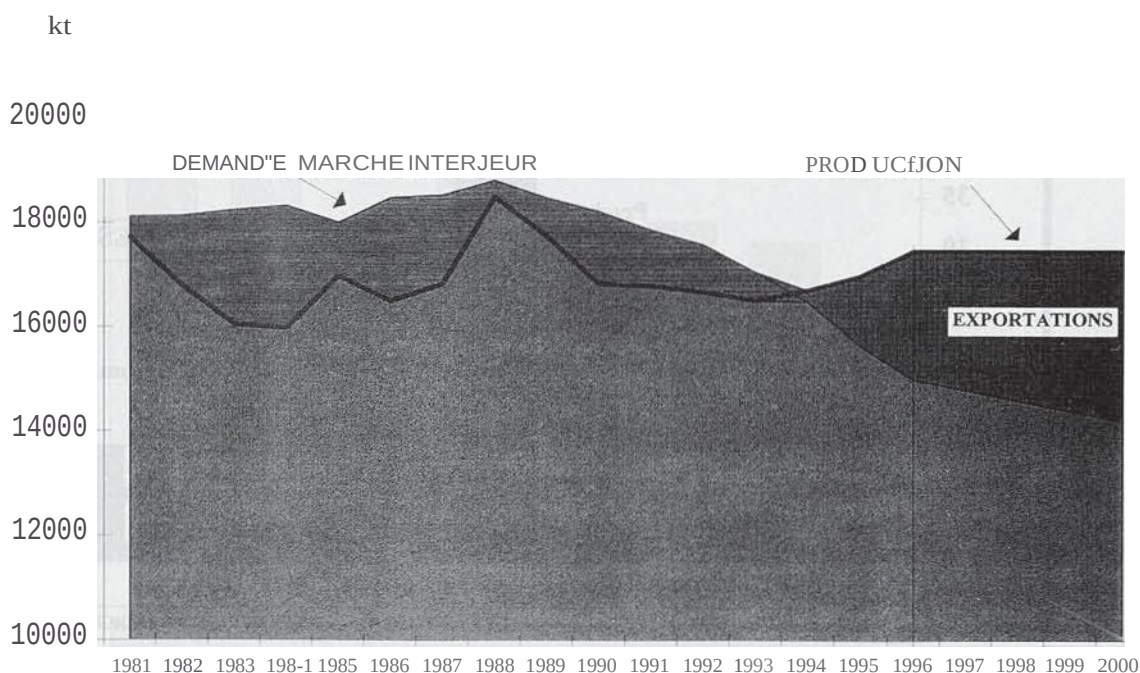


Graphique 1. Consommation de carburants en France (UFIP, février 97).

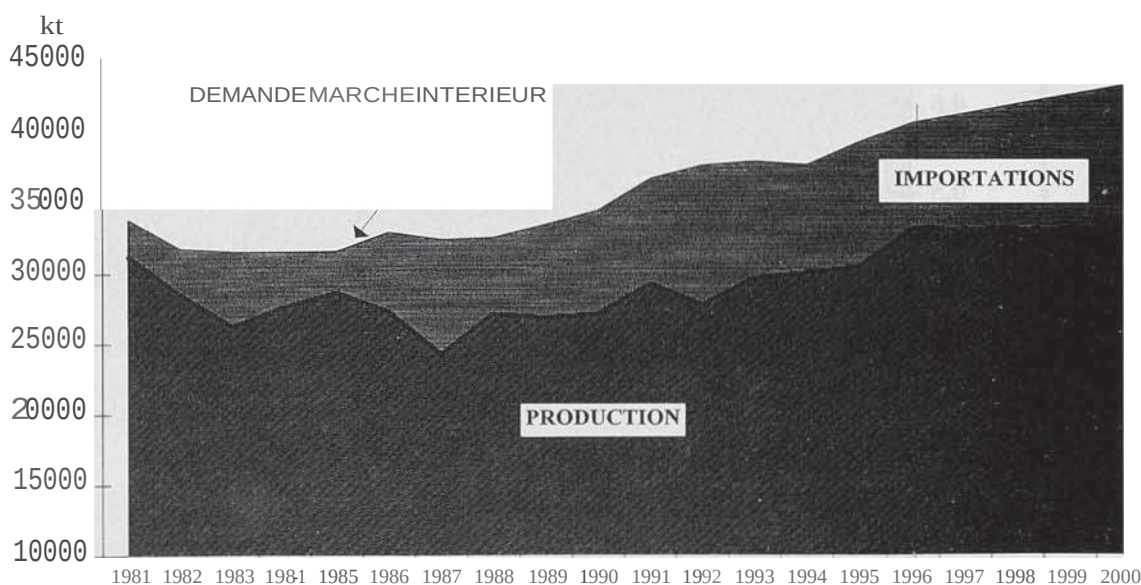
(*) Secrétaire Général de la Chambre Syndicale du Raffinage UFIP



Graphique 2. Consommations marché intérieur essences, gazole, FOD (Mt) (UFIP, février 97).



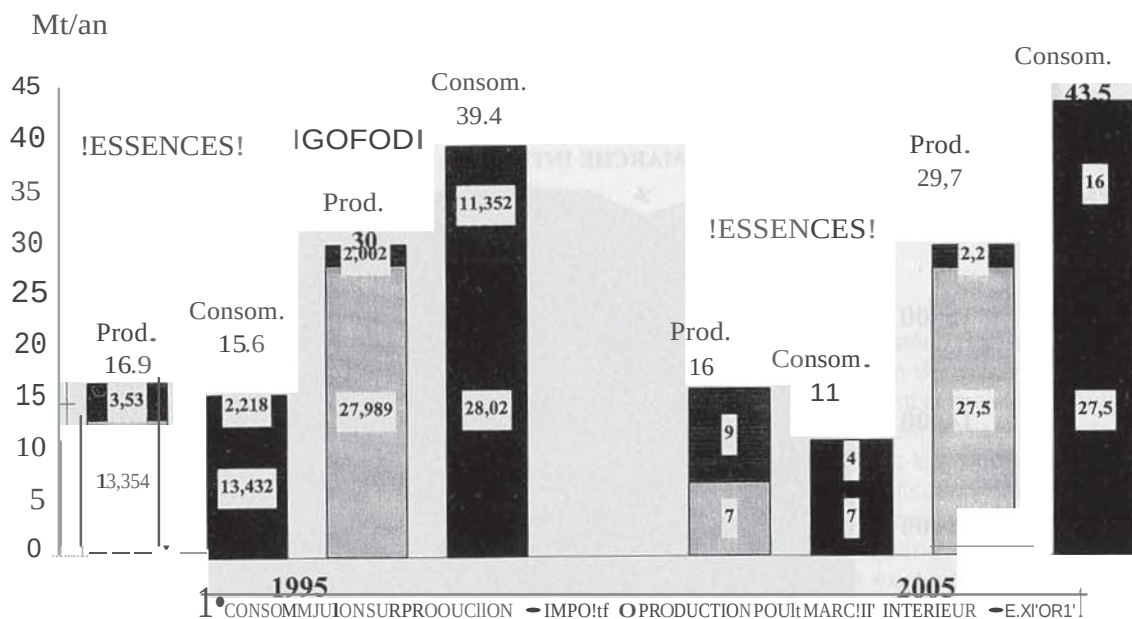
Graphique 3.
Déséquilibre du raffinage carburants essence.



Graphique 4.
Déséquilibre du raffinage gazole FOD

5 milliards de francs, et a entraîné le recours à diverses techniques de raffinage (pas seulement le réformage catalytique à haut indice d'octane, mais aussi l'alkylation et l'isomérisation) ainsi que l'utilisation de composés oxygénés (actuellement les éthers MTBE et ETBE) (graphique 6). L'introduction de carburants sans plomb à haut indice d'octane (super 98) a permis de faire bénéficier les véhicules anciens fonctionnant au carburant plombé de la suppression des émissions de plomb, pour la presque totalité du parc. Pour le

gazole, le travail des raffineurs a permis de réduire la teneur en soufre de 0,5 % à 0,3 % puis 0,2 % et finalement en octobre 1996 à 0,05 % (le fioul domestique restant à 0,2 % (graphique 7). Ce processus d'amélioration continu requiert des investissements particulièrement lourds pour une industrie caractérisée par des marges faibles, dans un contexte de surcapacité et de concurrence intense et face à un déséquilibre grandissant de la demande de gazole par rapport à celle d'essence



Graphique 5.
Carburants scenario 2005.

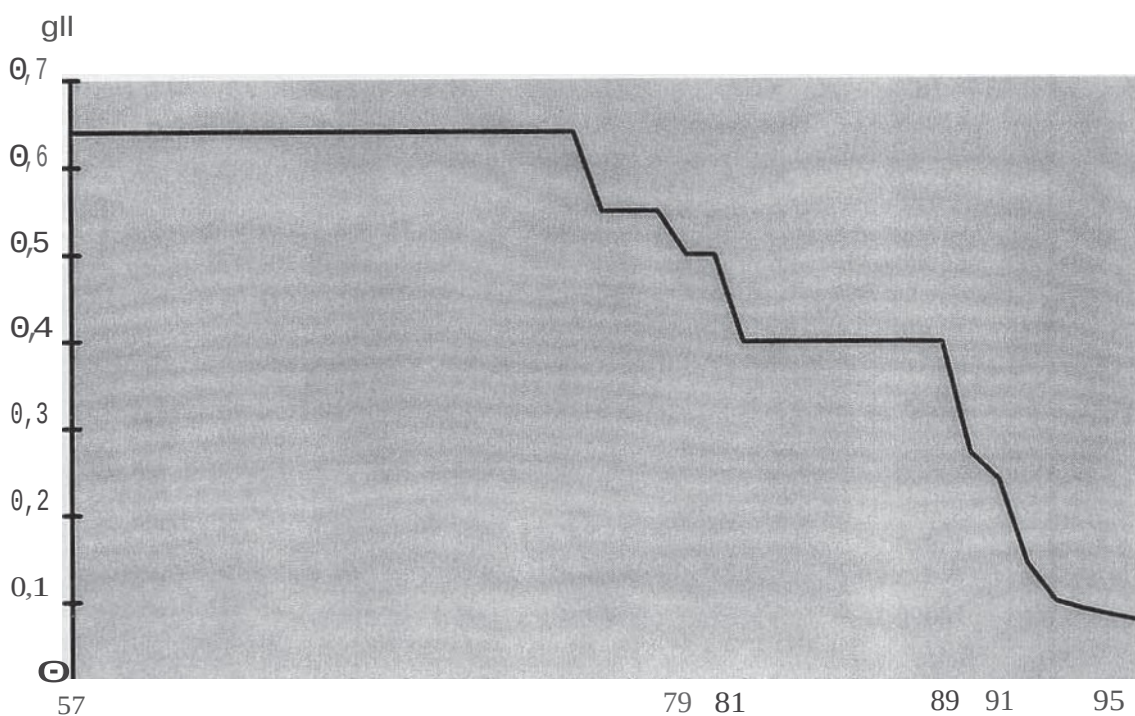


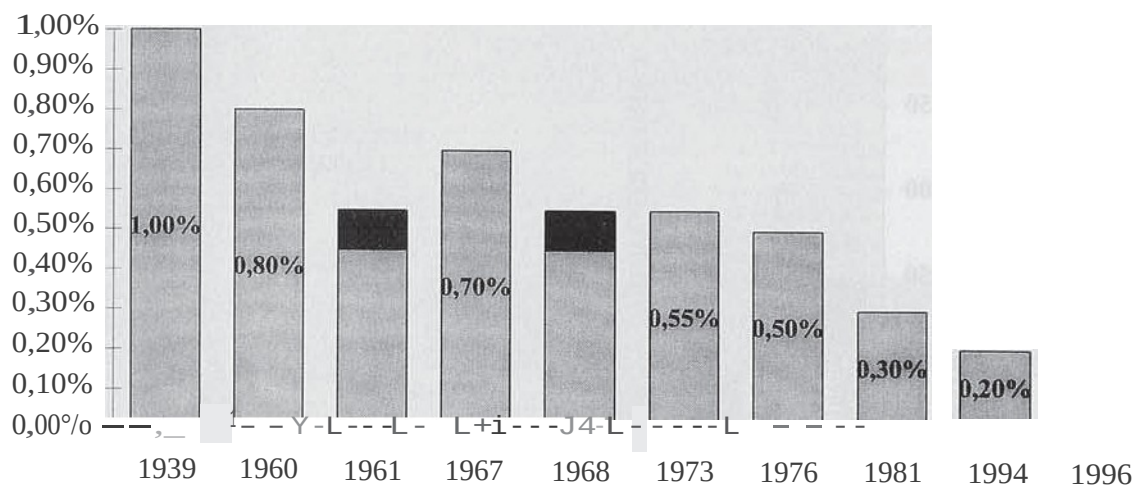
Figure 6.
Evolution de la teneur moyenne en plomb totalité des carburants.

