

N° 2757

ASSEMBLÉE NATIONALE

CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958

DOUZIÈME LÉGISLATURE

N° 125

SÉNAT

SESSION ORDINAIRE DE 2005-2006

---

Enregistré à la Présidence de l'Assemblée nationale  
le 14 décembre 2005

---

Annexe au procès-verbal de la séance  
du 14 décembre 2005

---

**OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION  
DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES**

---

**RAPPORT**

*sur*

***la définition et les implications du concept de voiture propre,***

Par MM. Christian CABAL et Claude GATIGNOL,

députés.

---

Déposé sur le Bureau de l'Assemblée nationale  
par M. Claude BIRRAUX

*Premier Vice-Président de l'Office.*

---

Déposé sur le Bureau du Sénat  
par M. Henri REVOL

*Président de l'Office.*

---

**COMPOSITION DE L'OFFICE PARLEMENTAIRE  
D'ÉVALUATION DES CHOIX SCIENTIFIQUES  
ET TECHNOLOGIQUES**

**PRÉSIDENT**

M. HENRI REVOL

**PREMIER VICE-PRÉSIDENT**

M. CLAUDE BIRRAUX

**VICE-PRÉSIDENTS**

M. Claude GATIGNOL, député	M. Jean-Claude ETIENNE, sénateur
M. Pierre LASBORDES, député	M. Pierre LAFFITTE, sénateur
M. Jean-Yves LE DEAUT, député	M. Claude SAUNIER, sénateur

**DÉPUTÉS**

M. Jean BARDET  
M. Christian BATAILLE  
M. Jean-Pierre BRARD  
M. Christian CABAL  
M. Alain CLAEYS  
M. Pierre COHEN  
M. Francis DELATTRE  
M. Jean-Marie DEMANGE  
M. Jean DIONIS du SÉJOUR  
M. Jean-Pierre DOOR  
M. Pierre-Louis FAGNIEZ  
M. Louis GUÉDON  
M. Christian KERT  
M. Pierre-André PÉRISSOL

**SÉNATEURS**

M. Philippe ARNAUD  
M. Paul BLANC  
Mme Marie-Christine BLANDIN  
Mme Brigitte BOUT  
M. François-Noël BUFFET  
M. Roland COURTEAU  
M. Christian GAUDIN  
M. Serge LAGAUCHE  
M. Jean-François LE GRAND  
Mme Catherine PROCACCIA  
M. Daniel RAOUL  
M. Ivan RENAR  
M. Bruno SIDO  
M. Alain VASSELLE

# SAISINE

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
LIBERTÉ • ÉGALITÉ • FRATERNITÉ

ASSEMBLÉE NATIONALE

LE PRÉSIDENT

Paris, le 4 mars 2004

Monsieur le Président et cher Collègue,

En application de l'article 6ter de l'ordonnance n° 58-1100 du 17 novembre 1958 relative au fonctionnement des assemblées parlementaires, le Bureau de l'Assemblée nationale a décidé, à l'initiative du Président du groupe de l'U.M.P., de saisir l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques d'une étude sur *"la définition et les implications du concept de voiture propre"*.

Je vous prie, Monsieur le Président et cher Collègue, de croire à l'assurance de mes meilleurs sentiments.

*Antoine*



Jean-Louis DEBRÉ

Monsieur Claude BIRRAUX  
Président de l'Office parlementaire d'évaluation  
des choix scientifiques et technologiques



# SOMMAIRE

	<u>Pages</u>
<b>INTRODUCTION</b> .....	5
<b>I. TROUVER LE CHEMIN D'UNE MOBILITÉ DURABLE</b> .....	11
<b>A. L'ÉNERGIE ET LA MOBILITÉ, DEUX PILIERS DE LA CROISSANCE ÉCONOMIQUE</b> .....	13
1. <i>La croissance économique et la demande énergétique</i> .....	13
2. <i>La croissance économique et la mobilité</i> .....	20
3. <i>La liberté d'aller et venir : un droit fondamental</i> .....	24
<b>B. COMMENT RENDRE L'ÉVOLUTION DU MARCHÉ AUTOMOBILE ÉCO-COMPATIBLE ?</b> .....	28
1. <i>Le parc automobile français : vers une voiture diesel par individu ?</i> .....	29
2. <i>Inéluctabilité de la montée en gamme et en puissance ? L'exception française</i> .....	33
3. <i>La sécurité et le confort sont-ils compatibles avec les économies d'énergie ?</i> .....	37
4. <i>La voiture mono-usage est-elle vouée à l'échec ?</i> .....	40
<b>C. LA PERTINENCE DES OBJECTIFS DE RÉDUCTION DE LA POLLUTION ET DE LA PRIORITÉ ACCORDÉE À LA TECHNOLOGIE</b> .....	42
1. <i>L'étude réalisée sur l'arc alpin à l'horizon 2030</i> .....	42
2. <i>Les deux tiers de la solution sont technologiques</i> .....	44
<b>II. L'INDISPENSABLE ÉCOBILAN DE LA VOITURE SUR SON CYCLE DE VIE</b> .....	49
<b>A. L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE LA VOITURE SUR SON CYCLE DE VIE</b> .....	50
1. <i>L'analyse par cycle de vie : une généralisation indispensable</i> .....	51
2. <i>Les parts respectives de la fabrication, de l'usage et du recyclage</i> .....	58
<b>B. L'ÉCOFABRICATION DES VOITURES</b> .....	60
1. <i>Écoconception : matériaux, légèreté, démontabilité...</i> .....	60
2. <i>Écofabrication : le bilan environnemental des usines</i> .....	65
<b>C. LE RECYCLAGE DES VÉHICULES</b> .....	72
1. <i>Les objectifs européens</i> .....	72
2. <i>La mise en place d'une filière économiquement et techniquement viable</i> .....	74
<b>III. FACE À LA POLLUTION LOCALE, DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES DISPONIBLES</b> .....	77
<b>A. LA POLLUTION LOCALE : QUEL DIAGNOSTIC ? QUELLE ÉVOLUTION ?</b> .....	78
1. <i>Le constat dressé par Airparif en Ile-de-France</i> .....	78
2. <i>L'évolution prévisible de la pollution urbaine due au transport routier</i> .....	84
<b>B. LA POLLUTION URBAINE, UN ENJEU POUR LA SANTÉ PUBLIQUE</b> .....	90
1. <i>Les polluants automobiles et leur impact sur la santé</i> .....	90
2. <i>Une connaissance clinique et épidémiologique à améliorer</i> .....	92
<b>C. LA SÉVÉRISATION DES NORMES ET LES PROGRÈS TECHNOLOGIQUES</b> .....	95
1. <i>Des normes européennes toujours plus strictes</i> .....	95
2. <i>L'achèvement de la dépollution des émissions</i> .....	101
1. <i>La désulfuration du carburant</i> .....	106
2. <i>De nouveaux modes de combustion</i> .....	107

D. LES FILIÈRES ALTERNATIVES POUR RÉDUIRE LA POLLUTION ET LE CO2 .....	111
1. Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) .....	111
2. Le gaz naturel véhicule (GNV) .....	113
<b>IV. L'EFFET DE SERRE : UN DÉFI POUR LES TRANSPORTS.....</b>	<b>117</b>
A. LE SECTEUR DES TRANSPORTS : L'ÉMETTEUR LE PLUS DYNAMIQUE .....	119
1. Les transports dans les émissions globales .....	119
2. Les émissions des voitures particulières en France .....	123
1. La prise en compte des auxiliaires : l'exemple de la climatisation.....	128
2. Le plan climat et la nécessaire promotion de solutions non technologiques .....	133
B. LES PROGRÈS DU MOTEUR À COMBUSTION INTERNE : INCONTOURNABLES À COURT TERME, INSUFFISANTS À LONG TERME .....	140
1. La diésélisation : solution d'aujourd'hui, solution de demain ? .....	140
2. Le moteur à essence peut-il bénéficier de progrès aussi importants que le moteur diesel ? .....	151
C. L'HYBRIDATION : UNE TECHNOLOGIE VRAISEMBLABLEMENT CLEF À MOYEN ET LONG TERMES .....	156
1. Le principe et les différents types d'hybridation.....	156
2. Une technologie aujourd'hui efficace, mais chère et marginale .....	160
3. Une technologie demain incontournable ? .....	162
D. LA VOITURE ÉLECTRIQUE : UNE TECHNOLOGIE QUI DOIT DÉMONTRER SA VIABILITÉ.....	167
1. Pourquoi la voiture électrique a-t-elle été un échec dans les années 1990 ? .....	168
2. Les projets et les potentialités .....	173
3. Une démonstration nécessaire des capacités réelles des voitures électriques.....	183
E. LES BIOCARBURANTS : DE L'AGRICULTURE À LA CHIMIE .....	187
1. Les filières actuelles de biocarburants dans le monde.....	188
2. Les biocarburants agricoles : une solution utile mais marginale .....	196
3. La biomasse : une réelle opportunité à long terme et un enjeu de recherche.....	206
F. L'HYDROGÈNE ET LA PILE À COMBUSTIBLE : LE RÊVE EST-IL POSSIBLE ?.....	211
1. L'hydrogène direct : une voie marginale ? .....	213
2. La pile à combustible : peut-on surmonter les obstacles ? .....	215
a) Histoire et principe technologique .....	215
b) Quelle pile pour les transports : PEM ou SOFC ? .....	217
3. Comment fournir l'hydrogène massivement ? .....	221
a) Comment le fabriquer ? .....	222
b) Où le fabriquer ? A bord du véhicule ou de manière centralisée ?.....	228
c) Comment le transporter et le stocker ? .....	231
d) Les programmes de démonstration.....	237
<b>V. PRINCIPALES CONCLUSIONS ET PROPOSITIONS DES RAPPORTEURS .....</b>	<b>243</b>
A. LA MOBILITÉ DURABLE POUR PRÉSERVER L'ENVIRONNEMENT ET LA CROISSANCE ÉCONOMIQUE .....	243
B. POURSUIVRE LA RÉDUCTION DE LA POLLUTION LOCALE : UNE NÉCESSITÉ .....	244
C. RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE : LE DÉFI DE L'AUTOMOBILE.....	245
D. PROPOSITIONS DE VOS RAPPORTEURS .....	247

E. LE VÉHICULE DU FUTUR : ÉCONOME ET MOINS POLLUANT.....	249
ANNEXES.....	253
ANNEXE 1 : EXAMEN DU RAPPORT PAR L'OFFICE.....	255
ANNEXE 2.....	261
I. PERSONNES AUDITIONNÉES EN FRANCE.....	261
II. PERSONNES AUDITIONNÉES À LA COMMISSION EUROPÉENNE.....	265
III. PERSONNES AUDITIONNÉES EN BELGIQUE.....	266
IV. PERSONNES AUDITIONNÉES AUX ETATS-UNIS.....	267
V. PERSONNES AUDITIONNÉES EN ALLEMAGNE.....	269
VI. PERSONNES AUDITIONNÉES AU ROYAUME-UNI.....	271
VII. PERSONNES AUDITIONNÉES AU JAPON.....	272
ANNEXE 3 : COMPTE-RENDU DE L'AUDITION PUBLIQUE DU MARDI 18 OCTOBRE 2005.....	277
I. THÈME DE LA MATINÉE : QUEL DIAGNOSTIC, QUELLES SOLUTIONS ?.....	278
A. PREMIÈRE TABLE RONDE : LA POLLUTION URBAINE ET LES ÉMISSIONS AUTOMOBILES : QUEL LIEN AUJOURD'HUI ?.....	279
1. Introduction par M. Christian Cabal, député de la Loire.....	279
2. M. Philippe LAMELOISE, Directeur d'Airparif.....	282
3. M. Laurent SELLES, Chef d'unité adjoint, DG Entreprises et industrie, Commission européenne.....	287
4. Mme Valérie PERNELET, Chef de projet « Air et santé », AFSSE.....	291
5. M. Jean-Bernard RUIDAVETS, INSERM, Toulouse.....	294
6. Débat avec la salle.....	298
B. DEUXIÈME TABLE RONDE : QUELLES SOLUTIONS DANS LES DIX PROCHAINES ANNÉES ?.....	305
1. M. Daniel LE BRETON, Chef du Département « Transport Energie », Total.....	305
2. M. Gérard BELOT, Direction de l'environnement automobile et du développement durable, PSA.....	308
3. M. Dominique HERRIER, Directeur adjoint, IFP.....	313
4. M. Alain MORCHEOINE, Directeur de l'Air, du bruit et de l'efficacité énergétique, ADEME.....	317
5. M. Rémy PRUDHOMME, Professeur d'université, Paris XII.....	321
6. Débat avec la salle.....	326
II. THÈME DE L'APRÈS-MIDI : COMMENT RÉDUIRE L'IMPACT DE L'AUTOMOBILE SUR L'EFFET DE SERRE ?.....	332
A. PREMIÈRE TABLE RONDE : QUELLE EST LA CONTRIBUTION DE L'AUTOMOBILE À L'EFFET DE SERRE ?.....	333
1. Introduction par M. Claude Gatignol, député de la Manche.....	333
2. M. Jean-Pierre FONTELLE, Directeur du CITEPA.....	335

3. M. Jean-Claude GAZEAU, Président de la MIES.....	338
4. M. Pierre BEUZIT, Directeur de l'ingénierie, Renault.....	342
5. M. André DOUAUD, Directeur technique, CCFA .....	345
6. Débat avec la salle.....	351
B. DEUXIÈME TABLE RONDE : QUELLES SOLUTIONS DANS L'AVENIR ? .....	355
1. Introduction par M. Christian CABAL .....	355
2. M. Philippe PINCHON, Directeur du centre de résultats Moteurs-Energies, IFP .....	355
3. M. Patrick OLIVA, Vice-président de Michelin .....	359
4. M. François BADIN, Directeur de recherches, INRETS.....	363
5. M. PierPaolo CAZZOLA, Analyste, Division des politiques de technologie de l'énergie, AIE .....	367
6. M. Thomas GUERET, Analyste, Division environnement et efficacité énergétique, AIE .....	370
7. Débat avec la salle.....	374

## INTRODUCTION

En changeant de statut social, c'est-à-dire en passant du produit de luxe rare à un objet massivement distribué et possédé, l'automobile est devenue un élément incontournable de nos sociétés modernes. Le permis de conduire est l'examen le plus passé et le plus réussi au sein d'une classe d'âge, loin devant le baccalauréat, sans que ce succès massif n'ait jamais eu besoin d'un appui des pouvoirs publics. La possession du papillon rose est devenue à la fois le symbole de la majorité et de l'indépendance, et le passeport obligatoire vers l'emploi.

En devenant incontournable, l'automobile est également devenue le sujet de débats idéologiques. Certains ont pu parler de « *dépendance à l'automobile* » de nos sociétés<sup>1</sup>, caractérisée par un manque d'alternative au déplacement automobile et à une modification de plus en plus irréversible de l'espace urbain en fonction de ce moyen de transport. En effet, sa diffusion a remodelé les espaces, déconcentré les villes, contribué à la spécialisation des espaces, engendrant une mobilité plus subie que voulue. Dès lors, il faudrait cesser d'adapter la ville à l'automobile, pour contraindre l'automobile à s'adapter à la ville.

**Au cœur de ce débat politique se trouvent les nuisances imputées à l'automobile. Les pouvoirs publics doivent répondre à une demande sociale de réduction de la pollution urbaine, de la pollution globale et des nuisances associées, correspondant d'ailleurs à l'intérêt général et aux objectifs de long terme de préservation de la santé publique et de l'environnement. Mais cette demande d'une « *voiture propre* » est très fortement ambivalente, puisque dans le choix d'achat d'un véhicule, le critère environnemental est placé très loin après le confort, la puissance, le design ou la sécurité. Cette ambivalence est aussi marquée par les images que continue de diffuser l'automobile : le statut social, la liberté, le sport, la séduction... L'Agent 007 ne roule pas en Renault-Dacia Logan.**

Le terme de « *voiture propre* » s'est cependant progressivement imposé. Il est devenu une base de droit mou. Partiellement définie par la loi sur l'air de 1996, la propreté automobile donne droit à certains avantages fiscaux. Elle est aussi devenue un critère contractuel mal défini pour l'achat public, les flottes d'entreprises sensibles au développement durable ou l'action citoyenne et publicitaire de certaines compagnies d'assurances.

Une étude approfondie et une définition fondée sur des bases scientifiques sont donc devenues indispensables pour orienter les choix publics et répondre à la demande de nos concitoyens.

---

<sup>1</sup>Tod Litman, 2001, Victoria Transport Institute.

Valorisante, la propreté est pourtant une notion négative. Le dictionnaire *Robert* définit ce qui est « *propre* » comme ce qui n'a aucune trace d'ordure, de crasse, de poussière ou de souillure. Une personne propre est une personne qui se lave souvent, dont les vêtements sont débarrassés de toute impureté. Le dictionnaire renvoie d'ailleurs à « blanc, immaculé et pureté ». Le *Petit Larousse*, quant à lui, retient cette même définition négative : « qui n'est pas tâché ou souillé, qui a été lavé ou nettoyé », mais ajoute « *qui ne pollue pas, respecte l'environnement. Usine, voiture propre* ». **Défini négativement, le propre apparaît aussi comme défini absolument.**

**Dès lors une voiture peut-elle être considérée comme propre ?** Qu'il s'agisse de la pollution locale ou des gaz à effet de serre, une voiture peut-elle éviter tout au long de son cycle de vie, de sa fabrication à sa destruction, d'émettre des polluants, d'avoir un impact sur l'environnement ? La réponse est évidemment négative. **Consommatrice d'énergie et de matériaux, elle ne peut se faire propre au sens intégral du terme à moins de ne plus exister.**

Le terme « *propre* », appliqué à l'automobile respectueuse de l'environnement, doit donc être compris comme une notion relative par rapport aux autres véhicules, par rapport à des normes fixées et par rapport à un objectif de minimisation de l'impact et des rejets, la voiture « *zéro émission* ».

**Notion relative, la propreté automobile apparaît aussi comme une notion contingente et évolutive.** Ce qui est aujourd'hui le must technologique ne le sera pas demain et ce qui le sera demain ne le sera plus après-demain. La définition elle-même amène à prendre en compte un panel de solutions dans le temps. La voiture « *zéro émission* » est comme une asymptote<sup>1</sup>, les progrès techniques permettent de s'en rapprocher mais sans jamais l'atteindre, au prix d'efforts de plus en plus importants et pour des gains marginaux décroissants.

**A ces objectifs de santé publique, liée aux émissions polluantes, et de protection de l'environnement, liée aux émissions de CO<sub>2</sub>, pour l'essentiel, s'ajoutent trois objectifs complémentaires : la croissance économique, l'indépendance énergétique, le renforcement de l'industrie automobile française.**

La recherche de la « *voiture propre* » ne peut s'abstraire de la volonté de **créer un cadre le plus favorable possible à la croissance économique.** Il convient à ce titre de rappeler le lien étroit entre la croissance de l'économie, celle des échanges et donc des transports sous toutes leurs formes. La croissance du transport est plus rapide que la croissance économique. La mondialisation et le développement de l'Internet s'accompagnent d'une augmentation de la demande de transport. La mobilité des personnes, comme

---

<sup>1</sup> *Tod Litman, 2001, Victoria Transport Institute.*

des idées et des marchandises, est un moteur et une caractéristique essentielle du monde moderne et libre dans lequel nous vivons. Pour vos rapporteurs, l'enjeu n'est pas de diminuer la demande de mobilité mais de trouver les solutions pour que cette mobilité soit moins émettrice de carbone fossile et de polluants. Le doublement du parc automobile mondial d'ici à 2020, passant de 700 millions à 1,5 milliard, en raison de l'enrichissement de la Chine et de l'Inde, peut être une opportunité et non une catastrophe annoncée si ces véhicules sont modernes et donc peu polluants.

Les transports, et tout particulièrement l'automobile, sont pour l'instant entièrement **dépendants des combustibles liquides fossiles non disponibles sur le territoire national**. Leur caractère stratégique a conduit depuis de nombreuses années les pouvoirs publics à mener une politique de **diversification** des approvisionnements, **d'économie d'énergie** et de **substitution**. Plusieurs filières sont ainsi directement concernées soit comme complément : gaz de pétrole liquéfié, gaz naturel pour les véhicules, électricité, biocarburants agricoles, soit comme solution globale d'avenir : pile à combustible, biomasse... Plus généralement, **chercher à disposer dans le futur d'une énergie abondante à prix abordable et la moins polluante possible est un objectif majeur**.

**La compétitivité de l'industrie automobile française et le confortement de sa position internationale sont deux autres préoccupations majeures. L'industrie automobile représente 90 milliards d'euros de chiffre d'affaires et plus de 300 000 emplois, un solde extérieur positif et un savoir-faire technologique au plus haut niveau mondial.** Dans un environnement mondial très difficile où la concurrence est brutale et peut remettre en cause rapidement des positions qui semblaient acquises, chercher à imposer des évolutions contre les constructeurs et au détriment de leur compétitivité serait contreproductif. Il est souhaitable au contraire de développer un partenariat permettant d'atteindre les objectifs environnementaux ou de sécurité des véhicules et en même temps de conforter la base industrielle et technologique nationale, la demande de véhicules plus propres et plus économes se retrouvant sur tous les marchés du monde.

C'est dans cet esprit que l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) a été saisi le 4 mars 2004, en application de l'article 6 *ter* de l'ordonnance n°58-1100 du 17 novembre 1958 relative au fonctionnement des assemblées parlementaires, par le Bureau de l'Assemblée nationale, à l'initiative du Président du groupe de l'Union pour un mouvement populaire, d'une étude sur « *La définition est les implications du concept de voiture propre* ».

L'OPECST a désigné vos rapporteurs pour la conduire lors de sa réunion du 13 avril 2004.

L'étude de faisabilité a été présentée et approuvée par l'Office lors de sa réunion du 6 juillet 2004. Le programme de travail a été approuvé par les Questeurs des deux assemblées le 8 septembre 2004. Enfin, à la demande des rapporteurs, les experts du Comité de pilotage ont été nommés par M. Henri Revol, Président, en novembre 2004.

Le libellé de l'étude implique que soient seules comprises dans son champ les voitures particulières (VP) destinées au transport des personnes et aux utilitaires légers dont le poids est inférieur à 2,8 t, conformément à la réglementation européenne. Il s'agit essentiellement de voitures de tourisme possédées par les ménages à 94 %. C'est-à-dire qu'en sont exclus les motocycles et les poids lourds, ainsi que les autres modes de transport. Le but de la saisine est donc de concentrer l'étude sur ce qui est l'outil principal de mobilité de nos concitoyens : la voiture.

L'étude n'avait pas non plus pour objectif d'examiner l'impact environnemental des différents modes de transport les uns par rapport aux autres ni de mesurer l'impact d'éventuels changements modaux.

Par ailleurs, vos rapporteurs ont exclu de leur champ d'étude les éléments touchant aux nuisances de l'automobile au sens large qui, s'ils sont des gênes, ou des conséquences graves, ne peuvent être considérés comme des polluants au sens strict du terme (agent physique, chimique ou biologique provoquant une dégradation dans un milieu donné), notamment les accidents de la route.

Enfin, si vos rapporteurs se sont intéressés à la voiture du futur, ils n'ont pas inclus dans leur étude tous les progrès envisageables en matière d'intelligence embarquée ou de sécurité, sans toutefois ignorer leur impact potentiel sur la pollution par le transport soit à travers la régulation du trafic, soit à l'inverse par l'effet d'alourdissement des véhicules.

Chercher à définir le concept de voiture propre et ses implications pour les voitures du futur a nécessité de la part de vos rapporteurs une analyse approfondie et réaliste des équilibres énergétiques, de la place de l'automobile dans l'économie et de l'évolution du marché et de la demande des consommateurs.

Ensuite, ils ont cherché à progresser vers un écobilan de la voiture en prenant en compte sa phase de fabrication, son usage et sa phase de démolition, la première comme la dernière étape n'étant pas à négliger.

Au cours de l'utilisation de la voiture, deux problèmes différents doivent être examinés séparément : l'impact sur la santé et les questions climatiques.

L'impact sur la santé dépend du niveau des émissions de polluants chimiques locaux des véhicules tels les oxydes d'azote (NOx), les particules (PM) et les hydrocarbures imbrûlés.

L'impact des rejets de l'automobile sur le climat, quant à lui, dépend pour l'essentiel des émissions de gaz à effet de serre, soit dans le cas de l'automobile celles de CO<sub>2</sub>, qui, si elles ont un impact global et dans le long terme, ne constituent pas une menace pour la santé.

Enfin, au cours de cette étude, vos rapporteurs ont privilégié la recherche de solutions technologiques aux problèmes posés par l'automobile. Celles-ci apparaissent en effet comme pouvant apporter près des deux tiers des progrès nécessaires pour atteindre les objectifs fixés en matière de pollution et de changement climatique, le tiers restant étant constitué par les changements de comportement et de mode de transport. Ce dernier tiers dépassait toutefois le champ de cette étude.

\*

Au cours de leur étude, les rapporteurs ont pu compter sur le concours efficace des experts du comité de pilotage, sur la disponibilité des personnes auditionnées et sur l'efficacité des services de nos ambassades aux États-Unis, en Allemagne, au Royaume-Uni, auprès de l'Union européenne à Bruxelles et enfin au Japon, qu'ils en soient tous vivement et chaleureusement remerciés.



## I. TROUVER LE CHEMIN D'UNE MOBILITÉ DURABLE

L'énergie est redevenue une question fondamentale pour l'économie française. C'est pourquoi, pour la première fois, le Parlement a adopté une loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique française (Loi n °2005-781 du 13 juillet 2005).

Elle définit la stratégie énergétique nationale afin de contribuer à l'indépendance énergétique, garantir la sécurité d'approvisionnement, assurer un prix compétitif de l'énergie et préserver la santé humaine et l'environnement, en particulier en luttant contre l'effet de serre (article 1<sup>er</sup>).

La loi fixe ensuite à l'État les missions de maîtriser la demande d'énergie, de diversifier les sources d'approvisionnement et de développer la recherche. Il doit en outre favoriser la réduction de l'impact sanitaire et environnemental de la consommation énergétique. L'État s'engage à renforcer progressivement la surveillance de la qualité de l'air en milieu urbain, et donc les normes, en fonction de l'évolution technologique.

**La lutte contre le changement climatique est érigée en priorité. La France s'engage à diminuer de 3 % par an en moyenne les émissions de gaz à effet de serre, en cohérence avec l'objectif de division par deux des émissions mondiales d'ici à 2050, ce qui nécessite une division par quatre de ces émissions dans les pays développés.**

Afin de maîtriser la demande d'énergie, l'État s'engage à faire évoluer la réglementation au plus près des capacités technologiques, à utiliser la fiscalité pour favoriser les économies d'énergie, à développer le recyclage et la valorisation énergétique et à mettre en place des politiques exemplaires, notamment dans sa politique d'achat de véhicules.

En matière de diversification du bouquet énergétique de la France, l'État se fixe l'objectif qu'à l'horizon 2010, 10 % des besoins énergétiques soient satisfaits à partir de sources d'énergies renouvelables. **La loi stipule que le secteur des transports « doit faire l'objet d'une réorganisation profonde, car il constitue la principale source d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution de l'air ».** L'État soutient donc **le développement des biocarburants**, encourager la compétitivité de la filière et se fixer l'objectif de l'incorporation de 5,75 % de biocarburants au 31 décembre 2010 contre 2 % aujourd'hui. L'État devra également **appuyer l'utilisation des véhicules hybrides et électriques et la recherche sur les piles à combustible et l'hydrogène.** L'État s'engage en outre, pour les transports de passagers et de marchandises, à privilégier les transports en commun et les voies ferrées par rapport aux projets routiers ou aéroportuaires.

En matière de recherche, la loi de programme couvre l'ensemble des secteurs sans exclusion. L'accroissement de l'efficacité énergétique, l'augmentation de la compétitivité des énergies renouvelables, les différents modes de production, stockage, transport et utilisation de l'hydrogène sont visés. Sur ce dernier sujet, une mission hydrogène composée de l'IFP, du CNRS, du CEA et du ministère de l'industrie est créée.

Enfin, la loi définit les énergies renouvelables. Ce sont les énergies hydraulique, solaire, éolienne, géothermique, houlomotrice, marémotrice ainsi que celles issues de la biomasse, du gaz de décharge, du gaz des stations d'épuration d'eaux usées et du biogaz. La biomasse est elle-même définie comme « *la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales, de la sylviculture et des industries connexes ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers* ».

Dans ce cadre, vos rapporteurs ont souhaité tout d'abord revenir sur le lien entre énergie, mobilité et croissance économique, puis analyser les évolutions du marché automobile et enfin examiner s'il était possible d'attendre des progrès technologiques l'essentiel de la solution aux problèmes posés en matière de pollution locale ou globale par le secteur des transports.

## ***A. L'ÉNERGIE ET LA MOBILITÉ, DEUX PILIERS DE LA CROISSANCE ÉCONOMIQUE***

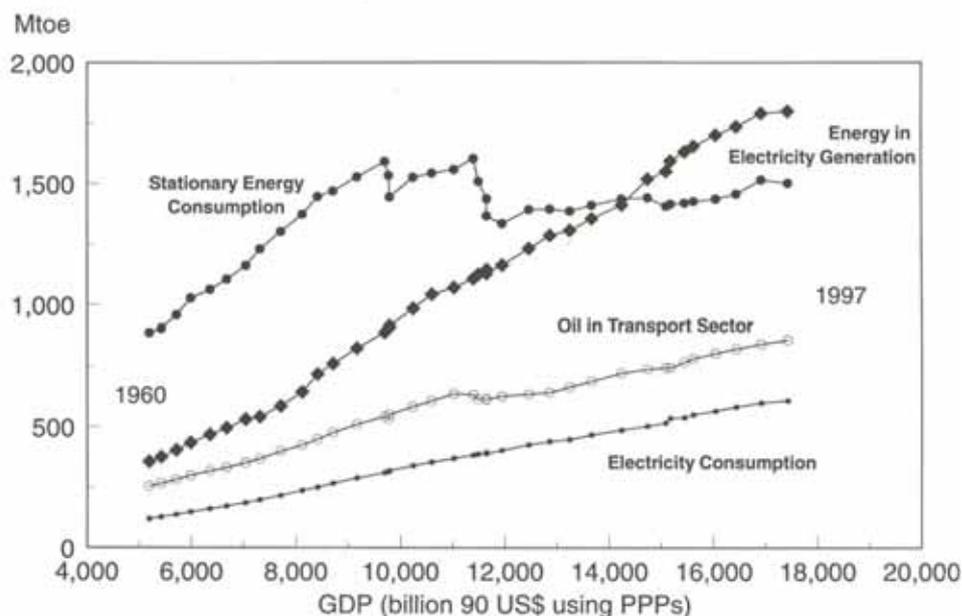
L'énergie et la mobilité sont des éléments essentiels des économies modernes. Les États-Unis ont érigé en principe la mise à disposition de leurs entreprises et de leurs citoyens d'une énergie à bon marché et d'importantes structures de transport pour assurer le développement de leur économie et de leur territoire. Ces principes sont en réalité confirmés partout dans le monde, dans les pays émergents comme en Europe.

### **1. La croissance économique et la demande énergétique**

Le lien entre croissance économique et demande en énergie est établi de manière robuste par différentes études. Or, la demande d'énergie sera croissante dans les prochaines années alors même que les ressources pétrolières seront sans doute de plus en plus rares. Nos sociétés, et tout particulièrement les transports routiers, devront donc faire face à de très importants défis.

- **Consommation d'énergie/croissance économique : un lien robuste**

Au cours de leurs différentes auditions, vos rapporteurs ont pu confirmer qu'existait un lien fort entre la croissance économique et la demande en énergie depuis 40 ans (cf. graphique ci-dessous) :

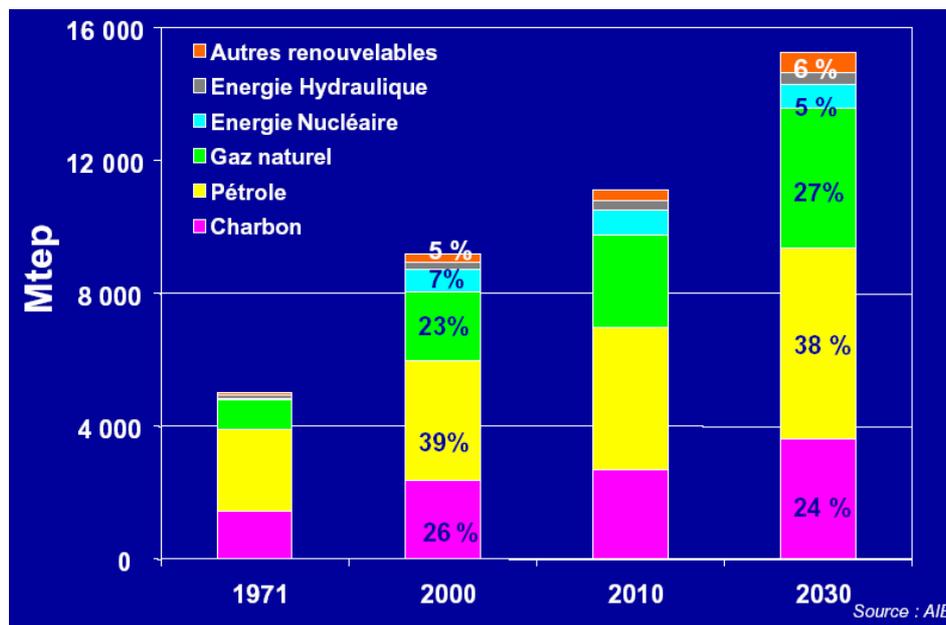


Source : O. Appert, IFP, 2005

Le défi est désormais de diminuer non pas forcément la densité énergétique de la croissance mais sa densité en énergie fossile pour diminuer les émissions de CO<sub>2</sub>.

- **Une demande croissante d'énergie est à prévoir**

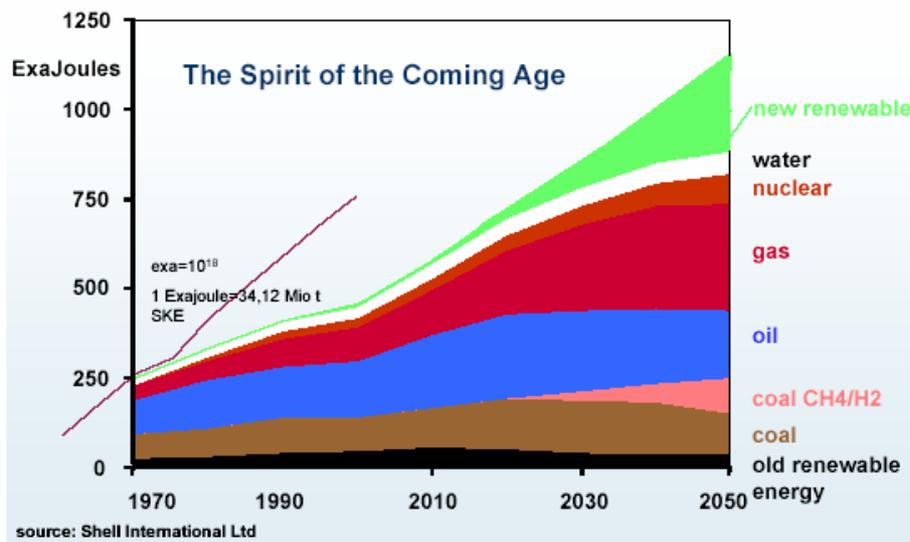
Dans son rapport, *Perspectives énergétiques mondiales 2004*, l'Agence internationale de l'énergie prévoit que **la demande mondiale d'énergie s'accroîtra de 60 % d'ici à 2030**. On peut donc traduire le tableau ci-dessous de la façon suivante :



Les combustibles fossiles resteront largement prédominants. Ils représenteront 85 % de l'augmentation de la demande. Deux tiers de cet accroissement viendront des pays émergents comme la Chine et l'Inde. L'évolution des prix du pétrole aura un impact très important. Bâti sur une hypothèse de prix du baril autour de 25 \$, le futur pourrait être sensiblement différent si le prix moyen devait être de 35 \$. Alors, l'AIE estime que la demande mondiale pourrait être inférieure de 15 % en 2030.

La consommation de gaz naturel devrait doubler d'ici à 2030. Il en serait de même du charbon.

En revanche, l'énergie nucléaire devrait voir sa part diminuer.



**Ce scénario d'accroissement de la demande d'énergie n'est pas, selon l'AIE, compatible avec les engagements de Kyoto des pays développés. Ceux-ci dépasseraient de 30 % leurs objectifs.**

Vers 2050, cela peut conduire à une consommation mondiale d'énergie de 25 Gtep/an (scénario A2), contre 15 Gtep/an en 2030 (ci-dessus) et 10 aujourd'hui.

Les études de l'AIE montrent que d'autres scénarios sont possibles en conjuguant efficacité énergétique, maîtrise de la demande et développement des énergies renouvelables. Il serait ainsi possible de limiter l'augmentation en 2050 à 20 Gtep/an, voire de parvenir à limiter la demande mondiale à 13 Gtep/an, dont 7 Gtep renouvelables.

Notons qu'à ce jour le baril de pétrole se maintient au-dessus de 60 \$ US.

**Il s'agit donc d'ici à 2050 de développer les technologies et les comportements permettant de découpler la croissance de la production de CO<sub>2</sub> et, pour partie, de la demande en énergie.**

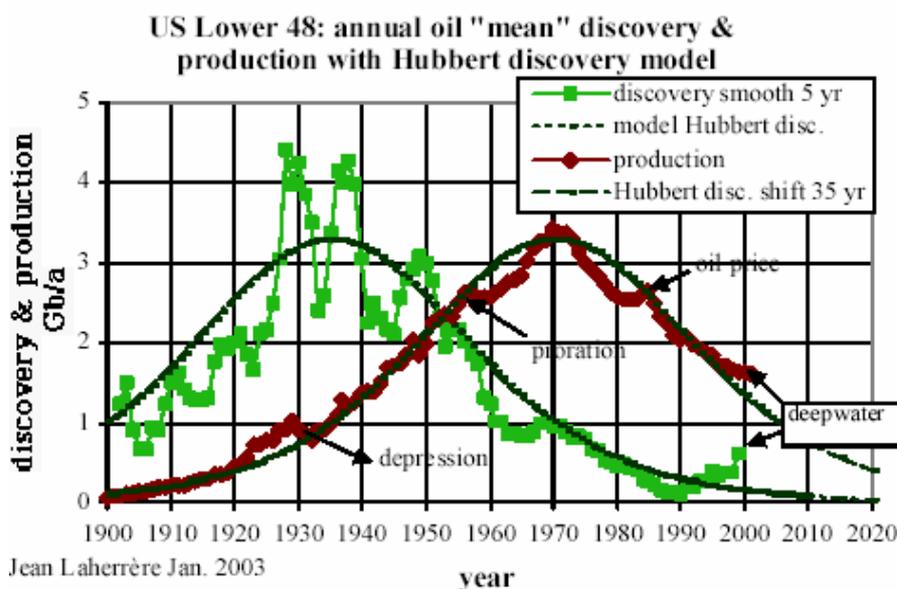
- **Le pétrole va-t-il manquer ?**

Les tensions sur les prix du pétrole, liées en grande partie à la croissance de la demande des pays émergents comme la Chine et l'Inde, font désormais douter que le pétrole pourra être l'énergie dominante du 21<sup>e</sup> siècle. Plus encore, beaucoup pensent que nous connaissons déjà ou que nous sommes proches du « *pic pétrolier* ».

Les analyses sur la fin du pétrole qui étaient en vogue au moment du premier choc pétrolier refont surface. En 1973, des analystes prévoient la fin du pétrole peu après l'an 2000, ils se sont trompés. Qu'en est-il aujourd'hui ?

La théorie dite du « *pic pétrolier*<sup>1</sup> » modélise les ressources pétrolières mondiales sous **la forme d'une courbe en dôme, dite « courbe de Hubbert »**. K. Hubbert était géologue et avait réussi à prédire, dans les années 1950, grâce à son modèle, le pic de production de pétrole des États-Unis dans les années 1970.