Le rôle des carburants dans les émissions

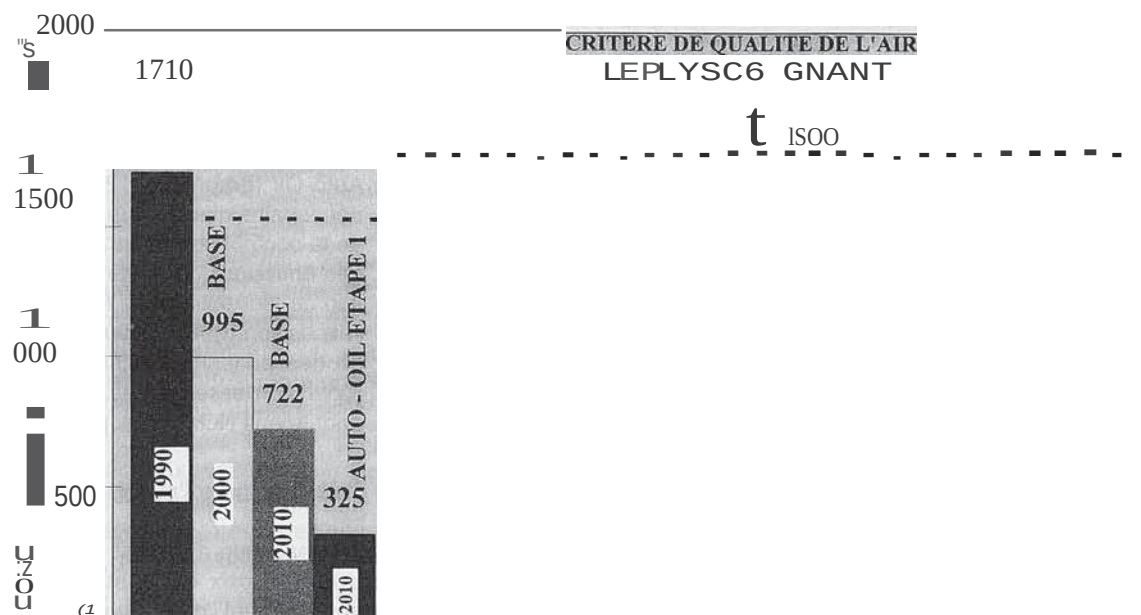
Pour les essences en ce qui concerne les polluants réglementés (CO, HC, NOx), les émissions des véhicules dépendent essentiellement des performances des convertisseurs (pots) catalytiques ; les études sur la qualité de l'air à l'horizon 2010, menées par la Commission européenne dans le cadre du Programme Auto

Oil, ont montré que déjà, avec les mesures applicables en 1996, on obtenait des améliorations très importantes sur ces polluants, notamment sur le CO et sur le benzène (graphiques 8 et 9). Il reste des progrès à faire sur les précurseurs d'ozone et les particules (graphique 10).

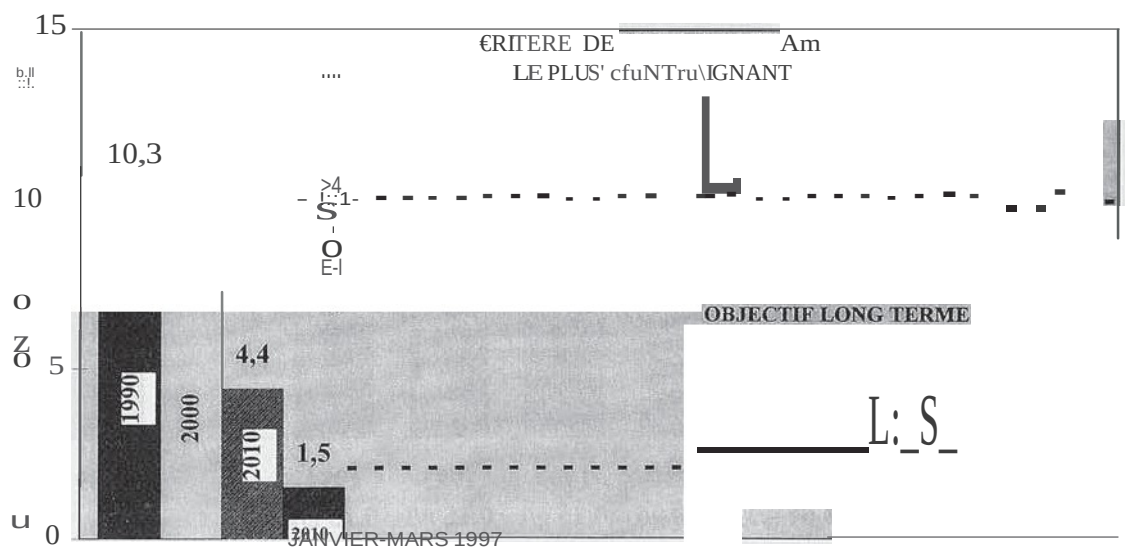
A propos du benzène, on ajoutera que la teneur moyenne en benzène des carburants en France, bien en dessous de la valeur de 5 %



Graphique 7.
Evolution des caractéristiques intersyndicales de teneur en soufre du gazole.



Graphique 8.
Auto-oil européen. Amélioration de la qualité de l'air monoxyde de carbone.



G
r
a
p
h
i
q
u
e

9
.

A
u
t
o
-
o
i
l

e
u
r
o
p
é
e
n
.

A
m
é
l
i
o
r
a
t
i
o
n

d
e

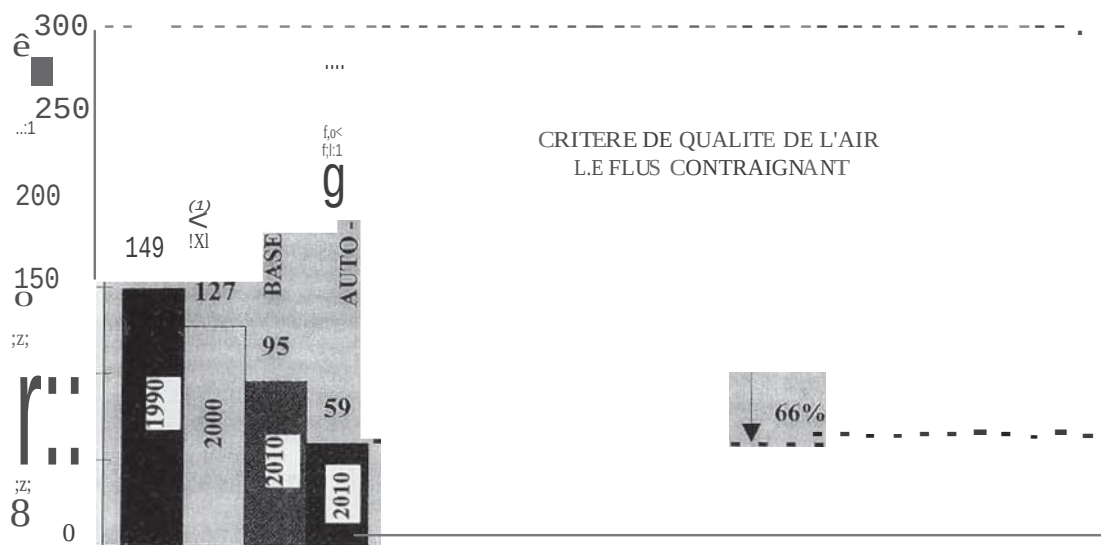
l
a

q
u
a
l
i
t
é

d
e

l'
a
i
r

b
e
n
z
è
n
e



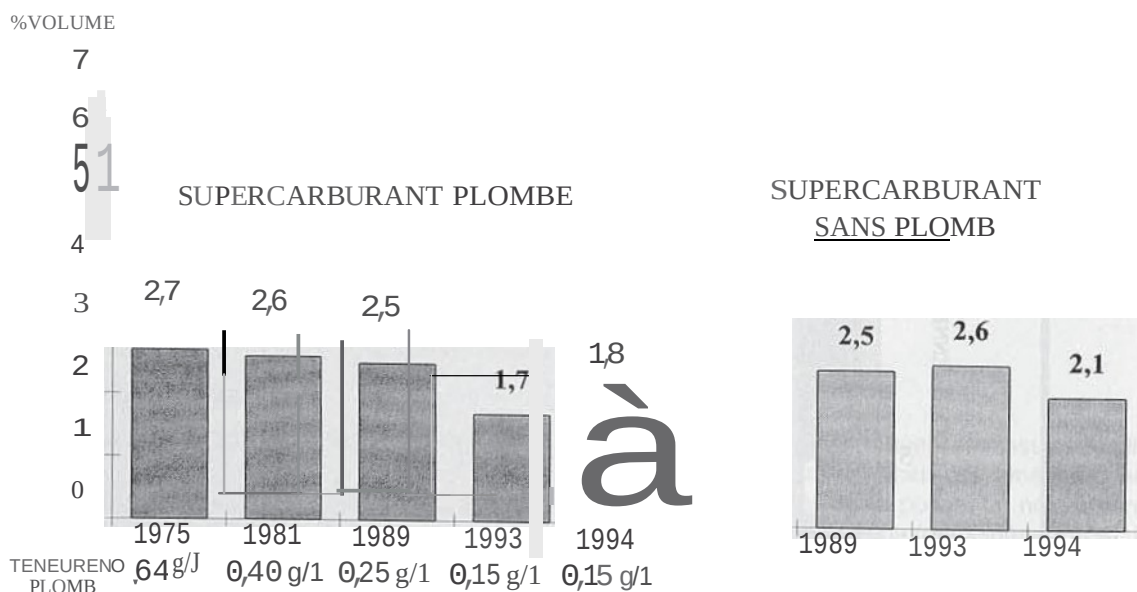
Graphique 10.
Auto-oil européen. Amélioration de la qualité de l'air oxydes d'azote.

fixée par la directive de 1985 pour le carburant sans plomb, a diminué pour tous les supercarburants y compris ceux à haut indice d'octane (graphique 11). Si problème de benzène il y a, il s'agit des pics de concentration locaux (principalement dans des espaces confinés, parkings souterrains...) ; l'expérience acquise en milieu professionnel montre qu'il existe une marge très importante entre les limites requises par la législation et retenues au niveau européen (1 ppm pour 8 heures) et les expositions éventuelles. Pour le gazole, la réduction drastique de la teneur en soufre a permis de réduire les émissions de SO_2 et les émissions massiques de particules : cette approche n'épuise pas la question et des mesures sont prévues dans le cadre des

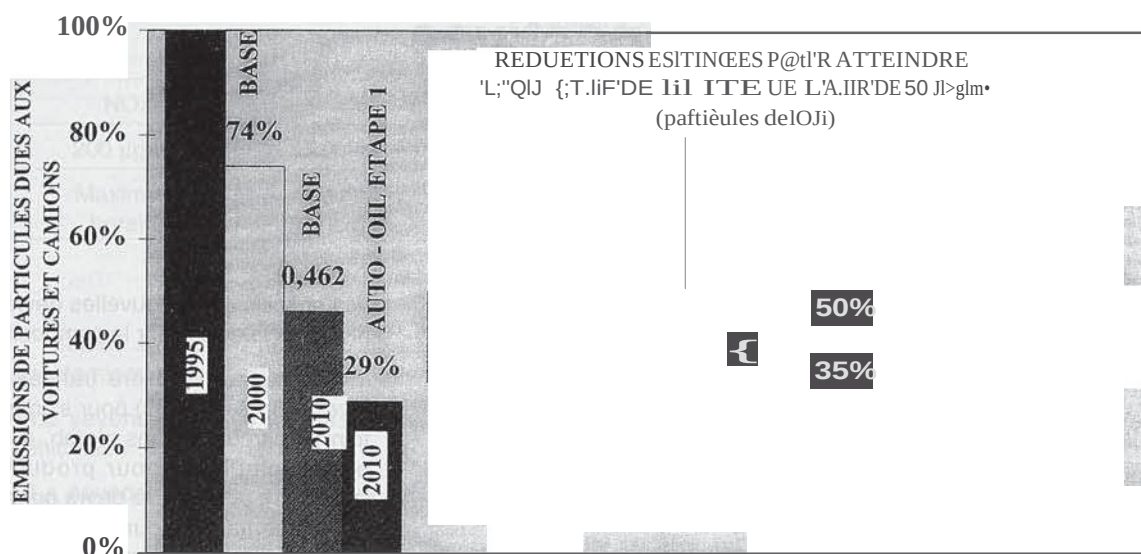
directives européennes issues du Programme Auto-Oil (graphique 12) ; de toute façon, il est nécessaire d'avoir une meilleure connaissance de la contribution des transports dans l'ensemble des émissions, des effets des particules en fonction de leur taille et de leur composition, enfin de l'exposition réelle du public. Là encore, la maîtrise des émissions passe aussi par celle de la répartition essences-gazole si l'on s'intéresse en priorité aux NO_x et aux particules.

Principes pour l'avenir

Beaucoup a été fait pour améliorer les carburants au prix d'investissements importants : actuellement, cette évolution est gouvernée par



Graphique 11.
Evolution des teneurs moyennes en benzène des supercarburants français.



Graphique 12.
Auto-oil européen. Amélioration de la qualité de l'air émissions de particules.

les nécessités environnementales ; cette évolution doit se poursuivre dans l'avenir ; tout ce que nous souhaitons, c'est que ces améliorations soient conçues en fonction de l'optimisation du couple moteur-carburant, en fonction d'objectifs de qualité de l'air scientifiquement établis et selon le meilleur rapport coût-efficacité pour atteindre ces objectifs : les propositions de la Commission européenne pour les carburants de l'an 2000 (programme Auto-Oil) correspondent en grande partie à cette exigence. Pour l'étape suivante, les développements de la technologie des véhicules doivent faire l'objet d'une actualisation complétée et objective, notamment afin de mieux cerner les contraintes réelles qui en résultent pour les carburants. Ce sera un des sujets essentiels du programme Auto Oil 2.

Une action immédiate très forte (par exemple très au-delà des propositions de la Commission européenne) sur la qualité des carburants afin d'améliorer les émissions des véhicules anciens encore en service ne paraît pas satisfaire à ce principe de meilleur rapport coût-efficacité : elle exigerait la mise en place d'investissements coûteux pour une période transitoire et ne serait pas

d'effet immédiat pour autant, vu les délais de réalisation de ceux-ci. Dans ce contexte, le renouvellement accéléré du parc de véhicules et les mesures non techniques (exemple la régulation du trafic) apparaissent plus adaptés à court et moyen terme. Il est certes exact que certains de ces carburants existent et sont distribués, mais il est essentiel d'ajouter qu'ils ne représentent qu'une très faible part du marché global européen et que leur surcoût est compensé par de très fortes incitations fiscales : par exemple, le gazole suédois représente moins de 2 % de la consommation totale du gazole de l'Union et fait l'objet d'une réduction d'accises de l'ordre de la moitié du prix hors taxes. La généralisation d'un gazole du type du gazole suédois à l'Europe entière entraînerait un véritable bouleversement dans l'industrie du raffinage européen dont les incidences seraient considérables sur le plan de l'équilibre offre-demande et notamment la disponibilité du kérosène et du gazole. Ceci se traduirait entre autres par des augmentations de prix du gazole, dues à la réduction de l'offre du produit, très supérieures à la seule répercussion du coût de réalisation des spécifications.

Essence - Perspectives

Guy CLAUS (*)

Les propriétés physiques et chimiques des carburants sont encadrées par des spécifications techniques fixées par l'administration. Leur première fonction est de garantir que tout carburant est utilisable en toute sécurité par tous les moteurs. Depuis quelques années, ces spécifications évoluent et de nouvelles apparaissent. Leur fonction est de contribuer à l'amélioration de la qualité de l'air.

Le public est maintenant habitué aux pompes d'essence .. sans plomb ... Celle-ci est appelée à se généraliser au point que le " plombé " disparaîtra au début de la prochaine décennie. D'autres modifications moins spectaculaires sont apparues plus récemment, et d'autres sont proposées pour l'an 2000.

Le tableau 1 présente la situation de quelques spécifications ayant un rôle à jouer sur les émissions polluantes. Elles portent sur la composition chimique (teneur en soufre, en benzène, en aromatiques, en oléfines, en oxygène) et des propriétés de distillation (tension de vapeur " RVP ", quantités distillées à 70 °C et à 100 °C). La situation de 1996 est comparée aux propositions que la commission de Bruxelles a faite au parlement européen pour application en 2000. On voit que

des spécifications nouvelles devraient apparaître, plus spécialement sur la composition chimique.

L'industrie pétrolière française a lourdement investi (8 MMF de 85) pour s'adapter à la fabrication de carburant sans plomb, et elle poursuit un effort semblable pour produire du gazole à 0,05 % de soufre. Elle devra consentir des efforts supplémentaires pour s'adapter pour satisfaire aux spécifications proposées pour 2000.

Les spécifications sont des valeurs extrêmes, en général maximales, que le produit doit satisfaire. La rigidité des procédés de raffinage ne permet pas d'atteindre simultanément toutes ces conditions extrêmes. Par conséquent, les valeurs moyennes effectives des propriétés spécifiées sont inférieures aux valeurs spécifiées. Le tableau 1 montre également quelques valeurs moyennes attendues en 2000 avec les nouvelles spécifications. C'est à partir de ces valeurs moyennes qu'on peut évaluer l'impact réel des nouvelles spécifications sur la qualité de l'air.

Les propositions pour l'an 2000 ont été définies au terme de l'étude Auto-Oit, qui a procédé dans une démarche rationnelle, orientée exclusivement vers la qualité de l'air. Pour cela, des valeurs-seuil de polluants dans l'atmosphère urbaine ont été fixées à partir de recommandations d'experts, en particuliers ceux de l'OMS. Elles sont indiquées dans le tableau 2.

(*) Elf-Antar-France, Centre de Recherche de Solaize.

Tableau 1.
Evolution à court terme de quelques spécifications des essences en Europe

	1996	Proposition pour 2000		
		Minimum	Maximum	Moyenne du marché
Soufre, % masse	0,05		0,020	0,015
Plomb, g/l	0,013		0,005	0,005
RVP, kPa, Class 5/6	90		60	58
VLI (RVP + 7 x E70)	1 100			
E70, % vol	15-47	46		
E 100, % vol	43-70			
Benzène, % vol	5,0		2,0	1,6
Aromatiques, % vol			45	37
Oléfines, % vol			18	11
Oxygène, % masse	Selon 85/536/EEC		2,3	1,0

Tableau 2.
Objectifs de qualité de l'air de l'étude Auto-Oil

NOx	CO	Benzène	Particules	Ozone
200 Lgfm3	10 i-LQ/m ³	10 i-LQfm3	50 i-Lg/m ³	180 i-Lgfm3
Maximum horaire	Maximum horaire	Moyenne annuelle	Moyenne annuelle	Percentile 99 sur une heure

L'étude évalue les effets de plusieurs scénarios de mesures portant sur:

- La sévérisation des normes d'émissions des véhicules
- La sévérisation des spécifications des carburants
- La sévérisation des contrôles techniques (Inspection et maintenance)

L'effet de ces différents scénarios sur la qualité de l'air a été évalué dans 9 villes européennes (La Haye, Londres, Athènes, Madrid, Milan, Lyon...), par calcul, à partir de modèles modernes de transport de matière et de chimie atmosphérique. Le coût de chaque scénario a également été évalué afin de définir les propositions sur la base du meilleur ratio coût /efficacité.

La réalisation de cette étude nécessitait cependant de connaître les relations entre les propriétés des carburants et les émissions, pour les différentes technologies moteurs représentatives du parc roulant en 2000. Ces relations ont été déterminées dans le cadre de l'étude EPEFE (1) menée conjointement par les pétroliers et les constructeurs européens de juillet 93 à mai 95. Quelques chiffres significatifs de l'effort consenti sont indiqués dans le tableau 3.

Tableau 3. Quelques chiffres sur EPEFE

- 35 voitures testées, essence et diesel
- 5 moteurs de poids lourds
- 26 carburants d'essais dont 12 essences
- 5 000 mesures d'émissions au banc à rouleau selon cycles européens
- 500 000 données récoltées et analysées par traitement statistique pour obtenir des corrélations émissions vs propriétés des carburants
- Coût : 10 millions ECU

Les paramètres représentatifs des carburants ont été choisis sur la base de la littérature existante et des résultats d'un programme similaire réalisé aux Etats-Unis (U. S. Auto-Oil). Les carburants ont été fabriqués selon une matrice non biaisée ce qui a contraint à sélectionner des coupes essence de nombreuses raffineries européennes.

En ce qui concerne plus spécialement les essences, les tendances obtenues sont indiquées dans le tableau 4. Les plages de variation des paramètres carburant sont larges: Passer de 300 à 20 ppm de soufre ou de 52 à 20 % d'aromatiques représente des modifications très profondes des structures de raffineries. Compte tenu de ces larges variations, les effets des essences sont relativement faibles.

Les indications données dans le tableau 4 correspondent à des niveaux moyens d'émissions moyennés sur la flotte des véhicules. Seule une réduction du soufre permet d'abaisser systématiquement toutes les émissions réglementées. Les autres paramètres du carburant ont des effets distincts selon le polluant considéré, obligeant donc à trouver un compromis.

Le tableau 4 montre les variations d'émissions apportées par la modification du carburant et par celle du véhicule. Cette dernière se révèle bien plus importante. Ceci vient en partie de l'inhibition de catalyseur par les oxydes de soufre. Celle-ci dépend de la formulation du catalyseur monté sur les différents véhicules de la flotte d'essais.

L'étude EPEFE a aussi montré que la variabilité des émissions est bien plus grande d'un véhicule à l'autre que d'une essence à l'autre. D'une manière générale, les effets des carburants sur les émissions sont faibles comparés aux effets apportés par la technologie moteur. Le tableau 5 montre que pour les principaux polluants, la variabilité entre véhicules est toujours supérieure à 60 %, alors qu'elle est toujours inférieure à 40 % pour les carburants, et peut être de quelques % sur les véhicules les moins sensibles au carburant.

Sur la base de l'étude Auto - Oil, la Commission a retenu un scénario dit « EUR03 » de mesures optimales, dont les aspects spécifiquement essence sont indiqués au tableau 1. Ce

(1) European Programme on Emissions, Fuels and Engine technologies.

		HC	CO	NO _x	PM	CO ₂	Benzène
Soufre, 382 __, 18 ppm		--	--	----	=	=	--
Aromatiques E100 =35%		-----	---	+++	=	-	-----
51.1 __, 19,5%	E100>35%	--	--	++	=	-	-----
E100 Aro>35%		-----	--	+++	=	=	-----
36,3 __, 64,5 %	Aro = 20%	--	--	++	=	=	--

				Croissance	Delta,%	Décrois.
				=	0-2	=
				+	2-5	-
				++	5-10	--
				+++	10-20	---
				++++	20-30	----
				+++++	>30	-----

Tableau 4.
Résultats synthétiques d'EPEFE

Tableau 5.
Sensibilités des émissions aux essences et aux véhicules

	Variations des polluants sur l'ensemble des essences, en %		Variations des polluants sur l'ensemble des véhicules, en %	
	Véhicule le plus sensible au carburant	Véhicule le moins sensible au carburant	Carburant le plus sensible au véhicule	Carburant le moins sensible au véhicule
HC	2,9	25,6	63,0	65,6
CO	3,6	30,0	64,7	74,2
NO _x	7,7	42,6	84,8	88,4
CO ₂	0,5	4,1	49,3	50,6

scénario doit permettre de satisfaire les normes de qualité de l'air indiquées au tableau 2 dans la plupart des villes européennes. Seules quelques villes du sud (Athènes, Milan...) devraient excéder ces valeurs quelques jours par an.

Le coût de ces mesures a été évalué, comme indiqué au tableau 6. On peut constater:

- C'est l'industrie qui portera le poids des efforts nécessaires, avec 90 % des investissements.
- Dans l'industrie, c'est la construction automobile qui porte le plus, avec au total 66 % des dépenses.
- A la suite des efforts déjà consentis pour l'essence sans plomb et le gazole à 0,05 % de soufre, l'industrie pétrolière devra continuer d'investir en Europe
- Le surcoût induit sur le litre de carburant est infime, le conducteur ne s'apercevra pas qu'il achète un carburant moins polluant.

L'étude Auto-Oil permet également d'évaluer les réductions d'émissions apportées par les seules mesures sur les carburants. Le tableau 7 montre que ces effets sont limités, vers 8 % pour

Tableau 6.
Les coûts d'EURO 3

Pour l'industrie, en Millions d'ECU par an, pendant 5 ans	
Constructeurs de voitures	3 094
Constructeurs de véhicules commerciaux légers	373
Constructeurs de poids-lourds	675
Raffineurs	765
Pouvoirs publics (Contrôle technique)	555
TOTAL INDUSTRIE	5 461
Pour le consommateur, surcoût du litre	
Essence	0.002 ECU/1
Gazole	0.0018 ECU/1

les essences, sauf sur les émissions de benzène. Les mesures sur les carburants sont 5/6 contributives, le plus gros des réductions viendra des nouvelles technologies moteur et du contrôle technique.

Tableau 7.
Contribution des mesures carburant à la réduction des émissions

	Essence	Gazole	
		Tourisme	Poids lourds
NO _x	7,1%	0,5%	2,1%
HC	8,4%	10,7%	2,2%
CO	8,9%	10,6%	0,4%
Particules	—	10,0%	3,2%
Benzène	20,7%		

L'étude Auto-Oil montre aussi que les mesures actuellement en vigueur sur les normes d'émissions conduisent à l'amélioration de la qualité de l'air, au fur et à mesure que le parc de véhicules se renouvelle; elles permettront d'atteindre les critères de qualité de l'air spécifiés plus haut pour tous les polluants, sauf l'oxyde d'azote, qui apparaît donc comme le polluant critique, qui justifie les mesures EURO 3.