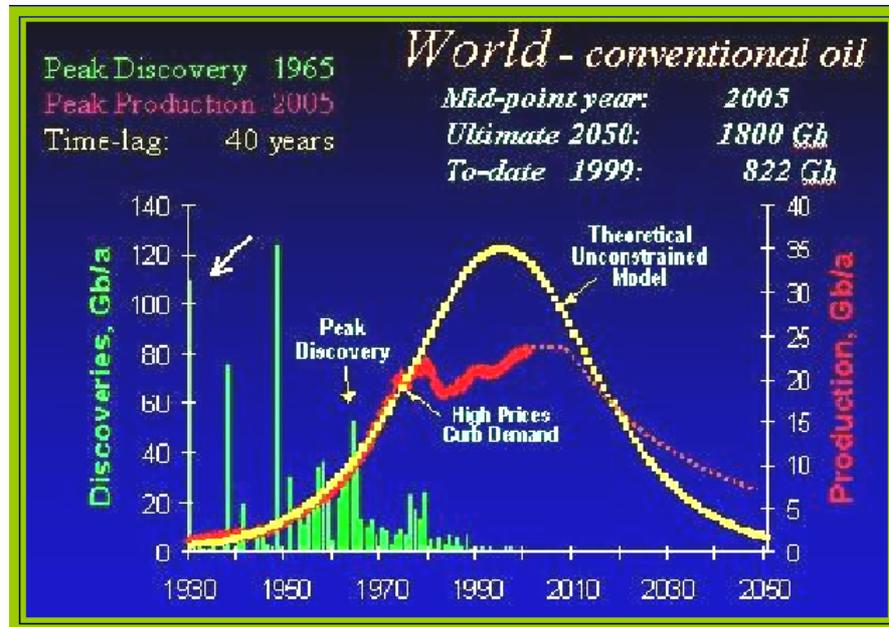
Selon Hubbert, un pic de découvertes de gisements précède un pic de production conduisant, compte tenu de la hausse prévisible de la demande, à une hausse des prix. Cela se traduit par les courbes suivantes pour les États-Unis (de 1900 à 2020) :



À une certaine date, le monde aura consommé plus de la moitié du pétrole disponible sur notre planète, la production décroîtra ensuite de manière inéluctable tandis que les prix s'élèveront.

<sup>1</sup> "peak oil".

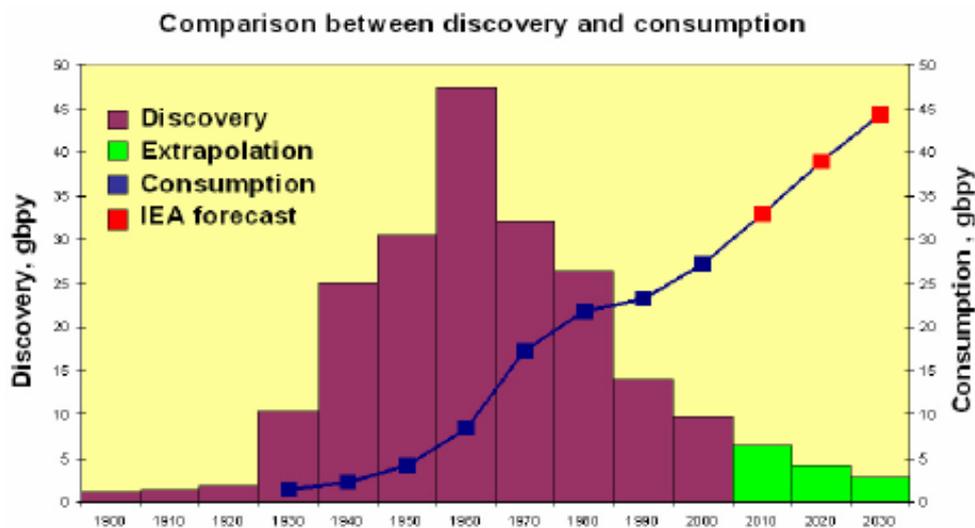
Au niveau mondial, le pic de découverte serait 1965, et celui de production 2005 :



Source : [www.peakoil.net](http://www.peakoil.net) – Matthew R. Simmons – ASPO Lisbon Meeting 2005.

Le principal tenant de cette théorie est un professeur de physique de l'université d'Upsalla en Suède, M. Kjell Aleklett<sup>1</sup>. Il prévoit ainsi que dans les 30 prochaines années, seulement 134 milliards de barils seront découverts tandis que la consommation s'élèvera à 1.000 milliards de barils. Il estime également que schématiquement, entre 1955 et aujourd'hui, la tendance s'est complètement inversée. Si à l'époque on découvrait 30 milliards de barils et on en consommait 4, aujourd'hui on en consomme 30 et on en découvre 4.

<sup>1</sup> Association for the study of peak oil (ASPO), [www.peakoil.net](http://www.peakoil.net).



Source : [www.peakoil.net](http://www.peakoil.net), Kjell Aleklett.

**Ces évaluations sont extrêmement contestées. Si tous les experts s'accordent à considérer que le pétrole est une ressource finie, la très large majorité est extrêmement prudente sur l'évaluation des réserves et des capacités de production, compte tenu des graves erreurs de prévision commises dans le passé et de l'évolution des technologies.**

**L'Agence internationale de l'énergie et de très nombreux experts font une analyse différente.**

Adelman et Lynch, du M.I.T., classés parmi les optimistes, rejettent toute prévision d'un quelconque pic de production car ils estiment que par le passé la plupart des prévisions se sont révélées erronées, que ce soit celles sur la production du charbon ou celles sur la production de pétrole. Pour eux, les prix sont l'indicateur « *d'une course entre l'épuisement des réserves connues d'une part et le progrès technique d'autre part* »<sup>1</sup>.

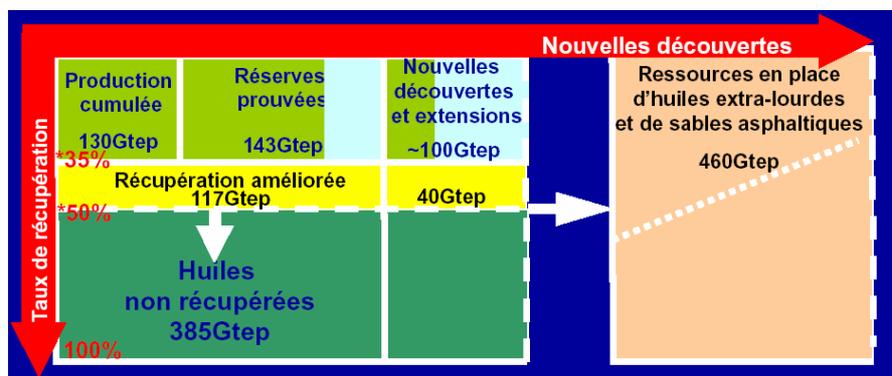
L'USGS (United States Geological Survey) adopte une analyse médiane. Recourant à la méthode de Hubbert, il estime que le plafonnement de la production pourrait intervenir entre 2020 et 2030. Ce scénario est fréquemment retenu, notamment par des grandes sociétés pétrolières comme Shell.

L'IFP, quant à lui, exclut une rupture rapprochée compte tenu des ressources connues et des progrès possibles dans l'extraction du pétrole. Les « *réserves prouvées* » assureraient 40 années de consommation au rythme actuel, selon Olivier Appert, son président. A ces réserves peuvent raisonnablement s'ajouter celles à découvrir, que l'on peut estimer à 40 années

<sup>1</sup> Denis Babusiaux, IFP, déc. 2003, « *L'offre et la demande pétrolières* ».

supplémentaires. Par ailleurs, l'exploitation des bruts lourds du Canada ou du Venezuela, qui a commencé, assurerait l'équivalent de 20 ans de consommation. Selon lui, la diminution de la production n'interviendra pas avant 2025, voire 2040.

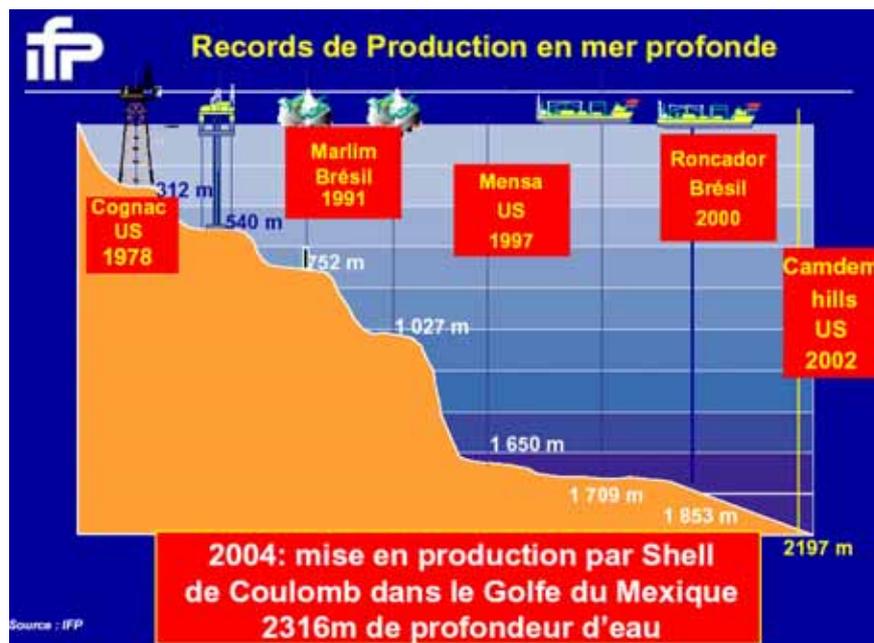
Des progrès très importants sont possibles dans l'extraction. Aujourd'hui **guère plus de 30 % du pétrole d'une nappe sont extraits. Dans le futur, cette proportion pourrait dépasser 50 %.** A cet égard, **une augmentation du taux de récupération de 1 % de l'ensemble des puits actuellement en exploitation permettrait de gagner l'équivalent de 2 à 4 années de réserves. Le potentiel est donc très important.**



Source : J.Lecourtier, IFP, 2005.

Plusieurs séries de techniques peuvent être utilisées pour repousser les limites des découvertes et de l'exploitation :

- \* maintien de la pression dans le réservoir par injection d'eau ou de gaz,
- \* modification de la composition du pétrole (fluidification) par injection de vapeur, de gaz, de CO<sub>2</sub> ou de produits chimiques,
- \* utilisation de l'imagerie sismique 4 D en cours d'exploitation,
- \* trajectoires de forage complexes (record horizontal de 10 km),
- \* sélection des drains les plus intéressants et productifs (completion intelligence),
- \* forages *off shore* de plus en plus profonds. Cette technique est sans doute celle où il est le plus facile, pour un non professionnel, de percevoir les progrès spectaculaires accomplis par les ingénieurs et la possibilité de trouver du pétrole au-delà de l'accessible et du connu. En 25 ans, la profondeur des forages a été multipliée par 7 à 8.



Certes, ces techniques sont coûteuses et transforment le pétrole en un produit de plus en plus technologique et cher, mais elles assureront vraisemblablement la fourniture en pétrole au-delà de plusieurs dizaines d'années.

**Il ne s'agit pas pour vos rapporteurs de minimiser la fin prévisible du pétrole. Mais il est prévisible que la fourniture en pétrole sera assurée tout au long du 21<sup>e</sup> siècle à des coûts de plus en plus élevés permettant la poursuite de son exploitation et nécessitant de ne l'utiliser progressivement que pour les usages pour lesquels il est indispensable et donnant un certain laps de temps pour que les sociétés puissent s'adapter à ces évolutions.**

## **2. La croissance économique et la mobilité**

Si la croissance s'accompagne d'une consommation supplémentaire d'énergie, elle s'accompagne également d'une demande toujours croissante de transport, posant là aussi le problème de réussir à rendre cette croissance de la mobilité compatible avec les objectifs de réduction de la pollution et des émissions de gaz à effet de serre.

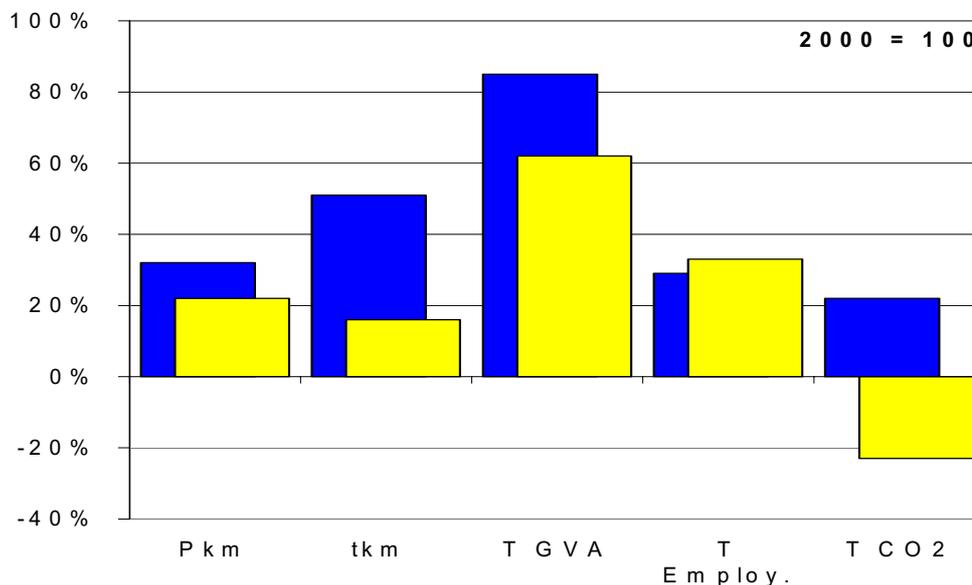
- **Le lien croissance économique – croissance du transport**

Les études montrent un lien fort entre croissance économique et croissance du transport. La mondialisation n'a fait qu'accroître ce phénomène.

Lors de leur mission à Berlin, vos rapporteurs ont pu rencontrer les experts de l'Institut de recherche sur les transports dépendant du DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Institut für Verkehrsforschung). Des travaux y sont menés depuis plus de cinq ans sur l'impact potentiel sur la croissance économique de mesures contraignantes de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dues au secteur du transport.

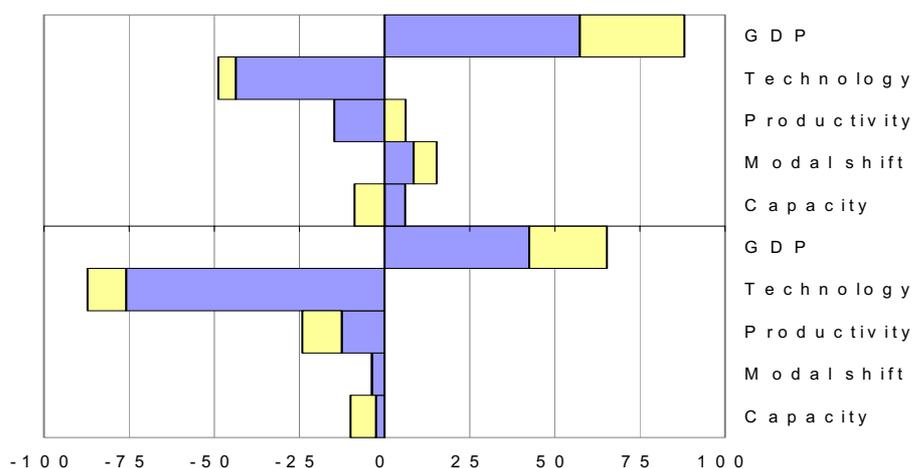
Il s'agit de savoir quel sera l'impact, d'ici à 2020, de mesures de régulation sur l'évolution du trafic, de l'économie, de l'emploi et des émissions de CO<sub>2</sub>. L'étude montre qu'avec un prix du carburant porté par mesure réglementaire à 3 ou 4 €/litre, il est possible conserver une croissance économique et de la rendre plus favorable à l'environnement.

Les résultats sont indiqués dans le graphique ci-dessous. En bleu figure l'évolution prévisible sans intervention en matière (de gauche à droite) de transport de passagers, de marchandises, de valeur ajoutée, d'emploi et de CO<sub>2</sub>. La référence est l'année 2000 (base 100).



L'Institut a également cherché à distinguer les facteurs potentiels de progrès dans les deux scénarios permettant de compenser l'augmentation de la demande de transport (passagers en bleu/marchandises en jaune). L'impact de l'intervention publique est importante car elle réduit la croissance économique et stimule notamment fortement certains types de solutions comme les

technologies, mais aussi les efforts en matière d'efficacité énergétique et les changements modaux. Si dans le scénario de laisser-faire, l'augmentation de CO<sub>2</sub> est de 60 Mt (- 48 mais + 108), dans le scénario « réglementé », il est possible de parvenir à une réduction des émissions évaluées à 54 Mt.

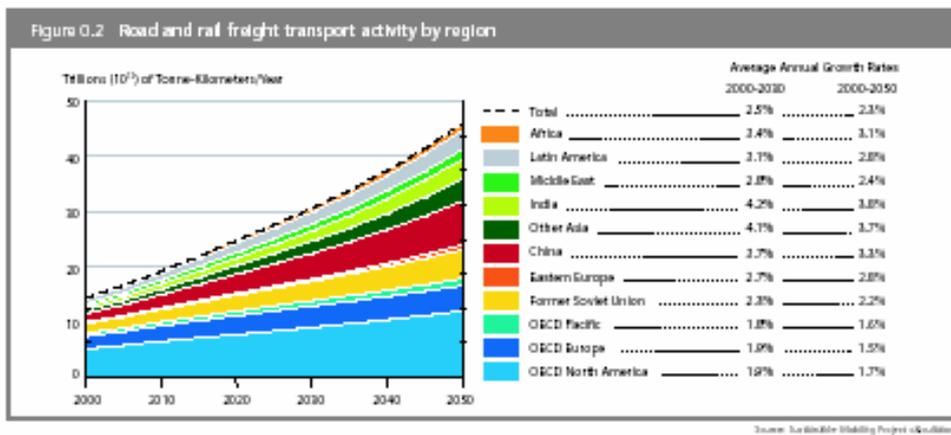
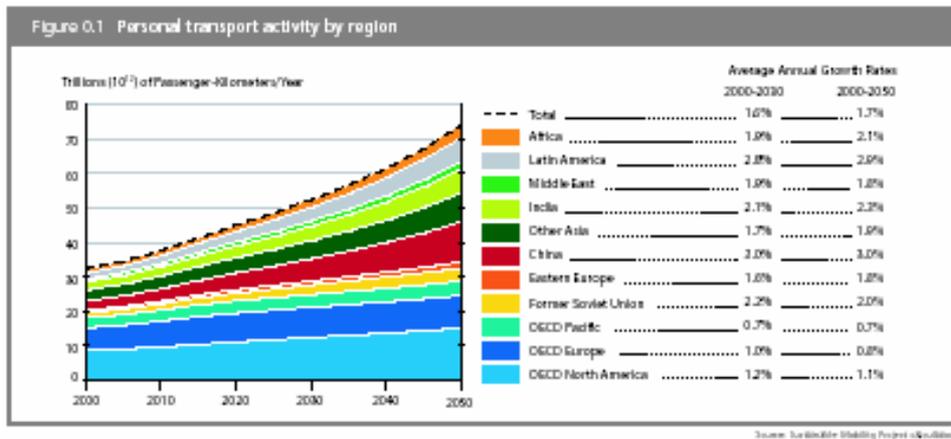


**Ces éléments confirment le lien entre croissance et mobilité et la possibilité de préserver la croissance économique tout en prenant des mesures pour restreindre les émissions de CO<sub>2</sub>. Cependant, l'impact négatif des dispositifs envisagés (accroissement du prix des carburants allant très au-delà des prix actuels) sur la croissance n'est guère envisageable en Europe, où la croissance est faible et le chômage élevé.**

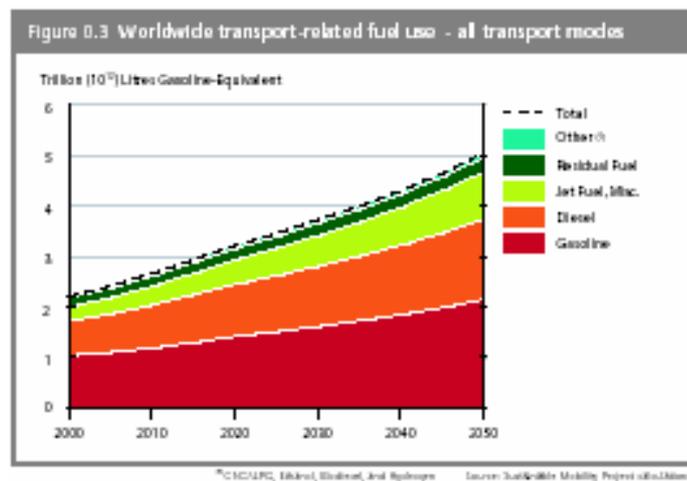
- **La croissance prévisible de la demande de transport**

La croissance de la demande de transport sera forte d'ici à 2050. A partir des projections de l'AIE et de l'OCDE, le World Business Council for Sustainable Development<sup>1</sup> prévoit une progression de 1,6 à 1,7 % par an du transport de personnes entre 2000 et 2050 et de 2,3 à 2,5 % pour le transport de marchandises.

<sup>1</sup> Ce conseil réunit plusieurs des principaux industriels du pétrole et de l'automobile : GM, Toyota, Shell, BP, Daimler Chrysler, Ford, Honda, Michelin, Nissan-Renault, Norsk Hydro, Volkswagen.



La croissance du transport s'accompagne mécaniquement d'une hausse de la demande de carburant. Or, il faut rappeler que l'objectif de diviser par quatre les émissions de CO<sub>2</sub> nécessiterait une diminution des émissions de 3 % par an en moyenne d'ici à 2050.



Ces projections ne sont donc pas soutenables au regard des objectifs affichés. Elles font apparaître très clairement la nécessité de ruptures technologiques ou de mesures particulièrement fortes.

### 3. La liberté d'aller et venir : un droit fondamental

- **Un mode de développement en question**

Face à ces prévisions qui mettent en lumière la difficulté d'atteindre les objectifs fixés pour 2050, la tentation est forte, chez certains experts, de promouvoir des solutions coercitives ayant pour objectif de contraindre les citoyens à abandonner leur voiture particulière pour les transports en commun, voire contraindre à une réduction de la liberté de déplacements trop consommateurs d'énergie, tels les voyages aériens.

Or, la voiture particulière, et plus largement la mobilité, « *la liberté d'aller et de venir* » est indissociable des sociétés libérales modernes. Avoir une voiture, c'est accéder à l'autonomie, à la liberté de mouvement.

Elle joue un rôle fondamental dans l'évolution des modes de vie vers une plus grande mobilité dans des espaces géographiquement plus vastes et diversifiés mais temporellement plus resserrés, c'est pourquoi elle a pu être qualifiée « *d'adaptateur territorial universel* »<sup>1</sup>.

L'automobile et la multimotorisation sont aussi les symboles et les outils du développement du travail féminin et de l'accession à la propriété en milieu périurbain. L'accession des femmes au permis de conduire a sans doute été aussi importante dans leur « *libération* » que d'autres conquêtes.

Le passage à l'âge adulte se fait en partie par l'obtention du permis de conduire à la majorité, l'automobilité étant très importante dans l'acquisition de l'autonomie<sup>2</sup>.

La liberté de voyager selon le mode souhaité est le propre des pays libres et démocratiques. Tous les régimes autoritaires ont instauré des passeports intérieurs et des interdictions de déplacement. Les sociétés modernes ont certes besoin des transports pour l'économie mais elles en ont tout autant besoin pour la culture, les échanges humains, les rencontres et les échanges d'idées. Il n'est pas forcément inutile de rappeler que le libéralisme politique et économique a constamment associé aux libertés politiques et économiques la liberté d'aller et venir, droit énoncé par la déclaration des droits de l'homme et du citoyen de 1789.

Il est apparu très clairement à vos rapporteurs, aux cours de leurs différents entretiens, que leurs interlocuteurs les plus prompts à vouloir contraindre nos sociétés à certaines évolutions n'étaient pas sans arrière-pensées. Hostiles depuis toujours aux moyens de transport non collectifs ou

---

<sup>1</sup> G. Dupuy, 1995, *Les territoires de l'automobile*, Paris, Anthropos, 216 p.

<sup>2</sup> Lomasky, 1997, « *Autonomy and automobility* », *The independant review*.

non conformes à certaines normes, ils se sont saisis de la pollution ou du réchauffement climatique pour vouloir imposer une société différente. La diminution des émissions ne justifie-t-elle l'interdiction ou la limitation de nombreuses activités ? Ne justifie-t-elle pas l'abandon de notre mode de développement trop consommateur d'énergie et de matière ? Trop technologique ? Trop inégalitaire ? Ne remet-elle pas en cause le niveau même de notre développement ? Des arguments malthusiens resurgissent.

Certes, notre modèle de développement n'est pas exportable tel quel à tous les pays émergents. Mais l'objectif ne peut être de l'abaisser pour permettre à d'autres de l'élever. Si certaines ressources sont finies, la croissance économique et le progrès technologique n'ont pas de limite donnée à l'avance. La poursuite d'un bien-être, d'une protection contre la faim ou la maladie n'ont pas à s'arrêter en Occident pour permettre aux autres nations de les rejoindre. L'objectif qui doit être poursuivi est bien la continuation de notre développement technologique pour être plus économes en énergies non renouvelables et plus économes en ressources. On ne peut vouloir arrêter la croissance ; elle doit être poursuivie avec des technologies non polluantes.

- **Un besoin quotidien pour les Français**

Les sondages menés par les professionnels de l'automobile comme les études menées par les instituts publics de recherche ou de statistiques confirment la place prépondérante de la voiture dans les déplacements des français.

Fin 2003, le Comité des constructeurs français d'automobiles (CCFA) avait commandé un sondage sur la place de l'automobile en France à l'institut TNS Sofres. L'échantillon de 963 personnes interrogées associait de manière quasi unanime - + 80 % - l'automobile à la mobilité, à la facilité de vie au quotidien et à la liberté. A plus de 60 % avec l'innovation, les loisirs et le plaisir. Cependant, cette image était ambivalente puisque 80 % l'associaient aussi à la pollution et au danger et plus de 70 % aux encombrements.

Par ailleurs, depuis 2000, il y a toujours plus de 70 % des personnes interrogées qui estiment que l'absence d'une voiture dans leur foyer manquerait beaucoup. Plus significative encore est l'analyse qui est faite des conséquences de la disparition potentielle de la voiture : perte de temps (89 %), gêne pour les commissions (84 %), perte de confort dans les déplacements (84 %), diminution des sorties (78 %), diminution des sorties en fin de semaine et en vacances (76 %), sentiment d'isolement (71 %), handicap pour le travail (59 %), difficulté de conduite des enfants (48 %). Logiquement, ils sont donc plus de **80 % à estimer la possession d'une voiture indispensable.**

Son usage n'est sans doute pas toujours optimum puisqu'il ressort de ce sondage que dans 78 % des cas, la voiture sert à faire un seul déplacement à partir du domicile, 21 % seulement des déplacements seraient combinés.

Par ailleurs, l'INSEE mène tous les dix ans environ une étude globale sur les transports en Ile-de-France. Pour la dernière étude menée entre octobre 2001 et avril 2002, 10.500 ménages ont été interrogés. La précédente étude avait eu lieu en 1991 et auparavant en 1983 et 1976. Cette enquête a pour but d'appréhender les évolutions de long terme des comportements en matière de déplacements. Elle couvre l'ensemble des trajets et s'adresse à tous les membres de plus de 6 ans des foyers interrogés.

En 2001, les Franciliens ont effectué 35 millions de trajets par jour, soit une progression de 6 % par rapport à 1991. Elle correspond à l'augmentation de la population de 5,9 %. Chaque Francilien a effectué en moyenne 3,5 déplacements par jour. Ce niveau est constant depuis 25 ans.

La marche à pied est le mode de transport qui progresse le plus. Elle représente 34,1 % des déplacements des Franciliens et 46,6 % des déplacements de Parisiens.

En revanche, malgré les investissements publics, la part des transports en commun régresse à 19,4 % contre 20,1 % en 1991. Pourtant, selon le Syndicat des transports d'Île-de-France (STIF), le nombre de places/km offertes a progressé de 66 %. L'une des explications est sans doute la baisse des déplacements entre Paris et sa banlieue, comprise entre 2 et 10 %, alors que les déplacements entre banlieues augmentent entre 9 et 11 %. Or, le réseau de transports en commun ne s'est pas adapté à cette évolution.

La distance des trajets à légèrement augmenté (5 km contre 4,7) pour l'essentiel en automobile en grande couronne.

**L'automobile représente 44 % des déplacements quotidiens, 40 % des trajets entre Paris et la banlieue, 45 % en petite couronne et 60 % en grande couronne.** L'utilisation de la voiture est passée entre 1991 et 2001 de 1,51 à 1,54. Le parc automobile a progressé de 1 % par an, contre 3 %/an entre 1976 et 1983 et 2 %/an entre 1983 et 1991. La grande couronne est à l'origine de 75 % de l'augmentation du parc automobile.

Cette analyse sur la région parisienne a été confirmée par le rapport de la Cour des comptes d'avril 2005 sur les transports publics urbains. La Cour y remarquait que le trafic automobile avait augmenté partout sauf à Paris *intra muros*, où 53 % des ménages n'en possèdent pas.

En dehors des déplacements internes aux agglomérations, il est aussi important de comprendre l'exacte place de l'automobile. C'était l'objet d'une enquête réalisée par la Sofres pour le ministère de l'équipement et des transports en 2004. Elle portait sur les **déplacements, à plus de 100 km** du

domicile, des personnes âgées de 15 ans et plus. Peu d'évolutions sont intervenues depuis 2000. 188 millions de voyages de ce type ont été effectués en 2003, soit 195 milliards de km. **70 % ont été effectués en voiture**, 15 % en train et 6 % en avion. **En termes de kilomètre parcourus, la voiture représente 51 %, l'avion 31 %** et le train 11 %.

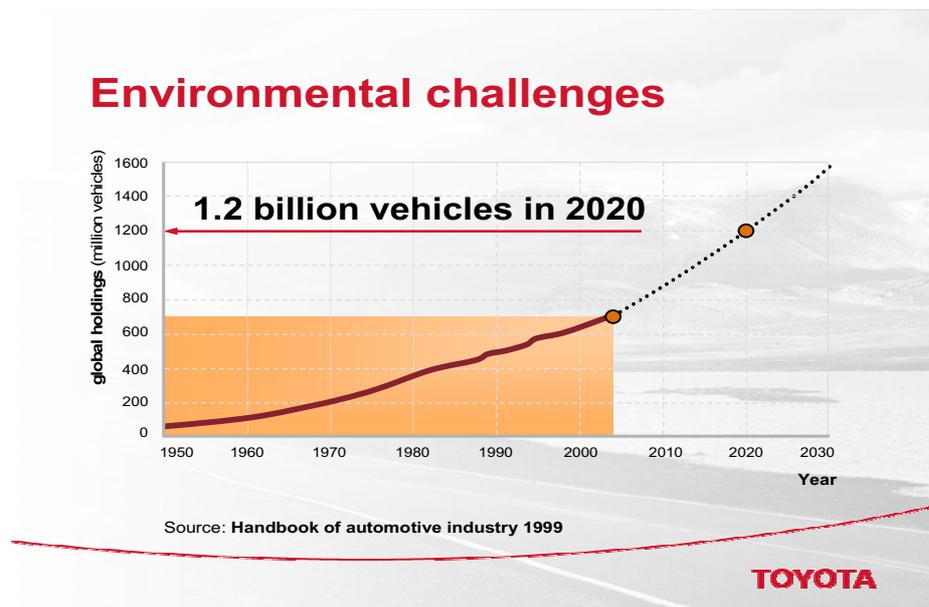
81 % des trajets sont effectués pour des motifs personnels et 19 % pour des motifs professionnels.

Globalement, pour tous les trajets inférieurs à 1.000 km sur une journée, c'est la voiture qui est privilégiée. Elle l'est également pour les voyages de plusieurs jours en famille.

Enfin, il convient de rappeler que l'enquête transport de 1994 menée par l'INSEE et l'INRETS avait montré que **72 % des déplacements en voiture concernaient des déplacements de moins de 100 km. Elle représentait 63 % des déplacements de moins de 80 km en France.**

## ***B. COMMENT RENDRE L'ÉVOLUTION DU MARCHÉ AUTOMOBILE ÉCO-COMPATIBLE ?***

Si la demande d'énergie et la demande de transport vont croissant, il n'est guère surprenant de constater qu'il en est de même de **la croissance du parc automobile. Un doublement est attendu d'ici à 2020.** Les pays émergents souhaitent s'équiper et atteindre les niveaux des pays développés. La demande en moyens de transports individuels est très forte partout dans le monde, quel que soit le niveau de richesse.



Si dans les pays développés le niveau d'équipement est proche de la saturation et que dans certains centres historiques urbains européens on assiste même à la diminution du nombre de ménages possédant une voiture, le parc automobile évolue globalement en qualité, vers plus de confort et plus d'espace, et en quantité.

**Cette évolution, qui paraît elle aussi inéluctable, peut-elle devenir compatible avec le respect des grands objectifs environnementaux ?**

## 1. Le parc automobile français : vers une voiture diesel par individu ?

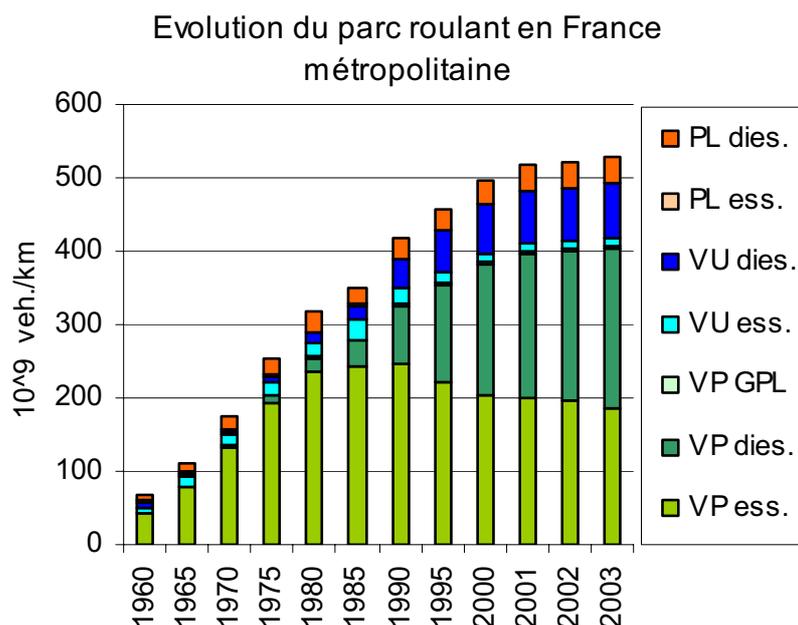
Les taux d'équipement des ménages permettent de connaître le nombre de ménages possédant une voiture et le nombre voitures possédées par ménage. Or , sur ce plan, on constate **le passage d'une voiture pour la famille à une voiture pour l'individu, chaque adulte en âge d'avoir le permis de conduire en possédant une.**

**Progressivement, de 1988 à 1998, le taux d'équipement des ménages est passé de 75 à 80 %. Pourtant proche de la saturation, ce chiffre continue de progresser plus vite que le nombre de ménages. Il s'explique en partie par la croissance de la population, la décohabitation, la périphérisation de l'habitat et de l'emploi et enfin la multimotorisation. Aujourd'hui, sur huit ménages équipés, quatre sont bi ou trimotorisés.**

**Le nombre d'habitants par voiture en France rejoint progressivement le niveau américain : 2,1 habitants par voiture contre 1,7 (chiffre 1998).**

On distingue habituellement deux types de parc automobile :

- le parc statique, soit le nombre de véhicules en service sur le territoire,
- et le parc roulant qui prend en compte l'importance de chacun d'eux en fonction du kilométrage annuel parcouru.



L'évolution du parc de véhicules particuliers en France est bien connue grâce à l'étude annuelle publiée par l'ADEME, qui exploite les données de l'UTAC, et par le rapport annuel du CCFA.

Les caractéristiques du parc roulant français peuvent être appréhendées par le tableau suivant :

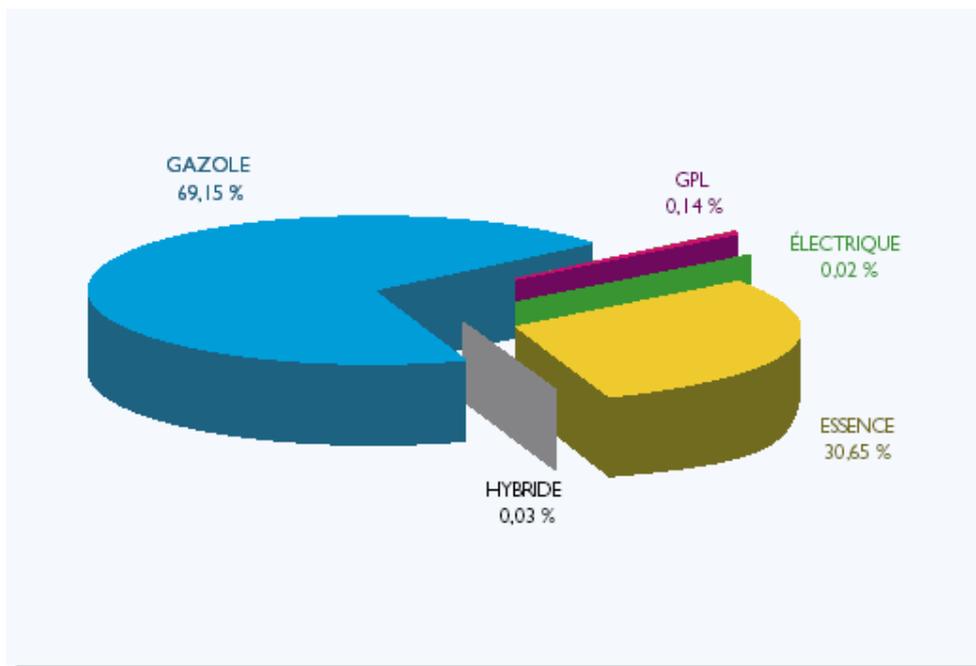
<b>Le parc automobile</b>			<b>Le parc utilitaire</b>		
Parc VP Total million	30		Parc VUL millier	5465	millier
Age moyen (an)	7,6		Parc PL > 5t	557	
Km au compteur	99 530		Bus & Car	82	
<b>Puissance Administrative</b>		<b>%</b>	<b>Km annuel moyen</b>		
4 et 5 Cv	44		VP essence	10 500	
6 et 7 CV	47		VP diesel	17 400	
8 CV et plus	9		VUL diesel	18 300	
<b>Par Gamme</b>		<b>%</b>	<b>Consommations</b>		
Petite	44		VP essence	7,7	l/100km
Moyenne Inférieure	31		VP diesel	6,5	
Moyenne supérieure	17		VUL diesel	9,5	
Haut de gamme	6		Poids lourd	36,5	
Divers	1		Bus & Car	31,5	
<b>Par carburant</b>		<b>%</b>	<b>Consommations</b>		
Super plombé ASR	5		Essence	15 898	Mt
Sans plomb	48		Gazole	36 453	
Gazole	47				
GPL GNV	0,5				

Les immatriculations en 2004 se répartissent de la manière suivante :

<b>Im m a t r i c u l a t i o n V P n e u f</b>		<b>m i l l i o n</b>
Total		2 0 1 3
dont essence		6 2 1
dont diesel		1 3 9 2
<b>Im m a t r i c u l a t i o n V P o c c a s i o n</b>		<b>m i l l i o n</b>
Total		5 4 4 4
<b>im m a t r i c u l a t i o n V U n e u f</b>		<b>m i l l i e r</b>
V U L		4 0 8
P L		4 7
C a r & b u s		4 , 2
<b>Im m a t r i c u l a t i o n P L o c c a s i o n</b>		<b>m i l l i e r</b>
total		7 3

- **Répartition diesel-essence**

En 2004, sur 2.013.709 immatriculations neuves en France, **69,15 % des véhicules vendus sont des diesel**, 30,65 % des essence, 0,14 % des GPL (2.875), 0,03 % des hybrides (669) et 0,02 % des électriques (460).



La progression de la diésélisation est significative puisqu'elle représentait 33 % du marché en 1990. Elle a été quasiment continue depuis lors.

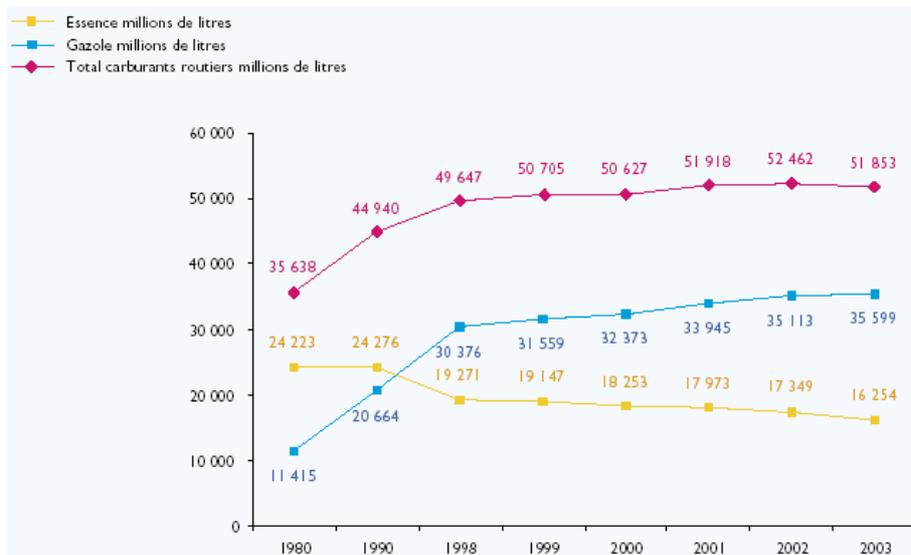


Depuis 1998, le nombre des immatriculations de véhicules GPL ne cesse de décroître. 22 589 véhicules neufs avaient été immatriculés en 1998, contre 2 875 en 2004.

Celui des véhicules électriques reste dans sa fourchette, soit entre 100 et 500 par an depuis 1995.



**L'impact de la diésélisation du parc français se retrouve dans la stagnation de la consommation de carburants.** En effet, le volume d'essence diminue tandis que le volume de gazole consommé ne croît que faiblement malgré l'augmentation des distances parcourues et l'augmentation du parc.



Sur 2004 et 2005, selon le CCFA, on assisterait à diminution de la consommation liée à la poursuite de la diésélisation mais surtout à la politique menée à fin de faire respecter les limitations de vitesse et la hausse du prix des carburants.

- **Vieillessement du parc : une évolution inquiétante pour l'environnement**

En dix ans, de 1988 à 2004, l'âge moyen des véhicules est passé de 5,96 ans à 7,6 ans. Cette évolution se poursuit dans la foulée de l'accroissement de la fiabilité.

- **Vers une stabilisation du kilométrage parcouru ?**

En France, malgré la baisse du kilométrage annuel moyen par véhicule, la moyenne de l'ensemble des VP s'est accrue de 12 % entre 1988 et 1998 en raison de la diésélisation du parc. En effet, un véhicule diesel roule plus qu'un véhicule essence : 18 900 km contre 11 300 km. Or, en 2004, un véhicule diesel roulait 17 400 km et un véhicule essence 10 300. Cette évolution se poursuivra-t-elle dans la durée ? La hausse du prix des carburants continuera-t-elle à avoir cet impact ?

Par ailleurs, malgré cette augmentation, le temps moyen par jour d'usage de la voiture est resté inchangé, soit une heure, en raison de l'accélération des déplacements. Ceux-ci se font par voie rapide et dans un espace périurbain. Le trafic intérieur des VP a d'ailleurs augmenté de 39 % sur cette période (1988-1998).

## **2. Inéluctabilité de la montée en gamme et en puissance ? L'exception française**

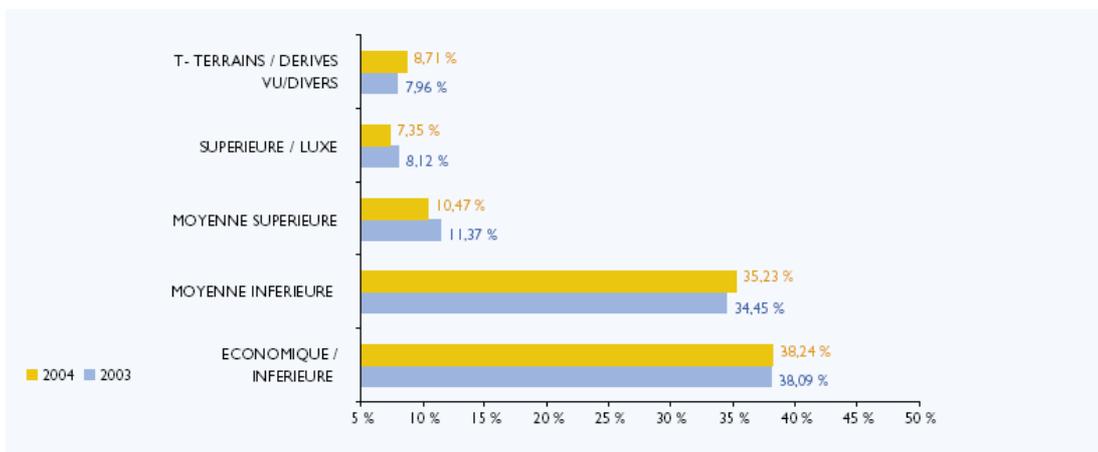
Dans les pays développés (Europe, Japon, États-Unis) la tendance habituellement constatée est à la hausse des modèles de grande taille, puissants et luxueux, dont la principale illustration sont les « *Sport utility vehicles* » américains qui semblent devoir envahir le marché européen.

**Aux États-Unis, les *light trucks* représentaient, en 2003, 54 % des ventes.** Cette tendance très forte semble s'essouffler sous l'effet de la hausse des prix du pétrole. Les acheteurs américains semblent se tourner vers des véhicules moins gros et moins puissants, mettant d'ailleurs en difficulté les constructeurs automobiles américains mais favorisant leurs concurrents asiatiques.

Dans de nombreux pays **d'Europe, la culture de la grande berline est beaucoup plus forte qu'en France.** Vos rapporteurs ont été frappés, au cours de leurs missions au Royaume-Uni et en Allemagne, de constater que le marché français était bien plus vertueux que les marchés de nos deux principaux partenaires. Ces deux pays connaissent des niveaux d'émissions de CO<sub>2</sub> beaucoup plus élevés en raison d'un marché automobile tourné encore majoritairement vers l'essence (Royaume-Uni) et vers les grosses berlines.

Ces remarques sont également vraies pour les pays du nord de l'Europe. Il est certain que l'influence des constructeurs nationaux est importante. Si Renault et Peugeot, comme Fiat en Italie, sont les pionniers des petits véhicules économes produits en grande série, les constructeurs nationaux britanniques, allemands et suédois apparaissent plus comme les meilleurs représentants de la puissance, du confort et du luxe automobile.

**En France**, en 2004, le marché a confirmé sa tendance depuis plusieurs années. **Le segment économique/inférieur représente 38,24 % et le segment moyen inférieur 35,23 %**. Ainsi ces deux classes sont en augmentation et représentent plus de 70 % du marché.

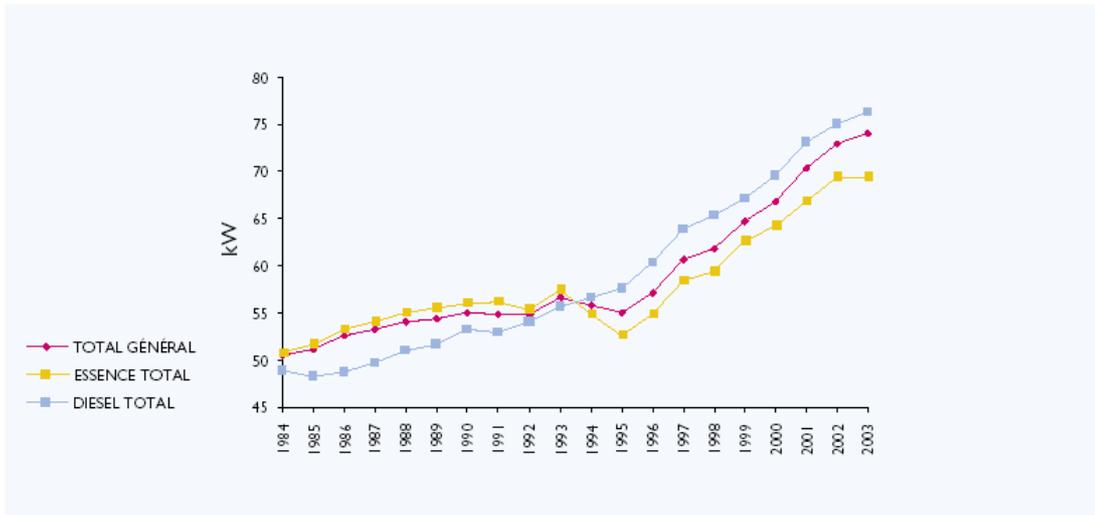


Les évolutions les plus sensibles se font sentir dans les trois autres classes : moyenne supérieure, supérieure/luxe et tous terrains/SUV. Les deux premières sont en régression au profit des gammes inférieures et **des SUV qui représentent désormais 8,71 % du marché**.

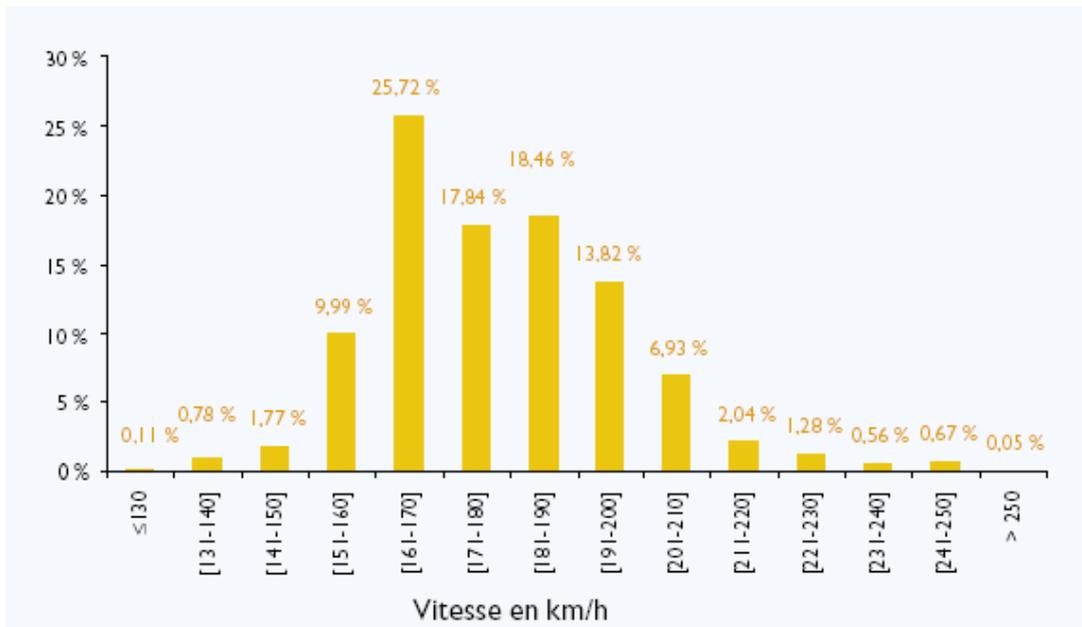
- **Évolution du rapport masse-puissance**

Le rapport annuel de l'ADEME permet aussi de bien mesurer l'évolution des caractéristiques des véhicules qui influent le plus sur leur consommation et sur leurs émissions de polluants : la masse et la puissance.

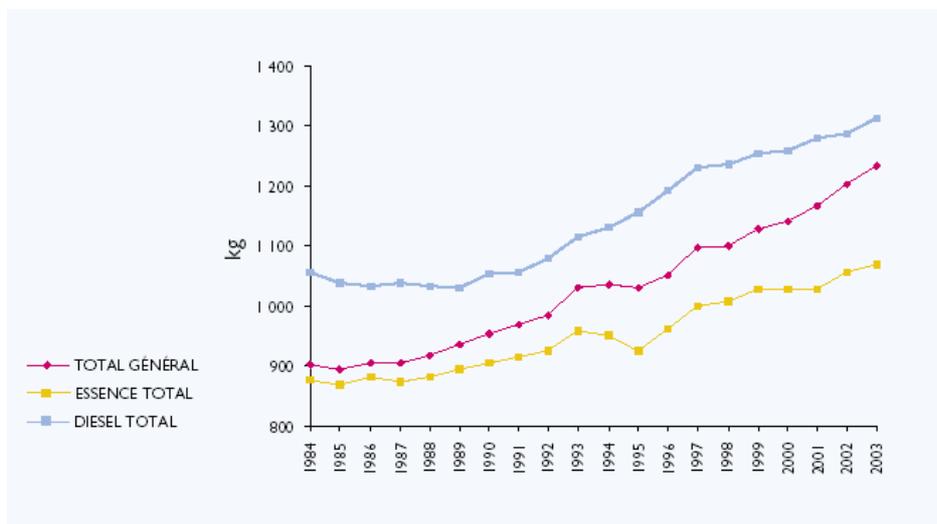
Depuis 1984, **la puissance moyenne (kW) des véhicules a augmenté de 38 %**.



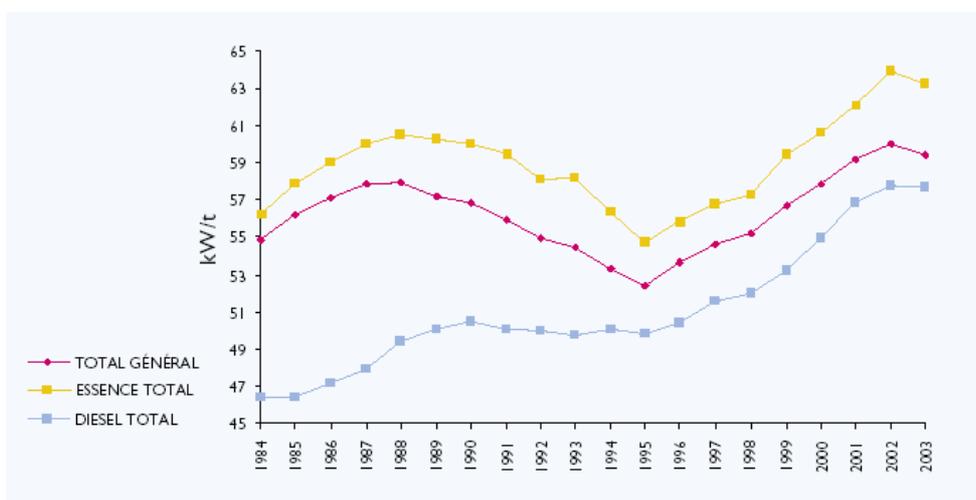
L'augmentation de la puissance des véhicules se traduit aussi par l'augmentation du nombre de véhicules vendus ayant la capacité de rouler au-delà de la limitation de vitesse. L'ADEME retient que 12 % seulement des voitures vendues ont une vitesse maximale inférieure à 160 km/h. Plus des quatre cinquièmes des véhicules vendus disposent donc d'une puissance très supérieure à ce qui serait strictement nécessaire. Il n'existe quasiment plus de véhicules vendus ayant une vitesse maximale inférieure à la limitation de vitesse sur autoroute en France (0,11 %).



Par ailleurs, **la masse des véhicules ne cesse d'augmenter depuis 1984, 15 kg/an en moyenne**, en raison de l'amélioration de la sécurité et du confort des véhicules mais aussi de l'installation de dispositifs anti-pollution.



L'augmentation du poids étant plus rapide que l'augmentation de la puissance des véhicules, l'ADEME relève pour la première fois depuis 1995 une diminution de la puissance massique (kW/t).



Pour vos rapporteurs, **l'examen attentif du marché français est plutôt encourageant puisque les Français s'orientent vers des voitures beaucoup moins puissantes et polluantes que leurs homologues européens.** Il reste néanmoins à être vigilants et à poursuivre sur cette tendance, la demande de confort et de sécurité étant très forte et malheureusement peu compatible avec la sobriété des véhicules.

### **3. La sécurité et le confort sont-ils compatibles avec les économies d'énergie ?**

La sécurité et le confort sont des demandes légitimes des consommateurs auxquelles les constructeurs cherchent à répondre, comme d'ailleurs les législateurs nationaux et européens, en adoptant de nouvelles normes. **Il est néanmoins nécessaire de prendre conscience de leur impact en termes de poids notamment, ou de consommation d'énergie, et donc de consommation et de pollution.**

- **L'impact des nouvelles normes et de la demande de confort**

Les nouvelles normes antipollution et la demande croissante de confort des consommateurs ont un impact direct sur l'augmentation de la consommation des véhicules ; elles limitent d'autant les économies d'énergie et notamment l'ampleur des améliorations entreprises par les constructeurs sur les motorisations.

M. Pierre Beuzit, directeur de l'ingénierie de Renault l'indiquait très clairement à vos rapporteurs :

<b>Les émissions de CO<sub>2</sub> (constructeurs européens)</b>				
	1995	1998	2003	2008
Moyenne	186 g/km	178 g/km	161 g/km	140 g/km
Renault	181	170	148	
<b>1998-2003</b>				
Effet marché :	+ 8,5 g/km	gain global : 26,4 g/km (- 15 %)		
Effet réglementation :	+ 0,9 g/km			
<b>2004-2008</b>				
Effet marché :	+ 3,5 g/km	gain à faire : 29,3 g/km (- 18 %)		
Effet réglementation :	+ 4,8 g/km			

Plus précisément à l'horizon 2008, l'évolution de la réglementation et de la para réglementation (ex : EuroNcap) se traduit par une augmentation des émissions de 4,7 g/km, soit concrètement par les évolutions suivantes :

Évolution des rétroviseurs	0,75
Normes choc piéton	0,50
EuroNcap	1,50
EURO IV	1,35
Particules (incitations)	0,6
<b>Total</b>	<b>4,7 g/km</b>

Cette évolution moyenne, déclinée sur deux modèles de la gamme Renault, a un impact direct sur l'augmentation du poids et de la consommation :

	Mégane 1 > Mégane 2	Clio 1 > Clio 2
Sécurité	+ 51 kg <sup>(1)</sup>	+ 62 kg
Dimensions	+ 36	+ 10
Acoustique	+ 20	+ 18
Prestations client	+ 25	+ 21
<sup>(1)</sup> Rappel	+ 10 kg	+0,9 gCO <sub>2</sub> /km

- **Allumer les phares en plein jour : sécurité contre effet de serre ?**

A l'exemple des pays du nord de l'Europe ou de la Hongrie, la France a récemment expérimenté, pour des raisons de sécurité routière, l'allumage des feux de croisement en plein jour. Cette mesure avait pour but, en facilitant la visibilité des véhicules, d'éviter des collisions sur la route, donc des blessés et morts supplémentaires. Mais une telle mesure, *a priori* favorable en termes de sécurité routière, était-elle neutre en termes de consommation et donc de production de gaz à effet de serre et de réchauffement climatique ?

A bord des automobiles, le courant électrique est fourni par un alternateur qui est entraîné par le moteur et qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. L'alternateur est classiquement constitué d'un *rotor*, entraîné par le moteur, en fait un électroaimant, qui tourne au centre d'un *stator*, un anneau fait de bobinage de cuivre. Le mouvement de rotation du rotor produit un champ magnétique qui permet la production d'électricité et recharge la batterie. Cependant, plus l'énergie électrique demandée est importante, plus l'alternateur est sollicité. Le champ magnétique freine les mouvements du rotor de telle sorte que pour fournir plus d'électricité, il faudra plus d'énergie et donc plus de carburant à vitesse constante.

Ainsi, mécaniquement, **l'allumage des feux entraîne une surconsommation. Celle-ci est toutefois difficile à estimer précisément car elle varie en fonction du carburant et des besoins électriques du véhicule. Selon l'ADEME, elle varierait de 0,09 litre aux 100 km pour un diesel à 0,3 litre pour fournir 100 Watts. Valeo donne une estimation moyenne de 0,2 l/100 km<sup>1</sup>.**

---

<sup>1</sup> Chiffres cités par Science & Vie, sept. 2005, p.132-133.

Plus généralement, c'est l'ensemble des dispositifs de sécurité ou de confort, paraissant aujourd'hui indispensables, qui nécessite une puissance électrique toujours plus importante à bord des véhicules : feux de croisement 110 W, projecteurs anti-brouillard 110 W, lunette arrière chauffante 200 W, calculateurs du moteur et pompe électrique de carburant 250 W, chauffage additionnel électrique 1.000 W<sup>1</sup>.

#### 4. La voiture mono-usage est-elle vouée à l'échec ?

Attentifs aux évolutions du marché automobile, aux évolutions réglementaires et aux demandes des consommateurs, vos rapporteurs ont aussi cherché à comprendre **si le développement d'un véhicule plus spécialisé ne pourrait pas permettre d'optimiser les véhicules et leur usage réel.**

En effet, beaucoup des détracteurs de l'automobile reprochent l'inadéquation entre l'objet et le besoin réel des consommateurs. **Pourquoi utiliser un véhicule fait pour 5 personnes ou plus, permettant de rouler à 150 km/h ou plus pendant des centaines de kilomètres alors que la plupart des automobilistes sont seuls dans leur voiture pour un trajet quotidien aller/retour toujours identique de quelques dizaines de kilomètres au plus ? Pourquoi en outre posséder une voiture alors même que son usage peut en être limité aux fins de semaines et aux vacances en famille ? Comment concevoir dans l'avenir un véhicule adapté aux besoins permettant d'être protégé des accidents et des intempéries ?**

A ces questions récurrentes, il a été souvent répondu par le développement de véhicules plus spécialisés adaptés non pas à tous les usages mais à quelques-uns seulement. On peut penser aux voitures de sport, aux cabriolets, mais aussi aux petites citadines.

Parmi celles-ci, **le modèle le plus abouti en termes de recherche de compacité et de performance environnementale est la Smart For Two.** En effet, parmi les véhicules à essence et selon les motorisations, elle est classée 3<sup>e</sup> (113 g CO<sub>2</sub>/km), 5<sup>e</sup> (116), 6<sup>e</sup> (118), 8<sup>e</sup> (120) et 9<sup>e</sup> (121) par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie). **Parmi les véhicules diesel, elle s'est classée 1<sup>ère</sup> (90 g CO<sub>2</sub>/km) et 2<sup>e</sup> (95).**

Ce véhicule est particulièrement compact. Il n'a que 2,5 m de long, ne comporte que deux places et un petit coffre. Ses motorisations sont des 3 cylindres spécifiquement adaptés et sobres. **Les moteurs essence sont bridés électroniquement entre 135 et 150 km/h. Le moteur diesel ne consomme que 3,4 l aux 100 km en usage mixte, c'est-à-dire le même niveau que l'objectif affiché par le Gouvernement pour le véhicule familial des années 2010.**

---

<sup>1</sup> *Mémento de technologie automobile Bosch 2002.*

Imaginée par Nicolas Hayek, l'inventeur de la Swatch, la Smart *For Two* est produite depuis juillet 1998 par le groupe Daimler Chrysler. 750 000 voitures ont été vendues à ce jour. Les ventes sont en hausse constante, 80 000 en 1999, 150 000 en 2004. Mais les objectifs initiaux étaient de 200 000 par an. La société a toujours été déficitaire.

L'échec commercial de la Smart s'explique sans doute en partie par son positionnement haut de gamme (entre 9 et 12 000 € neuve) mais également par son côté avant-gardiste. La Smart crée elle-même son propre marché, celui d'une **voiture spécifiquement urbaine adaptée à des ménages possédant déjà plusieurs voitures ou ayant pris l'habitude de louer un plus gros véhicule lorsqu'ils en ont besoin**. Or ces ménages semblent encore peu nombreux et concentrés dans quelques métropoles (Paris, Rome, Copenhague...).

**La société occidentale reste très marquée par l'idée de posséder une voiture dimensionnée en fonction du plus grand dénominateur – les usages exceptionnels plutôt que quotidiens. L'évolution est très lente.**

D'autres constructeurs ont cherché à en tirer les enseignements en proposant de très petites voitures, plus polyvalentes et moins chères, comme les C1, 107, Aygo ou Twingo. Les capacités d'emport sont plus importantes (5 places), ainsi que les capacités routières. Dès lors elles peuvent être à la fois la 1<sup>ère</sup> voiture d'un célibataire ou la 2<sup>e</sup> d'un couple. Elles sont plus faciles à vendre et à revendre à l'occasion.

Vos rapporteurs estiment qu'en l'état actuel du marché automobile, **les consommateurs ne sont pas prêts à se tourner vers une voiture dédiée à la ville qui permettrait par la même occasion de limiter fortement les pollutions, mais ils constatent une lente évolution qui permettra peut-être dans les prochaines années une évolution des comportements.**

### ***C. LA PERTINENCE DES OBJECTIFS DE RÉDUCTION DE LA POLLUTION ET DE LA PRIORITÉ ACCORDÉE À LA TECHNOLOGIE***

Face à ces défis : consommation croissante d'énergie, demande toujours plus forte de mobilité, de confort, de sécurité, des mentalités encore peu sensibilisées à un usage raisonné de la voiture, vos rapporteurs se sont interrogés sur les actions les plus susceptibles d'accélérer la mise sur le marché de véhicules plus propres permettant d'atteindre les objectifs globaux de réduction des émissions. Les actions réglementaires et coercitives à l'encontre des conducteurs ayant notamment pour objectif de leur faire abandonner leurs voitures étaient-elles les seules pertinentes ? Les objectifs ambitieux que se sont fixés la France et l'Europe peuvent-ils être atteints par d'importantes évolutions technologiques ?

Ces questions peuvent être utilement éclairées par l'étude menée sur les transports dans l'arc alpin par l'OCDE. Vos rapporteurs se référeront ici à l'analyse de cette étude rédigée par Bernard Chateau, directeur de l'ENERDATA SA, et Alain Morcheoine, directeur de l'air et du bruit de l'ADEME.

#### **1. L'étude réalisée sur l'arc alpin à l'horizon 2030**

L'étude menée sur les transports dans l'arc alpin est très novatrice et particulièrement intéressante puisque cette région est très vulnérable et que sa configuration géographique rend la gestion des transports complexes et peu sujette à d'importantes modifications. **La pollution atmosphérique dans les vallées est bien souvent aussi importante que dans les grands centres urbains** du fait de l'encaissement et de la météorologie. **Les densités de population y sont aussi comparables** puisque très peu de zones sont réellement habitables (13 % seulement au Tyrol par exemple). L'espace utile est peu important et doit être affecté à de multiples usages dont les transports représentent une bonne part. Il est d'ailleurs fréquent que toutes les voies de communication, quel qu'en soit le mode (train ou route), empruntent le même itinéraire. En outre, l'arc alpin reliant deux des zones les plus développées d'Europe (Italie du Nord et bassin rhénan) les échanges y sont très importants et concentrés sur quelques itinéraires souvent congestionnés.

Cette étude a donc été menée, à partir de 1994, par le groupe de prévention et contrôle de la pollution de l'OCDE, au sein duquel la France, l'Autriche, la Suisse et l'Italie ont été étroitement associées.

Pour établir des « *transports écologiquement viables* », l'OCDE a établi six critères majeurs pour l'année 2030, fondés sur des considérations de santé publique, de grands équilibres écologiques et d'équité sociale :

- critère relatif au CO<sub>2</sub> : réduction des émissions pour stabiliser la concentration de GES au niveau de 1990. Le total des émissions imputables aux transports ne devrait pas dépasser 20 % des émissions totales de 1990.

- critère relatif aux dioxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et aux composés organiques volatils (COV) : le total des émissions de NO<sub>x</sub> et de COV liées aux transports ne devrait pas dépasser 10 % au total des émissions du transport en 1990.

- critère relatif aux particules : la réduction des émissions de particules fines (inférieure à 10 microns) serait de 90 % en 2030 par rapport à 1990.

- critère relatif au bruit : une réduction du bruit lié aux transports à un niveau égal ou inférieur à un maximum de 55 dB en période diurne et de 45 dB en période nocturne et à l'intérieur des habitations.

- critère relatif à l'emprise au sol : une réduction, par rapport à 1990, des espaces urbains et non urbains consacrés aux infrastructures de transport.

Cette étude a été menée à partir du résultat à atteindre. Une approche téléologique a été retenue car les prévisions ne peuvent se fonder uniquement sur les phénomènes contemporains, les objectifs ne pouvant être atteints que par des discontinuités, voire des ruptures de tendance. Chateau et Morcheoine citent cette définition de la méthode suivie : « *La caractéristique des analyses de type backcasting - téléologiques - est de se préoccuper, non pas du futur susceptible de se produire, mais de quelle façon les futurs souhaitables peuvent être atteints. Elle est ainsi explicitement normative et suppose de travailler à rebours d'une situation particulière future souhaitable vers le présent afin de déterminer la faisabilité physique de ce futur, ainsi que les décisions politiques qui seraient exigées pour atteindre ce point* ».

Ainsi, dans l'étude sur l'arc alpin, cinq étapes ont été suivies :

- \* définition des objectifs par rapport aux effets sur l'environnement ;
- \* description du système actuel de transport ;
- \* analyse de différents scénarios ;
- \* analyse des impacts des différentes solutions pour obtenir une cohérence entre objectifs, moyens et résultats ;
- \* détermination des mesures à prendre.

Évidemment, la construction de ces scénarios pose un certain nombre de difficultés. Dans le cadre d'un scénario tendanciel ne remettant pas en cause les relations en croissance économique et demande de transport, se pose tout de même la question des phénomènes de saturation susceptibles d'apparaître. Il y en a essentiellement deux : la saturation des infrastructures, spécifiques à l'arc alpin, et plus généralement celle de l'équipement en automobile des ménages.

Pour les scénarios non tendanciels c'est-à-dire écologiquement viables, il est nécessaire d'intégrer des ruptures de comportement ou des ruptures technologiques dont l'ampleur n'est pas toujours facile à évaluer. Certains scénarios envisagent par exemple que 60 % du parc automobile pourraient être électriques, alimentés par une pile à combustible (PAC).

**Quatre scénarios** ont été finalement élaborés pour évaluer la viabilité de transports écologiquement soutenables : un scénario tendanciel dit « *laisser-faire* », insoutenable écologiquement parlant mais permettant d'étalonner les autres, trois scénarios visant à décrire le champ des solutions possibles et les options des décideurs politiques.

Deux grandes options sont en réalité envisageables : la technologie et la gestion de la demande. Le premier scénario ne se fonde que sur la technologie (TEV 1), le second que sur la gestion de la demande (TEV 2), et le 3<sup>e</sup> est une combinaison des deux précédents (TEV 3).

## **2. Les deux tiers de la solution sont technologiques**

L'examen de ces différents scénarios a permis de donner une indication du modèle de solutions mixtes possibles dans les transports.

**Le scénario du laisser-faire mène le système de transport très au-delà de la viabilité écologique.** Les émissions de CO<sub>2</sub> seraient 6 fois supérieures à l'objectif (30 % au dessus du niveau de 1990 en 2030), celles de NOx trois fois, celles de COV, comme de particules, au moins deux fois, malgré des progrès significatifs sur le filtrage des émissions (y compris filtres à particules et pièges à NOx) et des voitures moins consommatrices (moyenne de 5 l/100 km).

Le scénario technologique décrit comment les objectifs peuvent être atteints par la seule amélioration des technologies existantes de transport et le développement de moteurs moins polluants. Il s'agit, dans une certaine mesure, d'une « *utopie technologique* ». Il est néanmoins construit, compte tenu du temps de pénétration dans le parc automobile, sur des technologies commercialisables en 2015 et généralisables en 2030.

**L'étude montre la viabilité d'un scénario tout technologique.** Mais Chateau et Morcheoine relèvent trois problèmes principaux :

- **l'objectif de réduction de CO<sub>2</sub> est très difficile à atteindre et suppose une contribution majeure des voitures électriques alimentées par une PAC dont l'hydrogène serait produit sans CO<sub>2</sub>.** Cela supposerait non seulement la viabilité de cette technologie mais aussi des investissements massifs et rapides pour la production d'hydrogène soit dans la capture du CO<sub>2</sub> soit dans l'électricité nucléaire.

- le développement du trafic serait difficilement conforme avec l'objectif de réduction de l'emprise des infrastructures de transport.

- l'objectif de réduction du bruit serait également très difficile à atteindre.

**Le scénario reposant sur la gestion de la demande de transport montre comment l'objectif peut être atteint grâce à la réduction de la demande de transport et la modification de la répartition modale des trafics en faveur de modes non polluants (rail, voie d'eau, transport en commun, vélo, marche à pied).** Une telle évolution exigerait des changements structurels importants.

Un tel scénario pose toutefois plusieurs problèmes majeurs :

- il nécessite *« un énorme changement des comportements, des mentalités et des priorités sociales, dont on peut douter de la réelle acceptabilité sociale et politique »*.

- il nécessite de *« modifier profondément les schémas d'urbanisation et d'aménagement du territoire vers une densité plus forte, en particulier dans les grandes agglomérations [...] Les distances quotidiennes de voyages devraient être massivement réduites pour correspondre aux distances de marche/vélo et les zones d'habitation/travail/shopping devraient se concentrer le long des itinéraires de transport en commun »*.

- l'objectif de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> reste cependant le plus difficile à atteindre. Il exigerait en particulier **un transfert très important de la route vers le rail.** Cela nécessiterait en outre une électricité supplémentaire sans CO<sub>2</sub>. Une telle évolution rendrait très difficile le respect de l'objectif de réduction de l'emprise des infrastructures et de réduction du bruit.

**La viabilité écologique peut, enfin, être atteinte en combinant inflexions de la demande de transport et ruptures technologiques, c'est le troisième scénario.**

La réalisation de ce scénario nécessiterait une coopération internationale. **Il nécessiterait également un développement important d'une production sans CO<sub>2</sub> d'électricité.** Il serait néanmoins possible d'atteindre les objectifs avec des véhicules fonctionnant avec des PAC et des reformeurs embarqués et non de l'hydrogène direct. **Un développement important des infrastructures ferroviaires** est inévitable. De même, **les mentalités, les comportements et priorités sociales devront changer.** Des **transformations dans l'urbanisation** devront être opérées.

Selon l'étude de l'OCDE, **les efforts à faire sont aux deux tiers technologiques** (66 % pour la France). **Le reste des progrès doit être accompli à hauteur de 13 % par une réduction de la demande de transport, à 11 % par substitution modale** et à 11% par un meilleur facteur de charge des mêmes modes de transport.

Ce scénario **n'impose pas de révolution** dans la demande de transport puisque **la croissance de trafic envisagée par rapport à 1990 est de 50 % pour les marchandises et 60 % pour les passagers.** Les reports vers le fer n'imposent pas de recul de la route mais un développement possible des infrastructures spécifiques.

Ce scénario imposerait trois grandes catégories de mesures :

- limiter la croissance du volume de transport par rapport au scénario de laisser-faire ;
- influencer un changement de mode de transport vers des modes moins polluants.
- réduire les effets négatifs des véhicules.

Le pouvoir politique devrait dès lors recourir à **un ensemble d'outils visant à internaliser les coûts externes des transports, fixer des normes d'émissions conformes aux objectifs, mobiliser les fonds pour mettre à disposition des modes de transports moins polluants, associer le secteur privé, éduquer le public et investir dans la recherche.**

En définitive, cette étude, si elle ne peut être considérée comme valable pour tout le système des transports permet de donner des indications très importantes.

**Des objectifs très ambitieux, tels que ceux définis par l'OCDE dans cette étude, ne sont pas inatteignables et insoutenables économiquement parlant.** Les moyens techniques, économiques et institutionnels actuels ou prévisibles doivent permettre de les atteindre.

De plus pour y parvenir, **il n'y a pas une solution mais plusieurs, ouvrant aux décideurs politiques et au débat démocratique un champ réel de possibilités et de choix.**

Chateau et Morcheoine estiment que « *l'étude montre qu'on ne passe pas à un tel monde écologiquement viable par une révolution du monde d'aujourd'hui, mais par une orientation différente des choix futurs [...]* C'est le Lyon-Turin plutôt que le doublement du tunnel routier du Mont Blanc. C'est le pari industriel de la PAC plutôt que la crispation sur le moteur à combustion interne. C'est le développement systématique des tramways et des nouveaux services de transport plutôt que celui des nouvelles rocades et autres voies urbaines rapides ».



## **II. L'INDISPENSABLE ÉCOBILAN DE LA VOITURE SUR SON CYCLE DE VIE**

Après avoir analysé le contexte général dans lequel se posent les questions de pollution automobile, tout particulièrement l'évolution de la demande énergétique et de transport dont les liens avec la croissance de l'économie sont très forts, puis l'évolution du marché au regard de l'objectif d'une voiture moins polluante et plus économe, et enfin les grands types de solutions possibles et le caractère réaliste d'une option essentiellement technologique, vos rapporteurs souhaitent examiner plusieurs aspects de l'écobilan du véhicule.

En effet, il ne peut être question d'envisager la voiture au cours de sa seule période d'utilisation ou dans un seul lieu. Comme ils l'ont d'ores et déjà souligné, le véhicule électrique présenté comme l'idéal serait, dans bien des pays du monde, plus polluant qu'une voiture diesel moderne. Il en est de même de nombreux véhicules à pile à combustible qui circulent aujourd'hui, comme vos rapporteurs ont également pu le constater dans leurs missions.

C'est pourquoi, avant d'aborder spécifiquement les technologies et les carburants permettant de réduire la pollution locale et les émissions de gaz à effet de serre, ils souhaitent prendre en compte les questions relatives à l'analyse du cycle de vie, la notion de fabrication écologique et enfin le recyclage des véhicules.

## ***A. L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE LA VOITURE SUR SON CYCLE DE VIE***

**L'analyse du cycle de vie (ACV) sert à évaluer objectivement l'impact d'un produit sur l'environnement et ce tout au long de son existence, depuis l'extraction des matières premières qui servent à sa fabrication jusqu'à son élimination finale, en passant par son utilisation.** Outil de mesure de l'impact final d'un produit sur l'environnement, elle est destinée à optimiser le processus de fabrication en définissant les conditions les plus favorables. Elle doit permettre d'éviter des phénomènes de déplacement de la pollution au cours du cycle de production et d'utilisation.

**C'est un outil indispensable pour développer des stratégies de développement durable.**

Son utilisation se généralise à la suite d'une longue histoire de définition et de concertation.

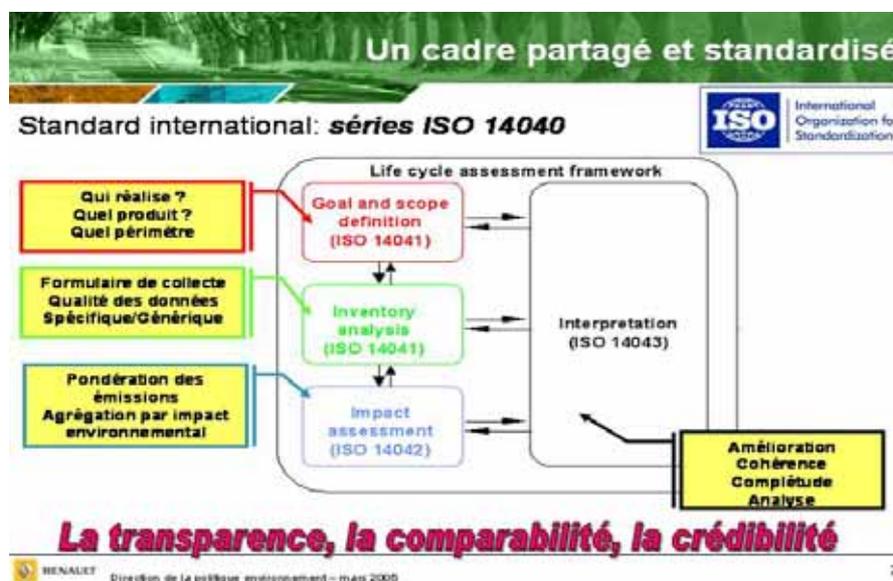
<b>Période</b>	<b>Phase</b>	<b>Evènements</b>
1960-1990	Approche bilan matière, bilans énergétiques dans l'industrie	Chocs pétrolier Crises industrielles Evolution de la réglementation environnementale
1988-1991	Phase d'initiation	Développement des systèmes de management environnemental Premiers bureaux d'études spécialisés en ACV
1991-1995	Phase d'apprentissage	Directive sur le traitement et la valorisation des déchets d'emballages Lancement des ACV pour la grande industrie (énergie, acier/aluminium, papier/ plastiques) Eco-Labels. Premières controverses publicitaires
1995-2000	Phase de normalisation	Systématisation des certifications ISO 14001 de l'EMAS et des rapports environnement. Groupe de travail ISO sur les normes 14040. Edition des premières normes. Utilisation de l'ACV en appui technique préréglementaire.
>2000	Période d'usage banalisé	Comptabilité effet de serre Application de l'IPP et Eco-conception Déclaration environnementale systématisée.

**Académie des Technologies – Les Analyses de Cycle de Vie**

***(Didier Gauthier, Hervé Mazéas, Henri Lecouls)***

Les industriels japonais semblent avoir, en la matière, une réflexion plus poussée que les constructeurs européens. Cela s'explique sans doute par **l'impulsion donnée par le ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie (METI) en 1998 dans le cadre du projet national dédié à l'ACV. Il a permis la constitution de la plus grande base de données au monde<sup>1</sup>.** L'objectif a d'abord été d'établir des écobilans sur de nombreux produits et de mettre ses éléments à disposition de l'industrie.

Cette démarche ACV fait l'objet **d'une réglementation internationale de qualité, dite ISO 14001, et de la série 14040** visant à standardiser le périmètre d'investigation, les informations à recueillir sur les intrants, la pondération des émissions et l'agrégation des données, ainsi que les normes d'interprétation.