Par contre, la Commission a également annoncé son intention de proposer de nouvelles mesures EURO 4 encore plus contraignantes pour 2005. L'efficacité réelle sur la teneur moyenne en oxyde d'azote dans deux villes européennes est indiquée au tableau 8. On voit que EURO 3 suffira pour satisfaire 66 g/m³ (en moyenne annuelle) requis par les experts de la qualité de l'air à Londres mais pas à Athènes, et que EURO 4 n'amènera que des changements infimes à cette situation.

La Commission n'a pas encore confirmé sa position vis à vis d'EURO 4, dans l'attente d'études complémentaires. Mais il serait difficile de comprendre qu'après la démarche rationnelle

d'Auto-Oil, l'Union Européenne en vienne à décider des mesures inutiles et coûteuses.

Il est donc souhaité que la préparation des réglementations reste dans une démarche rationnelle, selon une approche coût - efficacité. Toutefois, il convient d'être conscient des limites de cette démarche.

1. L'évaluation de l'efficacité des mesures repose sur l'utilisation de modèles de qualité de l'air, en y injectant des données (Météorologies locales, part des polluants apportée par la nature, constantes des schémas...) qui ne sont que partiellement validées. Cette situation devrait s'améliorer avec les progrès dans la connaissance des mécanismes fondamentaux de la physico-chimie atmosphérique.

2. L'étude Auto-Oil repose sur des relations établies dans le cadre d'EPEFE c'est à dire sur des technologies moteur disponibles aujourd'hui et amenées à être largement diffusées en 2000. Par contre, de nouvelles technologies en émergences peuvent changer la donne. A titre d'exemple, on peut citer :

- Les nouvelles technologies de combustion, comme l'injection directe essence en charge stratifiée, qui devrait être diffusée en Europe avant l'an 2000, et qui apporte des avantages conséquents en terme de consommation.
- L'introduction de catalyseurs « De-NO_x » tant en essence qu'en diesel, dont la sensibilité au soufre présent dans le carburant peut-être très variable selon la formulation du catalyseur, mais actuellement mal connue.

Pour rester dans une démarche rationnelle, un travail complémentaire sur les technologies de combustion et de post-traitement, et sur la modélisation de la qualité de l'air serait le préalable à de nouvelles réglementations.

Tableau 8.
Teneurs moyennes annuelles en NO_x en J.l.g/m³, dans deux villes européennes et dans différents scénarios de mesures

	Base 90	Sans nouvelles mesures	EUR03	EUR04, carburants seuls	EUR04, Total
Londres	185	105	55	53	59
Athènes	145	135	115	111	110

Le véhicule à propulsion électrique

« Un acteur essentiel de la qualité de vie de nos mégapoles au 3^e millénaire »

J. BERETTA (*)

1. Introduction : comment le moteur électrique a propulsé l'automobile à pétrole à la conquête du monde

Pour faire de la projection socio-technologique, il est souvent intéressant de faire un retour en arrière car le progrès et l'innovation suivent une spirale qui passe à proximité du même point.

Au début de l'automobile vers 1880, les différents modes de propulsion en sont à leur balbutiement, les tricycles à vapeur, les voitures à essence et les voitures électriques se traînent derrière les fiacres à deux chevaux, à des vitesses moyennes de 18 km/h.

En 1890, les batteries font d'énormes progrès et la voiture électrique cumule tous les avantages : vitesse, autonomie suffisante, agrément d'utilisation.

La fabrication se développe et de nombreux constructeurs se lancent dans ce créneau, et les performances s'améliorent. L'année 1899 voit le record de Camille JENATZY avec la « jamais contente » qui dépasse les 100 km/h.

Entre 1900 et 1920, la voiture électrique était florissante et même plus diffusée que la voiture à pétrole. Il est vrai qu'à cette époque, la voiture thermique était contraignante, sale et peu fiable.

Aux Etats-Unis, le véhicule électrique avait l'image d'une voiture qui pouvait être conduite par des femmes. Agréable et silencieuse, voilà les atouts de la voiture électrique dont l'autonomie était suffisante pour faire les courses en ville.

Des flottes de taxis et d'autobus circulent dans les grandes villes européennes. Le mode de vie de l'époque était bien adapté au véhicule électrique, l'infrastructure n'était développée qu'autour des villes limitant le trafic aux zones urbaines, les grandes distances étant assurées par le chemin de fer et les voies maritimes.

Mais les progrès des voitures thermiques : autonomie supérieure, remplissage rapide ainsi que l'amélioration des routes, ont favorisé les randonnées hors des villes. Le coup de grâce a

été donné par l'apparition du démarreur électrique et de l'allumage par batterie.

Grâce au démarreur électrique et à la batterie, la voiture thermique a conquis le monde. Ses principaux défauts ont été gommés. Parallèlement, la société a évolué et la demande de mobilité individuelle n'a fait qu'amplifier le phénomène. En 10 ans, la voiture électrique ne figurait plus dans les statistiques automobiles, malgré un sursaut à chaque crise pétrolière, les recherches sont restées faibles. En performance, les générateurs n'ont que peu évolué.

Aujourd'hui, l'automobile thermique a profité d'un contexte porteur. Mais les attentes de notre société en terme de mobilité ont évolué, les valeurs changent ainsi la qualité de vie, la préservation de l'environnement et des ressources énergétiques deviennent des thèmes prioritaires. La voiture à propulsion électrique revient sur le devant de la scène. Mais en 90 ans, les choses ont peu changé du côté des batteries tandis que du côté sociétal, des modifications profondes ont eu lieu.

Notre société s'est complexifiée et par là même, devient résistante aux changements. L'introduction de nouveaux systèmes de propulsion ne peut se faire que par des évolutions de ce système complexe mais surtout pas par une révolution. La voiture électrique est un des maillons de cette évolution. Réactivée par des poussées écologiques contre l'invasion de la voiture thermique, nous assistons aujourd'hui à la 2^e chance de la propulsion électrique. La spirale de l'évolution achève son tour.

2. La voiture électrique et la ville ou la problématique voiture-ville

La voiture doit s'adapter aux évolutions de la mobilité urbaine, les travaux de l'INRETS et de l'université Paris VIII ont montré que l'automobile ne tuait pas la ville mais au contraire lui apportait la vie. Par contre, il devient nécessaire de rationaliser chaque mode de transport ce qui permet des gains plus rapides que l'approche multimodale.

(*) PSA Peugeot-Citroën.

Il faut dédier les véhicules à l'usage et la voiture électrique urbaine doit répondre à ces enjeux:

- respect de l'environnement ;
- respect du cadre de vie (absence de bruit et de pollution) ;
- respect des ressources énergétiques ;
- respect des lois du marché.

La voiture électrique remplit les trois premières de ces conditions et bénéficie d'aides pour remplir la dernière. Elle espère, grâce aux travaux de recherche et développement, remplir toutes ces conditions après l'an 2000.

Le respect de l'environnement est une de nos préoccupations majeures du moment. Mais, quand est-il de la qualité de l'air, les émissions du trafic qui participent sans aucun doute pour une bonne part à la pollution urbaine sont en décroissance sur la période 1990-2010 ?

Moins 80 %, 77 %, 44 % et 23 % respectivement pour CO, COV, NOx et les poussières (document CITERA NA/280 décembre 1994 - pour Ministère de l'Environnement).

Ces diminutions ne sont pas aussi spectaculaires que celles des émissions industrielles (activité décroissante voire exclue des villes) ce qui alourdit en pourcentage la responsabilité de l'automobile, même en l'absence de l'inventaire des sources domestiques.

Il faut souligner que ces émissions se font sur une surface croissante (le développement du trafic se fait dans des zones d'accroissement de l'urbanisation). Ainsi les chimistes, qui disposent du concert de concentration (rapport d'une quantité à un volume, et par extension à une surface) peuvent-ils facilement expliquer pourquoi la qualité de l'air (concentration de substances dans l'air) s'est améliorée très sensiblement en région parisienne de 1970 à 1993.

Le Co, le Pb, le SO_2 et les PM ont été divisés respectivement par 7, 12, 10 et 5. Les NOx n'auraient diminué que de 10 % (faible historique de la mesure des NOx, réglementation sur les émissions récentes).

Cependant, la moins bonne situation concernera toujours les centres villes dans lesquels, pour des raisons locales voire microlocales, il peut-être souhaitable d'utiliser des véhicules électriques qui sont localement des véhicules zéro émissions (ZEV)

Le respect du cadre de vie dans nos villes ne peut pas aujourd'hui être traité de manière unique. La voiture électrique est un des acteurs de ces nouveaux défis car elle ne génère ni bruit ni pollution gazeuse. Mais, c'est globalement qu'il faut traiter les problèmes en imaginant la ville pour taire coexister en harmonie voitures, transports publics et piétons.

La qualité de vie dans nos villes peut se caractériser vis-à-vis de l'automobile par, son niveau de bruit, son taux de consommation d'espace, sa surface d'intrusion visuelle et sa quantité de pollution. Il faut sortir des idéologies préconçues du « tout transport public » du « tout automobile individuel » du « tout véhicule électrique » et aménager la ville en stimulant le développement d'une urbanisation globale intégrant transport et gestion de l'espace.

Alors seulement nous pourrons vivre en harmonie avec la ville.

Le respect des ressources énergétiques prend en considération à la fois la consommation et les risques d'approvisionnement. Le secteur des transports a un taux de croissance des plus importants, il est responsable de 60 % de nos importations pétrolières ce qui constitue un facteur de vulnérabilité de notre économie. L'enjeu est donc de réduire cette dépendance.

Une des voies est l'amélioration des performances des moteurs thermiques, mais les gains potentiels sont de plus en plus faibles.

Le meilleur des moteurs diesel à injection directe ne pourra dépasser 40 % de rendement et la dépollution risque de diminuer cette performance. Le véhicule électrique apparaît comme la solution idéale par son rendement de 60 % et l'utilisation d'une énergie non importée.

Le respect des lois du marché : nous ne sommes qu'au balbutiement de ces nouvelles technologies. La voiture électrique souffre du syndrome de la poule et de l'œuf. Comment vendre des voitures électriques qui sont plus chères pour des prestations différentes ? La seule solution est de soutenir ce marché naissant pour qu'il arrive à maturité. Il est nécessaire de mettre en place des aides, des privilèges, de faire la promotion des voitures électriques actuelles. A terme, lorsque les quantités auront dépassé le seuil de rentabilité, nul ne peut douter, au vu de la simplicité des ensembles moto-propulseur électrique, qu'ils seront bien moins coûteux qu'un moteur thermique de puissance équivalente.

Mais l'avenir de la propulsion électrique ne dépend pas seulement de son coût, le vrai défi est d'ordre technologique. La recherche et le développement dans les domaines considérés ont été dopés durant les trois dernières années par de nombreux programmes financés par des nations du monde industriel : Programme PRE-DIT pour la France, 4^e PCRD pour l'EUROPE, PNGV pour les Etats Unis, New SUNSHINE pour le Japon... la liste est longue.

Tous les constructeurs se montrent optimistes car de nombreuses solutions se préparent, cela démontre l'engagement sur ce mode de propulsion. Nous sommes conscients des problèmes d'environnement engendrés par les transports

dans les villes, mais nous voulons qu'il soit possible de maintenir dans ces villes une capacité de liberté et de mobilité que seule la voiture individuelle peut assurer en complémentarité avec les transports collectifs.

3. La voiture électrique et la route ou comment réaliser une mutation génétique de l'automobile

La voiture a su pendant ces 10 dernières années être plus fiable, plus confortable, plus rapide, plus pratique et plus autonome, ce qui lui a permis de s'imposer comme premier mode de transport de notre société. Mais son succès l'amène aujourd'hui dans le box des accusés comme pollueur, comme source de nuisance sonore et comme consommatrice d'énergie.

Tout ceci entraîne l'automobile vers une mutation génétique qui doit lui permettre de potuer moins, de consommer moins tout en fournissant les mêmes prestations. Cette mutation peut prendre la forme d'une nouvelle voiture appelé hybride électrique.

Qu'est ce qu'un hybride électrique ?

Au sens large, c'est une voiture qui utilise au moins deux sources d'énergie pour assurer sa propulsion. L'idée maîtresse est de marier des motorisations, une électrique et une thermique, pour assurer la propulsion du véhicule et combiner bien évidemment les avantages du véhicule électrique en ville et la polyvalence du véhicule thermique sur route.

Dans cette union, les possibilités ne manquent pas et chaque couple peut se différencier selon sa vocation et sa mission. Nous pouvons classer les hybrides électriques en deux grandes familles : les hybrides séries et les hybrides parallèles.

– Les hybrides parallèles : sont équipés de deux systèmes de propulsion, l'un électrique et l'autre thermique. Ce type de véhicule recourt à des technologies existantes et ne modifie pas

fondamentalement l'architecture puisqu'on introduit un moteur électrique sur la chaîne cinématique.

Un jeu d'embrayages amont et aval permet de sélectionner différents modes de fonctionnement:

- électrique seul pour les zones « zéro émission »
- thermique seul pour l'autonomie routière,
- thermique + électrique pour les accélérations et les ralentissements.

– Les hybrides séries sont équipés d'un seul système de propulsion qui est électrique et disposent de deux sources d'énergies électriques, l'une constituée de batteries et l'autre d'un générateur électrique. En ville, la batterie permet de rouler sur des trajets courts en tout électrique, sur route le générateur assure la recharge des batteries et l'alimentation de la motorisation électrique.

Si les systèmes hybrides permettent d'apporter une solution à l'autonomie du véhicule électrique, il reste le handicap du surcoût. Surcoût dû en majeure partie à la présence des batteries. Il apparaît évident que l'introduction de ces véhicules dépend essentiellement des évolutions à la fois réglementaires et technologiques.

4. Les organes électriques ou les grands défis technologiques du 21^e siècle

Ils sont au nombre de trois :

- l'électronique de contrôle et de gestion,
- le groupe moto-propulseur électrique,
- la source d'énergie électrique.

La source d'énergie électrique

C'est le réservoir de combustible de la propulsion électrique. Elle est pour le véhicule électrique urbain constituée de batteries qui restent le talon d'Achille de ces systèmes de propulsion.

Le tableau 1 synthétise les performances attendues ou existantes de ces différents couples.

Tableau 1.

	Pb	Ni-cad	Ni-Mh	Li-Ion
Energie massique Wh/kg	30	50	70	120
Puissance massique W/kg	150	200	200	300
Energie volumique Wh/cm ³	70	90	160	250
Durée vie en cycle	500	2 000	1 500	1 000

Les caractéristiques sont données pour des systèmes batteries.

Les batteries plomb, longtemps seules possibilités pour les véhicules électriques, sont maintenant remplacées par des couples plus performants notamment le Ni-Cad.

Les seules batteries réellement industrialisées pour ces applications sont les Ni-Cad de SAFT. Ces batteries présentent un compromis juste acceptable en performance pour un coût qui est loin d'être compétitif.

Nous attendons beaucoup des nouveaux couples qui verront leur aboutissement vers l'an 2000. La filière Li-Ion permettra de conférer aux véhicules des autonomies de l'ordre 250 km pour des coûts acceptables. Le Ni-Mh très proche du Ni-Cad offre une garantie de succès mais présentent des performances moins attrayantes.

Le groupe moto-propulseur électrique

C'est le point fort du véhicule électrique, les systèmes à courant continu (CC) industrialisés sur les véhicules de série présentant des rendements de l'ordre de 85 %.

Des moteurs à courant alternatif (AC) permettront d'atteindre 95 % de rendement et ceci à coût identique malgré la complexité accrue du contrôle électronique. Dans ce type de moteur, deux technologies sont en compétition : le moteur synchrone bobiné et le moteur synchrone à aimant défluxable. Le premier prend la forme du moteur à griffe de GEC ALSTHOM, le deuxième du moteur à aimant de LEROY SOMER développé dans le projet régional VEDELIC (Véhicule DEMonstrateur Lithium Carbone).

Dans cette démarche, il ne faut pas négliger les moteurs à reluctances variables qui par leur spécificité doivent permettre de réduire les coûts aussi bien du moteur que de l'électronique. Les solutions asynchrones semblent aujourd'hui dépassées (tableau II).

L'électronique de contrôle et de gestion

L'énergie, voilà le vecteur qui doit guider les ingénieurs du 21^e siècle. Comment gérer aux mieux l'énergie à bord d'un véhicule à propulsion

électrique ? Nous assistons à une complexification des systèmes de propulsions (hybride, batterie, piles à combustible...). Le conducteur ne sera plus en mesure de contrôler au mieux les différents organes et sources d'énergies qui prendront place dans nos véhicules de demain.

Dans le cerveau de cette électronique de gestion, il sera nécessaire d'implanter les modèles et les lois de commande de ces systèmes qui deviennent complexes. Les principales contraintes risquent d'être orientées vers des critères de consommation d'énergie et de sécurité sans oublier la pollution.

Le superviseur devra se charger de choisir comment répartir aux mieux la puissance aux roues à partir des différents systèmes de propulsion et sources d'énergie installées.

5. Le parcours déjà réalisé

La France est le premier pays à proposer une gamme complète de véhicule électrique réalisée en série. PSA depuis septembre 1995 avec ses 106 et AX électriques en versions VP et W, Peugeot Moteur Cycle avec le scooter électrique commercialisé depuis octobre 1996, Renault avec ses gammes utilitaires : Master, Express ainsi que la Clio en version VP.

La commercialisation n'a en rien ralenti l'effort de recherche et de développement. Le système TULIP (Transport Urbain Libre Individuel et Public), présenté par PSA en 1995, est une proposition innovante pour une nouvelle forme de mobilité urbaine utilisant des voitures électriques biplaces, associées à une infrastructure de gestion et de stationnement, mettant en œuvre un système de recharge automate par induction.

Renault et PSA dans les projets PRAXITELE et LISELEC vont expérimenter en 1997 sur la base de Clio et 106, les systèmes de libre service de voitures électriques en utilisant une clé électronique similaire à celle élaboré par la RATP ou la SNCF.

Renault et PSA se sont lancés il y a plus de cinq ans dans un programme commun de véhi-

Tableau II.

GMP	Pb	Ni-cad	Ni-Mh	Li-Ion	Li-Ion
Puissance massique moteur Kw/kg	0,3	0,75	0,75	1,20	1,40
Puissance massique de l'électronique Kw/kg	4	1,30	1,60	1,80	2
Rendement moteur + électronique	0,80	0,80	0,83	0,87	0,86
Coût en%	100	130	120	115	110

Base GMP, 30 Kw, 200 V.

cule hybride série à turbine (VERT) qui doit permettre de concilier les exigences environnementales de la circulation urbaine et celle de l'autonomie routière.

Ces véhicules ont été présentés en octobre 1995 pour la 406 VERT et en octobre 1996 pour l'ESPACE VERT.

Des organes spécifiques tels que la batterie de puissance ou la turbine à gaz sont développés en tenant compte des contraintes automobiles.

L'année 1997 verra apparaître les premiers prototypes de voiture électriques équipées d'organes de 2^e génération (chaîne de traction composée de batteries Lithium-ion et de groupe moto-propulseur électrique synchrone). Elle verra ainsi l'introduction par PSA d'une fourgonnette électrique.

L'enjeu socio-économique

Le manque de visibilité de ces marchés futurs ne doit pas nous écarter des vrais enjeux économiques car notre civilisation n'attendra pas pour bénéficier de ces modes de transport qui concilient consommation, écologie et liberté.

Tout d'abord pour les constructeurs automobiles qui ont jusqu'à présent entièrement une formation de mécanicien, la modification culturelle est de taille mais déjà amorcée par l'innovation de l'électronique. Electronique plus électrotechnique donne naissance aux systèmes de propulsion électrique.

Ensuite, les fournisseurs et équipementiers, principalement les industriels de l'électrotechnique car les marchés potentiels de la propulsion électrique représentent l'équivalent du marché actuel de l'électronique de puissance industrielle.

Pour terminer, tous ceux qui vivent autour de l'automobile devront s'adapter à ces nouveaux défis technologiques.

6. Conclusion ou comment la propulsion électrique va permettre la mutation de l'automobile de demain

La clé du succès de la propulsion électrique passe par une période d'amorçage du marché.

La potentialité de ces nouveaux systèmes de propulsion en terme de consommation, de pollution va permettre à l'automobile de s'adapter aux défis du 21^e siècle.

La technologie de la mobilité doit évoluer en phase avec les attentes de la société qui maintenant sont centrées autour de la qualité de vie et du service.

Nous nous devons d'envisager dans un futur proche l'apparition de la propulsion électrique qui nous permettra de relever les défis de la voiture de demain.

Bibliographie

MM. BUREAU- PSA/DRAS/DIR. Conférence, 6-12 décembre 1996, Beijing (Chine). Conférence " Les échecs .., 27 juin 96.

HENRIET. PSA/DRAS/DIR. Document interne. LA

MURE - INRETS. Le futur de l'automobile.

ASCHER. Université de Paris VIII, article Rebonds " La faute de la bagnole, vraiment ? " • 13/09/96. " Le futur de la mobilité urbaine ".

Les gazoles : perspectives d'avenir

E. ROSEMBERG (*)

Introduction

Examiner les perspectives d'avenir du Gazole, c'est se poser des questions de quantité et de qualité.

Aurons-nous demain une ressource en gazole suffisante pour répondre à la demande ?

A quelles spécifications devra-t-il satisfaire pour répondre aux exigences des moteurs en matière d'émissions, de performances, de consommation, ou à celles de la réglementation ?

Ces deux questions ne sont pas indépendantes, la ressource est bien entendu fonction de la qualité recherchée pour le produit.

Evolution de la demande en carburant en France (figure 1)

On assiste à une croissance de la demande de carburant en France. Cette croissance est due principalement au développement du transport routier.

Le camion tend à remplacer le rail et la voie d'eau car il est mieux adapté à l'activité écono-

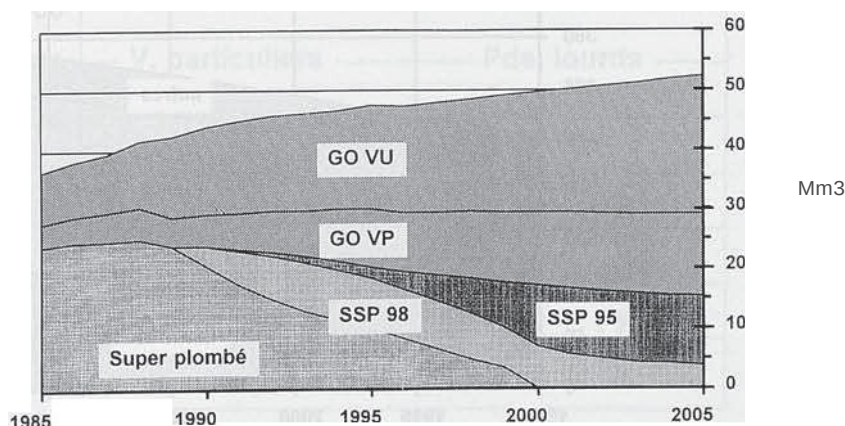
mique moderne : déclin de l'industrie lourde au profit de l'industrie légère et des activités tertiaires, aménagement du territoire avec éparpillement des zones de production, développement du juste à temps et des flux tendus.

La consommation globale (essence + gazole) des véhicules particuliers est, elle, pratiquement constante, les "accidents" des courbes sont dus à des ajustements statistiques. L'augmentation du parc est compensée par les progrès en matière de consommation et une légère baisse du kilométrage moyen par véhicule (effet de la deuxième voiture).

Depuis 1989, la consommation d'essence décroît à cause de la diésélisation croissante des petits utilitaires et des véhicules particuliers. Pour ces derniers, la diésélisation n'entraîne pas une diminution de la consommation d'énergie malgré la plus faible consommation nominale des véhicules diesel exprimée en l/100 km. Quand un automobiliste se convertit au diesel, il augmente son kilométrage annuel en raison du coût plus faible du carburant, globalement sa consommation annuelle reste constante.

Au sein des essences on assiste au développement des sans plomb qui remplacent le super plombé. Celui-ci devrait disparaître naturellement vers 2002/2003 mais la Commission Européenne prévoit son interdiction dès 2000.

(*) TOTAL Raffinage Distribution.



Journée scientifique APPA
24 OCTOBRE 96

TOTAL

Figure 1.
Consommation de carburants en France.

En conclusion, la consommation de gazole va continuer à se développer en France, pour les raisons suivantes :

- croissance du transport routier en liaison avec l'augmentation de l'activité économique,
- diésélisation des véhicules particuliers et des petits utilitaires.

Le ratio gazole/essence qui était de 1,3 en 1995 devrait être de 2,4 en 2005.

Evolution de la demande en carburant dans l'Union Européenne (figure 2)

La Commission a publié en 1995 des prévisions de consommation énergétique jusqu'à l'an 2020. Dans le scénario de base, appelé "Common Wisdom", la consommation de pétrole des 15 dans les transports passerait de 254 Mt en 1990 à 365 Mt en 2020.

Si l'on extrapole les tendances, cette croissance globale sera associée à une décroissance de la consommation d'essence et à un maintien des autres carburants, principalement du carburéacteur.

Si au contraire, la diésélisation se ralentissait en Europe, on pourrait espérer un maintien de la consommation d'essence.

Ces prévisions conduisent à un doublement de la consommation européenne de gazole qui passerait de 110 Mt en 1995 à 200-230 Mt en 2020. Les ratios essence/gazole reproduiraient la situation française avec quelques années de retard.