Cette méthode peut s'appliquer à l'automobile et permet de connaître les parts respectives de la fabrication, de l'usage et de la destruction des véhicules.

## 1. L'analyse par cycle de vie : une généralisation indispensable

Vos rapporteurs ont eu sur ce sujet des entretiens particulièrement intéressants avec les constructeurs Renault Nissan et Toyota.

<sup>1</sup> *Technologies internationales*, n°109, novembre 2004, « Les avancées de l'analyse du cycle de vie au Japon », Françoise Strasser et rapport « La méthode d'analyse du cycle de vie », service pour la science et la technologie de l'ambassade de France au Japon, Olivier Georgel.

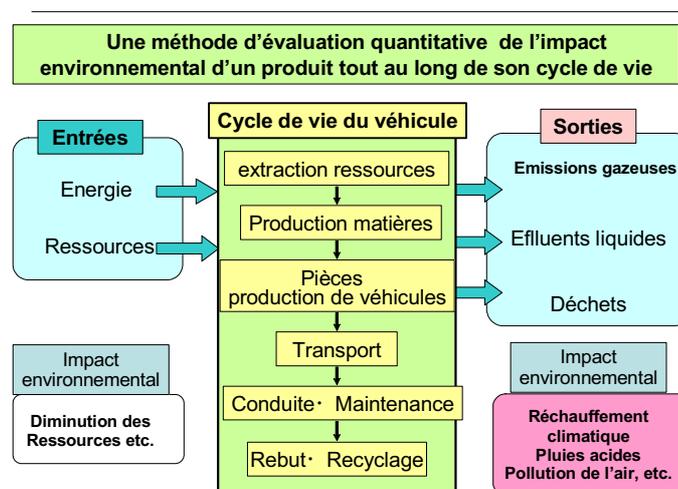
- **L'analyse du cycle de vie chez Toyota**

Chez Toyota, l'analyse du cycle de vie est devenue l'outil de référence pour le pilotage environnemental des futurs véhicules. Il doit permettre à l'ingénieur responsable d'un projet de mettre en œuvre les outils susceptibles de réduire l'impact écologique d'un nouveau véhicule.

Toyota indique prendre en compte sa responsabilité environnementale de constructeur automobile et mesurer l'impact de chaque étape de la vie d'un produit.

L'analyse du cycle de vie a été mise en place à partir de 1997 pour les modèles à motorisation essence du marché japonais. Depuis 2005, un second programme, dit Eco-VAS (eco-vehicule assessment system), vise à élargir le champ d'application et de trouver des solutions plus opérationnelles.

Pour y parvenir, Toyota cherche donc à appréhender l'ensemble des composants et des impacts de chaque produit et de chaque étape conduisant à la fabrication, à l'usage et à la destruction d'un véhicule.



Source : Toyota, W. Tomboy, mars 2005.

L'objectif est de parvenir à disposer des données nécessaires à un bilan coût/avantage pour choisir les meilleures options techniques.

**A partir de 2005, Toyota souhaite étendre progressivement le procédé Eco-VAS à l'ensemble de sa gamme.** Une telle évolution ne peut se faire que par étapes car il est nécessaire de disposer d'une très grande quantité de données, y compris historiques, sur les modèles précédents. Cette nouvelle contrainte environnementale doit également être intégrée dans les nouveaux projets de conception de véhicule au côté des critères habituels de

performance, de coût et de satisfaction des besoins des consommateurs. Elle doit ensuite pouvoir se traduire de manière concrète et opérationnelle, à travers des objectifs identifiés et atteignables, dans le processus de design, prototypage et fabrication, comme un des éléments de perfectionnement. **Au final, il s'agit de fournir au consommateur une information environnementale complète et accessible.**

**En Europe, la nouvelle Yaris est le projet pilote** du procédé Eco-VAS. Par rapport au modèle actuel, il s'agit d'étudier le différentiel d'impact dû au changement de certains éléments et d'analyser les données sur la composition des matériaux et les pièces externalisées. Cela implique donc un important travail avec les sous-traitants. Sont particulièrement pris en compte la consommation d'énergie et les émissions de polluants, mais aussi le poids des pièces. Ces recherches vont très loin puisque est, en outre, comptabilisé le processus de production, y compris l'éclairage ou l'air conditionné de l'usine. Sur les pièces externalisées, les investigations portent sur 95 % du poids total des pièces.

Toyota se place donc dans le cadre de la politique du produit intégré (IPP – integrated product policy) qui consiste, selon l'Agence européenne de l'environnement, en une amélioration de l'efficacité économique et environnementale des produits. Elle est fondée sur la prise en considération des impacts des produits sur l'ensemble de leur cycle de vie, depuis l'extraction des ressources naturelles dont ils sont issus, en passant par leur usage, jusqu'à leur mise au rebut comme déchet.

Il s'agit aussi d'anticiper les préconisations de la Commission européenne<sup>1</sup>, qui souhaite que cette conception se traduise par des mesures concrètes en termes de prix, de demande et d'offre. Dans les prix devraient être intégrés le principe du pollueur payeur, une fiscalité environnementale et enfin la responsabilité du producteur. Au niveau de la demande et de l'offre, une labellisation environnementale doit guider, à terme, les consommateurs, des déclarations environnementales des produits devront être mises à leur disposition et les achats publics devront être plus écologiques.

- **L'analyse du cycle de vie chez Renault Nissan**

L'audition d'experts de Renault a également permis à vos rapporteurs de constater que ce constructeur était très avancé dans la mise en oeuvre progressive de ce nouveau concept sur l'ensemble de sa gamme et de ses sites de production.

---

<sup>1</sup> *Green paper on IPP, Com (2001) 68.*

En effet, il est évidemment particulièrement difficile, pour un constructeur automobile qui assemble un produit extrêmement complexe et à longue durée de vie, d'arriver à prendre en compte de manière convenable tous les éléments de la filière.

**L'inventaire des intrants est sans doute l'étape la plus exigeante car elle doit être exhaustive. Elle ne peut se faire sans utiliser des données génériques et sans utiliser des règles type d'allocation.** Pour une matière première, doivent être examinées l'énergie et la pollution de l'extraction, de la fabrication, de l'utilisation et du traitement en fin de vie : émissions atmosphériques, aqueuses, déchets solides, coproduits, rejets divers.

De la même manière, les émissions de la production, de l'utilisation et de la fin de vie d'une véhicule sont examinées au regard de leur impact sur : le réchauffement climatique, les pluies acides, l'eutrophisation, la création d'ozone photochimique mais aussi de l'épuisement des ressources naturelles, de la quantité de déchets ou de substances toxiques.

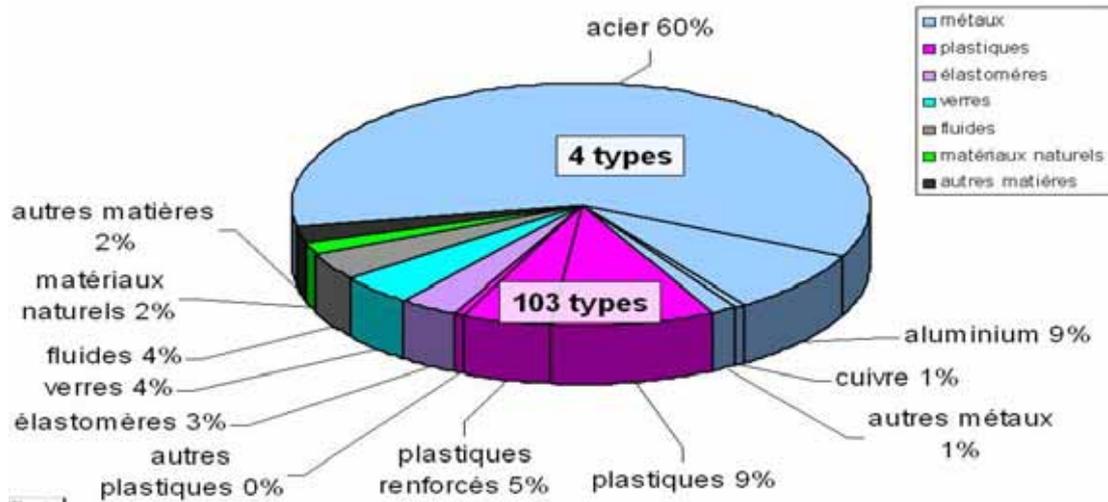
Pour Renault, comme pour Toyota, malgré l'extrême complexité de cette démarche, l'outil ACV permet, tout en s'appuyant sur une norme internationale, de **définir les voies d'un progrès continu, de quantifier les bénéfices écologiques, d'améliorer la prise de décision et de communiquer efficacement vers les consommateurs.**

En effet, il est l'outil d'un management global de l'environnement : les sites industriels de production, les achats et les fournisseurs, la logistique, l'ingénierie, le recyclage et la recherche.

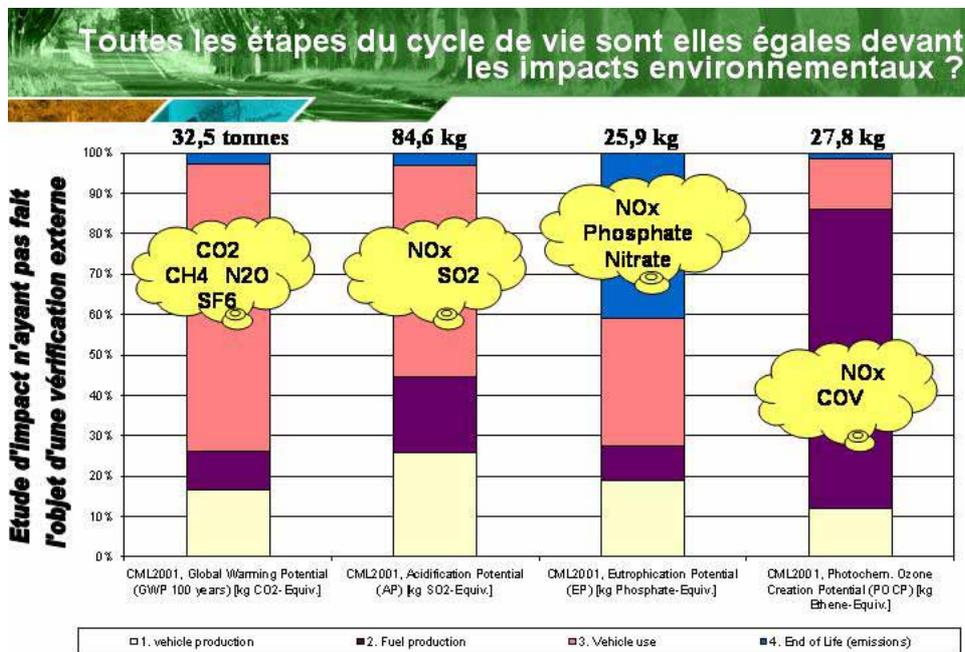
Pour y parvenir, Renault a conclu plusieurs partenariats depuis 2002, avec Elf sur les huiles biodégradables, EUCAR (association de sept constructeurs) pour le recyclage, Plastic Omnium pour les pièces des véhicules, l'ENSAM de Chambéry sur les matériaux renouvelables, et plus généralement la Commission européenne pour la définition des analyses des moteurs et des carburants du puits à la roue.

Cette démarche a été expérimentée sur la Scenic II 1,5 dCi 120 CV. Elle a permis de prendre en compte les différents fournisseurs, les usines de Douai, Cléon et Cacia (Portugal) et la logistique du groupe. Ce sont, dans cet exemple, 3 200 pièces réparties en 360 fonctions qui ont été analysées.

Cela a permis d'aboutir à un « *bilan matières* » de la composition de la Scenic II :



Cela permet également de connaître l'impact des principaux composants d'une voiture en matière d'effet de serre :

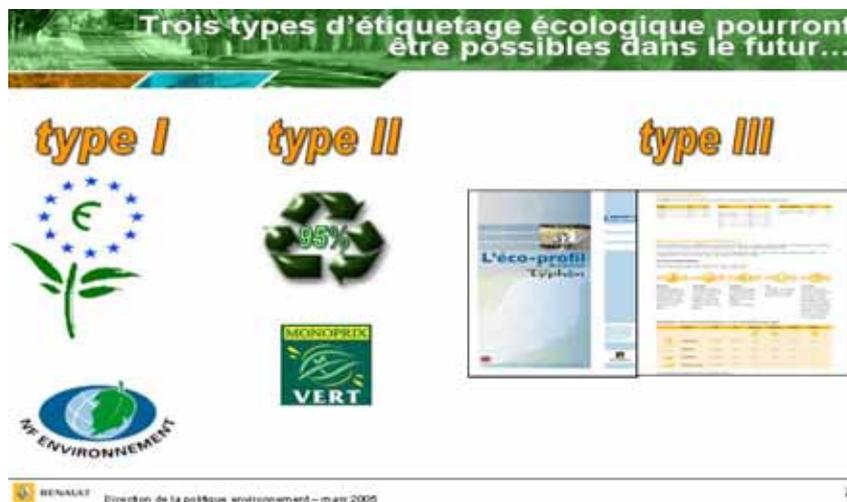


Au-delà même de ces bilans indispensables pour la gestion industrielle même de l'entreprise, l'un des objectifs importants est bien de communiquer en direction du public.

Renault a d'ores et déjà mentionné cette démarche sur son site Internet. Il présente plusieurs éléments de ses différentes voitures ([www.developpement-durable.renault.com](http://www.developpement-durable.renault.com)).

**Vos rapporteurs estiment que, dans l'avenir, l'objectif doit être de donner aux acheteurs une information fiable, comparable et rapidement compréhensible.**

Aujourd'hui, existent en Europe comme au Japon des étiquetages écologiques certifiés de type I, II et III. Le label dit de type III a pour objectif de fournir aux consommateurs des informations standardisées sur un produit. A titre indicatif, le type II correspond à des déclarations ne relevant que de la responsabilité du fabricant ou du distributeur et ceux de type I des signes officiels de reconnaissance de certains avantages environnementaux.



Au Japon, en avril 2002, a été lancé par le METI et la JEMAI<sup>1</sup> le **label «eco-leaf<sup>2</sup>»**, symbolisé par une feuille d'arbre verte. Il est fondé essentiellement sur la norme ISO 14001. Le label est constitué de trois parties :

- la **PEAD** (product environmental aspect declaration), rassemblant les informations essentielles sur le produit et incluant un récapitulatif de l'évaluation de l'impact du cycle de vie ;

- la **PEIDS** (product environmental information data sheet), présentant les aspects complets de l'évaluation de l'impact du cycle de vie avec des données chiffrées ;

- la **PDS** (product data sheet), présentant les informations essentielles de la PEIDS.

**Vos rapporteurs estiment que seule la démarche d'analyse du cycle de vie est à même de permettre un véritable écobilan des véhicules.**

**Sa généralisation progressive au niveau industriel est indispensable en France et en Europe pour un management environnemental efficace.**

Son objectif doit être aussi de **guider l'achat d'un véhicule par un consommateur en lui fournissant une information fiable, exhaustive et facilement compréhensible et comparable.**

Vos rapporteurs **soutiennent l'innovation que constitue la création d'une étiquette énergie** pour les voitures neuves en 2006 (cf. partie IV) **mais la jugent insuffisante** car elle ne concerne que les émissions de CO<sub>2</sub>.

Les consommateurs doivent pouvoir disposer d'informations synthétiques complètes pour guider leur choix.

L'analyse du cycle de vie est à même, dans le futur, d'apporter ces informations à partir des déclarations produits de type III.

C'est pourquoi **vos rapporteurs proposent qu'en coordination avec les constructeurs, la France propose à la Commission européenne la création d'un indicateur synthétique à l'horizon 2010 pour les modèles de conception nouvelle mis sur le marché à partir de l'analyse du cycle de vie.**

---

<sup>1</sup> *Japan environmental management association for industry.*

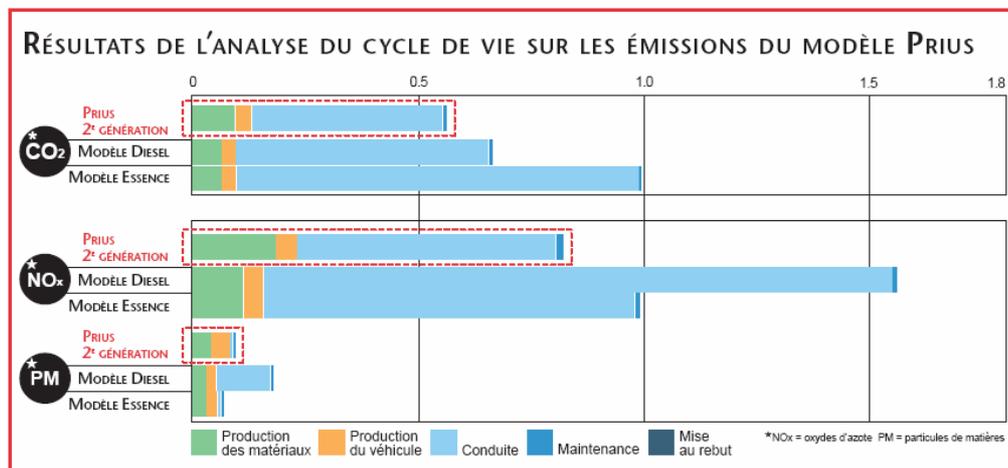
<sup>2</sup> *Eco-feuille.*

## 2. Les parts respectives de la fabrication, de l'usage et du recyclage

L'analyse du cycle de vie permet de comparer un modèle par rapport à un autre et de connaître l'importance relative, en termes de consommation d'énergie et de rejets, des principales phases de vie d'un véhicule.

- Les avantages de la Toyota Prius au regard de l'ACV

Ainsi, Toyota a pu établir une comparaison des émissions entre sa Prius de 2<sup>e</sup> génération et un modèle diesel et un modèle essence de sa gamme.



\* Pour le CO<sub>2</sub>, la comparaison est établie par rapport à l'indice 1 pour un modèle essence.

Ainsi, cette comparaison met en lumière le gain très net que représente la Prius en matière d'émissions de CO<sub>2</sub>, de NO<sub>x</sub> et de particules sur son cycle de vie, compensant très largement les émissions plus élevées nécessaires à sa fabrication et, dans une moindre mesure, à son recyclage.

En effet, l'usage est de très loin la phase la plus importante. La phase de recyclage est quasiment négligeable.

- **L'impact de la Scenic au regard de l'ACV**

L'analyse menée par Renault sur les émissions de la Scenic II aboutit à des résultats concordants (durée de vie de calcul de 150.000 km).

**En matière d'effet de serre, l'utilisation de la voiture et la production du carburant représente plus de 70 % du total des émissions.** Il en est de même en matière de NOx et de SO<sub>2</sub>, à l'exception d'impacts spécifiques (potentiel d'eutrophisation et d'ozone photochimique).

Ainsi, s'il est bien entendu nécessaire de veiller aux réductions d'émission lors des phases de production et de recyclage, **c'est bien lors de l'usage du véhicule que l'essentiel se joue**, du fait de la conception et de l'équipement du véhicule.

## ***B. L'ÉCOFABRICATION DES VOITURES***

La première étape de vie d'une voiture est sa conception et sa fabrication. C'est dès ce stade que doit être prise en compte la nécessité de minimiser son impact sur l'environnement.

### **1. Écoconception : matériaux, légèreté, démontabilité...**

L'écoconception du véhicule est devenu un impératif pour les bureaux d'études et les industriels comme pour les sous-traitants. Elle touche tous les éléments de la voiture.

Sans avoir ici un développement exhaustif sur le sujet, il est intéressant de relever quelques exemples représentatifs. **Les objectifs sont l'allègement, la réduction des coûts, l'isolation thermique, mais aussi la simplification et la démontabilité pour préparer le recyclage.**

- **Les métaux**

Les métaux (acier pour l'essentiel) représentent une part très importante du poids d'une voiture : **40 % de son poids moyen** et 90 % de celui de la caisse en blanc (ossature du véhicule). C'est un secteur clef pour les progrès à accomplir en termes d'écoconception.

**Pour les aciers**, Arcelor a mis au point, dans son centre de recherche de Montataire (Oise), un matériau spécial destiné aux capots, pavillons, hayons, portes et ailes, permettant un **allègement de 20 à 40 %**. Il s'agit de structures dites « *sandwich Usilight* »<sup>1</sup>. Ce matériau est constitué de deux parements en acier revêtu au zinc et d'une âme en polymère capable de supporter les températures atteintes lors de la cataphorèse<sup>2</sup>. Il s'agit donc de panneaux colaminés combinant la facilité de formage et de mise en peinture de l'acier avec la résistance aux petits impacts du polymère.

Dans le domaine **des alliages d'aluminium**, Alcan poursuit des recherches pour mettre au point des matériaux susceptibles d'apporter des allègements plus importants que les aciers spéciaux tout en restant compétitifs en termes de coût. En effet, l'aluminium est cher, difficile à travailler et à réparer, nécessite un équipement spécifique des concessions et ne concerne

---

<sup>1</sup> *Industries et technologies*, n°870, septembre 2005, Michel Le Toullec.

<sup>2</sup> *La cataphorèse est une technique de peinture qui consiste à immerger la pièce dans un bain de peinture hydrosoluble, en mettant la pièce en cathode, d'où le nom de cataphorèse, et en faisant migrer les particules de peinture en suspension dans le bain au moyen de courant électrique, de l'anode vers la cathode. Les particules se déposent en une fine couche uniforme, 20 microns. Cette technique permet le traitement intérieur des pièces. La peinture est ensuite cuite.*

donc que des voitures haut de gamme (Audi A8 et A2, Jaguar XJ...) ou des pièces interchangeables sur les modèles communs. Sont notamment étudiés des intérieurs de porte **allégés de 45 %** grâce à l'utilisation de tôles en alliage d'aluminium soudées par friction. L'un des défis de l'aluminium est aussi de s'intégrer à des carrosseries en acier, seules quelques pièces étant en aluminium. Alcan travaille ainsi dans son centre de recherche de Voreppe (Isère), sur un alliage d'aluminium, de silicium et de magnésium qui ne se déforme pas lors du recuit de la mise en peinture.

Des recherches sont en cours sur le **magnésium**, 36 % plus léger que l'aluminium. Son utilisation pose encore de nombreux problèmes : tenue à la corrosion et à l'abrasion, mise en forme. Il pourrait être utilisé dans les moteurs pour former des alliages plus légers.

- **Les plastiques**

Si l'utilisation des plastiques n'a pas progressé fortement ces dernières années en pourcentage de la masse des véhicules, les recherches se poursuivent pour utiliser des plastiques recyclés (cf. ci-dessous) ou leur permettre de remplacer des pièces plus lourdes.

C'est le cas notamment du **polycarbonate** qui pourrait remplacer progressivement l'ensemble des vitres des automobiles. Exatec, filiale de Bayer et General Electric, a mis au point un matériau dont la production doit prochainement commencer en République tchèque. **L'objectif est de réduire le poids de 50 % par rapport au verre.**

Cependant, ces matériaux doivent démontrer leur capacité à résister aux frottements et intempéries tout au long de la durée de vie d'un véhicule. Ils doivent également être aussi performants que le verre en termes d'isolation phonique. *Last but not least*, ils ont aussi l'obligation de pouvoir se briser en cas d'accident pour permettre le sauvetage des passagers et leur désincarcération.

- **L'électronique embarquée**

L'électronique embarquée des voitures modernes nécessite de la puissance électrique mais aussi un important câblage, estimé en moyenne entre 1 et 2 km de long et pesant 50 kg. Sur les voitures haut de gamme, le nombre de calculateurs peut être supérieur à 80 et celui des fils électriques à un millier. Les puissances de calcul ont été multipliées par 2.000 en 20 ans. Une Peugeot 607 a une puissance de calcul 100 fois supérieure à un Airbus A 300 lancé en 1975.

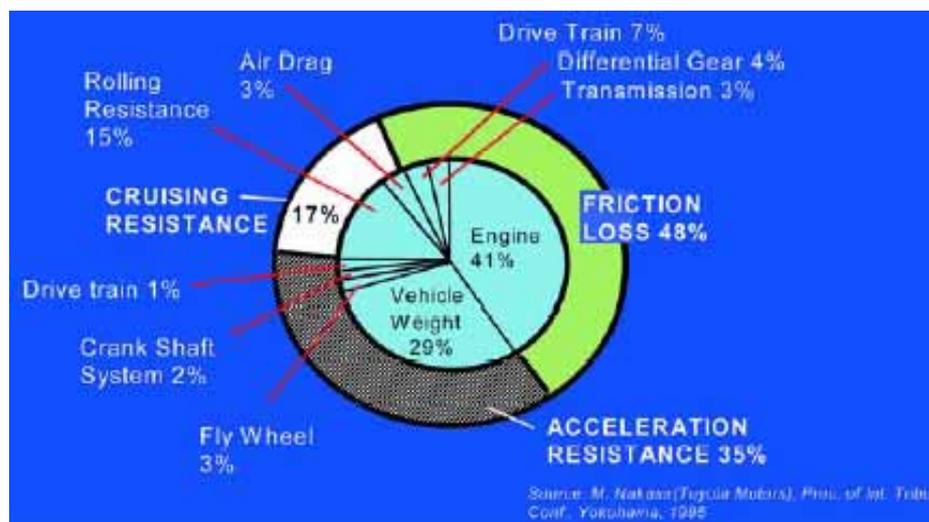
Depuis le milieu des années 1980, le multiplexage s'est développé dans l'automobile (CAN – *controller area network* - chez BMW). Il est

constitué de fils transportant l'énergie électrique et de fils transportant les données. Il a permis des progrès significatifs, mais est aujourd'hui dépassé.

Il est envisagé d'une part l'utilisation de courant porteur, et d'autre part un nouveau système de multiplexage plus rapide et efficace baptisé « *Flex Ray* ». Ce nouveau système doit permettre de fusionner les différents réseaux, séparés aujourd'hui, en place dans une voiture. Il doit entrer en application à partir de 2008.

- **Les revêtements des pièces mobiles pour réduire les frottements**

Pour améliorer les performances en termes de consommation et d'émissions, l'allègement n'est pas la seule voie possible. De nombreuses recherches sont effectuées **sur la réduction des frottements dans les moteurs, qui représentent 41 % des pertes d'énergie.**



Les pistons représentent la part principale (44 %) de ces frictions internes, c'est pourquoi les chercheurs du CEA de Grenoble travaillent sur le revêtement des pistons des moteurs. Ils parviennent ainsi à revêtir les parties les plus exposées des pistons de couches microscopiques de métaux ou d'alliages présentant autant de durabilité mais moins de résistance au frottement que l'aluminium. Des revêtements nanostructurés ou par projection d'électrons sont aussi étudiés.

- **L'isolation thermique**

L'isolation thermique des véhicules est un autre grand défi partout où les systèmes de climatisation se sont développés, en raison de l'impact de ces dispositifs sur la consommation.

De nombreux travaux sont menés sur ce sujet et progressivement introduits sur le marché. Vos rapporteurs ont notamment pu prendre

connaissance des recherches et des expériences menées sur ce sujet à l'université de Berkeley (Californie) par la division des technologies environnementales. Ces chercheurs ont expérimenté le **rétrofitage complet d'une Ford Taurus de 1999** avec pour objectif de réduire de 70 % ses besoins de chauffage ou de refroidissement par l'utilisation de systèmes d'isolation.

Des isolants en aluminium avec des cellules vides en nids d'abeille emprisonnant de l'air, ne craignant pas l'eau, extrêmement légers et flexibles, ont été mis au point. Ces cellules peuvent aussi emprisonner des gaz rares (xénon, krypton, argon) selon la performance souhaitée, les meilleurs résultats ayant été obtenus avec du xénon. L'intérieur de la voiture a ainsi été presque totalement tapissé de ce matériau.

En outre, les vitres ont été modifiées. Elles ont été équipées d'un double vitrage de polycarbonate ou d'acrylique. Les deux parois, celle en verre et celle en plastique, ont été revêtues à l'intérieur d'un revêtement limitant l'impact du rayonnement solaire.

**Le résultat final s'est avéré supérieur aux objectifs puisque le besoin de refroidissement a été réduit de 75 % et celui de réchauffement de 85 %.**

- **La conception de pièces en vue du recyclage**

Deux exemples, celui d'un bouclier de la Renault Mégane et d'un amortisseur d'une Renault Espace IV, illustrent une démarche désormais répandue dans l'industrie automobile pour atteindre les objectifs fixés au niveau européen.

Pour **le bouclier de la Renault Mégane**, cinq étapes successives sont identifiées par le constructeur pour l'intégrer dans un cycle vertueux prenant en compte l'impact environnemental :

- **Connaître et choisir les matériaux** : 99 % en polypropylène dont plus d'un tiers en matière recyclée, une innovation de Renault développée avec Plastic Omnium.

- **Évaluer la capacité** de la pièce à être recyclée en utilisant l'outil de cotation I.R.F (indice de recyclage de la fonction). Le bouclier a obtenu 80 sur 100.

- **Intégrer la recyclabilité dès la conception** :

- \* en supprimant des fixations métalliques pouvant détériorer les couteaux des broyeurs,
- \* en choisissant des matériaux séparables par des procédés de tri post-broyage,

\* en permettant aux acteurs du recyclage de démonter le bouclier en 2 minutes.

- **Travailler en collaboration avec les acteurs du recyclage** pour que le bouclier puisse être réutilisé, par exemple sous forme de granulés pour refaire de la matière.

- **Capitaliser cette expérience** pour faire progresser la conception des futurs véhicules.

Dans le cas d'un amortisseur d'une Renault Espace IV, la démarche est équivalente :

- Connaître et choisir des matériaux : 82 % acier, 11 % d'huiles, 7 % de plastiques et de caoutchouc (famille des polymères et des élastomères).

- Évaluer la capacité d'extraire le fluide. Les concepteurs utilisent l'I.R.F. La fonction d'extraction des fluides de l'Espace IV a obtenu 76 sur 100.



Source : Renault, Alice de Brauer, 2005

- **Intégrer la recyclabilité dès la conception en signalant le point de perçage pour les recycleurs** (marquage en blanc sur la photo) pour extraire l'huile en moins de 2 minutes.

- Travailler avec les acteurs du recyclage pour que le fluide puisse être recyclé dans les filières huiles, l'amortisseur soit broyé et suivre ensuite la filière des résidus de broyage.

- Capitaliser cette expérience.

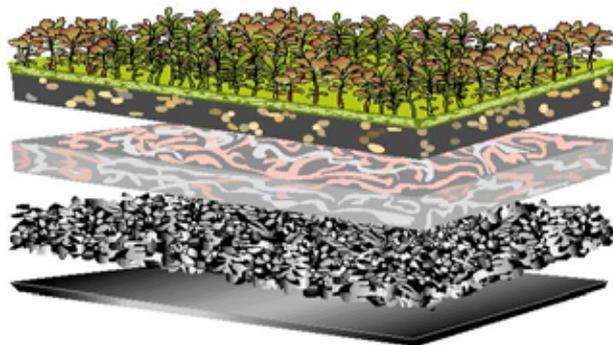
## 2. Écofabrication : le bilan environnemental des usines

Après l'étape de conception, l'étape de fabrication du véhicule en usine est importante et fait l'objet d'une réelle attention des constructeurs. Vos rapporteurs en ont recueilli plusieurs exemples.

- **L'usine Ford de Rouge**

Lors de leur mission aux États-Unis, ils ont pu visiter **l'usine Ford historique de Rouge**, à Dearborn, près de Detroit (Michigan).

Cette usine est devenue l'un des laboratoires les plus aboutis au monde d'une installation industrielle respectant son environnement. Notamment, le toit de l'usine d'assemblage final de Dearborn est **le plus grand toit vivant du monde** (454 000 pieds carrés). Il permet de collecter et de filtrer l'eau de pluie grâce à des plantations adaptées, des matériaux poreux et des citernes. Il réduit l'impact de réchauffement de l'usine en réduisant les surfaces bétonnées, il réduit également de 5 % les besoins de chauffage et de climatisation. Sa durée de vie doit être deux fois plus importante qu'un toit d'usine classique.



Ce schéma montre les différentes couches de ce toit vivant :

- le sedum poussant sur un substrat composé de craie, de sable, de tourbe, de composte et de dolomite,
- une laine artificielle destinée à absorber l'eau et nourrir les plantes,
- une couche de drainage,

- une membrane résistante aux racines pour protéger le toit proprement dit.

Parmi les autres innovations du site, Ford a mis en place **un recyclage des composés organiques volatiles (COV) présents dans les émanations de peinture**. Ces composés sont habituellement capturés et brûlés permettant une réduction de 95 % des émissions, mais ce procédé d'élimination est coûteux en gaz naturel et conduit à émettre du CO<sub>2</sub>. Un prototype a été mis en place au début 2003 permettant de concentrer ces gaz, puis de les réformer en un gaz riche en hydrogène. Enfin, ce gaz est filtré et utilisé **pour faire fonctionner une pile à combustible** afin de produire de l'électricité et de l'eau chaude. Ce système pilote permet **d'éliminer 99 % des émissions tout en produisant de l'énergie**.

Ce projet est aujourd'hui expérimental mais l'objectif de Ford est d'aboutir à une réduction de 20 % des coûts par rapport au système conventionnel, soit 100 000 \$ d'économie d'énergie, mais également 1.600 teCO<sub>2</sub>/an. Si ce système était étendu à toutes les usines Ford, l'économie serait de 10 MkW/h.

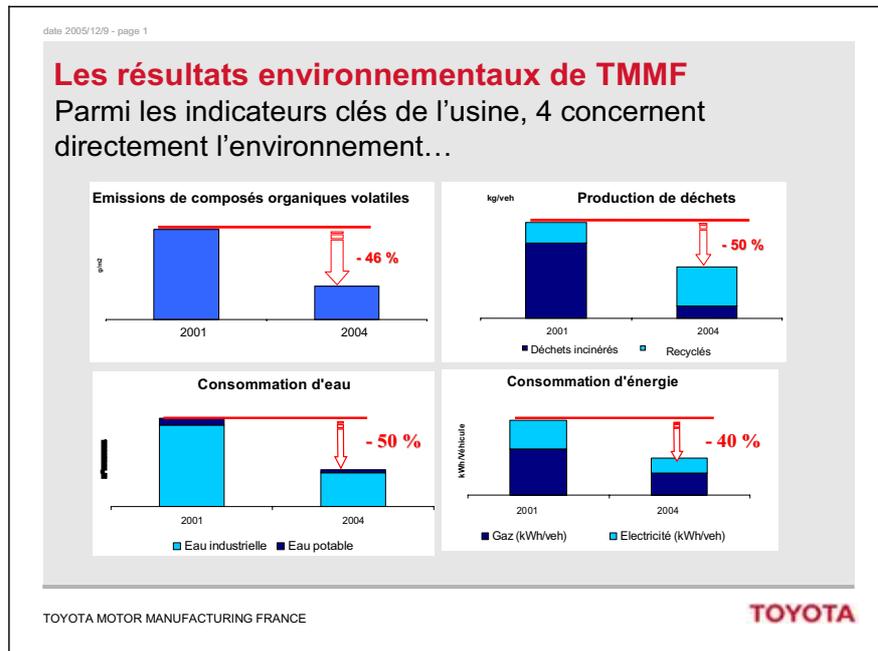
- **L'usine Toyota de Valenciennes**

L'usine Toyota de Valenciennes a été conçue selon le concept « *green clean & lean factory 21* », c'est-à-dire une usine du 21<sup>e</sup> siècle, respectueuse de l'environnement, propre et performante.

Ce concept comprend plusieurs facettes :

- l'intégration dans le paysage : plantations, compacité des installations et faible hauteur, préservation des espaces naturels environnants ;
- l'utilisation des nouvelles technologies de traitement des rejets : incinérateur, station d'épuration, osmoseur ;
- l'optimisation de la consommation d'énergie.

Ces options générales sont traduites en objectifs internes de réduction de la consommation d'énergie, des déchets, de la consommation d'eau et de rejets de COV.

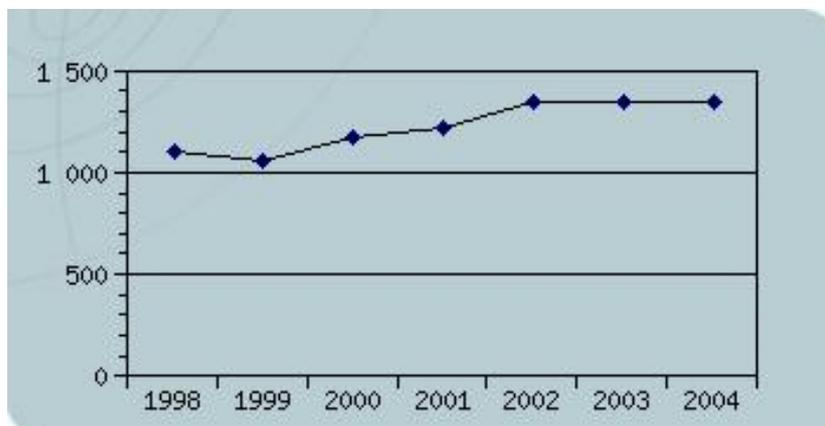


L'ensemble du management environnemental de l'usine fait l'objet d'une certification ISO 14001 obtenue en mars 2002.

- **L'usine « George Besse » de Douai**

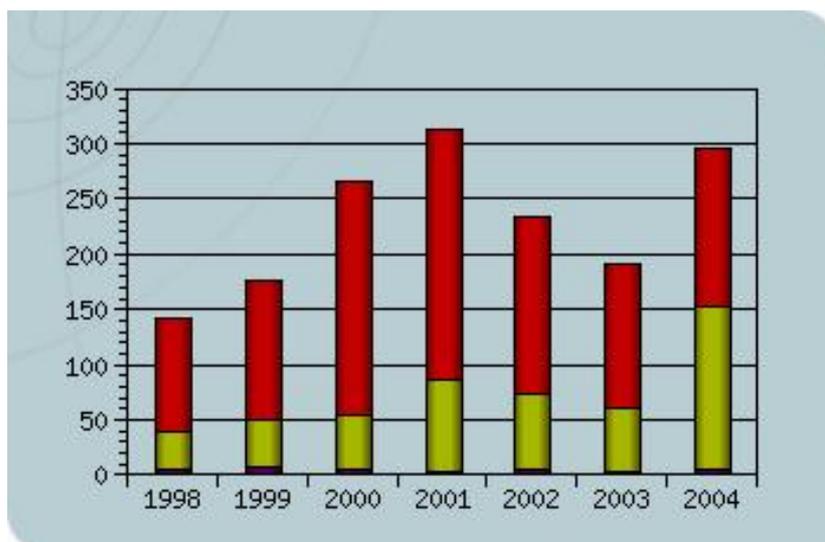
Le site Renault de Douai est **certifié ISO 14001 depuis 1999**. Cette certification engage le constructeur à un audit de certification chaque année et à une amélioration continue des processus. Elle engage également l'industriel à un tenir un tableau de bord de ses consommations et de ses rejets. Pour l'usine « George Besse », les résultats sont les suivants (Source, Alice de Brauer, Renault, septembre 2005) :

- Consommation d'eau en milliers de m<sup>3</sup> :



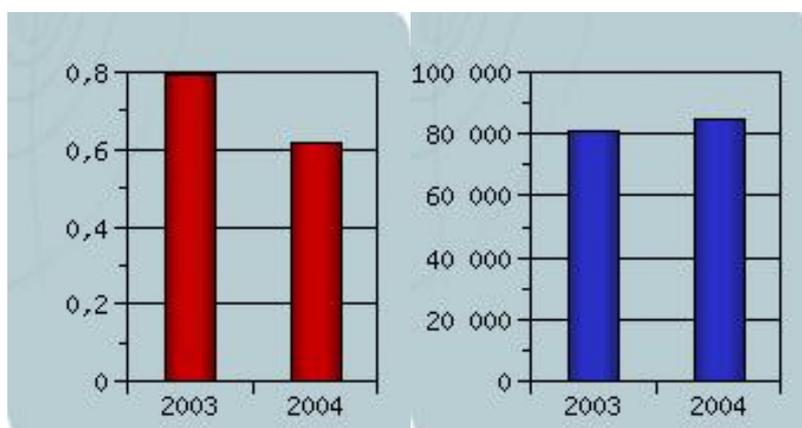
La consommation en eau ramenée au véhicule produit est passée de 4,2 m<sup>3</sup>/véhicule en 1996 à 2,9 m<sup>3</sup>/véhicule en 2004. Le volume d'eau prélevé est sensiblement identique à celui de 2003, avec une production de 23 % supérieure. La quantité d'eau potable consommée a diminué de 5.000 m<sup>3</sup> en 2004.