Equilibre ressources débouchés

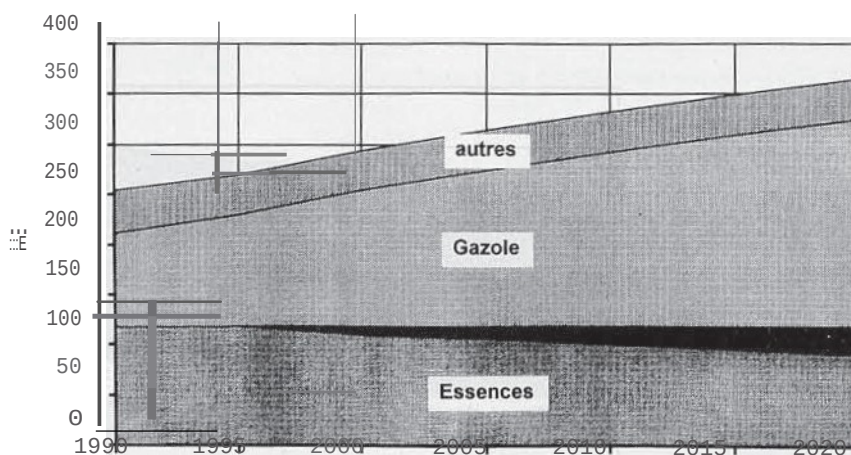
En 1995, la France a produit 17 Mt d'essence et en a consommé 15,6 Mt, alors qu'elle produisait 30,5 Mt de gazole et fioul domestique et en consommait 39,5 Mt. Il n'est pas possible de distinguer statistiquement Gazole et FOD qui jusqu'à maintenant ont été des produits quasi interchangeables aux niveaux raffinage et logistique.

La même année, l'Europe occidentale a produit 136 Mt d'essence et en a consommé 123 Mt. Les chiffres correspondant pour l'ensemble gazole fioul domestique sont de 217 et 215 Mt.

Aujourd'hui, l'Europe est équilibrée pour le gazole-FOD et excédentaire pour l'essence. L'évolution de la demande en Europe, qui aura avec quelques années de retard une structure analogue à celle de la France, va entraîner un lourd déficit européen de coupe moyenne et aggraver les excédents massifs d'essence.

L'excédent d'essence obère la rentabilité de l'outil de raffinage européen. L'industrie prévoit de fermer des raffineries pour retrouver une rentabilité correcte. Ces fermetures réduiront de manière mécanique la production de gazole.

La croissance de la demande de gazole est un phénomène mondial. Elle est due à l'augmentation du besoin de transport qui résulte du développement économique. Elle est particulièrement élevée en Asie du Sud-Est. Il n'y a donc pas d'espoir raisonnable de trouver dans d'autres parties du Monde des disponibilités de gazole qui nous manquent.



d'après le scénario "common wisdom" de la Commission Européenne

JournMscientifique APPA
24 OCTOBRE 96

TD TAIL

Figure 2.
Consommation d'énergie par les transports dans l'Union Européenne.

L'industrie du raffinage a pu répondre jusqu'à présent à la demande de gazole en Europe grâce à une certaine souplesse de l'outil de raffinage et à l'évolution de l'approvisionnement en brut. L'exemple de la France montre que ce ne sera plus le cas dans un futur proche si les prévisions se confirment.

Evolutions de qualité et conséquences

La Commission européenne a publié son projet de directive carburants en juillet 1996. Les principales caractéristiques du gazole de l'an 2000 sont rappelées dans le tableau de la figure 3 en comparaison avec les limites actuelles et celles du gazole suédois classe 1 souvent pris comme référence d'une sévèrification drastique.

Caractéristique	Unité	Valeur 1996	Limite 2000	Suède classe 1
• Nombre de cétane		>49	> 51,0	>50
• Densité à 15 °C	kg/m3	<860	<845	<820
• Température 95%	°C	<370	< 360	<285
• Aromatiques	%v	n.s.	n.s.	<5
• Polyaromatiques	%m	n.s.	< 11	<0,017
• Soufre	ppm	<500	<350	<10

Figure 3. Projets de spécification gazole.

La figure 4 rappelle les résultats de l'étude Auto-Oil sur l'effet des caractéristiques des gazoles. Pour les poids lourds, les réductions de NOx et de particules sont faibles, au maximum

de l'ordre de 7 à 8 %. Pour les véhicules particuliers, les émissions de NOx sont indépendantes de la qualité du gazole, celles de particules diminuent de 10 à 30 %. Les évolutions de qualité des gazoles les plus sévères laissent les rejets des véhicules diesel encore très au-dessus de ceux des véhicules à essence pour les polluants critiques.

Il faut noter que ces évolutions correspondent à des matériels qui n'ont pas été optimisés en fonction des nouvelles caractéristiques du gazole et donc à des performances (puissance) dégradées. Quelques essais d'optimisation des moteurs faits pendant les essais Auto-Oil ont montré que celle-ci se faisait au détriment des émissions lorsqu'on retrouve la puissance initiale.

Si ces nouvelles caractéristiques ont un impact souvent très limité sur les émissions, elles ont un impact significatif sur les performances :

- l'abaissement de la densité entraîne une augmentation de la consommation volumique ;
- l'abaissement du point 95 °C diminue la viscosité avec apparition de problème de redémarrage à chaud sur certains véhicules. L'augmentation des pressions d'injections risque de rendre les véhicules plus sensibles à ce phénomène.

Ces évolutions ont également des conséquences sur la disponibilité de gazole :

- diminuer le point 95 °C et abaisser la densité, c'est empêcher l'utilisation de certaines coupes pétrolières pour la production de gazole. La spécification suédoise entraîne une perte d'au moins 30 % de la ressource sauf refonte complète de l'outil de raffinage ;
- le coût de cette refonte a été évalué dans le cadre du programme Auto-Oil à 15 milliards d'ECU soit 100 milliards de francs pour l'Europe.

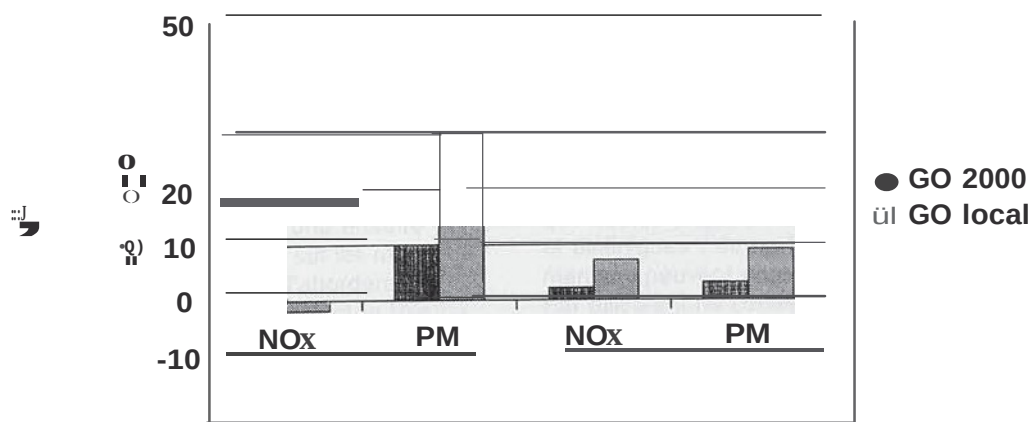


Figure 4. Effet de la qualité du gazole sur les émissions.

En supposant que l'investissement est proportionnel à la capacité de raffinage, le coût serait de 15 milliards de francs pour la France, équivalent à celui de 3 raffineries neuves ;

- la rentabilité du raffinage est trop faible en Europe pour justifier un tel investissement. Un durcissement trop sévère des spécifications du gazole accélérerait les fermetures de raffineries et réduirait encore la production de gazole ;

- par ailleurs, cette refonte entraînerait une forte augmentation, pouvant aller jusqu'au doublement, des consommations d'énergie et rejets de SO₂ du raffinage, ce qui compromet les efforts d'économie d'énergie et de limitation de rejets CO₂ en cours de mise en œuvre.

Conclusion

La demande européenne de carburant va continuer à croître en raison du développement du transport routier. Cette croissance sera satisfaite par un seul carburant: le gazole. Si la diésélisation des véhicules particuliers et des utilitaires légers se poursuit, elle générera une demande supplémentaire de gazole. Une pénurie de gazole apparaît comme inéluctable pour le moyen terme. La mise en place de spécifications trop sévères aggraverait cette pénurie. On serait alors très loin des conditions qui ont fait le succès du gazole : abondance et absence de sophistication donc prix attractant.

Le GPL : offre - émissions et perspectives

G. ANICET (*)

Il aura donc fallu plus de 80 ans pour que le GPL carburant soit reconnu en France comme un carburant alternatif à part entière, puisque c'est en 1912, aux Etats-Unis que le premier véhicule GPLc a pris la route. Utilisé depuis le début des années 70 pour les chariots élévateurs et les moteurs fixes, le GPLc avait fait l'objet d'un premier lancement en 1979. Toutefois l'obligation de la monocarburation d'abord et une fiscalité dissuasive ensuite ont découragés progressivement les premiers utilisateurs.

La volonté des pouvoirs publics de lutter efficacement contre la pollution urbaine s'est traduite une première fois dans la loi de finances de 1996 qui a accordé au GPLc des avantages proches de ceux jusqu'ici réservés à l'électricité, aux biocarburants ou au gaz naturel véhicule. La loi sur l'air devrait prochainement compléter ce dispositif par de nouvelles incitations positives. Le GPL carburant peut donc enfin prétendre à connaître un développement en rapport avec les enjeux de la lutte contre la pollution urbaine par les transports.

Grâce à toutes ces mesures, le GPLc, qui était déjà réputé pour ses qualités de carburant respectueux de l'environnement et sa disponibilité, est devenu un carburant économique.

Il faut dire qu'à l'étranger de nombreux pays l'avait déjà adopté. Le Japon, la Corée, l'Australie les Etats-unis, les Pays-Bas et l'Italie en sont des grands utilisateurs. Avec près de 4 millions de véhicules équipés, le GPLc est de loin le premier carburant alternatif au monde. La France entre donc de plein-pied dans le club des pays proactifs en matière de soutien à l'ensemble des carburants alternatifs, pour l'amélioration de la qualité de l'air.

Je vous propose donc aujourd'hui de taire un tour d'horizon sur la question du GPLc. Je commencerai par vous décrire les caractéristiques et les avantages du GPLc sur le plan du respect de l'environnement. Nous aborderons ensuite les conséquences de son utilisation, sur les moteurs, et les conditions de conduite. J'aborderai enfin les perspectives de développement et le rôle du CFBP dans la filière GPLc.

Tout d'abord voyons ce qu'est le GPLc.

Composition et propriétés

Dans la communauté européenne la composition du mélange carburation est régie par une

norme (EN 589), qui spécifie notamment un indice d'octane minimum (MON) fixé à 89. Cela a pour conséquence qu'au sein de l'Europe la composition des mélanges est variable, plus propané au nord et plus butané au sud. Toutefois cette variation est sans importance sur les moteurs puisque les équipements GPL des dernières générations gèrent ce paramètre.

Les constituants des mélanges européens sont différents uniquement par les proportions variables des composants qui eux sont toujours les mêmes. Ces constituants principaux sont parmi les hydrocarbures paraffiniques : le butane (C4 H10), le propane (C3 H8) et l'isobutane (C4 H10), mais selon leur origine, le mélange peut contenir aussi des hydrocarbures oléfiniques : les butènes (C4 H8), ou le propène (C3 H6). Toutefois les variations de composition sont en fait très limitées par l'obligation de présenter en toute circonstances un indice MON minimum de 89. Pour la France le GPL carburant (GPLc) se présente sous la forme d'un mélange de propane et de butane dans la proportion de 50/50 environ.

Cette composition tait que :

Le GPLc est un carburant respectueux de l'environnement

Incontestablement, c'est sur ses qualités environnementales que repose la sélection du GPLc en qualité de carburant alternatif. L'avantage de son emploi réside principalement dans sa formule chimique, il est plus riche en hydrogène que les carburants liquides traditionnels ; cette particularité est favorable à la diminution des émissions de monoxyde de carbone. Par ailleurs cette formule chimique est simple, puisqu'il ne contient que quelques types d'hydrocarbures paraffiniques et oléfiniques ; de ce fait les rejets à l'échappement ne peuvent contenir de produits toxiques. Par ailleurs il ne contient pratiquement pas d'impuretés, ce qui permet d'obtenir du catalyseur : une mise en action très rapide et un coefficient maximum de conversion. Enfin, le fait que le GPLc soit introduit en phase gazeuse dans les cylindres des moteurs permet d'obtenir une grande homogénéité de combustion et par conséquent une combustion propre.

Les meilleurs résultats sont évidemment obtenus dans les moteurs optimisés pour fonctionner au GPLc.

(*) Comité français du butane et du propane.

Le tableau qui vous est présenté montre précisément le résultat des émissions enregistrées sur un véhicule équipé au GPLc et optimisé pour son usage.

On observe des pollutions très basses pour chacun des 3 polluants réglementés : CO, HC (hydrocarbures) et NOx.

La réglementation européenne EURO 96 est atteinte avec des marges supérieures à 90 % ; les performances demeurent excellentes avec la norme EURO 2000 (prélèvement des émissions immédiatement après le démarrage). Testé selon la procédure ULEV, le véhicule GPLc atteint très aisément les normes californiennes ULEV (ultra low emission vehicle), pourtant réputées extrêmement sévères.

Il importe de souligner que ces résultats sont obtenus avec des technologies sophistiquées. Cependant les caractéristiques du GPLc se singularisent par rapport à l'essence par un spectre beaucoup moins étendu des émissions. On ne détecte que des hydrocarbures simples et légers (de C1 à C4) ; les aromatiques sont totalement absents.

Parmi les produits toxiques non réglementés, les émissions n'atteignent que 0,1 mg/mile contre 8 mg. pour les carburants traditionnels. Le taux de 1-3 butadiène est divisé par 10 par rapport à l'essence et les aldéhydes sont diminués de 50%.

En ce qui concerne la formation d'ozone troposphérique, les rejets sont 2 fois moins réactifs que ceux de l'essence.

Les émissions des moteurs de GPLc présentent encore une particularité intéressante : la détérioration des performances par temps froid est beaucoup plus faible qu'avec l'essence classique, car le carburant est délivré à l'état gazeux et qu'il n'est pas nécessaire d'enrichir le mélange au démarrage.

Ainsi le GPLc n'est il pas seulement respectueux de l'environnement mais également,

Le GPLc est un carburant respectueux du moteur

Ce comportement à froid du GPLc supprime le fameux phénomène de " lessivage » des

cylindres par excès de carburant liquide, qui se produit au moment du démarrage à froid ; de ce fait le lubrifiant moteur n'est pas dilué, il conserve ses caractéristiques optimales plus longtemps, ce qui accroît la longévité du moteur.

Par ailleurs, nous l'avons déjà vu, la combustion du GPLc est une combustion propre qui ne laisse pas de calamine ; le moteur ne s'encrasse pas. Toutefois pour les utilisations extrêmes à fortes charges (routes et autoroutes), il est impératif que le moteur soit équipé de soupapes et de sièges de soupapes compatibles avec les carburants gazeux afin de préserver sa fiabilité.

Les performances du véhicule GPLc

Nous venons d'examiner les performances en matière d'émission, il y a lieu de considérer aussi la consommation et le confort de conduite.

Du fait des différences de densité avec les carburants liquides traditionnels, la carburation au GPLc entraîne obligatoirement une surconsommation, en litres, de l'ordre de 20 à 25 %.

Toutefois il s'agit là de moyennes car, comme pour les carburants traditionnels, le style de conduite est déterminant. pour des conducteurs au pied " léger », la surconsommation peut descendre vers 15 %, si au contraire le pied est " lourd », on pourrait s'approcher de 30%!

La consommation dépend aussi du réglage du moteur. Ceci est particulièrement vrai pour les véhicules qui comportent encore des carburateurs. Pour eux les réglages doivent être envisagés systématiquement lors de chaque visite d'entretien. Pour les moteurs équipés de l'injection et de la catalyse, le problème ne se pose plus puisque les microprocesseurs prennent en compte les paramètres moteur pour régler la richesse, et sont réglés pratiquement à vie.

En ce qui concerne le confort de conduite, le fonctionnement procure la même souplesse et les mêmes avantages que le moteur à essence. On constate simplement une baisse de rendement de l'ordre de 5 % à haut régime, du fait du moindre remplissage des cylindres.

Enfin, pour l'usager, Le GPLc est un carburant confortable. En effet, le bruit est sensible-

Polluants	Réglementations		Niveaux enregistrés		
	Europe 1996 (g/km)	Californie ULEV (g/mile)	Cycle Europe Procédure 1996 (g/km)	Cycle Europe Procédure (g/km)	Cycle FTP 75 (g/miLE)
CO	2,2	1,7	0,09	0,16	0,14
Hydrocarbures (HC)	0,5	0,04	0,02	0,031	0,032
NOx	0,5	0,2	0,008	0,02	0,065

ment diminué par rapport au fonctionnement aux carburants traditionnels.

Comme vous pouvez le constater le GPLc ne manque pas d'attraits. Voyons donc à présent comment est structurée son offre.

La situation de l'offre

Nous l'envisagerons sous 3 aspects : les ressources en GPL d'abord, ensuite le réseau de distribution, et enfin l'offre en matière de véhicules.

Les ressources en GPLc

La production des GPL a deux origines : le raffinage du pétrole, et le dégasolinage du gaz et des gaz de champs pétroliers. Le dégasolinage est à l'origine de 60 % de la production mondiale du butane et du propane ; les 40 % restant sont issus du raffinage du pétrole brut dont ils constituent des composants à la hauteur de 3 à 5 %. La situation de la France est complètement différente puisque 80 % des GPL proviennent du raffinage et 20 % du gaz naturel. Ces ressources sont également caractérisées par une forte quantité de butane dont la France est excédentaire. Le mélange GPLc qui incorpore ce butane au propane permet de résorber cet excédent.

Actuellement le marché global des GPL est de l'ordre de 3 millions de tonnes en dehors de la chimie, qui les utilise pour alimenter ses installations, en concurrence avec le naphta. Cette quantité de GPL actuellement utilisée par la chimie pourrait être libérée sans grande difficulté au bénéfice des secteurs carburants et combustibles.

Par ailleurs, il existe encore une capacité de production de GPL qui pourrait être obtenue par une récupération plus poussée sur les gisements de pétrole et de gaz naturel. Jusqu'ici la production des GPL s'est ajustée sur la capacité d'absorption des canaux de distribution.

En ce qui concerne :

Le réseau de distribution

La distribution du GPLc ne demande pas d'équipements complexes. Le gaz est manipulé en phase liquide par pompe sous une pression de 12 bars facilement obtenue. La distribution s'effectue par volumètre, comme pour les carburants liquides. Pour l'instant en France, les postes de distribution sont isolés des autres distributeurs dans les stations service. Cette situation a évolué à l'étranger et désormais il n'est pas rare de trouver des îlots de distribution qui offrent à la fois : l'essence, le gazole, et le GPLc. On peut penser que cette évolution touchera bientôt la France dans le cadre du rapprochement des dispositions réglementaires européennes.

Le réseau de distribution est composé actuellement de 650 stations publiques. L'intention des distributeurs est de doubler ce chiffre à l'horizon

2000. Pour 1996 plus d'une centaine de nouvelles stations seront mises en service. Ceci illustre la réactivité des sociétés de distribution de GPL qui, alors que la défiscalisation est intervenue lorsque les budgets étaient bouclés, a réussi à dégager les ressources pour accompagner aussi vite que possible la relance du GPLc. Il nous reste maintenant à aborder :

L'offre véhicule

Jusqu'à un passé récent le développement du parc des véhicules alimentés au GPLc s'est constitué à partir de véhicules initialement prévus pour fonctionner à essence qui ont été adaptés, c'est à dire sur lesquels on a " greffé " une seconde ligne d'alimentation.

Cette opération s'inscrit dans le cadre réglementaire de l'arrêté du 15 janvier 1985, qui règle tous les aspects de la transformation, et fixe les responsabilités. C'est dans ce cadre qu'agit le CFBP, qui est chargé de délivrer les agréments autorisant les transformateurs à exercer leur activité dans ce domaine.

Pour s'acquitter de cette mission qui lui est confiée par les pouvoirs publics, et apporter aux possesseurs de véhicules transformés au GPLc le maximum de garanties, le CFBP, en liaison avec le Groupement de Formation des Professions de l'Automobile (GNFA), a été conduit à mettre en place une procédure d'agrément qui fixe les obligations minimum à remplir pour procéder aux transformations qui sont d'ordres administratif, technique et qualification professionnelle.

Qualification professionnelle

La qualification professionnelle des opérateurs est le point fondamental de la filière de transformation des véhicules. Elle intervient au niveau du diagnostic, sur la possibilité ou non de procéder à la transformation, elle intervient ensuite au niveau du choix du matériel à monter sur le véhicule, elle intervient enfin dans le suivi et l'entretien du véhicule ainsi transformés.

Les opérateurs sont donc tenus d'avoir suivi un enseignement correspondant à 2 sessions de 4 jours, et d'avoir passé avec succès l'examen de fin de stage. L'admission des candidats à ces stages est rigoureusement contrôlée : pour être admis à les suivre il faut apporter la preuve d'une qualification préalable et d'une expérience de metteur au point.

C'est aussi dans cet esprit que la future procédure prévoit que l'attribution de l'agrément n'est pas acquise à titre définitif. Les agréments pourront être retirés aux professionnels qui ont cessé de remplir les conditions d'attribution, ou à ceux qui réalisent notoirement des installations qui ne donnent pas satisfaction à leur utilisateurs.

Le réseau des transformateurs est en évolution permanente depuis le début de 1996. Il comprendra environ 300 installateurs à la fin de l'année ce qui paraît suffisant pour faire face à la demande.

Il convient de souligner que l'activité de ces transformateurs baissera dès que les constructeurs automobile mettront à la disposition de leur clientèle, des véhicules équipés d'origine. Ceci risque d'intervenir rapidement puisqu'au mondial de l'automobile, pas moins de 14 constructeurs ont exposé des modèles GPLC, avec l'avantage important du maintien de la garantie constructeur.

Voilà pour ce qui est de l'offre, voyons maintenant pour ce qui est des perspectives.

Les perspectives d'évolution de la technique

Etant donné que les moteurs utilisant le GPLC sont des moteurs essence transformés, les progrès à attendre seront parallèles à ceux obtenus avec l'essence, c'est à dire qu'à équipement égal la performance des moteurs GPLC sera toujours meilleure.

La généralisation de l'injection et du pot catalytique contribuent à améliorer les performances constatées avec la carburation au GPLC.

Les recherches s'orientent aussi vers l'injection de GPL liquide, technique qui n'est pour l'instant, pas encore autorisée en France.

Des progrès encore plus significatifs pourraient être obtenus avec le développement de moteurs spécialement dédiés au GPLC, comme au Japon, ou aux Etats-Unis, où certains constructeurs offrent des véhicules encore plus performants en monocarburation (La maturité de ces marchés et la densité du réseau de distribution autorisent aujourd'hui ces pays à employer ce procédé).

D'autres recherches sont en cours dans le domaine des moteurs pour poids-lourds. Actuellement MAN dispose d'un moteur, qui équipe l'ensemble des autobus de la ville de Vienne en Autriche depuis 40 ans, et à Paris une compagnie de cars de tourisme. DAF, aux Pays-Bas, a mis au point deux moteurs GPLC, le LT 160 et LT 270, qui équipent déjà plusieurs flottes de transports publics aux Pays-Bas.

Les perspectives du marché GPLC

Au plan international, le GPLC est reconnu comme un carburant alternatif performant et immédiatement disponible. C'est le carburant alternatif le plus utilisé au monde. La maîtrise technologique de son usage quotidien contribue d'ores et déjà à préserver l'environnement de nombreux pays.

Tout ceci conduit progressivement les constructeurs automobiles à offrir des véhicules

équipés d'origine en bi-carburation et même en mono-carburation pour les marchés matures. Cette offre est l'une des conditions indispensables pour obtenir le décollage du marché.

L'autre condition absolument nécessaire, c'est le concours des autorités nationales, notamment sous la forme d'avantages fiscaux. Tous les pays qui ont décidé de promouvoir le GPL carburant ont eu recours à cette procédure, car il est bien connu que si les soucis écologiques sont de plus en plus d'actualité, il reste cependant que c'est le prix d'accès au produit qui est déterminant pour le consommateur.

Pour toutes ces raisons, et particulièrement par le fait qu'il peut rapidement être mis en œuvre, le GPL carburant gagne chaque année du terrain là où les contraintes écologiques deviennent les plus pressantes, et notamment dans les zones urbaines.

Ses marchés privilégiés sont évidemment les taxis, les transports en commun, et les flottes captives de véhicules légers d'intervention.

Partout où l'on désire rapidement combattre les causes de " l'effet de serre ", et les pollutions urbaines, le GPL carburant apparaît comme une des alternatives la plus crédible.

Au plan national la baisse des droits d'accise intervenue dans la loi de finance 1996 et les perspectives envisagées dans le projet de loi sur l'air ont donné le départ du renouveau du GPLC.

Les constructeurs nationaux annoncent la reprise à leur catalogue de véhicules GPLC. Pour RENAULT, c'est déjà fait, et pour PSA ce sera dans le courant de l'année. Du côté des constructeurs étrangers on ne reste pas inactif non plus : PONTIAC, SMB et SUBARU offrent déjà des modèles équipés d'origine au GPLC, de même que OPEL, HYUNDAI, HONDA, DAEWOO, NISSAN et TOYOTA.

Pour leur part, on l'a vu, les compagnies distributrices ont entrepris un programme de renforcement de leur réseau de stations-service afin de parvenir à une couverture nationale adaptée. L'évolution du marché donnera la cadence de cette évolution.