- Rejets liquides (métaux toxiques en kg/jour – noir -, matières en suspension en kg/j – vert -, matières oxydables en kg/j – rouge-) :

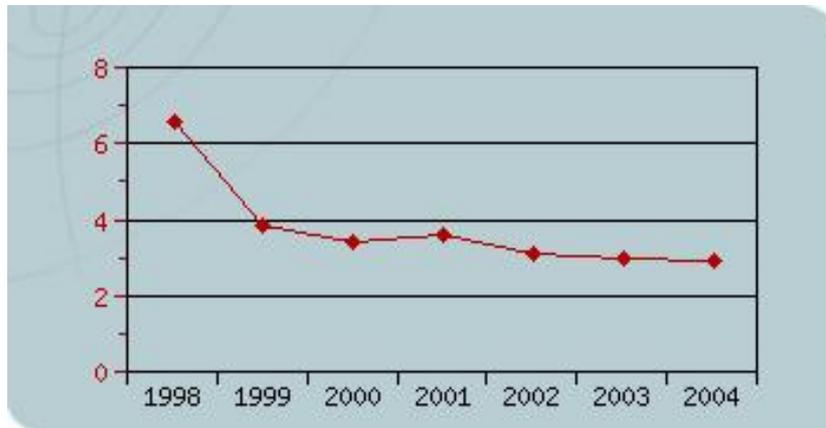


L'augmentation des émissions dans l'eau de l'année 2004 est due au démarrage d'un bioréacteur à membranes pour l'épuration de l'eau.

- Les émissions de SO<sub>2</sub> (en t – rouge -) et les émissions de GES (teCO<sub>2</sub> – bleu-) :



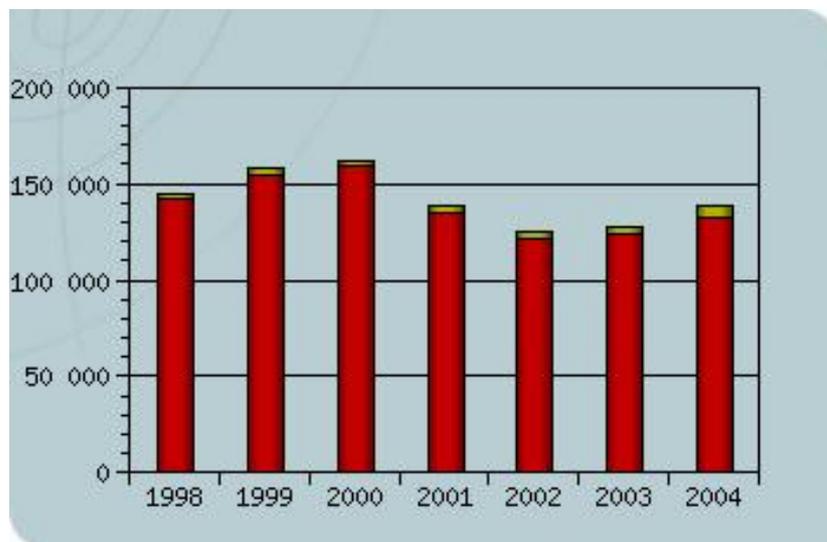
- Les rejets de COV (en kg/véhicule) :



Les rejets de COV par véhicule ont été réduits par le biais d'efforts réalisés à chacune des étapes du processus d'application des peintures sur les carrosseries et par la mise en place des peintures hydrodiluable. Par ailleurs, des incinérateurs à récupération d'énergie ont été mis en place pour les COV issus des mastics et de la cataphorèse.

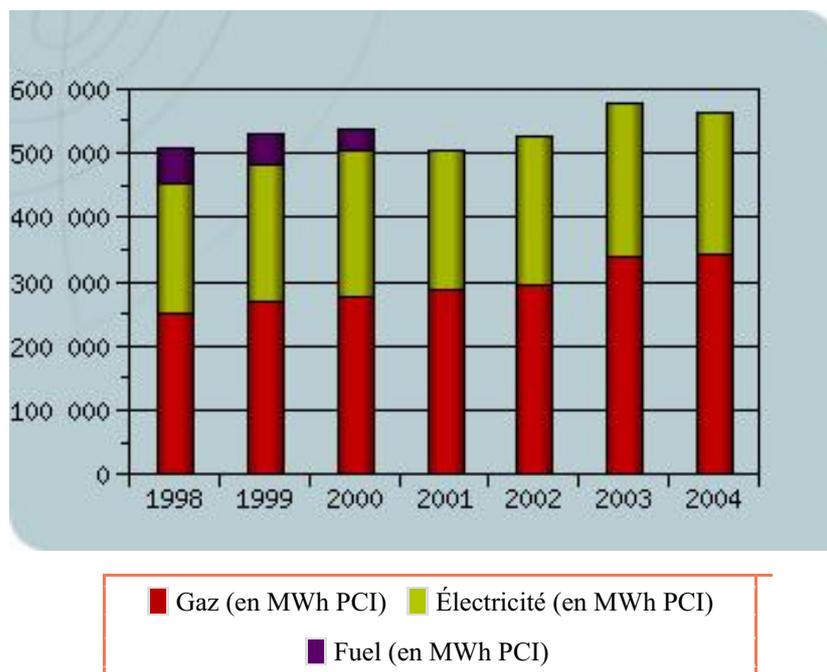
La diminution des COV entre 2002 et 2004 est due à l'amélioration des rafales de teintes et à l'optimisation de la récupération des purges des machines à peindre. Ils sont passés de 3,09 kg/véhicule en 2002 à 2.91 kg/véhicule en 2004.

**- Les déchets (DIB<sup>1</sup> en rouge, DID<sup>2</sup> en vert en tonnes) :**



Entre 1998 et 2004, l'usine a réduit de 36 % la quantité de DIB au véhicule.

**- La consommation d'énergie :**



<sup>1</sup>Déchets industriels banals : Déchets équivalents dans leur composition aux déchets ménagers, mais produits par l'industrie et le commerce. Ils ne contiennent aucune substance toxique. En pratique, il s'agit essentiellement de déchets d'emballage.

<sup>2</sup> Déchets industriels spéciaux : Déchets produits par l'industrie contenant des substances toxiques ou dangereuses pour l'environnement et dont l'élimination exige la mise en œuvre de mesures particulières.

La consommation de gaz et d'électricité par rapport à 2003 est sensiblement identique malgré l'augmentation de la production.

### ***C. LE RECYCLAGE DES VÉHICULES***

Même si l'analyse du cycle de vie montre que la fin de vie des véhicules ne représente qu'une petite part de l'énergie consommée et des émissions tout au long de la vie, vos rapporteurs ont été très attentifs à ce thème puisque le non-recyclage constitue encore une pollution environnementale et visuelle quotidienne pour bon nombre de nos compatriotes.

Les objectifs en la matière ont été fixés au niveau européen et doivent aboutir à la constitution d'une filière rentable économiquement.

#### **1. Les objectifs européens**

- **La réglementation**

Les objectifs de récupération et de traitement des véhicules hors d'usage (VHU) sont fixés par la directive européenne 2000/53/CE.

Elle fixe **un taux de réutilisation et de recyclage de 85 % du poids du véhicule en 2006, dont 5 % en valorisation énergétique, et de 95 % en 2015, dont 10 % en valorisation énergétique.**

Par réutilisation, la directive entend les pièces qui pourront être démontées, rénovées et remises sur le marché pour leur usage initial.

Le recyclage correspond au traitement des déchets en vue de leur réutilisation comme matière première soit pour l'utilisation première, soit pour une autre, mais à l'exclusion de la valorisation énergétique.

La valorisation énergétique est l'utilisation des déchets combustibles pour produire de l'énergie et/ou de la chaleur.

Ces trois éléments forment les déchets « *valorisés* », le reliquat est mis en décharge.

La directive fait application du principe du pollueur payeur. Ainsi, **le constructeur ou l'importateur doit assurer la reprise sans frais du véhicule** et assurer une accessibilité géographique aux centres de collecte pour les voitures **neuves à partir du 1<sup>er</sup> juillet 2002 et pour toutes les voitures à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2007.**

En France, il y a aujourd'hui 400 démolisseurs agréés et 45 sites de broyage.

Certains pays (Danemark, Pays-Bas, Norvège) ont créé des organismes publics ayant la mission d'agréer les acteurs de la filière et de contrôler l'application des mesures. D'autres pays comme l'Allemagne, l'Italie et le Royaume-Uni ont choisi de laisser les constructeurs s'organiser pour atteindre les objectifs. Les PECO paraissent en retard dans l'application de ces réglementations.

Ces différences de réglementation et d'organisation ne sont pas forcément de l'intérêt des constructeurs et des consommateurs et entraîneront probablement des surcoûts. L'organisation des filières au niveau national apparaîtra sans doute comme non optimale alors que les constructeurs et le marché sont de dimension européenne. **Vos rapporteurs estiment que la Commission aura probablement à se saisir à nouveau de ce dossier pour faire émerger une filière homogène en Europe.**

**En Europe de l'Ouest, ce sont environ 9 millions de VHU par an qui seront à traiter. On évalue les rejets illégaux à 7 % du total<sup>1</sup>.**

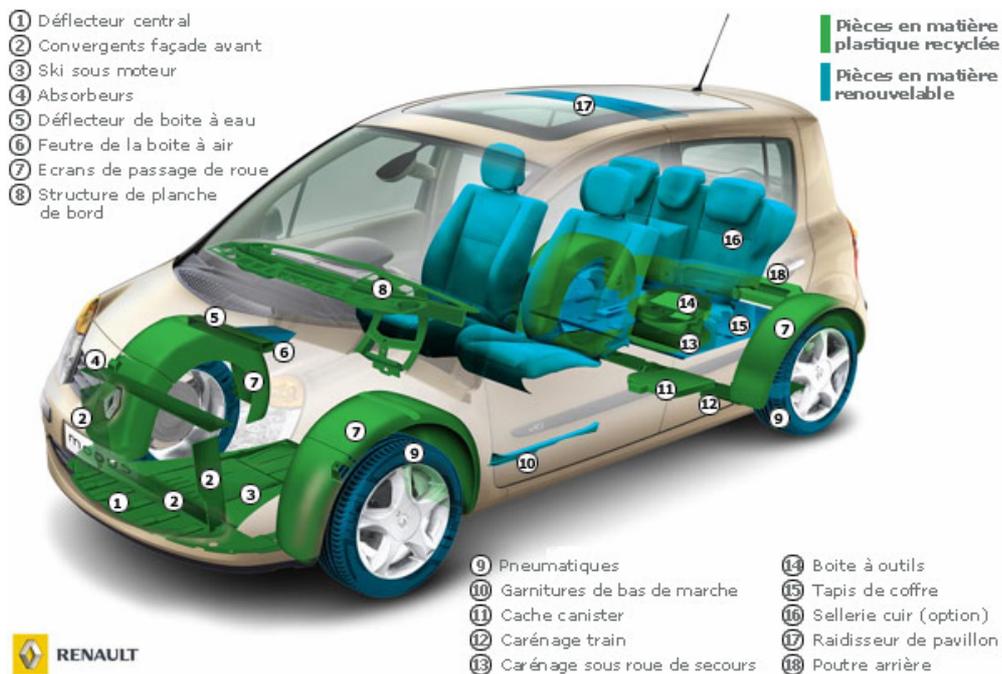
A titre de comparaison, au Japon, le nombre de VHU est de 5 millions, dont 1 million est exporté. Le niveau de recyclage actuel se situe entre 75 et 80 %. Les constructeurs automobiles ont pour objectif de porter ce taux à 95 % en 2015. Ils y sont obligés par la loi votée en juillet 2002 visant à limiter les conséquences écologiques des déchets illégaux.

En revanche, la réglementation américaine semble moins avancée. Le gouvernement fédéral n'est pas impliqué dans de tels dispositifs, ces aspects de la protection de l'environnement relèvent des États fédérés. Cependant les taux de recyclage y sont assez conformes à ce qui se pratique en Europe et au Japon. 94 % des véhicules en fin de vie, soit 15 millions, sont traités. Ils sont recyclés à hauteur de 75 % en moyenne. Les constructeurs, l'administration fédérale et les professionnels du plastique se sont associés au sein d'un programme de recherche, le CRADA (*Cooperative Research And Development Agreement*), sur les années 2004-2009, pour rester au niveau des constructeurs européens et japonais en la matière.

**Le Renault Modus est l'un des récents exemples de modèles recyclables à 95 % de leur poids, dont 10 % en valorisation énergétique (objectif 2015). Elle contient notamment 18 kg de plastiques recyclés, soit 20 % du total.**

---

<sup>1</sup> DGTPE, *Revue stratégique, automobile*, n°42, nov-déc 2004.

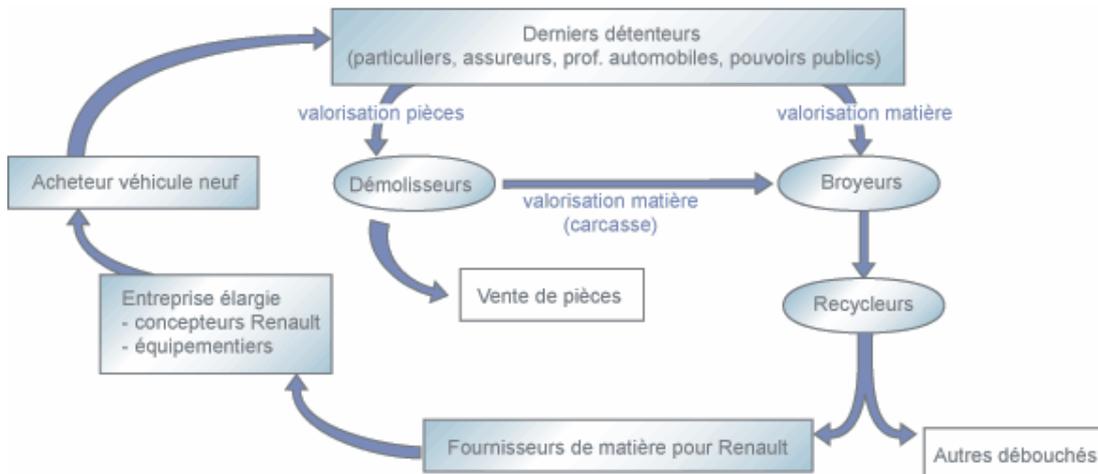


## 2. La mise en place d'une filière économiquement et techniquement viable

### • La filière du recyclage

En Europe, les constructeurs ont soit directement à leur charge les frais du recyclage, soit celui-ci est financé à l'achat par les consommateurs par une taxe spécifique (cas des systèmes mutualisés et gérés par un organisme public). La difficulté est de parvenir à l'équilibre financier. Selon les informations recueillies par vos rapporteurs, aux Pays-Bas la taxe à l'achat est de 45 € mais le recyclage y coûterait plus de 125 € par véhicule.

Les constructeurs sont dans tous les cas les acteurs essentiels de ces filières et les consommateurs en resteront inévitablement les financeurs.



Le schéma ci-dessus illustre le rôle de Renault dans la chaîne du recyclage.

- **L'exemple du recyclage des pneumatiques**

En France, les fabricants de pneumatiques (Bridgestone, Continental, Dunlop, Goodyear, Kléber, Michelin et Pirelli) se sont associés au sein de la société Aliapur, la réglementation française leur imposant de prendre en charge le recyclage de leur production. Ce **décret du 29 décembre 2002 impose aux producteurs et importateurs de recycler chaque année le tonnage vendu l'année précédente**. Jusqu'à présent, 1/3 était stocké en décharge ou rejeté dans la nature. Il y aurait 5 000 sites orphelins et 1 million de tonnes abandonnées.

Aliapur collecte, regroupe, trie et valorise les pneus usagés. Le coût du recyclage est d'environ **2 à 3 € par pneu payés par le consommateur lors de l'achat pour un véhicule particulier**. Broyés, les pneus sont réutilisés pour les sols des terrains de sport et des aires de jeu pour enfants, pour les pièces de caoutchouc destinées à l'industrie, les revêtements des routes afin de réduire le bruit et l'aquaplaning, les murs antibruit, les bétons spéciaux, des pneus plus petits (bacs poubelle, brouettes). Entiers ou découpés en bande, ils servent pour protéger des murs ou des quais, réaliser les tapis antivibratoires des tramways et métros et, enfin, de combustibles dans les cimenteries et les centrales thermiques.

Après sa première année d'existence, la société Aliapur était parvenue à récupérer 96 % de sa production de 2003. Par ailleurs, elle a entrepris d'inventorier les sites orphelins (114 identifiés, 260.000 t) et s'est donné pour objectif d'en traiter 30.000 par an en plus des 220.000 t liées à ses obligations réglementaires.

**En 2004, la valorisation énergétique a été le principal débouché, soit 33 %, les granulats 30 %, le rechapage 19 %, le réemploi 8 %, les travaux publics 7 % et les aciéries 3 %.**

L'initiative des principaux producteurs ne fait toutefois pas l'unanimité. Un groupement d'intérêt économique, baptisé « France recyclage pneu », réunit des acteurs plus petits et a pour client l'association des importateurs de pneumatiques. Les volumes collectés en 2004 sont beaucoup plus faibles, de l'ordre de 13.000 t. Il est toutefois intéressant d'observer que la valorisation n'est pas la même : 70 % dans les travaux publics, 14 % en valorisation énergétique, 11 % en granulat, 3 % en rechapage et réemploi.

Les deux réseaux ont été financièrement équilibrés en 2004.

**Cette première année d'exercice apparaît donc comme un succès. Il doit être pérennisé pour permettre dans un délai raisonnable la résorption des stocks sauvages dont les fabricants de pneumatiques ne peuvent s'exonérer.**

### III. FACE À LA POLLUTION LOCALE, DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES DISPONIBLES

La pollution locale due à l'automobile est un sujet extrêmement sensible puisque les experts n'en ont pas la même vision que les Français. Ainsi, dans le sondage Sofres « *Automobile et société* » de 2000, 60 % des personnes interrogées jugent inacceptable le niveau de la pollution automobile. C'est leur première préoccupation. La qualité de l'air est pourtant, selon les études, meilleure aujourd'hui que par le passé.

C'est en ville que la voiture est la plus contestée. Ainsi pouvait-on lire, sous la plume de Pierre Bonnaure et Véronique Lamblin : « *La plupart des déplacements se font avec une seule personne à bord, alors que les véhicules sont le plus souvent dimensionnés pour quatre à sept places. Plus de 50 % des trajets se font sur une distance de moins de trois kilomètres, qui ne permet ni au moteur ni au catalyseur d'atteindre une température normale de fonctionnement [...] La vitesse moyenne en agglomération étant de l'ordre de 13 km/h, le moteur fonctionne cinq à six fois plus longtemps que sur route pour parcourir la même distance, et il tourne à des régimes situés la plupart du temps hors de la plage optimale* »<sup>1</sup>.

Cette appréciation, communément partagée, montre combien l'utilisation de la voiture en ville et la pollution qu'elle engendre est un problème à la fois sociétal et technologique.

Du fait de leur saisine, vos rapporteurs se sont intéressés aux aspects technologiques à partir d'un diagnostic sur la réalité de la pollution et son évolution et sur son impact sur la santé. Ils ont ensuite cherché à mesurer les progrès qui devaient être attendus de la réglementation européenne et des recherches menées sur les moteurs, et du développement de certaines filières alternatives de carburant comme le GNV et le GPL.

---

<sup>1</sup> *Futuribles*, n°311 – septembre 2005, « *L'automobile de demain* », p.25-38.

## ***A. LA POLLUTION LOCALE : QUEL DIAGNOSTIC ? QUELLE ÉVOLUTION ?***

A travers l'exemple de l'Ile-de-France, la région la plus densément peuplée et la plus soumise à la pollution des transports, vos rapporteurs ont cherché à dresser un constat, à mesurer les évolutions et plus particulièrement l'impact de l'automobile.

### **1. Le constat dressé par Airparif en Ile-de-France**

- **La qualité globale de l'air en région parisienne**

La mesure de la pollution en Île-de-France a été confiée à Airparif. Elle est synthétisée par l'indice journalier Atmo. Il est calculé à partir de la concentration dans l'air de quatre polluants mesurés en continu : dioxyde d'azote, dioxyde de soufre, les particules (PM 10 – depuis 1997) et l'ozone. Chaque polluant est classé sur une échelle de 1 à 10. C'est le plus élevé de ces quatre sous-indices qui est, pour la région considérée, l'indice Atmo de la journée.

Ce travail de mesure permet d'aller au-delà de la simple mesure visuelle et instinctive de la pollution, comme le montre l'exemple de la photo de Montmartre vu depuis le toit d'Airparif, c'est-à-dire à 5 km.

**14 juin 2004 à 10 h, indice Atmo « BON 3 », PM10 : 20 µg/m<sup>3</sup> :**

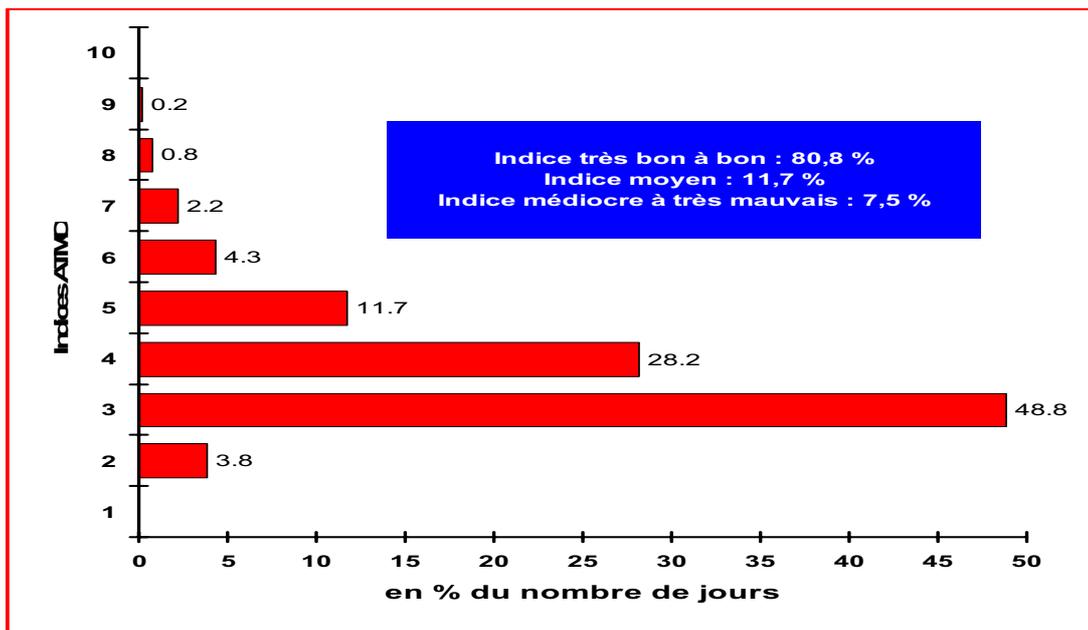


**9 juin 2004, 10 h, indice Atmo « Mauvais 7 », PM10 : 80 µg/m3 :**



Ces deux photos permettent déjà d'identifier l'un des problèmes de l'agglomération parisienne : les particules fines en suspension.

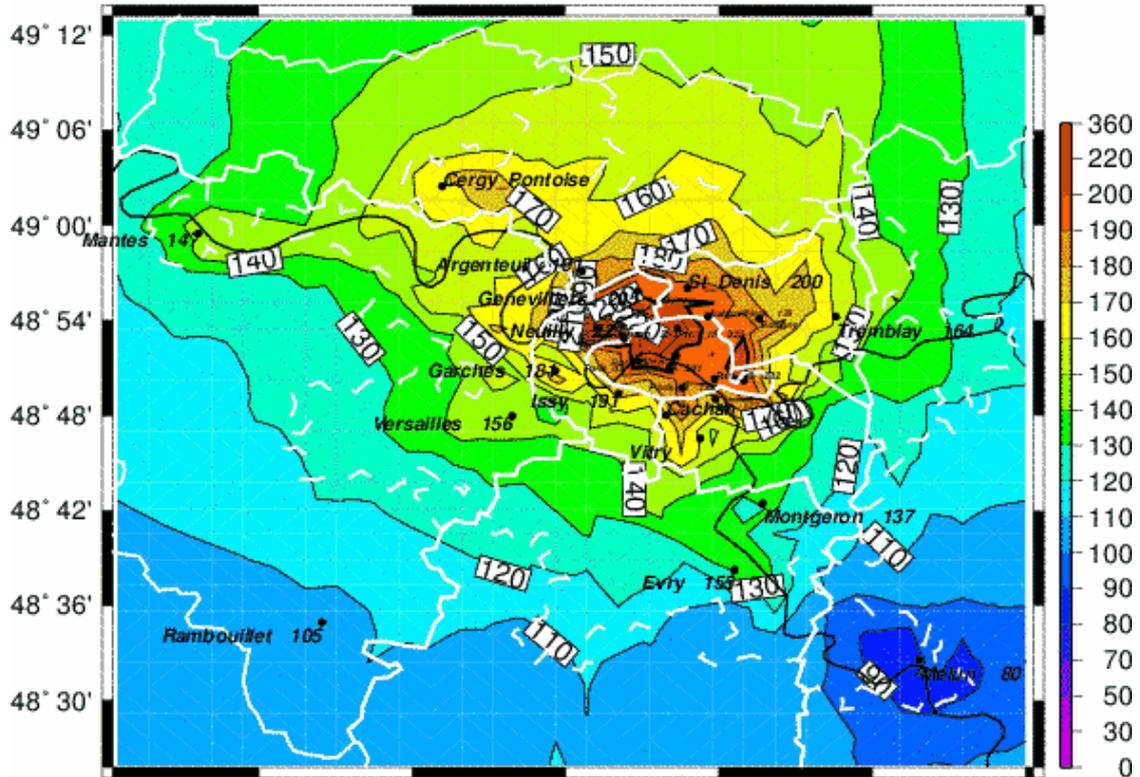
Cependant, **depuis 1998, le nombre de jours pendant lesquels l'indice Atmo est mauvais est très peu important.** On peut affirmer que l'air de la région parisienne est de bonne qualité.



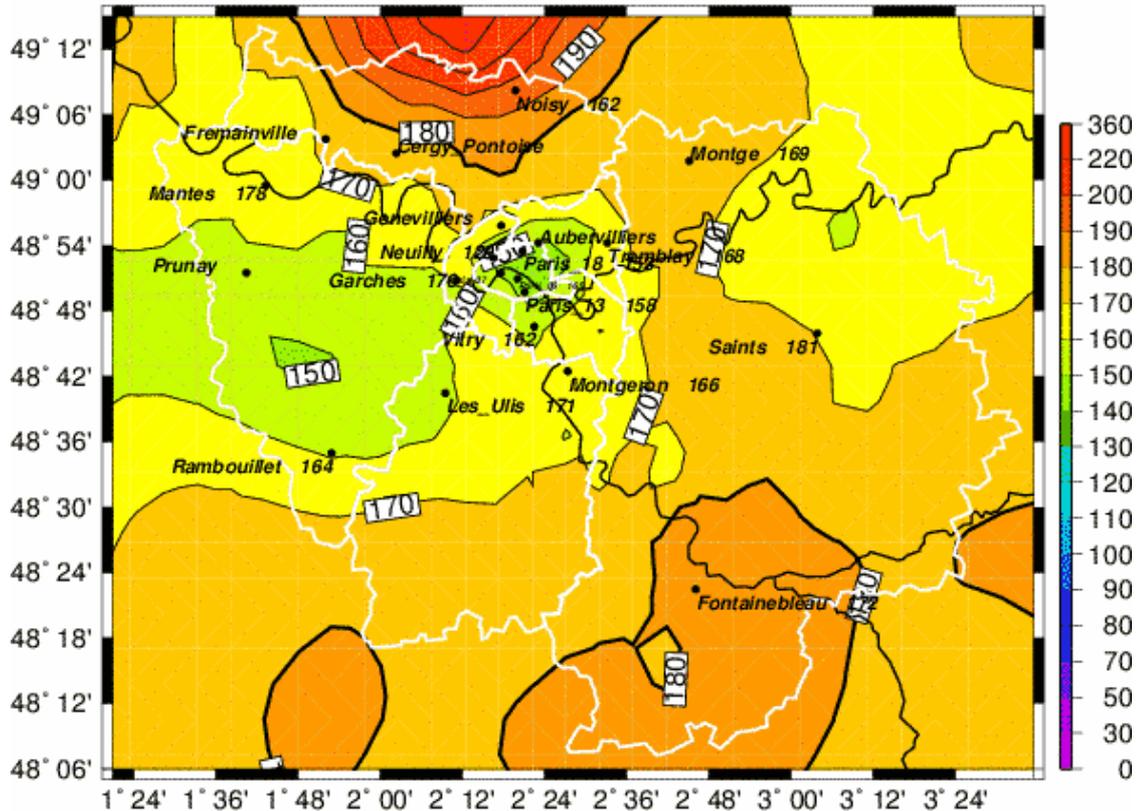
Outre les particules, les pics de pollution en Île-de-France sont de deux types de pics principaux qui peuvent se cumuler comme dans l'exemple ci-dessous : l'oxyde d'azote et l'ozone photochimique.

Les pics de pollution à l'oxyde d'azote interviennent le plus fréquemment l'hiver en zone urbaine, ci-dessous la carte du 17 septembre 2003.

Concentration max (assimilee) en NO2 le 17/09/2003



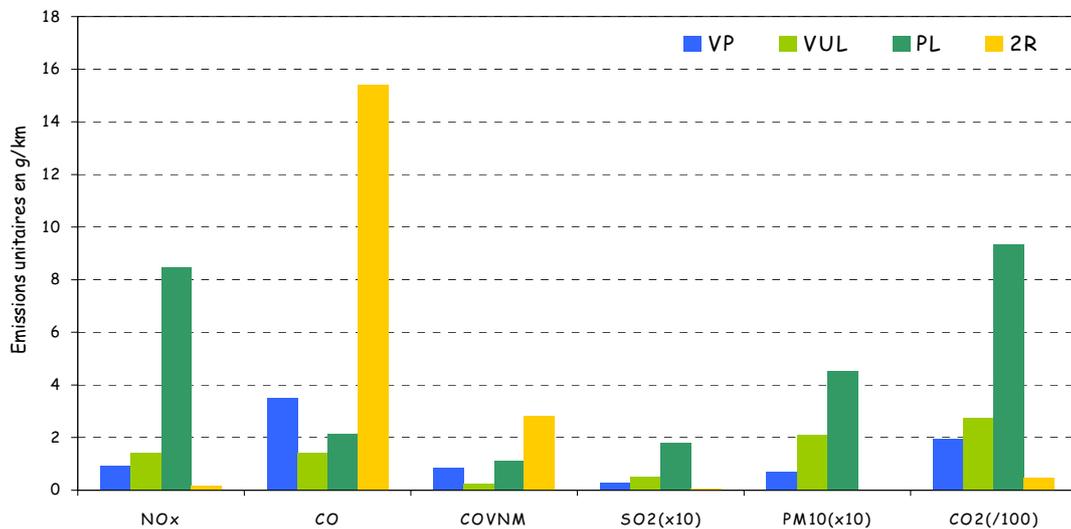
Concentration max (assimilee) en O3 le 17/09/2003



- **Les émissions des différents véhicules en Île-de-France**

Airparif mesure les émissions des différents véhicules : véhicules personnels (VP), utilitaires légers (VUL), poids lourds (PL) et deux roues (2R) dans les conditions réelles de circulation en Île-de-France.

Ces mesures permettent d'effectuer des comparaisons entre les différents moyens de transport. Les émissions sont le plus souvent corrélées au poids du véhicule. Cependant, on peut relever que sur certains types de polluants, les deux roues sont extrêmement peu performants. Ainsi, **en matière de composés organiques volatiles (COV) et de monoxyde de carbone (CO), un deux roues émet trois plus qu'une voiture.**

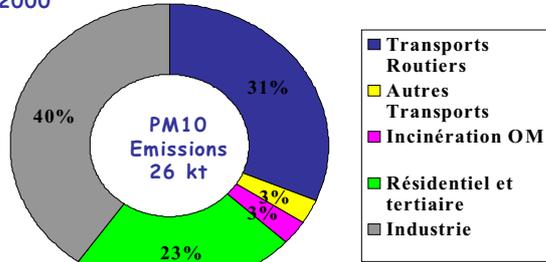


- **La contribution du transport routier aux émissions de particules fines (PM 10)**

En matière d'émissions de particules fines, de taille égale ou inférieure à 10 micromètres, l'opinion commune estime que le transport routier, et tout particulièrement les véhicules diesel, en sont les principaux responsables. Telle n'est pas la réalité : **en 2000, le transport routier n'a représenté que 31 % des émissions et les véhicules personnels diesel 12 %.**

 Contribution du transport routier aux émissions ...

Année de réf. 2000



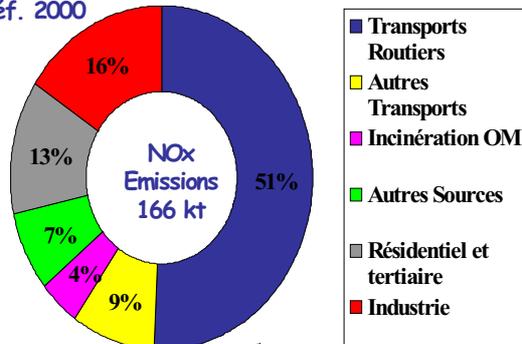
Transport Routier :  
Véhicules personnels Diesel : 12 %  
VUL : 8 %  
PL : 7 %  
Autres Em. routières : 5 %

- La contribution du transport routier aux émissions d'oxydes d'azote

En matière d'oxyde d'azote, la part du transport routier est plus importante : 51 %, dont 23 % pour les véhicules personnels.

 Contribution du transport routier aux émissions ...

Année de réf. 2000



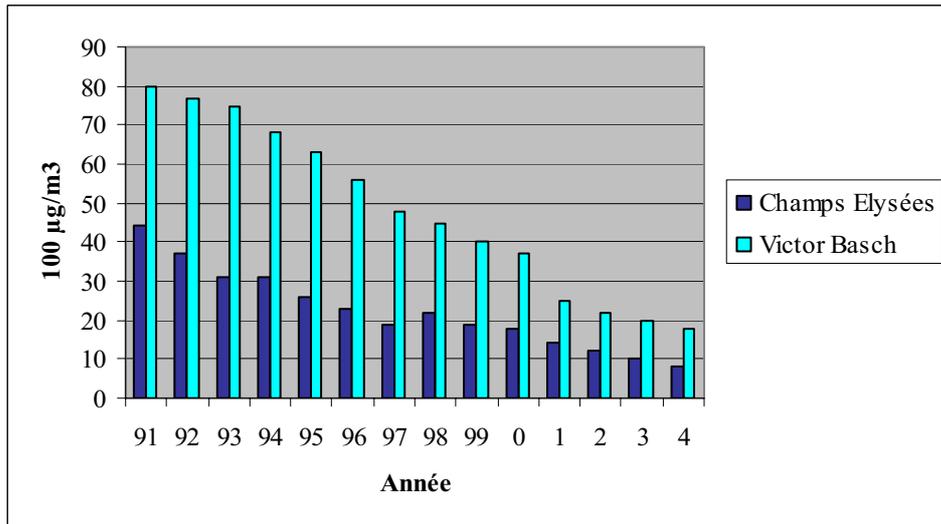
IdF = 10 % des émissions nationales

Paris « seule » : 10 % des émissions de NOx régionales

Transport Routier :  
Véhicules personnels : 13 %  
Véhicules personnels Diesel : 10 %  
VUL : 9 %  
PL : 19 %

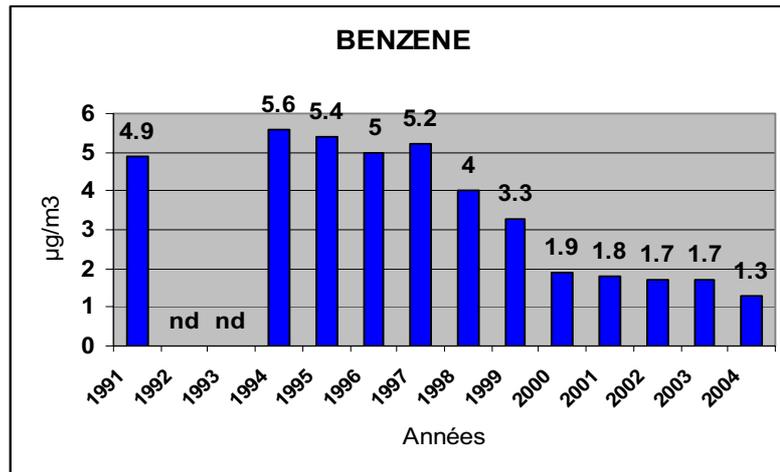
- **La diminution constatée des émissions de CO**

Sur deux points représentatifs de la circulation automobile il est possible de faire apparaître la réduction très significative des émissions de monoxyde de carbone essentiellement dues au transport routier : **une division par quatre depuis 1991.**



- **La diminution constatée des émissions de benzène**

De la même façon, le niveau moyen annuel des émissions de benzène mesuré dans un échantillon de stations par Airparif montre **une division par quatre depuis le milieu des années 1990.**



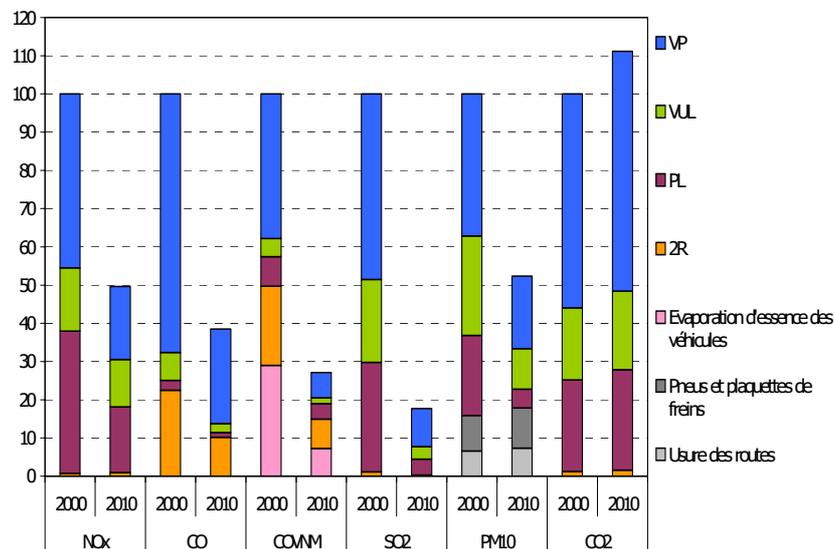
## 2. L'évolution prévisible de la pollution urbaine due au transport routier

Malgré ces évolutions constatées très favorables et qui vont se poursuivre, **Airparif reste préoccupé par l'évolution à venir de trois polluants : les oxydes d'azote, l'ozone et les particules fines.**

- **De fortes diminutions d'émission à l'horizon 2010**

Cette tendance favorable va se poursuivre ; d'ici à 2010, les réductions d'émission vont être très significatives dans tous les domaines :

**Evolution des émissions du trafic routier en Ile-de-France**  
(base 100 pour l'année de référence 2000)

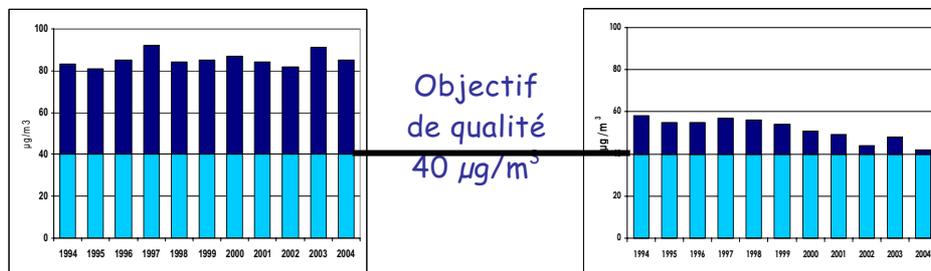


- . NOx, - 50 %, une division par trois pour les véhicules particuliers.
- . CO, - 60 % et pour les véhicules particuliers une division par trois.
- . COV, - 70 % et pour les véhicules une division par 10.
- . SO<sub>2</sub>, - 80 % et une division par 5 pour les véhicules particuliers.
- . PM 10, - 50 % et une division par 3 pour les véhicules légers.