Tous les éléments semblent cette fois être réunis pour que le GPLC prenne enfin son vrai départ. Il sort, du moins en France, d'une longue période de léthargie pour retrouver progressivement la place qui lui revient au sein de la batterie des carburants alternatifs.

Ce dont il faut bien se souvenir aujourd'hui c'est que l'amortissement d'un équipement GPLC s'obtient aux alentours de 45 000 km par rapport à un véhicule essence et 80 000 km par rapport à un véhicule Diesel et qu'avec 100 F de carburant on fait :

- 200 km au super,
- 350 km au gazole,
- et 450 km au GPLC.

Le GNV : offre, émissions et perspectives

X. BOURGUIGNAT (+)

Pour contribuer à la réduction des nuisances principalement en ville avec le développement excessif des transports publics ou privés, l'utilisation de carburants moins polluants est une obligation.

Le gaz naturel, de part sa composition, peut contribuer à cette réduction et à cette maîtrise des pollutions.

1. Le gaz naturel est un carburant disponible

Le gaz naturel pour véhicules (GNV) constitue un carburant alternatif : il est déjà utilisé et largement distribué pour les usages industriels ou domestiques.

Principalement composé de méthane (CH_4) pour 83 % à 97 %, le GNV est disponible dans 65 pays et utilisé dans la quasi totalité des autres.

Les gisements sont nombreux : il est acheminé vers les sites de consommation sous forme liquide (GNL) ou gazeuse (GNC).

Les réserves connues représentent près de 70 ans d'utilisation, soit plus que le pétrole. Elles ne sont pas toutes situées au voisinage de champs pétrolifères.

Le gaz naturel, utilisé comme carburant, est performant (indice d'octane 130). Malheureusement, sur les véhicules ne sont mis en place que des kits sur les versions essence : le carburant gazeux n'est pas, de ce fait, optimisé. Toutefois, dans ce cas, les véhicules sont à bicarburant : essence et gaz naturel.

2. Le gaz naturel est un carburant propre

Les émissions générées par les installations industrielles ont diminué de plus de la moitié en France entre 1980 et 1995 tandis que les émissions dues au transport augmentaient fortement.

L'utilisation du gaz naturel comme carburant pour les véhicules présente un avantage certain pour l'environnement et la santé publique. En effet, les rejets par l'échappement des gaz pre-

sentent beaucoup moins de problèmes que les moteurs à essence ou gazole (diesel). Par exemple dans le cas du gaz naturel, l'émission de benzène n'existe pas. De plus, le gaz naturel produit 60 % en moins de monoxyde de carbone (CO), 26 % en moins d'oxyde de carbone (CO_2), 55 % en moins d'hydrocarbures non-incinérés HC + NOx (si l'on ne prend pas en compte le méthane comptabilisé dans les HC) et 80 % en moins de substances provoquant la formation d'ozone toxique que les moteurs à essence (voir figure 1).

Les émissions particulièrement toxiques telles que les microparticules (riches en hydrocarbures aromatiques polycycliques : HAP surtout dans le diesel) ne sont pratiquement pas détectables lors de l'utilisation du gaz naturel. Il en est de même avec les oxydes d'azote (NOx) pour le gazole. De plus, les concentrations en soufre dans les échappements de moteurs fonctionnant au gaz naturel sont inexistantes, ce qui n'est pas le cas pour l'utilisation du diesel.

Lors des démarrages à froid, fréquents en milieu urbain, l'utilisation d'un carburant gazeux est un avantage (pas besoin de vaporisation, le pot catalytique n'est pas efficace immédiatement).

La figure 2 (d'après une étude de J.C. GUISET, de l'IFP) montre clairement la différence qualitative des hydrocarbures rejetés par les véhicules à essence et par ceux au gaz naturel. En effet, les rejets des moteurs fonctionnant au gaz naturel sont constitués principalement par le méthane tandis que les rejets des moteurs fonctionnant à l'essence sont par exemple des substances toxiques (BTX) et cancérigènes comme le benzène.

Le GNV est actuellement pénalisé car dans les HC est pris en compte le méthane. Les effets de CH_4 sur la pollution urbaine et le smog oxydant sont nuls : il faudrait, à l'instar de ce qui se passe aux USA, comptabiliser les HCNM (HC non méthanogène) pour établir des normes. Mieux encore il faudrait, au niveau européen, disposer de normes EURO 93, EURO 1, EURO 96, EURO 2 spécifiques au GNV.

Toutefois ces mesures faites en 1996 évoluent dans le temps grâce aux progrès technologiques : elles sont données à titre indicatif.

Outre les avantages en terme de pollution atmosphérique, le GNV, par rapport à un moteur

(+) Association française du Gaz Naturel pour Véhicule.

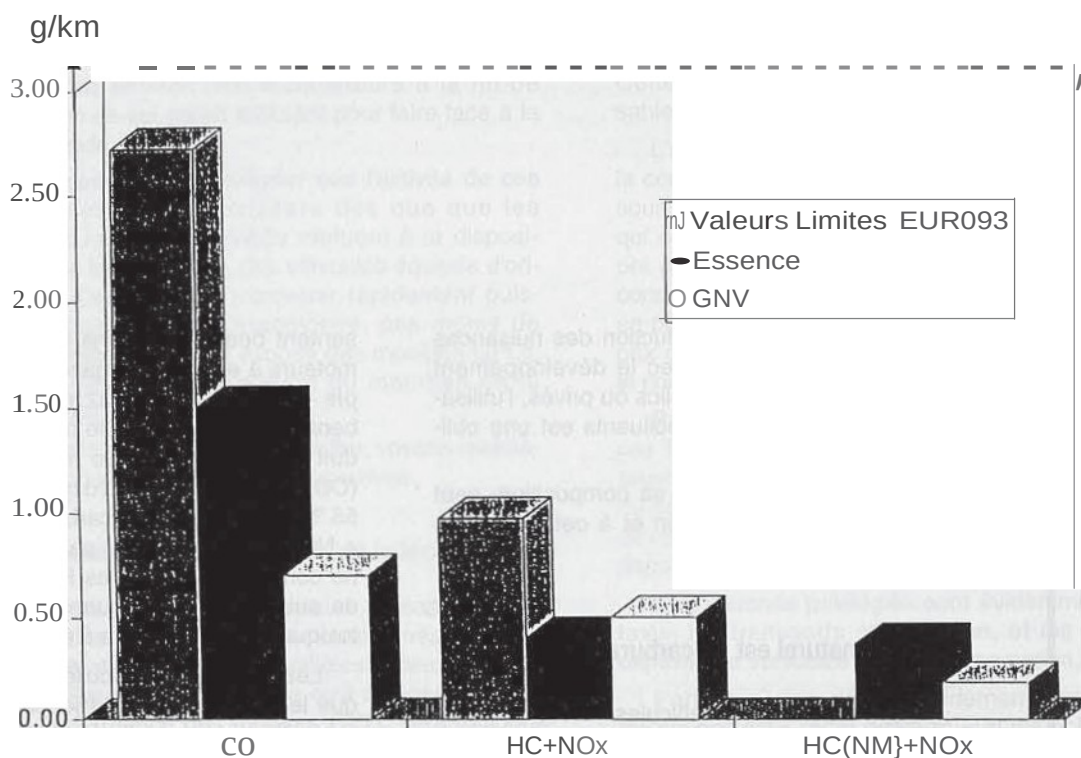
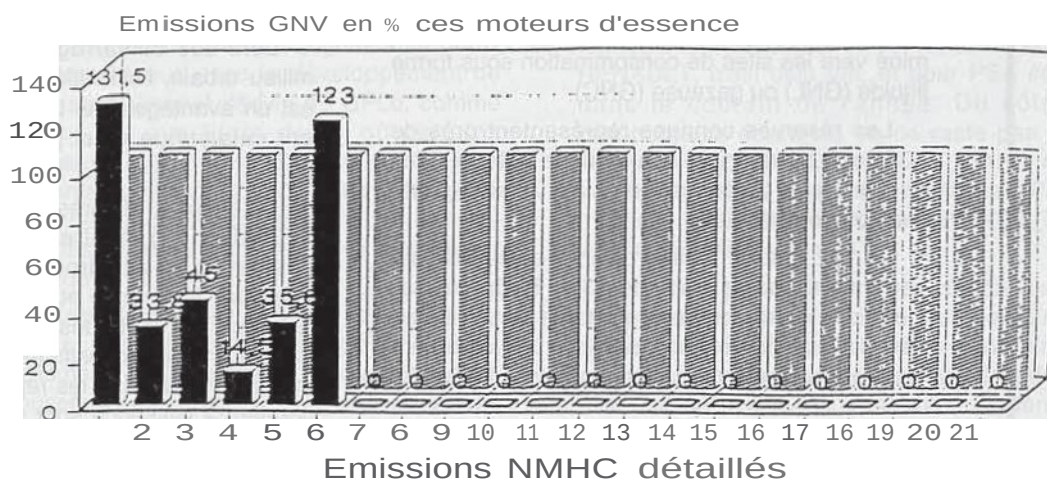


Figure 1.
Véhicules légers bicarburant essence- GNV (AFGNV/Juin 1995)



Emissions NMHC détaillés

— voiture gaz naturel voiture essence

Catalyseur à trois voies. ECE-EUOC.

- | | | |
|-------------------------|--------------------|-------------------|
| 1 : éthane | 8 : 1-butène | 15 : 1-pentène |
| 2 : éthène (éthylène) | 9 : isobutène | 16 : benzène |
| 3 : propane | 10 : cis butène | 17 : isooctane |
| 4 : propène (propylène) | 11 : isopentane | 18 : toluènes |
| 5 : éthine (acétylène) | 12 : n-pentane | 19 : éthylbenzène |
| 6 : butanes | 13 : propyne | 20 : m-,p-xylènes |
| 7 : transbutène | 14 : 1,3-butadiène | 21 : orthoxyène |

Figure 2.
Etude de comparaison des rejets en hydrocarbures non méthanogènes entre une voiture particulière alimentée par du gaz naturel et une voiture à essence équipée par un catalyseur à trois voies [14].

diesel (surtout pour les autobus urbains) présente trois avantages :

- le bruit des véhicules est réduit de 4 à 7 décibels;
- les vibrations au ralenti ont disparu (le moteur GNV est à allumage commandé : c'est un gros moteur à essence) ;
- les fumées d'échappement sentent le méthane (gaz imbrûlés).

3. Les perspectives de développement du GNV

Pour le développement d'un nouveau carburant propre, il faut des stations de remplissage (compresseurs portant le gaz à 200 bars, pression admise dans les réservoirs embarqués) et des véhicules dédiés (autobus) ou équipés de kits (voitures utilisant l'essence).

Dans un premier temps, seront sélectionnées des agglomérations voulant utiliser ce carburant propre et adapté à la circulation urbaine : la pollution en ville est la plus nuisible pour les populations.

Les villes concernées afficheront la volonté d'agir sur les véhicules utilisés pour la logistique urbaine

- autobus,
- bennes à ordures ménagères SOM,
- véhicules de livraison (petits utilitaires),
- véhicules de services urbains,
- flottes captives urbaines et périurbaines.

Avant d'envisager une utilisation plus large, il faut permettre à la filière industrielle de faire ses preuves, de disposer de composants permettant une meilleure économie générale de la filière.

4. Les travaux de recherche en cours sur le GNV

Si la filière gaz carburant donne à ce jour des résultats satisfaisants, elle a besoin d'être améliorée. Les travaux s'articulent sur trois axes :

- les moteurs avec le PREDIT pour rechercher l'utilisation optimale des qualités du gaz naturel ;

- le mélange pauvre avec une recherche JFP/GDF/RENAULT VI ;

- le GNL (Gaz Naturel Liquéfié) tant pour les stations (GNL : GNC à 200 bars) qu'embarqué sur les véhicules.

Ces travaux, alliés aux recherches sur les pots catalytiques, doivent permettre d'offrir aux utilisateurs des véhicules expérimentaux qui répondent aux normes les plus exigeantes de Californie (ULEV- Ultra Low Emission Vehicle).

5. Quelles mesures peuvent inciter les utilisateurs potentiels à recourir au gaz naturel comme carburant ?

Initier une nouvelle filière nécessite des investissements et la réalisation d'installation de distribution non rentable lors de leur mise en service.

Pour inciter ces actions, des mesures sont envisagées :

- la Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie :

- remboursement partiel de la TIPP pour les véhicules transportant des personnes,

- possibilité d'exonération de taxes départementales ou régionales ;

- Les politiques décidées par certaines régions : Ile-de-France, Provence Alpes Côte d'Azur, Nord Pas de Calais : incitations aux achats de véhicules, aux stations et aux opérations ponctuelles ;

- les aides de l'ADEME : contrats locaux à mettre en place sur chaque opération.

Le gaz naturel comme carburant est prometteur au regard de l'environnement. Certes il ne va pas se développer rapidement dans les années à venir, mais des démonstrations ponctuelles pour les " niches " urbaines devraient conforter la filière et préparer des extensions de plus ample envergure.