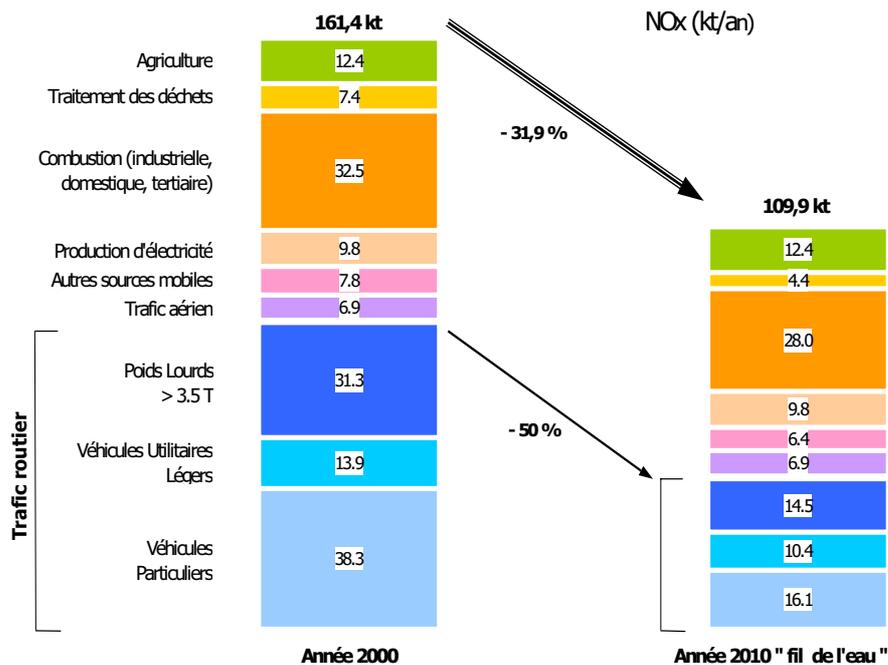
Seules les émissions de CO<sub>2</sub> sont prévues en augmentation de 10 % par Airparif.

• **Évolution prévisible des émissions d'oxydes d'azote**

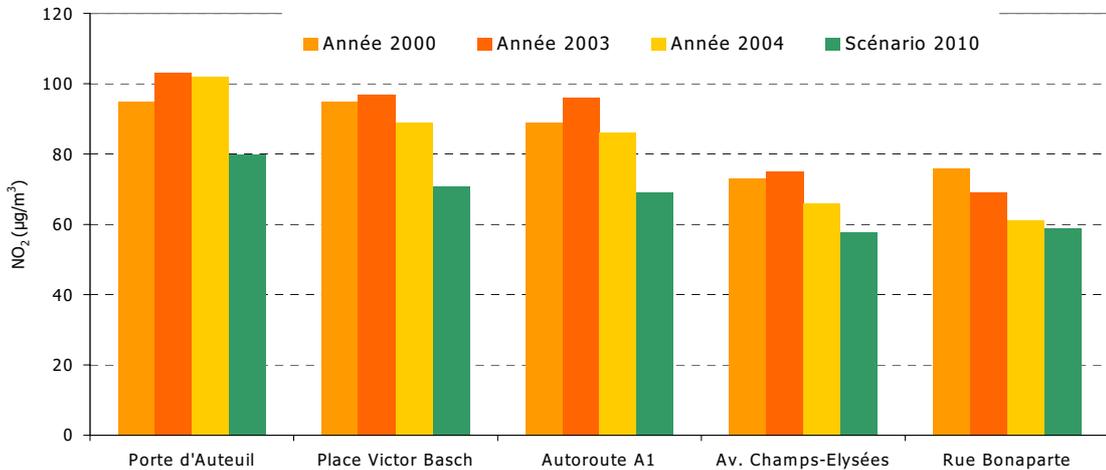
Depuis 1997, la diminution des émissions a été importante puisque, auprès de la circulation, la baisse est de 27 % et, en termes de mesures de fond, de 42 %. En revanche, comme le montrent les deux graphiques ci-dessous, en matière de NO<sub>2</sub> les émissions de la circulation n'ont pas diminué et restent supérieures aux objectifs de qualité de l'air (à gauche, mesure de proximité faite auprès du trafic). En mesure de fond, les résultats sont plus satisfaisants avec une baisse de 22 % (à droite).



D'ici à 2010, les émissions de NO<sub>x</sub> baisseront fortement, en raison, à plus de 82 %, des progrès du secteur du transport routier.

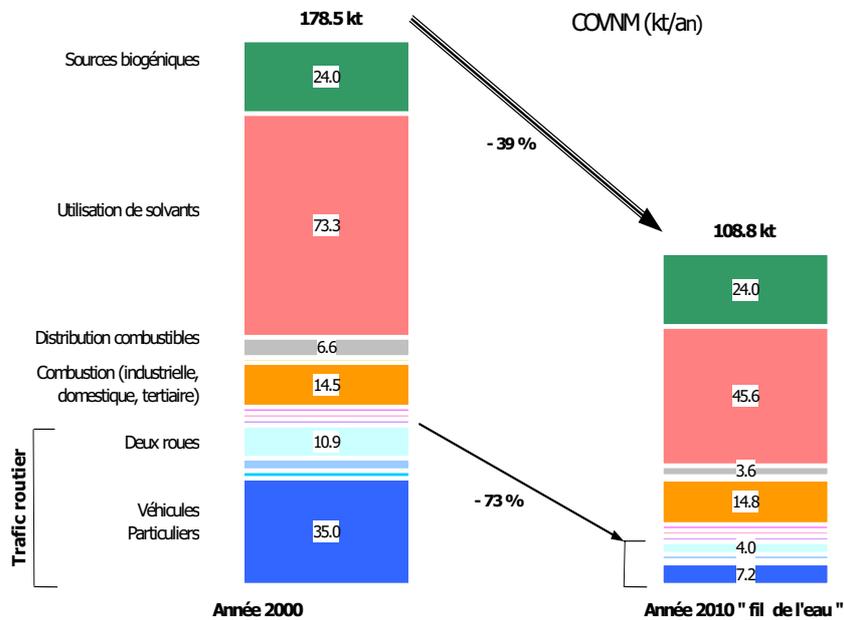


Cette évolution bénéfique permettra une baisse de 20 à 30 % au plus près du trafic routier mais sera insuffisante pour atteindre à sa proximité les objectifs de qualité de l'air fixés par l'Union européenne à 40 µg/m<sup>3</sup>.



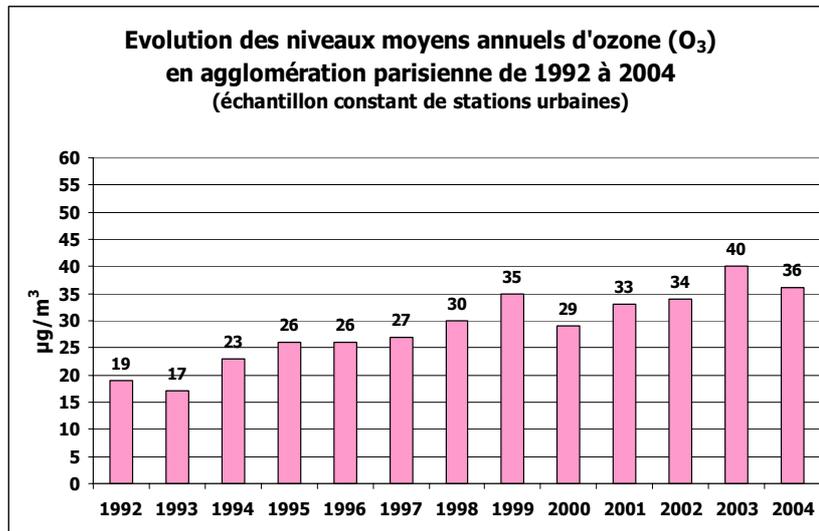
• **Évolution des émissions de COV**

L'analyse plus fine de la baisse des émissions de COV montre qu'elle sera due à 54 % au transport routier.



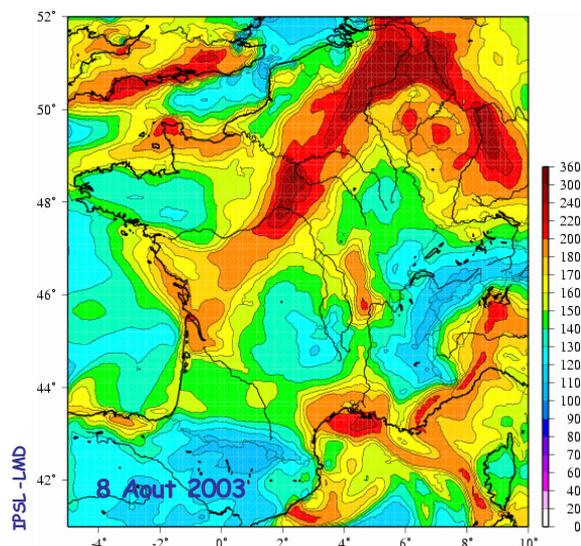
- **Évolution de la pollution à l’ozone (O<sub>3</sub>)**

Contrairement aux oxydes d’azote, Airparif relève une augmentation de la pollution à l’ozone en ville comme dans les zones rurales, jusqu’à un doublement en 10 ans.



L’ozone est un polluant complexe qui résulte de plusieurs d’entre eux (NO<sub>x</sub> et COV), sous l’action du soleil et de hautes pressions atmosphériques. En outre, ce polluant est partiellement détruit en ville et transporté par les vents, puis stationne dans les zones rurales périurbaines. La France est très soumise à des importations d’ozone venant de la région de Londres ou du bassin rhénan, jusqu’à 60 %.

**Ozone : une problématique locale et continentale ... !**



Ainsi, ce sont des efforts au niveau européen qui permettront de faire reculer la pollution à l’ozone, notamment dans d’autres secteurs que le transport routier.

- **L’évolution prévisible des émissions de particules fines**

Comme tous les autres polluants, les PM10 vont diminuer significativement mais, comme pour les NOx, des problèmes devraient subsister le long des axes de transport.

Ainsi, pour vos rapporteurs, l’analyse des données sur la région parisienne, région la plus exposée aux pollutions liées au transport, fait ressortir les faits suivants :

- la qualité de l’air y est bonne plus de 80 % du temps,
- la pollution atmosphérique liée au transport est en réduction spectaculaire dans tous les domaines depuis 10 ans et cette réduction s’amplifiera d’ici à 2010,
- le transport, et tout particulièrement les véhicules particuliers sont de plus en plus marginaux dans la pollution globale,
- à proximité des axes de trafic des problèmes subsisteront puisque, en matière de NOx comme en matière de particules, les niveaux seront supérieurs aux objectifs de qualité. En revanche, les objectifs devraient être atteints au niveau régional.

**Cette analyse démontre l'urgence de la mise au point et de la commercialisation de systèmes de dépollution éliminant ces deux polluants.**

## **B. LA POLLUTION URBAINE, UN ENJEU POUR LA SANTÉ PUBLIQUE**

La pollution urbaine a des impacts sur la santé publique qu'il convient de mesurer par des recherches de long terme.

### **1. Les polluants automobiles et leur impact sur la santé**

Il est tout d'abord nécessaire de lister les polluants et leur impact sur la santé.

	<b>Polluants secondaires</b>	<b>Impacts sanitaires</b>
Particules		Mortalité, morbidité respiratoire et cardiovasculaire, cancers.
SO <sub>2</sub>	Sulfates	Mortalité, morbidité respiratoire et cardiovasculaire
NO <sub>x</sub>	Nitrates	Morbidité respiratoire, irritation de l'œil. Acidification, eutrophisation
NO <sub>x</sub> +COV	Ozone	Mortalité, morbidité respiratoire, irritation de l'œil.
Composés organiques volatiles (COV)		Peu d'effets directs aux concentrations ambiantes exceptés les HAP
Hydrocarbures aromatique polycyclique		Cancers.
CO		Mortalité, morbidité cardiovasculaire.
Dioxines		Cancers.
As, Cd, Cr, Ni		Cancers.
Hg, Pb		Morbidité neurotoxique

Source : Ifen, Notes de méthode n°14, « Les coûts environnementaux de l'automobile, une mise en perspective de l'évaluation », août 2004, Michel Hubert, dir. Jacques Theys.

Globalement, depuis la loi sur l'air, des progrès très importants ont été accomplis dans la connaissance de la qualité de l'air en milieu urbain car elle a imposé un contrôle dans toutes les agglomérations de plus de 100.000 habitants, alors que la directive cadre européenne du 27 septembre 1997 ne l'impose que pour les agglomérations de plus de 250 000 habitants.

Un programme de recherche, Primequal (programme de recherche pour une meilleure qualité de l'air au niveau local – ministères de la recherche, de la santé, de l'environnement, de l'équipement, l'ADEME, le CNRS et l'INSERM) a permis de préciser les prédictions de pics de pollution afin de permettre le respect des normes de qualité de l'air. Il a aussi permis de fixer des seuils d'alerte et des valeurs limites. Sur l'Île-de-France, trois seuils horaires ont été définis en matière de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub>. Ce système, tourné vers la prévention du pic de pollution, fait l'objet de contestations par ceux qui considèrent que les niveaux moyens sont plus importants que quelques pics ponctuels.

Selon l'étude de l'Institut français de l'environnement (IFEN) d'août 2004, la manière de mesurer les polluants est imparfaite. Il s'agit dans bien des cas d'indicateurs partiels de la pollution et non d'une mesure complète en fonction des techniques disponibles.

- **Les particules**

Pour mesurer les particules en suspension, trois types de mesures sont effectuées en fonction du diamètre aérodynamique : taille inférieure à 13, 10 ou 2,5 microns.

Aujourd'hui, **les normes européennes ne portent pas sur les PM 2,5 mais sur les PM 10**. Ce point est contesté, certains experts souhaitant la mesure de particules plus petites. De plus les mesures sont faites en mesurant la masse des particules et non le nombre des particules les plus fines qui sont les plus dangereuses pour les systèmes respiratoires car elles s'infiltrent profondément.

- **Le NO<sub>2</sub> et le NO**

Parmi les oxydes d'azote résultant de la combinaison à haute température de l'azote et de l'oxygène de l'air admis, le NO<sub>2</sub> a été retenu dans les mesures pour sa plus grande stabilité.

Le NO se transforme assez rapidement en NO<sub>2</sub> par réaction photochimique.

Les deux oxydes ont cependant un effet distinct. Le NO s'attache à l'hémoglobine, alors que le NO<sub>2</sub> fragiliserait la muqueuse pulmonaire et la rendrait plus fragile aux agressions.

- **L'ozone, un indicateur de pollution photochimique**

L'O<sub>3</sub> n'est pas émis par les voitures mais il résulte à basse altitude de la transformation de polluants primaires par l'action de la chaleur et de la lumière.

Les concentrations d'ozone ne sont cependant pas les plus importantes en ville puisque les NO<sub>x</sub> détruisent l'ozone en ville, qui en revanche se concentre dans les forêts périurbaines.

- **Le CO**

Le monoxyde de carbone est issu de la combustion trop rapide et incomplète des carburants. Sa présence est de plus en plus faible en dehors des embouteillages et des tunnels. Il se diffuse à travers la paroi alvéolaire, se dissout dans le sang et se fixe sur l'hémoglobine en compétition avec l'oxygène. 200 personnes par an environ meurent encore d'intoxication au CO en France mais majoritairement en raison de sources domestiques.

## **2. Une connaissance clinique et épidémiologique à améliorer**

Outre les débats sur la qualité des mesures pour appréhender le risque sur la santé, la quantification physique des dommages sanitaires de la pollution de l'air fait l'objet de controverses scientifiques.

En France, les premières estimations ont reposé sur l'étude francilienne ERPURS (évaluation des risques de la pollution urbaine pour la santé) entre 1987 et 2000. Une seconde étude portant sur 9 villes (PSAS 9 - Programme national de surveillance des effets sur la santé de la pollution de l'air) a été coordonnée par l'Institut de veille sanitaire.

A l'étranger, plusieurs importantes études ont eu lieu : aux Etats-Unis, une étude sur 6 villes et une sur le cancer par l'American Cancer Society (ACS), et l'étude dite tripartite de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Cette dernière étude, publiée en 1999, a appliqué à la France les résultats obtenus aux États-Unis. Cette méthode d'extrapolation à partir des études américaines est malheureusement fréquente et peut affaiblir significativement les résultats.

Dans le cas de **l'étude ERPURS**, ce sont des données européennes d'évaluation des risques qui ont été utilisées. L'étude a eu pour objectif de mesurer à court terme les effets des pics de pollution sur les indicateurs de santé : mortalité, hospitalisation, urgence pédiatrique, visites à domicile. Les principaux polluants ont été retenus. Le niveau de pollution retenu a été celui sous lequel se trouvent 5 % des jours les moins pollués de l'année, ce qui est très faible. L'impact a été recherché sur les trois jours suivant l'épisode de

forte pollution. **Les relations les plus importantes apparaissent avec les particules et le NO<sub>2</sub>.** En matière d'hospitalisation pour maladies respiratoires, dont l'asthme, les effets sont les plus marqués chez les **enfants de moins de 15 ans : + 8 % pour des hospitalisations dues à l'asthme en rapport avec le NO<sub>2</sub>, et + 5 % pour des hospitalisations à cause de maladies respiratoires en lien avec les particules fines.**

L'étude **PSAS 9** menée sur la période allant de 1990 à 1997 a permis d'examiner une population de 11 millions de personnes (Bordeaux, Le Havre, Lille, Lyon, Marseille, Rouen, Strasbourg, Toulouse et Paris). Elle a abouti à un calcul annuel de la mortalité statistique anticipée évaluée à 2 800 décès en raison notamment de l'exposition à la pollution de fond plus qu'aux pics.

Ce type de résultat fait l'objet de controverses puisqu'il est difficile de faire la distinction avec les populations à risque et qu'il est également difficile de mesurer l'anticipation du décès. Ces études ne permettent pas non plus de distinction entre air intérieur et extérieur et bien entendu entre les sources extérieures de pollution.

C'est pourquoi, à des études sur les effets de court terme, certains ont pu préférer des études de long terme permettant mieux de mesurer le poids de l'exposition à une pollution de fond.

Parmi celles-ci, l'étude américaine sur six villes a suivi 8.000 adultes sélectionnés pendant 14 et 16 ans et l'ACS a suivi 500.000 personnes sur 7 ans. Ces deux études ont confirmé un lien entre l'augmentation de la mortalité et l'augmentation de la concentration de particules fines. Cependant, des contre-études menées sur les données recueillies ont conduit à affaiblir les liens démontrés en mettant en avant des facteurs d'incertitude.

L'étude de l'OMS évoquée plus haut et publiée dans *The Lancet* en septembre 2000 aboutissait pour la France à évaluer à 17.600 les décès anticipés causés en 1996 par les particules fines émises par l'automobile. Cette étude, citée par l'ancien ministre de l'écologie, M. Serge Lepeltier, dans son rapport « *Nuisances environnementales de l'automobile : quels vrais enjeux ?* »<sup>1</sup>, est également très contestée. Le ministre indiquait à ce propos : « *Ces résultats doivent être considérés avec prudence, dans la mesure où ils proviennent d'un modèle assez grossier et non d'une étude épidémiologique* ». Les chiffres de l'OMS pourraient être 10 fois supérieurs à la réalité.

- **L'Agence française de sécurité sanitaire et environnementale (AFSSE) a publié, en 2004, une étude sur l'exposition chronique aux particules fines et mortalité par cancer du poumon et par maladies cardio-respiratoires.** Elle avait pour but d'estimer l'impact de la qualité de l'air sur le

---

<sup>1</sup> *Sénat, 2001-2002, n°113.*

risque de décéder, dans la situation actuelle et dans plusieurs scénarios d'évolution de la pollution atmosphérique urbaine. Les particules fines sont considérées comme l'indicateur de qualité de l'air et de risque de référence.

Cette étude s'est intéressée à 76 villes et 16 millions de personnes de plus de 30 ans. Elle a cherché à évaluer leur exposition et à leur appliquer les facteurs de risque établis par les études antérieures.

**Il en résulte que sur les personnes âgées de 60 à 69 ans, 11 % des cancers du poumon seraient liés à la pollution. Sur l'ensemble de la population considérée, 6 % des cancers seraient liés à la pollution.**

Ainsi malgré, la très grande difficulté des études menées sur la pollution, **il est possible de constater que :**

**- Les liens entre pollution urbaine (NO<sub>2</sub>, particules notamment) et atteintes de la santé à court terme (maladies respiratoires), mais également à long terme (cancer du poumon, maladies cardio-vasculaires), sont de plus en plus clairement établis.**

**- Les différentes études indiquent que ce sont les expositions chroniques, correspondant à des niveaux modérés de pollution, qui sont responsables de l'essentiel de l'impact sanitaire.**

**La poursuite des politiques destinées à maîtriser la pollution atmosphérique urbaine, et particulièrement celle des transports routiers, est nécessaire ainsi que la poursuite des recherches épidémiologiques.**

## C. LA SÉVÉRISATION DES NORMES ET LES PROGRÈS TECHNOLOGIQUES

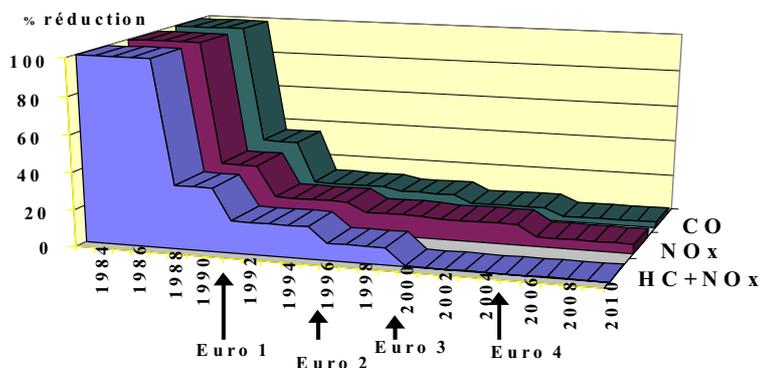
La réduction de la pollution de l'air est un objectif affiché au niveau européen depuis plus de 15 ans. Plusieurs générations de directives se sont succédées en coordination avec les États, les constructeurs automobiles et les pétroliers afin d'aiguillonner les progrès technologiques possibles.

### 1. Des normes européennes toujours plus strictes

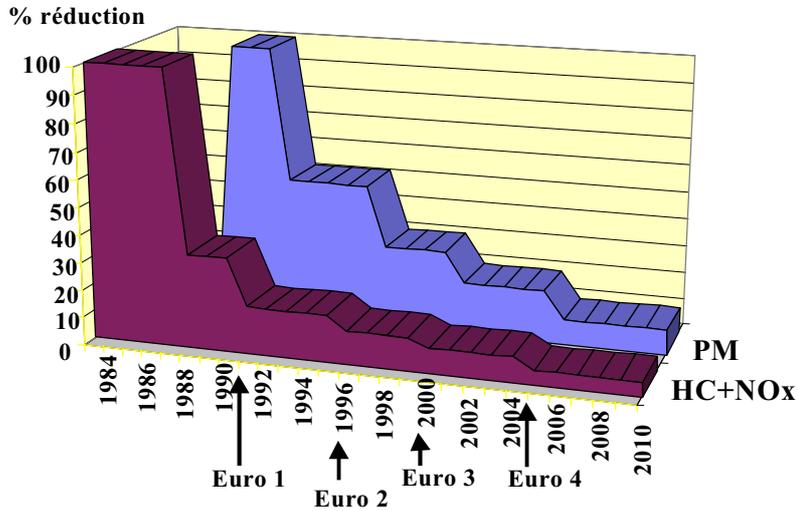
- L'évolution des normes d'émissions jusqu'à euro IV

L'Union européenne a adopté des normes successives de plus en plus sévères visant à réduire les émissions par kilomètre parcouru, dit « *end of pipe* », plutôt que d'orienter l'effort vers la réduction du nombre de kilomètres parcourus. Les objectifs de propreté et de sobriété sont pour l'instant dissociés pour lutter contre la pollution. Cette situation pourrait évoluer.

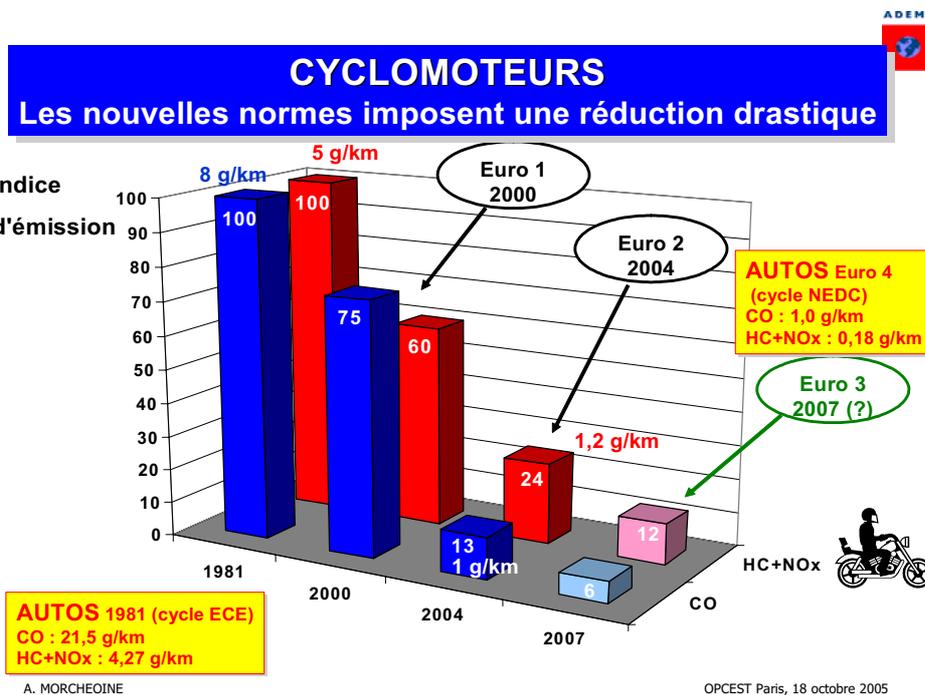
### voitures « essence »



## voitures «diesel»



A titre de comparaison, il est intéressant de prendre conscience du retard accumulé sur la réglementation des émissions des deux roues.



Au début des années 1980, un véhicule pouvait produire jusqu'à 50 g/km de CO (essence) ou 0,8 g/km de particules (diesel).

Les normes européennes en matière de pollution locale ont permis des progrès spectaculaires depuis leur adoption en 1970 puis leur renforcement progressif. Elles sont aujourd'hui définies par la **directive 70/220/EEC modifiée, les normes Euro IV ayant été fixées par la directives 98/69/EC.**

- **La préparation des normes Euro V**

Depuis le début 2004, la Commission européenne a entrepris la préparation de la norme devant succéder à Euro IV en envoyant un questionnaire et en diffusant ses analyses et les différents scénarios possibles de renforcement des normes et leur balance coût avantage.

La Commission a par ailleurs utilisé le programme d'étude et de recherche « CAFE » (Clean air for Europe), lancé en mars 2001, pour dégager les éléments permettant de fonder un renforcement des normes d'émissions de polluants des différents modes de transport, dont l'automobile.

Les études de la Commission l'ont conduite à estimer que d'ici à 2008 les évolutions industrielles et technologiques permettraient une réduction très importante des émissions de particules de moteurs diesel par la **généralisation des filtres (FAP). En revanche, elle a estimé que la technologie de post-traitement, dite « pièges à NOx », des oxydes d'azote n'était pas suffisamment aboutie** ou fiable pour permettre une réduction aussi spectaculaire que sur les particules. En la matière, comme pour les moteurs à essence, la Commission a retenu des réductions significatives de l'ordre 20 à 25 % des principaux polluants.

Cette première consultation a permis à la Commission de publier en janvier 2005 un document de travail donnant de premières indications sur les normes futures et surtout encadrant la possibilité, pour les États membres qui le souhaitent, de mettre en place des incitations fiscales pour les véhicules moins polluants que la norme Euro IV entrée en vigueur au 1<sup>er</sup> janvier 2005. Il s'agissait d'encadrer les avantages fiscaux accordés à l'équipement des voitures diesel en filtres à particules pour atteindre une émission de 5 mg/km.

Pour être valides, ces avantages doivent respecter cinq conditions :

- \* être notifiés préalablement à la Commission ;
- \* permettre d'anticiper les normes futures plus restrictives ;
- \* n'introduire aucune discrimination sur le marché ;
- \* prendre fin dès l'application des nouvelles normes ;
- \* être inférieurs au coût – installation comprise – des nouveaux dispositifs.

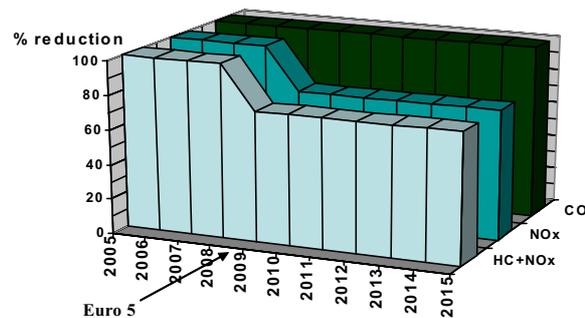
En juillet 2005, la Commission a confirmé ses intentions en publiant un projet de proposition de directive qui a été soumis pour consultation aux industriels du secteur.

Ces propositions, qui seraient applicables à partir de 2010 pour la norme future Euro V, présentent plusieurs aspects particulièrement importants.

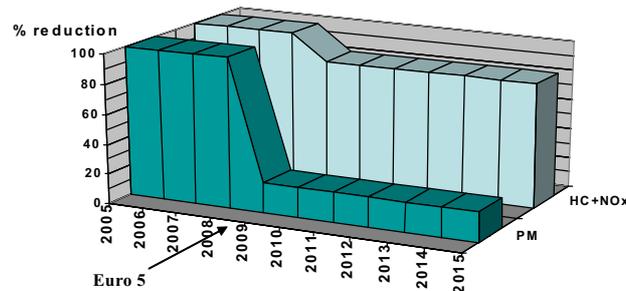
Tout d'abord, la future directive permettra une importante simplification du droit européen puisqu'elle remplacera et annulera la directive de 1970 et tous ses amendements successifs.

Pour les moteurs diesel, la Commission insiste sur deux domaines principaux : les particules et les oxydes d'azote.

### Euro 4 → Euro 5 – Voitures “essence”



### Euro 4 → Euro 5 – Voitures “diesel”



La norme Euro V devrait **imposer une réduction de 80 % de la masse maximale de particules émises par les moteurs diesel, faisant passer la limite de 25 à 5 mg/km**. Cette nouvelle norme conduira à la généralisation rapide des filtres à particules « fermés » - technologie PSA -, c'est-à-dire permettant de réduire les émissions de toutes les tailles de particules. Cette norme étant la limite maximale autorisée, cela correspond, selon la Commission, à un objectif inférieur de 50 % pour les ingénieurs, soit 2,5 mg/km.

La Commission indique également qu'elle souhaite dès que possible **introduire une norme supplémentaire portant non plus seulement sur la masse des particules émises mais aussi sur leur nombre et leur taille**. Les recherches montrent en effet la dangerosité des particules fines sur la santé et la nécessité de **ne pas permettre la mise sur le marché de technologies de filtres dits « ouverts » qui permettraient d'atteindre les normes européennes en termes de masse de particules émises, mais pas en termes qualitatifs** (nombre et taille). La Commission conduit un programme de recherche spécifique, le *Particulate Measurement Programme* (PMP), dont les résultats ne sont pas encore suffisamment consolidés pour permettre l'adoption d'une nouvelle réglementation.

La seconde grande question en matière d'émissions polluantes des **véhicules diesel concerne les rejets d'oxyde d'azote**. La Commission propose une réduction de **20 % des émissions, portant la limite à 200 mg/km** au lieu de 250. Cette évolution devrait pouvoir être atteinte par des évolutions internes des moteurs.

La norme Euro V devrait également conduire à **la réduction des émissions des véhicules essence**. La Commission propose une réduction de **25 % des émissions d'oxydes d'azote portant la limite à 60 mg/km au lieu de 80 et de 25 % celle des hydrocarbures (HC) en fixant la norme à 75 mg/km au lieu de 100**.

La Commission propose également d'introduire une norme limite de particules émises par les véhicules essences à injection directe opérant avec un mélange pauvre, mais ne touchant pas les véhicules à combustion stœchiométrique.

Les constructeurs devront également garantir le bon fonctionnement des dispositifs antipollution sur une durée deux fois plus longue, soit 160.000 km au lieu de 80.000.

Enfin, la Commission prend pleinement en compte l'évolution du marché automobile européen et l'attraction croissante des SUV (*sport utility vehicle*) et 4 X 4 en proposant la suppression de l'exception touchant les véhicules particuliers de plus de 2,5 t qui peuvent jusqu'à présent ne pas respecter les normes antipollution des VL mais celles des véhicules utilitaires. Ce ne devrait plus être le cas à partir de 2008, la limite étant placée à 2,84 t.

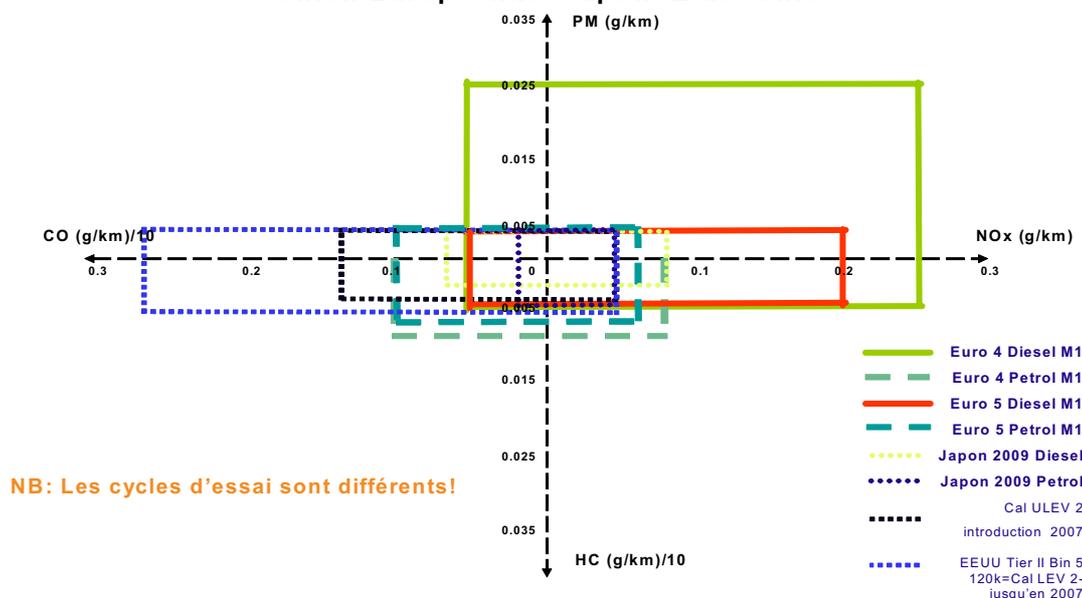
**Vos rapporteurs, qui ont pu rencontrer à Bruxelles plusieurs responsables de la Commission travaillant sur ce dossier, approuvent cette proposition de directive.**

**La généralisation des filtres à particules fermés filtrant tout le spectre des particules est indispensable** pour atteindre les objectifs attendus en matière de réduction de la pollution locale et pour ne pas introduire de

confusion auprès du public sur l'efficacité de ce dispositif de post-traitement. A cet égard, ils sont préoccupés par les projets allemands d'équipement de véhicules après commercialisation par des filtres à particules. En effet, de telles modifications ne peuvent être réalisées de manière écologiquement satisfaisante et ne permettent pas d'atteindre les objectifs européens en la matière. Les filtres ainsi installés sont d'une technologie très différente des filtres fermés et ne permettent pas une réduction aussi importante des particules fines.

**L'introduction d'une norme qualitative en matière de particules est également pleinement cohérente avec les impératifs de santé publique et la nécessité de confirmer le caractère propre des diesels modernes.**

### Comparaison des valeurs limites d'émissions pour les voitures Union Européenne- Japon- Etats Unis



Par ailleurs, au regard des normes retenues à l'étranger, notamment aux États-Unis et au Japon, beaucoup plus strictes en matière d'émissions de NOx pour les véhicules diesel comme le montre le diagramme ci-dessus, vos rapporteurs estiment que la réglementation des émissions d'oxydes d'azote doit continuer à évoluer. Il leur paraîtrait souhaitable qu'une date de généralisation des dispositifs de dépollution soit adoptée en liant la norme Euro V avec une future norme Euro VI. Ainsi, apparaîtraient clairement les deux volets de la dépollution des moteurs diesel et leur quasi-alignement sur les normes applicables aux véhicules essence et ce conformément aux conclusions du Conseil des 18-19 décembre 2000.

## 2. L'achèvement de la dépollution des émissions

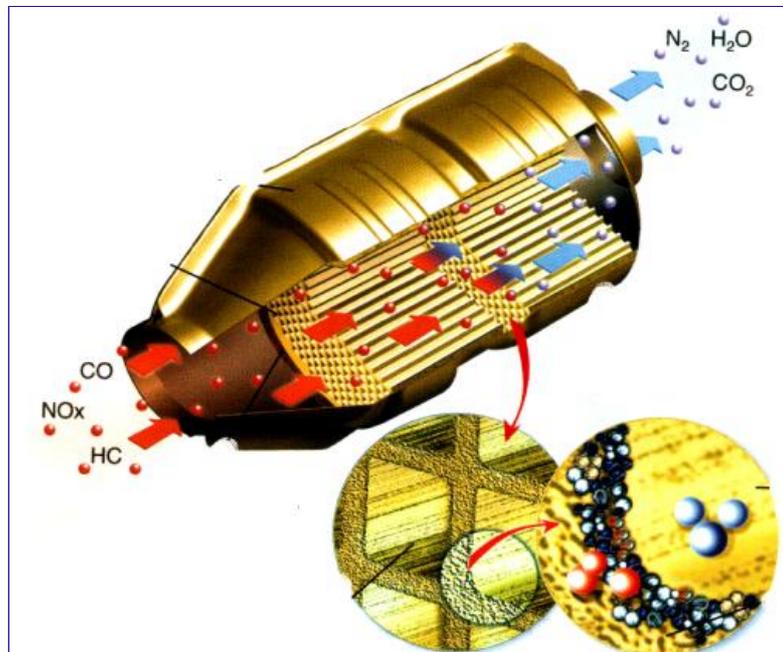
Pour satisfaire les normes passées comme pour atteindre les normes futures, les constructeurs ont mis au point ou étudient trois systèmes principaux :

- \* la catalyse trois voies,
- \* le filtre à particules,
- \* les pièges à NOx ou la catalyse quatre voies.

Les traitements post-combustion des gaz d'échappement sont sans doute les plus connus du grand public qui y est directement confronté lors de l'achat ou de l'entretien de son véhicule, et sur lequel une longue pédagogie a été entreprise par les pouvoirs publics ou les constructeurs depuis les pots catalytiques.

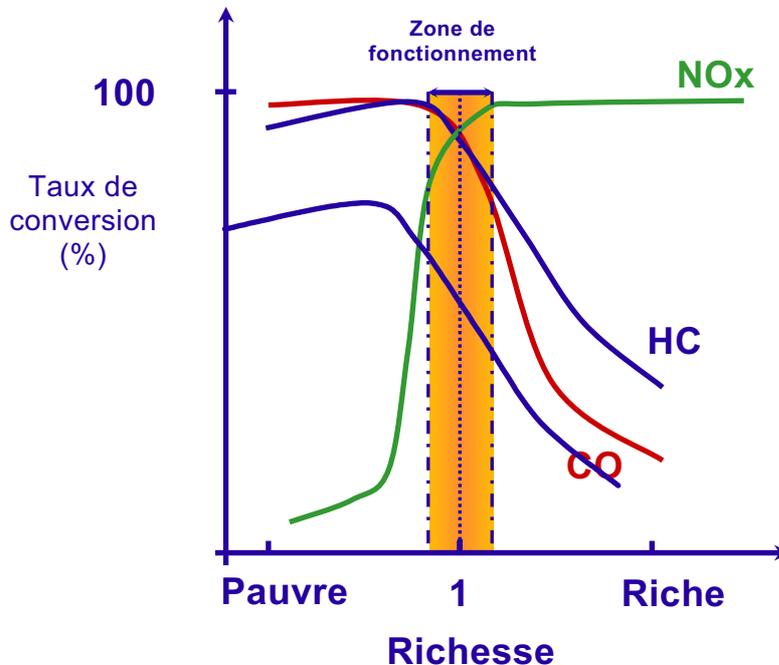
### • La catalyse trois voies

La catalyse trois voies est en place sur les voitures neuves depuis le début des années 1990. Elle consiste à faire passer les gaz d'échappement par un filtre dans lequel une réaction de catalyse se produit au contact de métaux précieux et transforme ainsi les polluants, une partie des NOx, le CO et les hydrocarbures imbrûlés (HC) en N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>, selon le schéma ci-dessous :



Source : PSA

Le taux de conversion maximum est atteint si la richesse du mélange air-carburant est égale à 1. Elle demande donc un réglage optimum du moteur pour y parvenir et explique que dans certaines conditions de charge, la catalyse soit moins efficace.



Des recherches sont en cours pour améliorer encore le fonctionnement des catalyseurs qui peuvent mettre quelques minutes pour atteindre la température à partir de laquelle ils commencent à être efficaces et émettre à froid une grande quantité de polluants.

A titre d'exemple, lors du Challenge Bibendum de Shanghai en octobre 2004, Volvo a présenté une S 60, aujourd'hui commercialisée en Californie, émettant moins de 500 g de polluant tous les 24.000 km. Cette performance est atteinte par une gestion très fine des soupapes d'admission, pour optimiser le mélange air-carburant, de la combustion – débutant par les parois -, et réintroduisant les gaz d'échappement résiduels dans la chambre pour brûler les HC.

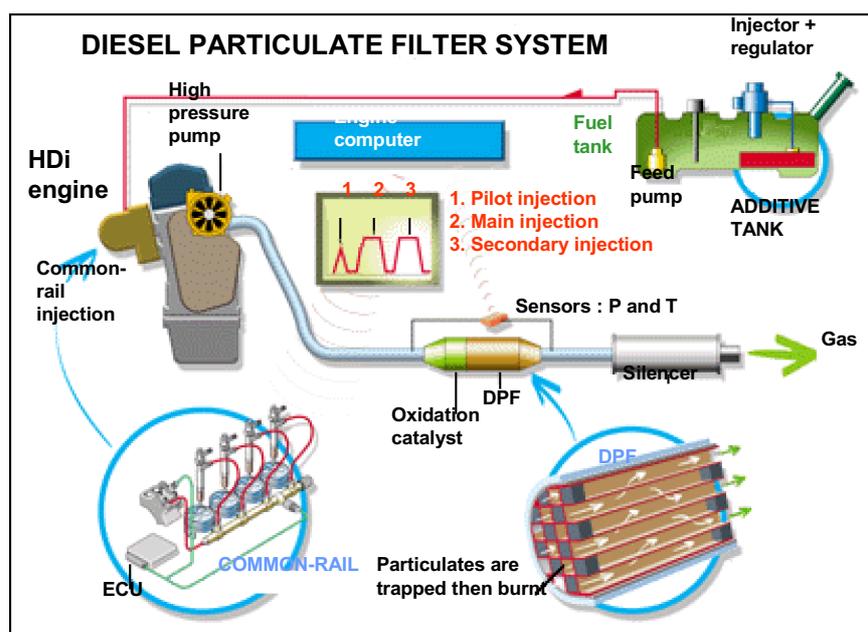
- **La généralisation progressive des filtres à particules**

Selon l'ADEME aujourd'hui seuls 5 % des véhicules diesel commercialisés en sont dotés.

Leur généralisation ne se fera pas sans difficulté, comme l'ont d'ores et déjà montré les problèmes de ressources en matières premières – céramiques notamment – et en capacités industrielles, quelques équipementiers seulement étant à même de fournir le marché.

Leur mise au point et leur généralisation au niveau européen est le résultat des recherches menées par les constructeurs les plus avancés en matière de diesel, et notamment par le groupe PSA Peugeot-Citroën qui propose un FAP extrêmement performant.

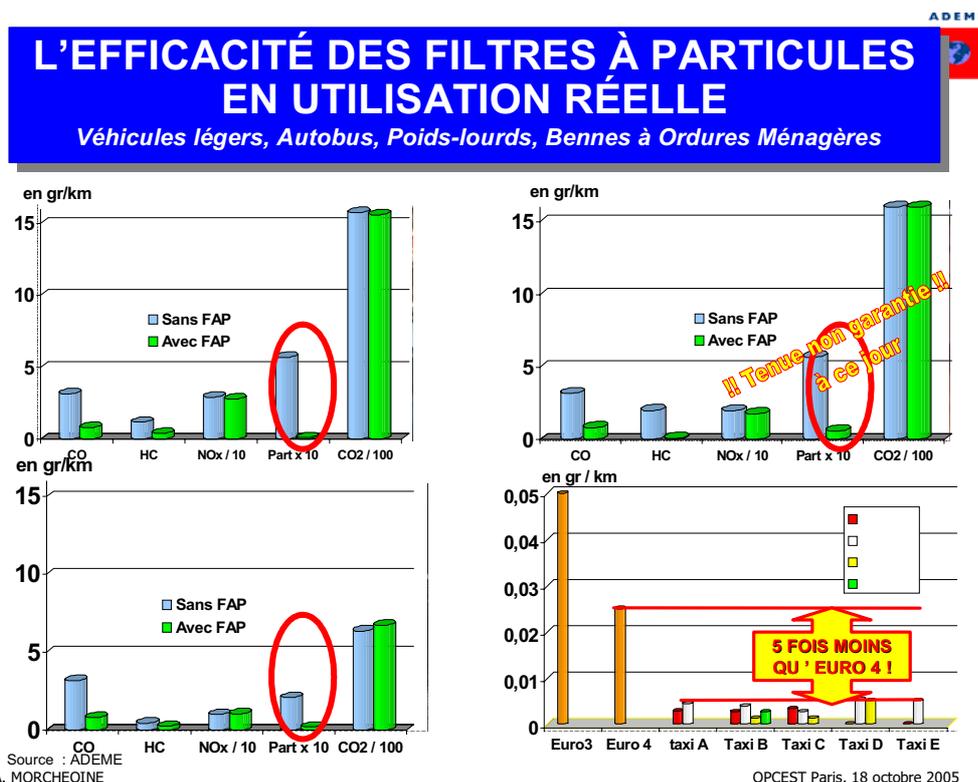
Le filtre à particules mis au point par ce constructeur succède au catalyseur trois voies. Il ne s'agit pas seulement d'un filtre supplémentaire mais d'une **gestion de l'ensemble du groupe motopropulseur** permettant d'optimiser le fonctionnement du filtre – capture et nettoyage- en cohérence avec le régime moteur. En outre est ajouté un additif qui facilite la régénération du filtre à 450°C au lieu de 600.



Ce système, mis au point par PSA, est extrêmement efficace. Les études menées par l'ADEME en situation réelle le confirment.

L'ADEME a équipé après construction des bus, bennes à ordures ménagères et des poids lourds et comparé les performances entre véhicules équipés et non équipés. L'efficacité du système de filtration est apparue très clairement.

Sur les voitures particulières, le filtre à particules est intégré au groupe motopropulseur, il n'existe pas de version non équipée. La comparaison rigoureuse n'a pas été possible. Cependant la comparaison des niveaux réels avec les niveaux requis par les normes Euro III et Euro IV (2005) montre bien la grande efficacité du système sur tous les types de particules.



- **Les pièges à NOx et la catalyse trois voies**

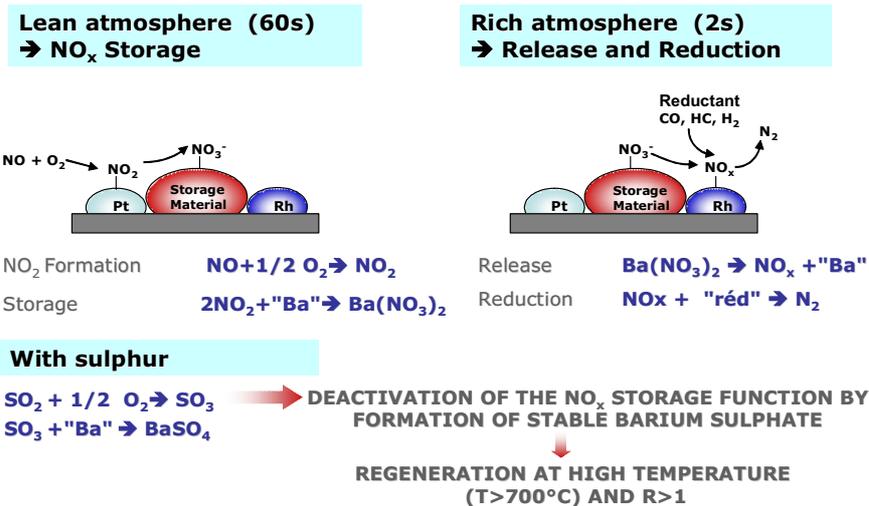
Le filtrage généralisé des émissions de NOx est le second progrès indispensable des moteurs diesel. Ces pièges sont aujourd'hui expérimentaux. La Commission européenne semble avoir renoncé à en imposer la généralisation rapide, les constructeurs n'étant pas unanimes sur leurs performances et leur fiabilité.

Le fonctionnement de ces pièges repose sur un principe similaire à celui de la catalyse trois voies. Il s'agit de capturer des polluants grâce à l'action catalytique de métaux précieux (platine) puis de les fixer grâce à un autre composant, du baryum, et enfin de libérer un nouveau composé par l'action d'un troisième métal, le rhodium, lors des périodes de régénération du filtre.

Ces filtres ont des problèmes de fiabilité dans le temps et ne peuvent fonctionner tant que les carburants ne seront pas sans soufre, car le soufre conduit au colmatage du piège.

## MECHANISM OF NO<sub>x</sub> TREATMENT

NO<sub>x</sub> Trap How does it work ?



Certains constructeurs travaillent sur la catalyse dite « quatre voies », c'est-à-dire éliminant les quatre polluants que sont les NO<sub>x</sub>, les HC, le CO et les particules. Ces dispositifs permettent de filtrer les suies et de piéger les Nox sur le même support. Toyota commercialise un système de ce type appelé DPNR pour « Diesel particulate Nox Reduction System ». La principale difficulté est d'éviter que les sites actifs destinés à piéger les NO<sub>x</sub> ne soient occultés par les suies.

Ce système concerne, comme le FAP, l'ensemble du groupe motopropulseur. Il s'appuie sur une injection directe à rampe commune à 1.800 bars avec multi-injections, un système de contrôle de combustion à basse température avec recyclage des gaz d'échappement, un injecteur de port d'échappement et le système de filtre lui-même. Cet injecteur de port d'échappement est situé à la tête de cylindre. Il injecte du carburant pour réduire les oxydes d'azote dans le pot catalytique, oxyder les particules fines et contrôler la régénération du filtre par le soufre du carburant.

Le système DPNR fonctionne pour partie comme un piège à NO<sub>x</sub> et un FAP classique avec un mélange pauvre. Les NO<sub>x</sub> sont oxydés par le métal précieux et sont stockés sous forme de nitrates. L'oxygène libéré par les NO<sub>x</sub> lors de leur stockage sert à oxyder les particules.

En revanche, lorsque le mélange est rendu plus riche que la stoechiométrie par l'ajout de carburant via l'injecteur de port d'échappement, l'azote et une grande quantité d'oxygène sont libérés du matériau de stockage des NOx. Les NOx réagissent alors avec l'azote et une importante quantité d'hydrocarbures imbrûlés et de monoxyde carbone présents dans le gaz d'échappement, tandis que les particules sont oxydées par l'oxygène libéré par les NOx.

La difficulté est bien entendu de gérer le passage d'un mélange pauvre à un mélange riche. Elle doit notamment permettre d'éviter la formation de fumée.

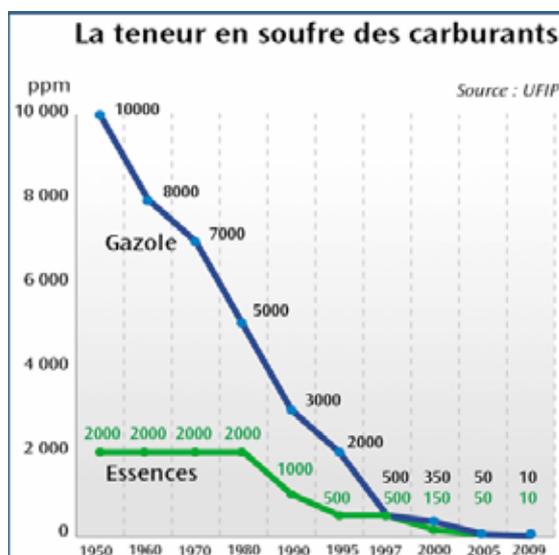
L'injecteur de port d'échappement est aussi utilisé pour augmenter temporairement la température du catalyseur à plus de 600°C pour régénérer le filtre.

Les essais menés en Europe montrent qu'il est ainsi possible d'atteindre un niveau d'émission de particule inférieur à la future norme Euro V et un niveau d'émission de Nox de 150 mg/km par rapport à une future norme de 200 mg/km.

## 1. La désulfuration du carburant

La présence de soufre dans le carburant conduit à émettre de l'oxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et des sulfates (une partie des particules) qui ont l'inconvénient d'encrasser les pièges à Nox.

La réglementation nationale, puis européenne, imposent depuis de nombreuses années une réduction progressive de la teneur en soufre des carburants et plus particulièrement du gazole.



Le passage à 10 ppm (particules par million) de soufre dans tous les carburants au 1<sup>er</sup> janvier 2009 est obligatoire. Les normes sont aujourd'hui de 50 ppm pour l'essence comme pour le gazole.

La désulfuration est opérée par hydrosulfuration du carburant, c'est-à-dire qu'ils sont transformés sous l'action d'hydrogène chaud (350°C) sous pression (50 à 100 bars) en hydrocarbures et en hydrogène sulfuré. Cette opération a l'inconvénient de faire baisser l'indice d'octane, ce qu'il faut ensuite compenser. Ce complément peut notamment être apporté par de l'ETBE fabriqué à partir d'éthanol.

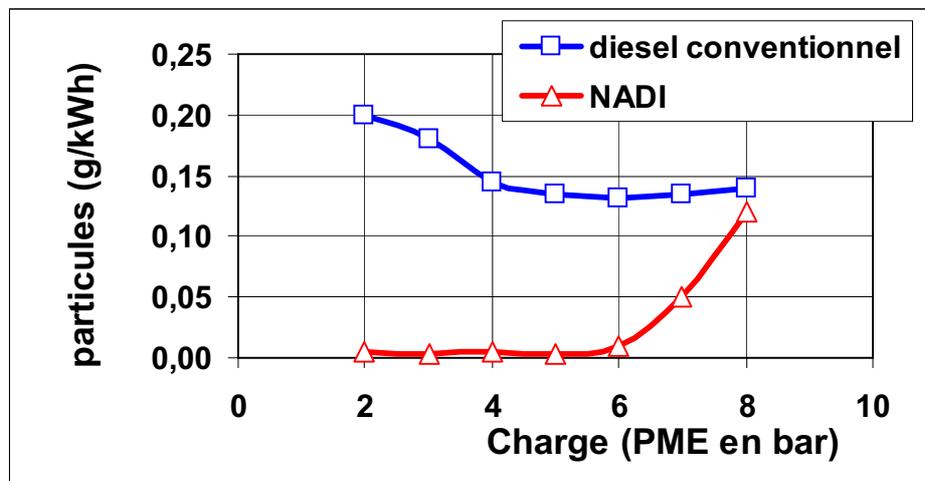
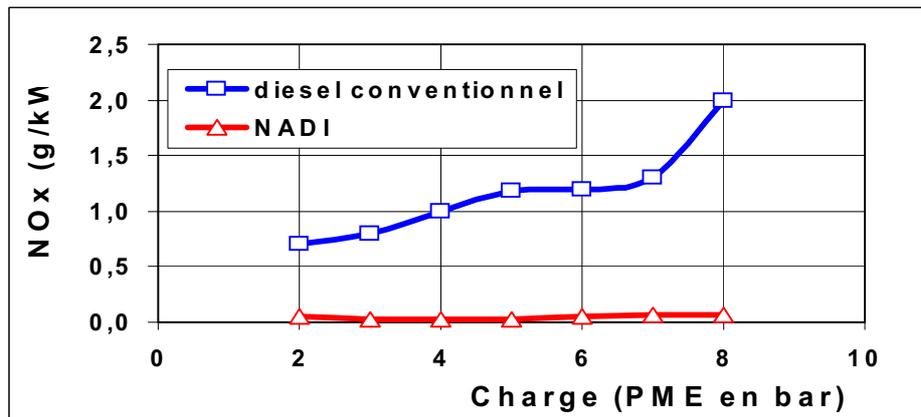
## **2. De nouveaux modes de combustion**

Le coût et la difficulté de mise au point des systèmes de post-traitement conduisent à envisager de nouveaux modes de combustion permettant de réduire en même temps dans le moteur les particules et les Nox.

Trois procédés seront ici évoqués : le NADI de l'IFP, le HCCI et le CAI. Les deux premiers ont trait au moteur diesel.

- **Le procédé diesel NADI-IFP**

Ce procédé, dit « Narrow angle direct injection », exploite un système de combustion constitué d'un injecteur dont l'angle du cône d'injection est très fermé (60° contre 150°) et une chambre de combustion adaptée. Il permet d'injecter le carburant très tôt dans le cylindre pour augmenter le temps consacré à l'homogénéisation du mélange air-carburant avant que l'auto-inflammation ne se produise (les moteurs diesel fonctionnent en effet par auto-inflammation du mélange air-carburant). S'y ajoutent un taux de compression variable et un recyclage des gaz brûlés pour optimiser la combustion. Ce procédé permet de **réduire les émissions de NOx dans un rapport de 20 à 100 et les émissions de particules dans un rapport de 5 à 10**. Les inconvénients sont l'augmentation du bruit et des émissions de CO et de HC. Ils peuvent être éliminés par des injections multiples et un catalyseur d'oxydation.

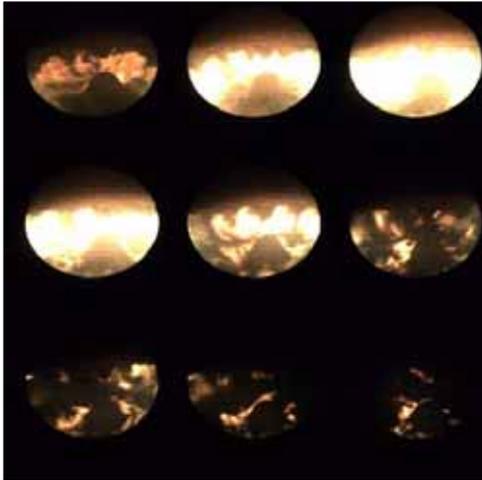


- Le diesel HCCI

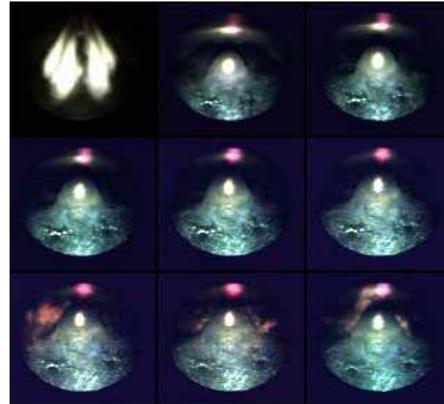
La combustion homogène HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) consiste à la fois à réduire la consommation et à réduire les polluants, notamment les NOx. Le défi consiste à contrôler le temps d'auto-allumage, la vitesse et la température pour optimiser le mélange et la combustion. Elle conduira à une évolution de la formulation des gazoles. Elle pourrait **aboutir vers 2010**.

Les photos ci-dessous représentant à gauche une combustion classique et à droite une combustion HCCI permettent d'illustrer le propos. La combustion classique est plus rapide et à plus forte température mais imparfaite, produisant des suies (flammes jaunes), tandis que la HCCI est mieux contrôlée, avec un mélange pauvre, à plus faible température et produit très peu de suies (flammes bleues).

### Combustion



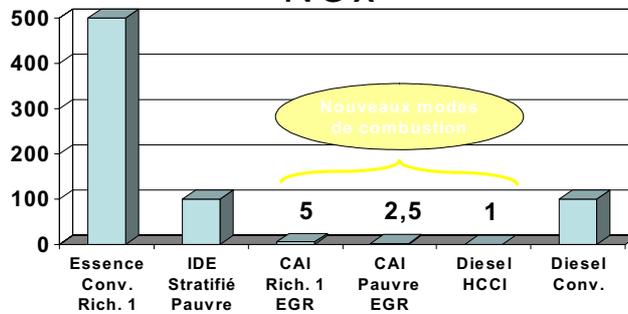
### Combustion



Conditions expérimentales : 1500 tr/min - PMI = 3

Le potentiel de réduction des Nox est très important, de l'ordre de 100 à 1.

### Le potentiel en émissions de NOx

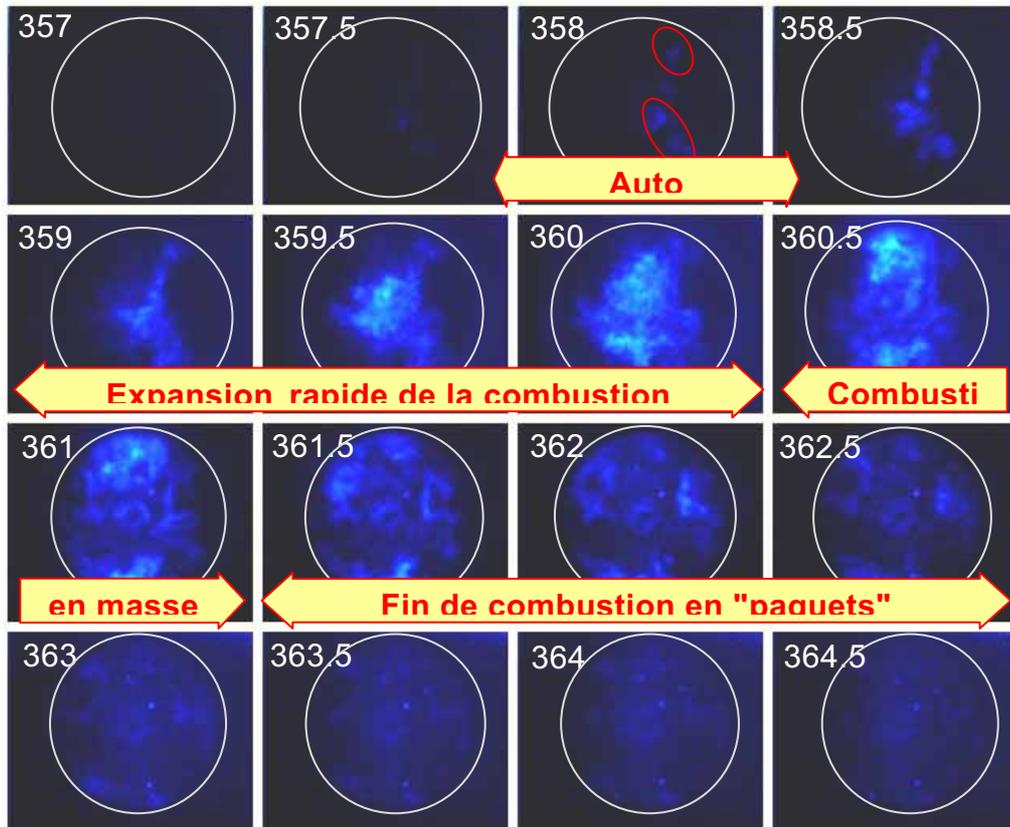


Comparaison par rapport à la référence diesel conventionnel (Réf. 100)

- **La combustion essence CAI**

La combustion de type CAI (Controlled Auto Ignition) a pour objectif d'allumer le mélange par auto-inflammation et non plus grâce à une bougie. Elle est provoquée par la rétention dans le cylindre de gaz chauds issus de la combustion lors du cycle précédent. Il permet de mieux maîtriser la combustion et de la rendre plus homogène (photos ci-dessous).

Ce mode de combustion pourrait être combiné selon les phases du moteur avec des combustions classiques.



## ***D. LES FILIÈRES ALTERNATIVES POUR RÉDUIRE LA POLLUTION ET LE CO2***

L'une des solutions envisagées et partiellement mise en œuvre est le développement de filières alternatives ne pouvant pas en France apporter une solution globale « *clés en main* », mais pouvant contribuer à la diversification énergétique pour des usages particuliers en fonction des types de véhicules, de flotte ou de lieu d'utilisation.

Deux voies principales existent aujourd'hui : le gaz naturel véhicule (GNV), le gaz de pétrole liquéfié (GPL).

### **1. Le gaz de pétrole liquéfié (GPL)**

Le GPL souffre de plusieurs graves handicaps. Les quelques accidents (Vénissieux 1999) qui sont intervenus ont donné une très mauvaise réputation à ce carburant. Elle a entraîné le reflux des ventes de voitures neuves en bicarburant et simultanément celle du nombre des points de vente, et des difficultés d'approvisionnement.

La filière avait connu un fort essor à partir de 1995. Mais elle connaît un déclin depuis 2000. Entre 2000 et 2004, les volumes de GPL carburant sont passés de 250.000 tonnes à 150.000 tonnes, tandis que le nombre de clients a stagné, puis décliné.

Néanmoins 180.000 véhicules roulent en France et bénéficient d'un réseau de 2.000 stations services, représentant un investissement de 200 millions d'euros.

Aujourd'hui, **l'évolution de la législation a rendu le GPL aussi sûr que les autres combustibles**. Les soupapes de sécurité sont obligatoires depuis le décret du 7 septembre 2000. S'y ajoutent d'autres dispositifs visant à éviter les situations dangereuses liées à une surpression.

Cependant **peu de constructeurs ont une offre de voitures neuves équipées en GPL**. Les marques qui ont fait les efforts les plus significatifs sont le français Renault (47 % du marché neuf en 2004) et le Coréen Daewoo (désormais Chevrolet – GM) qui offrent des gammes quasi complètes.

La voiture GPL a été considérée comme **voiture propre dans la loi de 1996 en raison de ses performances, à l'époque très supérieures en termes de pollution locale. Cet avantage demeure aujourd'hui mais s'est estompé** compte tenu des progrès de la dépollution des émissions, du manque

d'investissement des constructeurs dans l'optimisation des motorisations et de l'absence de voitures mono-carburant.

Cette situation est traduite par le comparatif présenté par M. Alain Morcheoine (ADEME) lors de l'audition publique organisée par vos rapporteurs le 18 octobre 2005.



**VOITURES EN UTILISATION RÉELLE  
COMPARATIF ESSENCE / DIESEL / GPL Euro3**

*ÉVALUATION ADEME AVEC PARTENAIRES EUROPÉENS*

Conditions de circulation	GPL / Diesel						GPL / Essence					
	CO	HC	NOx	Part	CO <sub>2</sub>	GES	CO	HC	NOx	Part	CO <sub>2</sub>	GES
Ville (4 km) démarrage moteur froid (20°C)	☹	☹	☺	☺	☹	☹	☹	☺	☺	☺	☺	☺
Ville moteur chaud	☹	☹	☺	☺	☹	☹	☹	☹	☺	☺	☺	☺
Route moteur chaud	☹	☺	☺	☺	☺	☺	☹	☺	☺	☺	☺	☺
Autoroute moteur chaud	☹	☹	☺	☺	☺	☺	☹	☺	☺	☺	☺	☺
Mixte dém. moteur froid (20°C) ville - extra urbain	☹	☹	☺	☺	☹	☹	☹	☺	☺	☺	☺	☺
Mixte moteur chaud ville - route - autoroute	☹	☹	☺	☺	☹	☺	☹	☹	☺	☺	☺	☺

☹ : moins bien    ☺ : équivalent    ☺ : mieux

A. MORCHEOINE

OPCEST Paris, 18 octobre 2005

Ce comparatif a été contesté par la filière GPL qui estime qu'il minimise l'avantage de ce carburant. Vos rapporteurs ont eu connaissance d'études contradictoires.

**Vos rapporteurs estiment que le débat sur le soutien à la filière GPL doit se poursuivre.** En effet, la filière a fait depuis 10 ans l'objet d'investissements publics importants, de la part de l'État comme des pétroliers. Un réseau de distribution est en place, la technologie est immédiatement disponible. **Les résultats sont décevants mais est-ce le moment d'arrêter ?**

Les tensions sur les prix du pétrole et plus spécialement sur le gazole sont en faveur d'un soutien à la diversification énergétique d'autant que le GPL continue, sur des modèles adaptés, de donner un avantage en termes de pollution locale mais aussi d'effet de serre (environ 10 %).

**Vos rapporteurs suggèrent une période d'observation supplémentaire de quatre ou cinq ans, à l'issue de laquelle les évolutions des technologies et des prix des carburants permettront éventuellement de**

**constater que la filière est devenue mature, ayant réussi à séduire un public suffisant, ou que la faiblesse de ses avantages ne justifie plus un soutien public.**

## **2. Le gaz naturel véhicule (GNV)**

Source d'énergie fossile et produit pétrolier, le gaz naturel, en fait du méthane, **peut être utilisé pour alimenter des véhicules après une compression à 200 bars**, soit la pression de bouteilles de plongée sous-marine.

Près de 4 millions de véhicules circulent au GNV dans le monde. Certains pays ont opté de manière très importante pour cette filière. C'est le cas de l'Argentine (1,3 millions de véhicules) ou de l'Iran.

L'utilisation du GNV est **relativement facile car, comme pour le GPL, des véhicules à bicarburations essence-GNV** peuvent être mis en service. Par sa composition chimique et ses propriétés intrinsèques, le GNV permet quasiment automatiquement **une diminution de l'ordre de 20 % des émissions de CO<sub>2</sub>, celle de certains polluants locaux et une diminution du bruit**, tout en offrant de bonnes conditions de sécurité et un rendement énergétique intéressant, quoique sensiblement inférieur, à celui des carburants classique.

**Au sein des produits pétroliers fossiles il permet une diversification** conformément aux objectifs nationaux et européens de développement des carburants de substitution au super et au gazole (20 % en 2020).

Les pouvoirs publics et les acteurs de la filière GNV<sup>1</sup> ont contractualisé leur action à travers trois protocoles quinquennaux successifs. Un premier protocole (juin 1994-novembre 1999) a accompagné le décollage de la filière et s'est traduit notamment par la mise en service de 350 autobus au GNV. Un second protocole (novembre 1999-juillet 2005) a permis d'amplifier ces premiers résultats. Aujourd'hui ce sont 1.600 autobus et 300 véhicules de service urbains (benne à ordures notamment – 40 % de la flotte à Paris) et 5.500 véhicules légers et véhicules utilitaires légers (VUL) qui roulent au gaz en France. **Mais le total reste modeste avec une flotte totale de moins de 10.000 véhicules.**

Un troisième **protocole a été signé le 4 juillet 2005** entre l'État et la filière GNV. Il fixe les objectifs communs pour 2010. Dans ce protocole,

---

<sup>1</sup> Association française du Gaz naturel pour véhicules (AFGNV) dont les principaux membres sont : Ministère de l'industrie, Gaz de France, Total, Carrefour, Renault Trucks, Renault, PSA, Carrefour, Total.

l'État s'engage à pérenniser les mesures fiscales de soutien à la filière. En 2010, le parc de bus au GNV devrait avoir doublé (3.000), celui des véhicules lourds devrait avoir quadruplé (1.200). Par ailleurs, les cinq prochaines années devraient voir se développer les véhicules légers et utilitaires légers au GNV dans les flottes d'entreprises et chez les particuliers. **Un objectif de 100.000 véhicules est retenu. Il y en aurait 20.000 en 2006 et 50.000 en 2008. Pour y parvenir, il est question de développer la distribution privative dans les entreprises et chez les particuliers** – Il y a 4 millions de pavillons en France susceptibles de recevoir le compresseur proposé par Gaz de France. Serait également mis en place un réseau de distribution public dans les stations services (Total et Carrefour notamment). 20 stations seraient disponibles en 2006, 200 en 2008 et 300 en 2010.

Pour assurer le développement des VL au GNV, le protocole affirme la volonté des constructeurs de fournir des véhicules assurant une parfaite transparence d'utilisation pour les particuliers et améliorant très sensiblement leur habitabilité et leur autonomie. Dans un premier temps, seuls des véhicules à bicarburation seront proposés puis, à une date non connue, des véhicules dédiés GNV.

**Aujourd'hui, peu de véhicules sont disponibles sur le marché français.** PSA commercialise des utilitaires depuis 1998 : les Peugeot Boxer et Citroën Jumper, et depuis 2001, les Peugeot Partner et Citroën Berlingo. Depuis 2004, PSA commercialise une C3 GNV à destination des sociétés (2 places). Dotée d'un moteur essence-GNV de 1,4 l et 68 ch, d'un réservoir GNV de 80 litres en plus du réservoir essence, cette voiture permet une autonomie de 250 km en mode gaz et de 700 km en mode essence. Une version 5 places à destination des particuliers sera commercialisée à partir de juillet 2005. Celle-ci disposera de réservoirs à gaz en carbone de 56 litres et non plus en acier, permettant une autonomie en mode gaz de 200 km. Cependant, non conçue dès le départ pour emporter ces réservoirs supplémentaires, la C3 les stocke dans la malle arrière, réduisant très significativement la dimension du coffre et donc la cantonnant à un usage urbain. PSA devrait proposer à l'étranger (Mecosur, Iran, Chine...) une motorisation dédiée GNV en 2006.

Une filiale spécialisée de Renault, SOMAC, a de son côté post-équipé près de 2 500 véhicules (Twingo, Clio, Express et Kangoo) depuis 1996. Ces véhicules ne sont cependant pas disponibles directement au catalogue du constructeur. Les développements futurs en matière de motorisation et de modèles restent d'ailleurs, comme chez PSA, à destination de certains marchés étrangers dans le Mercosur avec des Kangoo, Clio et Mégane tricorps. De même en Iran, une Logan GNV devrait être lancée au second semestre 2006.

Certains constructeurs étrangers sont aussi présents sur ce segment comme Opel avec la Zafira ou le VUL Combo.

**Vos rapporteurs restent cependant sceptiques sur la capacité réelle de la filière GNV de se développer pour plusieurs raisons :**

**- moins d'une dizaine de modèles sont disponibles à l'achat pour les particuliers ;**

**- les modèles disponibles ne sont que peu polyvalents** en raison de la perte d'espace dans le coffre qu'implique la bicarburation et de l'autonomie limitée en mode gaz ;

**- les modèles actuels à bicarburation ne permettent pas d'avantages substantiels** par rapport aux véhicules diesel modernes équipés de filtre à particules ;

**- des modèles dédiés GNV ne se développeront pas en France en dehors des flottes captives** en raison de l'absence de réseau de distribution. Compte tenu de l'expérience acquise dans la filière GPL, on ne voit pas pourquoi quelques 300 stations-service en 2010 permettraient le développement du GNV là où 2.000 stations GPL ne parviennent à donner le sentiment à la population d'un maillage satisfaisant du territoire ;

**- il ne paraît pas économiquement rentable, en France, pour les constructeurs automobiles français et les distributeurs pétroliers, de proposer un quatrième type de moteur et de carburant aux côtés du diesel, de l'essence, du GPL et voir des flex-fuel.** Un quatrième réseau de distribution ne peut que très difficilement être mis en place.



#### IV. L'EFFET DE SERRE : UN DÉFI POUR LES TRANSPORTS

Les études les plus récentes, notamment du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), ont permis d'établir une corrélation entre l'évolution du climat et la production anthropique de gaz à effet de serre (GES). Plus particulièrement les GES d'origine humaine seraient à l'origine de l'accélération du réchauffement.

Ce sujet est très complexe. De nombreuses inconnues subsistent. Elles doivent conduire à poursuivre les recherches pour mieux connaître l'évolution du climat, mieux appréhender l'action de l'homme et donc mieux définir les moyens de lutte à mettre en oeuvre.

Le climat futur est soumis à d'importantes incertitudes quant à l'ampleur du réchauffement, à sa rapidité et à ses conséquences sur l'environnement et l'homme. A titre d'exemple, le rôle du méthane est de plus en plus étudié. Parmi les gaz à effet de serre, au côté du CO<sub>2</sub>, le méthane joue un rôle très important puisque son pouvoir de réchauffement est 21 fois supérieur. Des recherches récentes ont mis en lumière l'importance des hydrates de méthane gelés (clathrate) dans les sédiments océaniques<sup>1</sup>, mais aussi dans le permafrost<sup>2</sup> et son impact potentiel sur évolutions climatiques futures. Il pourrait constituer un facteur majeur d'aggravation du réchauffement. Il pourrait donc être pertinent d'agir en priorité sur les émissions de méthane d'autant que le cycle de vie des molécules CH<sub>4</sub> est d'une dizaine d'année dans l'air.

Quelles que soient aujourd'hui les incertitudes, un consensus international, à la fois scientifique et politique, a conduit la France et l'Europe à s'engager pour la maîtrise, puis la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le cadre de la convention cadre des Nations unies sur le climat en 1992, puis du protocole de Kyoto en 1999. Celui-ci est entré en vigueur en 2005 et impose à la France une stabilisation de ses émissions de GES en 2010 par rapport à 1990 et à l'Europe une diminution de 8 %.

Au-delà du protocole de Kyoto, notre pays s'est engagé à diviser par quatre ses émissions à l'horizon 2050. En effet, si l'on veut permettre aux pays du Sud de se développer, tout en divisant par deux les émissions mondiales, les pays développés doivent réduire leurs émissions d'un facteur quatre.

**C'est donc à l'aune de ces deux engagements, stabilisation en 2010 par rapport à 1990 et division par quatre en 2050, qu'il faut aborder la question de la contribution de l'automobile à l'effet de serre.**

---

<sup>1</sup> Cf. *The clathrate gun Hypothesis*, 2002, James Kennett, Santa Barbara University, California.

<sup>2</sup> Cf. *The New Scientist Magazine*, n°2512, 11 août 2005, p.12.

Or, l'automobile et plus généralement le secteur du transport apparaissent comme les émetteurs les plus dynamiques et dont la réduction est sans doute la plus difficile en raison du très grand nombre de sources d'émission et de l'inertie du parc automobile.

Ce constat a conduit vos rapporteurs à analyser en détail les émissions des automobiles, puis les différentes solutions technologiques à moyen ou long terme : amélioration du moteur à combustion interne, biocarburants, hybridation, voiture électrique et hydrogène.

## ***A. LE SECTEUR DES TRANSPORTS : L'ÉMETTEUR LE PLUS DYNAMIQUE***

Le secteur des transports est l'émetteur de CO<sub>2</sub> le plus dynamique. Cette situation se vérifie quel que soit le pays du monde mais avec des différences significatives sur le marché des voitures particulières, certains marchés étant orientés vers une stabilisation ou une diminution des émissions. L'examen des émissions doit aussi conduire à prendre en compte les émissions des auxiliaires qui ne sont pas pris en compte dans les cycles d'essai servant à mesurer les émissions, tout particulièrement la climatisation.

Vos rapporteurs évoqueront aussi, en dernier lieu, les mesures susceptibles d'accélérer la prise en compte par le public et les constructeurs de la nécessité de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.

### **1. Les transports dans les émissions globales**

- **Au niveau mondial**

**Dans le monde, les émissions totales de CO<sub>2</sub> représentaient, en 2000, 20 milliards de tonnes.** Sur ce total, la production d'énergie en représentait 37 %, l'industrie 20 %, **le transport 27 %**, le résidentiel et le tertiaire 12 % et l'agriculture 2 %.

Les 27 % d'émissions du secteur des transports sont essentiellement le fait de **la route qui représente à elle seule 20 % des émissions.**

Au sein de ces 20 %, ce sont **les véhicules particuliers qui représentent la plus grande part avec 12 % des émissions totales**, les véhicules utilitaires légers 3 % et les poids lourds 5 %.

- **Comparaison entre grands pays**

Si l'on compare ensuite les grands pays entre eux ou des ensembles de pays, les différences font ressortir les choix énergétiques propres à chacun.

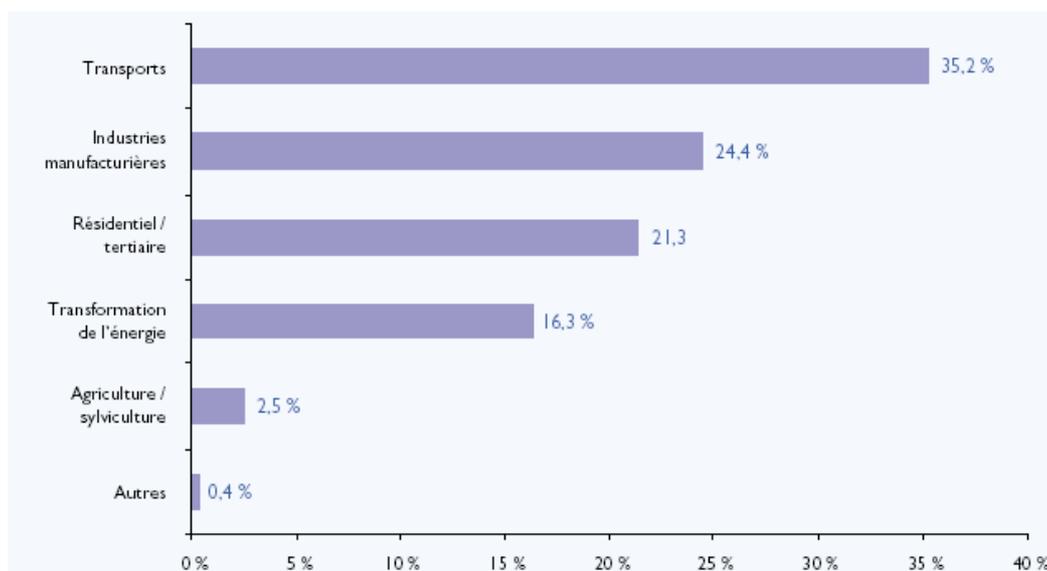
L'Union européenne à 15 émettait, en 2001, 3,2 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> par an contre 5,6 milliards aux États-Unis.

Aux États-Unis, l'énergie représente près de 40 % des émissions (2,2 Mds de t) et les transports plus de 25 % (1,7 Mds de t). Ces deux secteurs sont beaucoup moins importants en Europe. Cela se traduit par une **émission de CO<sub>2</sub> par habitant pour le transport de 6,2 tonnes aux États-Unis et de 2,2 tonnes en Europe.**

**En France, la part du transport dans les émissions totales est plus importante qu'aux États-Unis et que dans tous les pays européens, cependant les émissions de CO<sub>2</sub> par habitant pour le transport sont les mêmes (2,2 tonnes). Cela s'explique par les choix énergétiques français. La France n'émet que 386 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an contre 846 en Allemagne ou 307 en Pologne, et surtout 58 millions de tonnes dans le secteur énergétique contre respectivement 345 et 178.**

- **En France**

**La France est l'un des pays industrialisés qui émet le moins de dioxyde de carbone par habitant**, grâce à la place importante du nucléaire et de l'hydraulique dans son bilan énergétique. Mais cette structure de la production limite fortement les possibilités de réduire encore ses émissions par substitution de combustibles dans la production électrique. L'effort doit porter sur les secteurs où les émissions sont les plus diffuses et l'inertie la plus forte : les transports et l'habitat



Sources CITEPA/ADEME

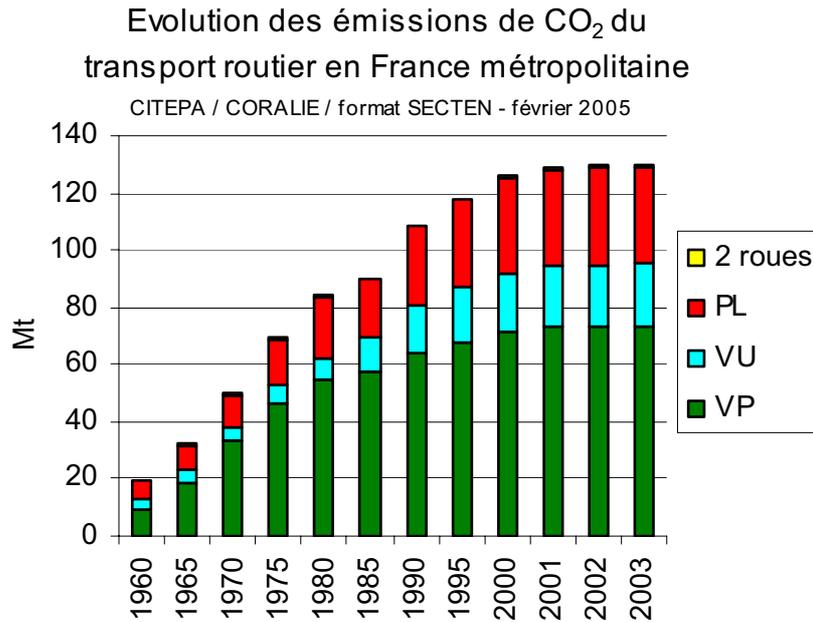
Au regard de la consommation d'énergie<sup>1</sup>, le secteur des transports paraît également prépondérant. Ils représentaient 25 % de la consommation d'énergie finale en 2000 contre 20 % en 1973 et 66 % de la part de la consommation de produits pétroliers contre 34 % en 1973. Cette évolution s'explique par le fait que les transports restent entièrement dépendants du pétrole, alors que la production d'électricité par l'énergie nucléaire s'est fortement développée.

---

<sup>1</sup> Cf. Alain Morcheoine, «Transport, maîtrise de l'énergie et effet de serre », Sénat 8 avril 2004.

Au sein du secteur du transport, la part du transport routier a crû plus vite. Il représente désormais 79 % de la consommation d'énergie du secteur contre 71 % en 1973.

Il en résulte que **les transports routiers représentaient en 2003 27 % des émissions de gaz à effet de serre et 34 % des émissions de CO<sub>2</sub> (149,1 MteCO<sub>2</sub>/an)<sup>1</sup>.**

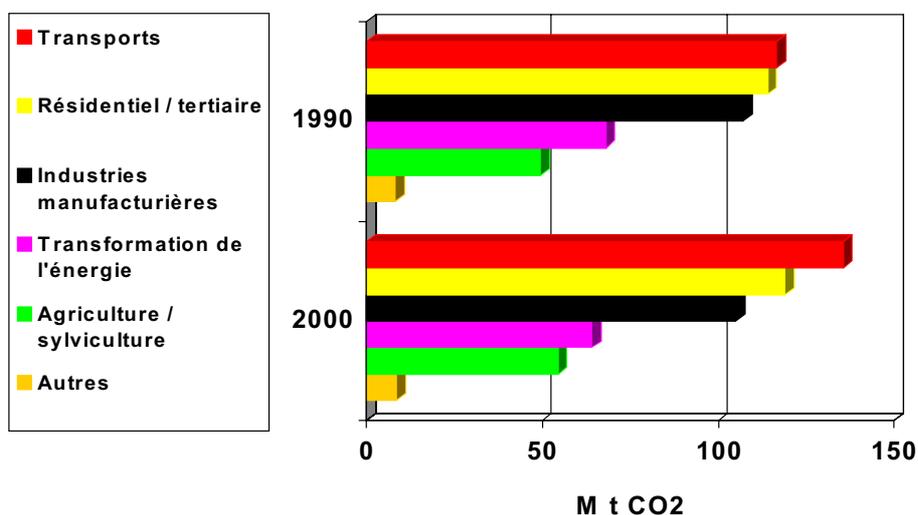


**C'est le secteur qui progresse le plus vite depuis 1990 : +23 %.**

<sup>1</sup> Source : MIES, 2005.

## ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub> PAR SECTEUR D'ACTIVITÉ

(Source CITEPA)



A lui seul, le secteur des transports est donc susceptible de compromettre le respect des objectifs de la France aux horizons 2010 et 2050.

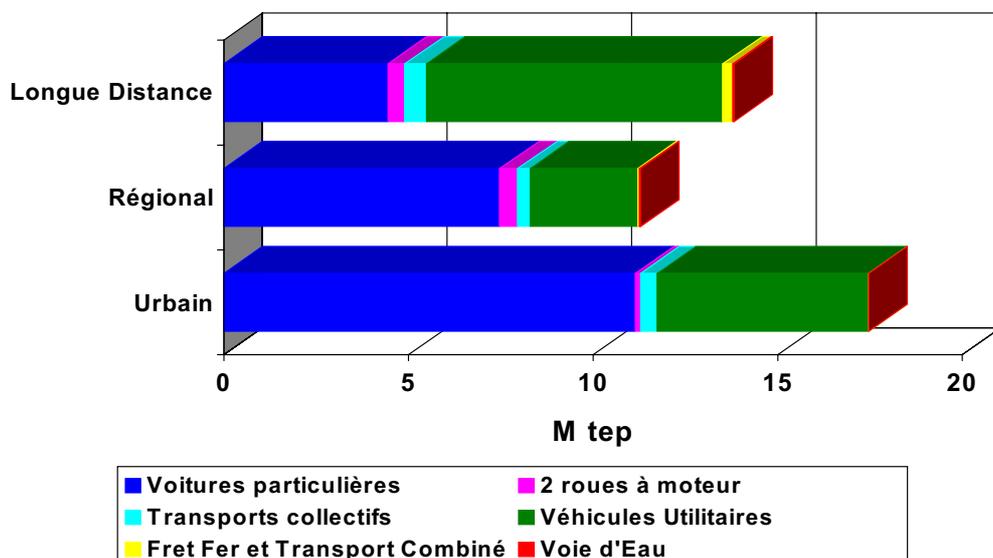
Par ailleurs, l'analyse de la répartition géographique et par type de la consommation énergétique des transports terrestres permet de mettre en lumière les différents types de déplacement et flux de trafic.

Le déplacement dans les agglomérations représente 41 % du bilan total, dont 2/3 pour les déplacements de personnes. Il en est globalement de même des transports régionaux.

Les trajets interurbains à longue distance (+ 100 km) représentent 32 % du bilan, dont 2/3 pour le transport routier de marchandises.

Cette consommation énergétique se décline de la manière suivante en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> :

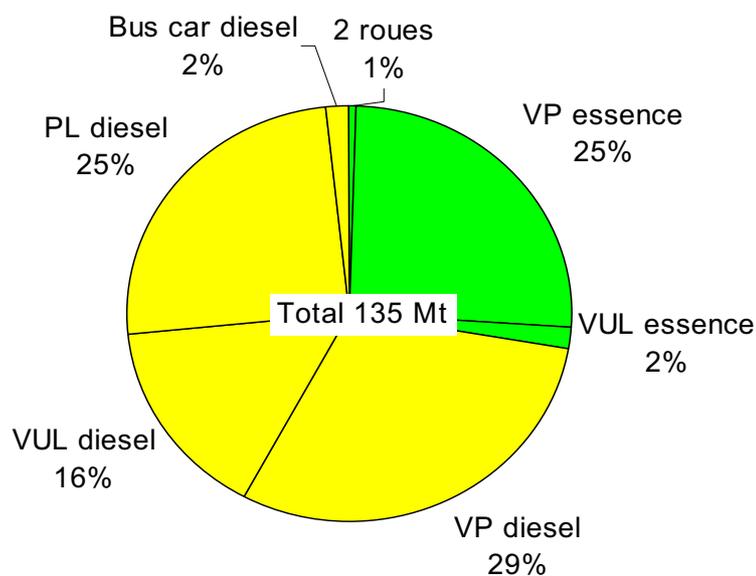
### BILAN ÉNERGETIQUE 2000 DES TRANSPORTS TERRESTRES QUI CONSOMME ? OÙ ?



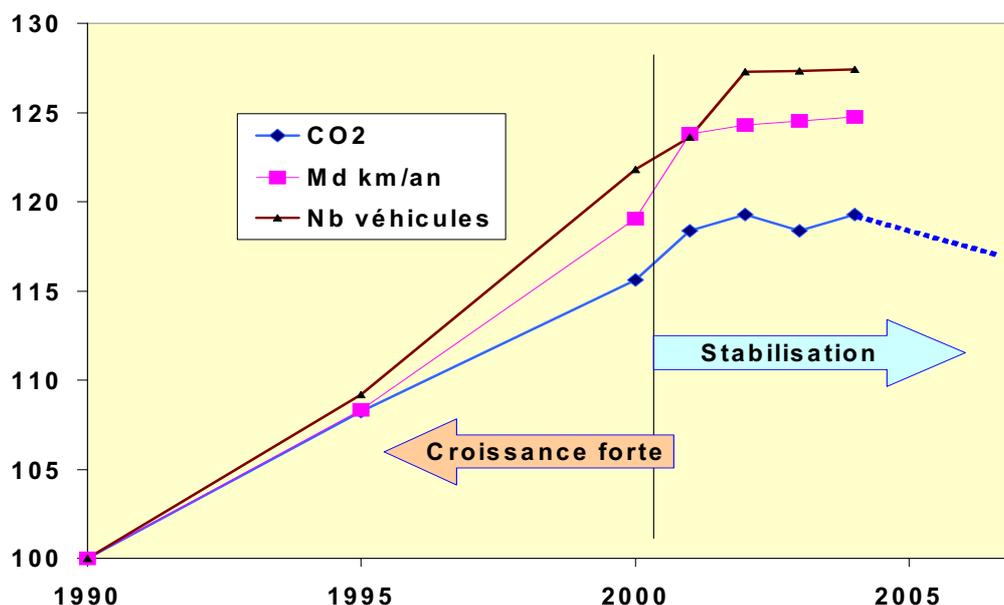
(source METLTM/ADEME)

## 2. Les émissions des voitures particulières en France

Les émissions du transport routier sont en France de 135 MteCO<sub>2</sub> et se répartissent de la manière suivante :



Les émissions du transport routier ont en France fortement progressé depuis 1990.



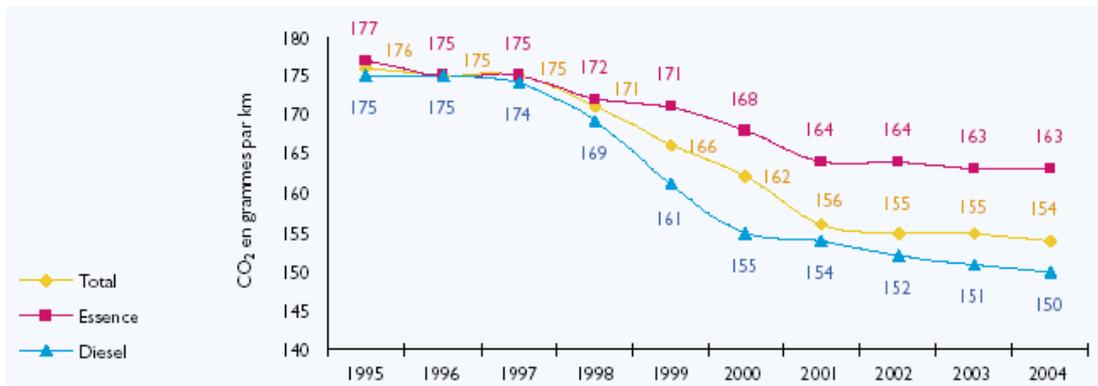
Selon le CCFA, on assiste donc à une stabilisation des émissions qui devrait se poursuivre par une baisse telle que le montrerait l'année 2004.

	CO2 Mt2003	CO2 Mt2004	2004/2003
VP	75,6	74,8	-1,0%
VUL	22,7	23,1	1,8%
PL	33,1	33,9	2,5%
Bus car	2,06	2,11	2,5%
2 roues	0,8	0,7	-4,8%
<b>total</b>	<b>134</b>	<b>135</b>	<b>0,4%</b>

Les émissions unitaires des voitures particulières sont mesurées sur un cycle d'essai européen normé. Elles sont exprimées en grammes de CO<sub>2</sub> par kilomètre parcouru.

Les émissions par km parcouru sont en baisse sensible depuis 1995. Elles sont passées de 175 g/km en moyenne à 154 g en 2004. Cependant, depuis quatre ans la diminution des émissions stagne<sup>1</sup>.

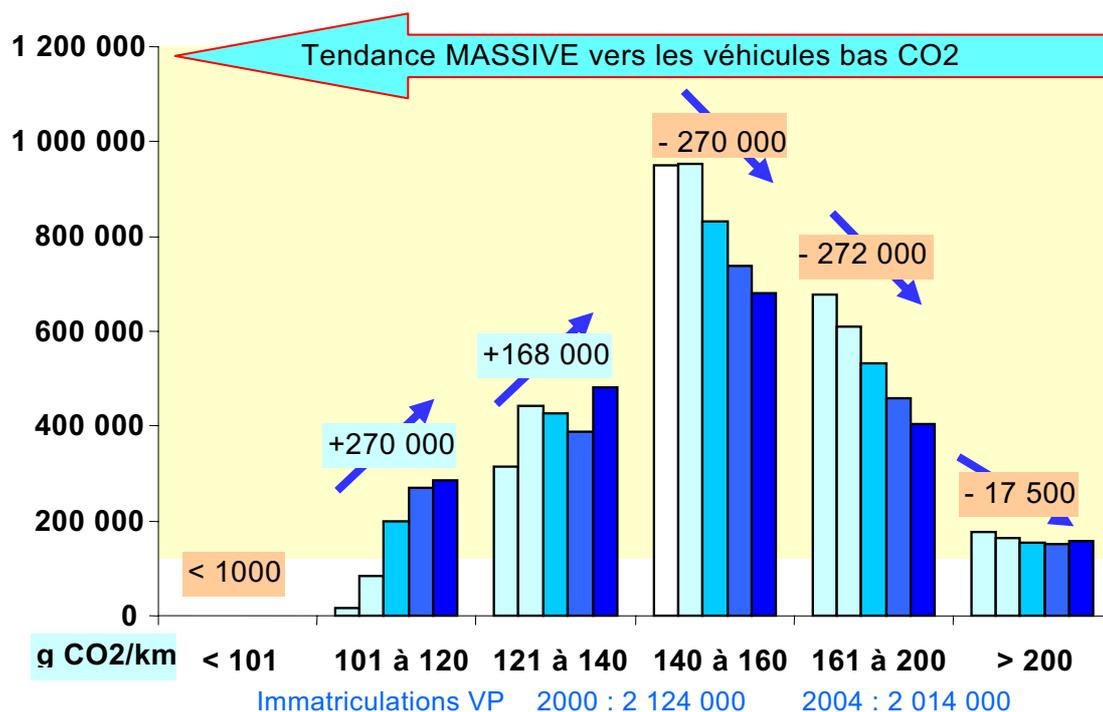
<sup>1</sup> Les données ci-dessous ainsi que les graphiques sont issus du rapport annuel de l'ADEME « Les véhicules particuliers en France », 2004, établi par Mme Sandrine Catania du département des technologies des transports.



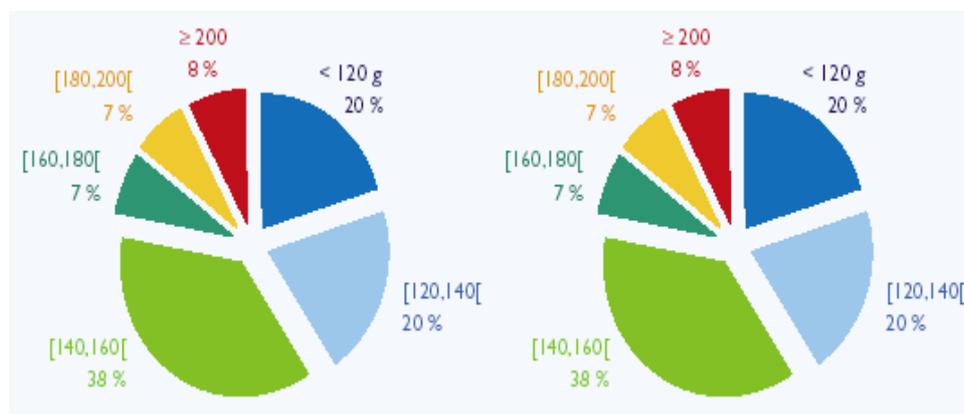
Cette évolution est confirmée par l'évolution de la consommation moyenne de carburant. Celle-ci baisse dans les mêmes proportions sous l'effet de la diésélisation du marché et de la baisse de consommation spécifique des nouveaux moteurs diesel.



Les progrès de la motorisation diesel se traduisent très rapidement dans les émissions du parc permettant le développement rapide de véhicules émettant moins de 120 g et de véhicules émettant moins de 140 g. **En 2004, 287.692 véhicules émettant moins de 120 g ont été vendus, soit 14 % des ventes. Ce sont les constructeurs français qui sont les plus performants sur ce segment de marché.**



Les progrès accomplis et l'effet de la diésélisation apparaissent lorsque l'on compare, en 2004, les ventilations des émissions entre essence (à gauche) et diesel (à droite) :



Ainsi seuls 20 % des véhicules essence vendus en 2004 en France émettent moins de 140 g alors que 40 % des véhicules diesel ont des émissions inférieures à ce chiffre.

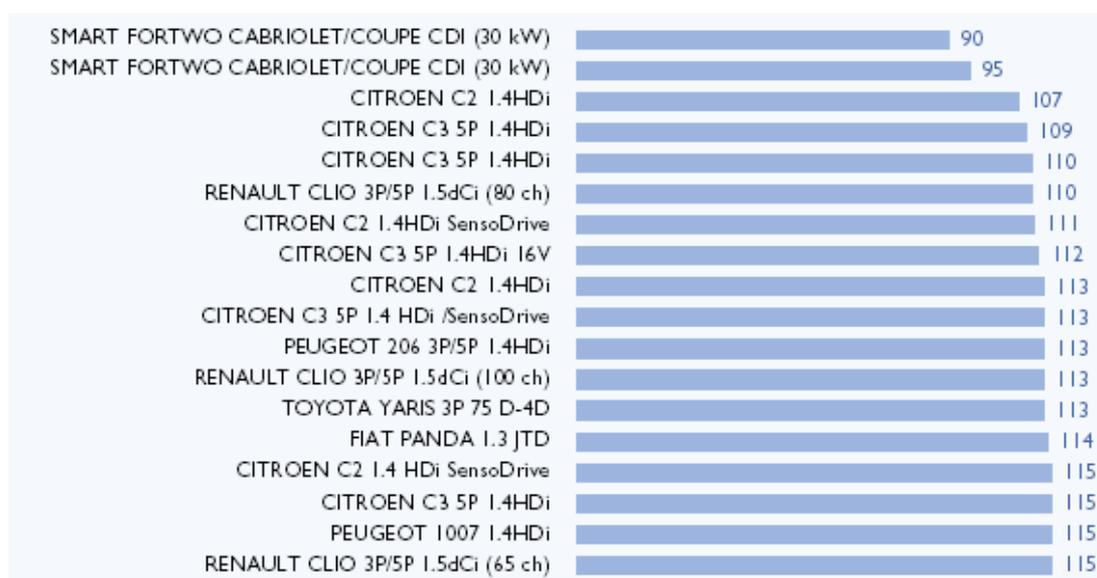
**Les dix modèles les plus vendus émettant moins de 120 g :**

	MARQUE	MODÈLE	CO <sub>2</sub> (g/km)	VENTES 2004
1	RENAULT	CLIO	110 à 115	82442
2	PEUGEOT	206	113 à 120	46734
3	CITROËN	C3	110 à 115	44872
4	RENAULT	MEGANE	117 à 119	37317
5	CITROËN	C2	108 à 115	9913
6	TOYOTA	YARIS	113 à 117	8879
7	FORD	FIESTA	114 à 120	4036
8	SMART	CITY	90 à 120	5616
9	FIAT	PUNTO	119	4111
10	FORD	FUSION	116 à 119	2874

Source ADEME

En dessous de 115 g de CO<sub>2</sub>, ce sont 138 207 véhicules diesel qui ont été vendus dont 134 000 par les constructeurs français.

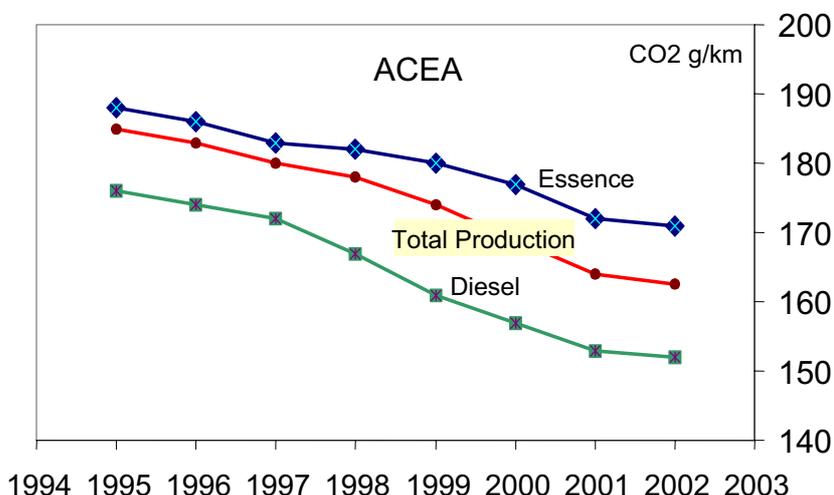
**Les dix meilleurs modèles diesel sont :**



Ce sont donc logiquement les constructeurs français qui ont les moyennes d'émissions les plus basses sur leurs gammes. La gamme Renault émet en moyenne 148 g et la gamme PSA 149 g en 2004.

Ces données doivent être analysées au regard de l'objectif volontaire des constructeurs européens d'atteindre une moyenne collective de 140 g en 2008 et de 120 g en 2012. L'engagement de 140 g

d'émissions correspond à une consommation de 5,2 l de diesel et 5,8 l d'essence aux 100 km. 120 g équivaut à 4,5 l de diesel et 5 l d'essence aux 100 km.



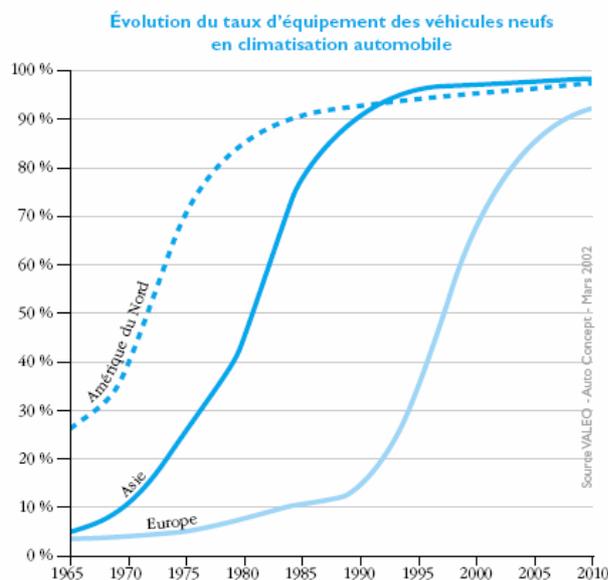
La Commission européenne relevait en juin 2005 que l'ACEA (Association européenne des constructeurs automobiles) avait atteint une moyenne de 163 g/km en 2003, soit un progrès de 11,9 % par rapport à 1995, la JAMA (association des constructeurs japonais) 172 g, soit - 12,2 % et la KAMA (association des constructeurs coréens) 179 g, soit - 9,1 %. **Pour la Commission le danger est donc important que les constructeurs n'atteignent pas leurs objectifs en 2008 et plus encore en 2012.**

### 1. La prise en compte des auxiliaires : l'exemple de la climatisation

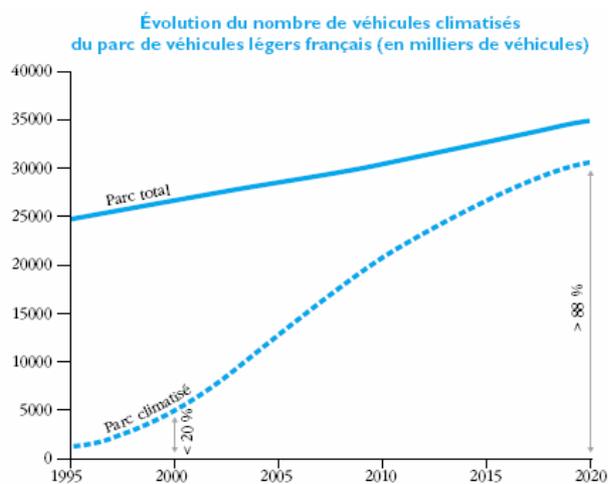
Comme l'ont d'ores et déjà indiqué vos rapporteurs, la mesure des émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules est faite à partir d'un cycle théorique défini au niveau européen qui ne prend pas en compte le fonctionnement des auxiliaires, tout particulièrement la climatisation. Une étude de l'ADEME a mis très clairement en lumière ce problème<sup>1</sup>.

Marginale il y a 20 ans en Europe avec moins de 10 % des véhicules neufs équipés, la climatisation est devenue un phénomène de masse. Plus de 90 % des véhicules neufs vendus en Europe en sont équipés. Avec 20 et 25 ans de décalage, le marché européen rejoint ainsi les marchés asiatiques et américains. La progression a été extrêmement rapide puisque le taux d'équipement est passé de 12 % environ en 1990 à plus de 90 % en 2005.

<sup>1</sup> La climatisation automobile, Stéphane Barbusse et Laurent Gagnepain, n°4343 ADEME.



Progressivement c'est donc l'ensemble du parc automobile français qui en est équipé. L'ADEME estime que 2/3 du parc seront équipés en 2010 et 9/10 en 2020.



Les résultats des travaux menés par l'ADEME avec l'UTAC confirment les premières analyses faites en 1996-1997. Les tests ont été effectués avec une température d'air ambiant de 30°C et 50 % d'humidité relative mais sans soleil.

Ces tests ont permis de démontrer une surconsommation comprise entre 12 et 43 % soit 0,7 l à 4 l au 100 km. Les meilleurs résultats sont obtenus par les moteurs diesel atmosphériques et les moins bons par les turbo-diesel.

En cycle extra-urbain, les résultats les plus favorables sont compris en +12 et + 28 % (EUDC).

En cycle mixte (MVEG), les surconsommations sont comprises entre 19 et 36 %.

En cycle urbain, les résultats sont très négatifs : entre 26 et 43 % de surconsommation.

	Surconsommation en l/100 km (entre parenthèses variation en %)		
	Cycle urbain (ECE)	Cycle extra-urbain (EUDC)	Cycle mixte (MVEG)
<b>Essence</b> (moyenne 10 véhicules)	+ 3,1 (+ 31 %)	+ 0,9 (+ 16 %)	+ 1,7 (+ 23 %)
<b>Diesel atmosphérique</b>	+ 2,4 (+ 26 %)	+ 0,7 (+ 12 %)	+ 1,3 (+ 19 %)
<b>Diesel suralimenté (turbo Diesel)</b>	+ 4,0 (+ 43 %)	+ 1,5 (+ 28 %)	+ 2,5 (+ 36 %)
<b>Ensemble des Diesel</b> (moyenne 10 véhicules)	+ 3,2 (+ 35 %)	+ 1,1 (+ 20 %)	+ 1,9 (+ 27 %)

*T extérieure = 30 °C, T consigne = 20 °C, essai sur cycle NMVEG cf. Dir. 98/69.*

Surconsommations moyennes en l/100 km  
entre l'essai climatisation en marche et sans climatisation

**Ainsi, la climatisation utilisée à elle seule, voire au-delà, tous les progrès accomplis par les constructeurs en matière d'amélioration des consommations.**

L'augmentation de la consommation de carburant se traduit par une augmentation des polluants qui est dans la majorité des cas plus que proportionnelle :

	CO	HC	NO <sub>x</sub>	Particules
<b>Essence</b>				
Urbain	+ 17 %	~ 0	+ 74 %	-
Extra-Urbain	+ 75 %	~ 0	+ 51 %	-
<b>Diesel</b>				
Urbain	- 30 %	- 24 %	+ 47 %	+ 60 %
Extra-Urbain	- 28 %	- 23 %	+ 27 %	+ 32 %

*T extérieure = 30 °C, T consigne = 20 °C, essai selon Directive 98/69 – nouveau cycle MVEG.*

Émissions moyennes de polluants mesurés en g/km  
Écart en % entre essai climatisation en marche et sans climatisation

A cette surconsommation de carburant s'ajoutent les pertes de fluides frigorigènes en cours d'utilisation en raison de l'usure ou de fuites dans les raccords, les flexibles, le compresseur, les joints...

L'ADEME a calculé qu'en moyenne, les automobiles sont chargées en gaz refroidissant à hauteur de 775 g. Sur 12 années de vie, ils perdraient par

fuite 15 % de cette masse, soit 116 g/an, auxquels s'ajoutent 2 demi-charges lors des maintenances soit 775 g sur 10 ans et une demi-charge émise sur la durée de vie soit 387g. Ainsi, les automobiles françaises équipées de climatisation perdraient chaque année en moyenne sur leur durée de vie 232 g par an.

Or, l'hydrofluorocarbone (HFC) utilisé habituellement le « R134a » a un pouvoir de réchauffement global (PRG) 1 300 fois plus important que le CO<sub>2</sub>. Ainsi 1 kg de ce gaz équivaut à 1,3 t de CO<sub>2</sub>.

Cela conduit l'ADEME à estimer, dans le meilleur des cas, pour un véhicule roulant 12.000 km/an et dont on serait parvenu à réduire les rejets à 93g/an de HFC (choix des composants les plus performants, très bon entretien), une émission supplémentaire de 10geCO<sub>2</sub>/km.

L'ADEME a ensuite cherché à mesurer l'effet global de la climatisation sur les rejets de gaz à effet de serre en cumulant la surconsommation et les fuites de HFC. Cette étude a été corroborée par un travail similaire réalisé au centre d'énergétique de l'école des Mines de Paris.

**Ainsi, en France, en 2010, l'usage de la climatisation automobile entraînerait une émission supplémentaire de 4 millions de tonnes équivalent CO<sub>2</sub> (MteCO<sub>2</sub>). Or, ces rejets ne sont nullement une fatalité. Ils permettent au contraire d'identifier un gisement de 3 MteCO<sub>2</sub>, équivalent à l'application de l'engagement des constructeurs européens ou du respect des limitations de vitesse.**

Au niveau européen, l'impact est plus important encore puisque l'ADEME estime que ce sont 31 MteCO<sub>2</sub> qui pourraient être évitées en 2012 si l'efficacité énergétique des systèmes de climatisation était améliorée (diminution de la surconsommation) et 37,4 MteCO<sub>2</sub> si l'entretien et la récupération des fluides étaient mieux organisés.

Si l'ampleur exacte de la surconsommation et son impact sur les rejets de CO<sub>2</sub> ont fait l'objet de contre-expertises de la part du Comité des constructeurs automobiles français (CCFA) qui l'estime globalement à 5 % de la consommation annuelle à partir d'une surconsommation moyenne en ville de 30 % (1/4 des trajets), de 18 % sur route (1/2 des trajets) et de 12 % sur autoroute (1/4 des trajets), la nocivité du fluide frigorigène est reconnue par tous les acteurs. **L'ACEA s'est engagée à réduire l'utilisation des HFC de 20 % en 2009 puis à les supprimer progressivement d'ici à 2014.**

**Une directive européenne devait être adoptée avant fin 2005** (approuvée par le Conseil en octobre 2004). Elle imposera la limitation des fuites de fluide frigorigènes et l'abandon progressif du R134a et **son remplacement par deux gaz : le CO<sub>2</sub> et le R152a**. Elle s'appliquera aux véhicules particuliers et aux utilitaires légers (masse inférieure à 1 205 kg).

**Ainsi, à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2007 pour les nouveaux types de véhicules et du 1<sup>er</sup> janvier 2008 pour tous les véhicules neufs, le fluide frigorigène utilisé devra avoir un PRG inférieur à 150 ou un taux de fuite inférieur à 40 g/an ou 60 g/an pour les doubles évaporateurs. A partir du 1<sup>er</sup> janvier 2011, la climatisation de tous les nouveaux types de véhicules et du 1<sup>er</sup> janvier 2017, de tous les véhicules neufs, devra utiliser un fluide frigorigène dont le PRG est inférieur à 150.**

Par ailleurs, **au niveau national, le Gouvernement doit prochainement adopter un décret imposant que seuls les professionnels et les garages agréés puissent intervenir sur les climatisations.** Ces professionnels obtiendront l'agrément à la suite d'une formation et après s'être dotés d'un matériel permettant de récupérer les fluides frigorigènes. Ils seront les seuls à pouvoir acheter ces fluides et devront restituer les fluides récupérés lors des entretiens et en fin de vie.

L'utilisation du CO<sub>2</sub> nécessite une évolution importante des systèmes de climatisation. En effet, il devra passer dans le système d'une pression de 35 bars à 130 ou 150 bars, opération au cours de laquelle il gagne ou perd environ 150°C. A de telles pressions, l'étanchéité devra être parfaite. Ces systèmes sont aujourd'hui coûteux.

L'équipementier Delphi a présenté en octobre un prototype abouti d'un système de climatisation fonctionnant à base de CO<sub>2</sub>. Comme dans un système classique, le CO<sub>2</sub> doit absorber la chaleur en s'évaporant et la libérer en se condensant. Ainsi, le refroidissement se déroule en quatre phases. Lors d'une première étape le gaz est comprimé à 130 bars et atteint 165°C (au lieu de 20 bars et 90°C avec du R134a). Le gaz est ensuite envoyé dans un refroidisseur où un échange se produit avec l'air extérieur. Le gaz ainsi refroidi est ensuite détendu à environ 30 bars, se liquéfie et atteint 0°C. La dernière étape est l'évaporation qui permet le rafraîchissement de l'habitacle. L'une des particularités du prototype de Delphi est d'utiliser le gaz, après évaporation, pour contribuer au refroidissement avant le détendeur et ainsi économiser de l'énergie. Le cycle inverse permet le réchauffement.

L'autre gaz envisagé, le R152a, reste 130 fois plus nocif que le CO<sub>2</sub> mais est un meilleur réfrigérant. Son utilisation nécessitera également une très bonne étanchéité puisque, constitué en partie d'hydrogène, il présente un risque d'explosion.

Avec ces deux gaz, c'est donc un équilibre qui sera recherché entre la surconsommation du véhicule, les nécessités d'étanchéité et de sécurité et la contrainte de coût.

Un autre point du système de climatisation sera amélioré : le compresseur. Actuellement, sur la plupart des véhicules, il fonctionne en continu et absorbe environ 8 CV de puissance. Une nouvelle génération à

cyindrée variable devrait permettre une adaptation au refroidissement ou au réchauffement demandée. Une division par quatre de la surconsommation en est attendue.

A la suite des études menées par l'ADEME et celles menées au niveau européen ou à l'étranger, **vos rapporteurs tirent donc les conclusions suivantes :**

**- l'inefficacité des systèmes de climatisation est aujourd'hui particulièrement préoccupante et offre un gisement important de réduction des émissions de GES ;**

**- la sensibilisation des conducteurs doit être poursuivie activement pour une utilisation raisonnée de la climatisation et une généralisation des gestes d'entretien ;**

**- l'amélioration de l'efficacité des systèmes et le renforcement de l'étanchéité sont immédiatement nécessaires ;**

**- la mise au point et la commercialisation de systèmes de climatisation sans HFC doivent être fortement encouragées ;**

**- la réduction de la puissance des climatisations en raison de la meilleure isolation thermique des automobiles doit être recherchée ;**

**- les cycles de test européen des véhicules doivent prendre en compte la totalité des auxiliaires et tout particulièrement la climatisation.**

## **2. Le plan climat et la nécessaire promotion de solutions non technologiques**

### **• Le plan climat 2004**

Le plan climat adopté en 2004 par le Gouvernement a pour objectif de permettre à la France de respecter ses engagements d'ici à 2010 et à l'horizon 2050. Il est structuré en sept chapitres : sensibilisation, transport, bâtiment, industrie, énergie, agriculture et forêt et plans climat territoriaux et État exemplaire.

Dans le cadre **des transports, une économie de 16,3 MteCO<sub>2</sub> est visée.**

Les mesures 1 à 8 concernent directement l'automobile. Il s'agit de :

- \* la réduction des émissions des automobiles conformément aux engagements des constructeurs dans le cadre de l'ACEA, soit 3 MteCO<sub>2</sub> en 2010,

- \* la réduction de l'impact de la climatisation des véhicules : 4 MteCO<sub>2</sub>,
- \* la mise en œuvre de la directive biocarburants : 7 MteCO<sub>2</sub>,
- \* la création d'une étiquette énergie : 0,2 MteCO<sub>2</sub>,
- \* le bonus-malus à l'achat : 1 MteCO<sub>2</sub>,
- \* le respect des vitesses autorisées : 3 MteCO<sub>2</sub>,
- \* la sensibilisation à l'écoconduite lors du permis de conduire : 0,7 MteCO<sub>2</sub>,
- \* la recherche – plan « *véhicule propre* ».

Parmi les mesures du plan climat, plusieurs sont en totalité ou pour partie de nature technologique : baisse de consommation, développement des biocarburants, climatisation, recherche, soit 14 MteCO<sub>2</sub>.

Elles seront d'ailleurs particulièrement difficiles à atteindre. Le respect de leurs engagements par les constructeurs est aujourd'hui incertain à l'horizon 2008 et surtout à l'horizon 2012.

L'application de la directive biocarburants est en bonne voie et a même été accélérée par décision du Premier ministre en septembre (voir ci-dessous).

En matière de recherche, le « *plan véhicule propre* » a été conforté par l'annonce, également en septembre, d'un programme de 100 M€ pour la réalisation d'une voiture familiale ne consommant que 3,5 l/100km. 20 M€ sont disponibles dès 2004.

Cependant, une grande partie de la réussite du plan climat repose sur des mesures non technologiques relevant des comportements individuels : utilisation de la climatisation, conduite économe, attitude à l'achat, respect des limitations de vitesse.

#### • **Information des conducteurs**

Un des axes importants est l'information des conducteurs lors de l'achat et de l'utilisation de leurs véhicules. Plusieurs mesures, approuvées par vos rapporteurs, sont mises en place : la formation à l'éco-conduite, la diffusion de bonnes pratiques, la mise en place d'une étiquette énergie.

- **L'adoption d'une conduite souple** permet des économies substantielles. L'ADEME estime qu'une conduite agressive en ville peut accroître de 40 % la consommation des véhicules. La plupart des entreprises de transport en commun ou de livraison forment désormais leurs conducteurs. L'impact est important lors des premières semaines suivant les formations puis s'estompe partiellement. Une formation continue et une évolution des comportements est donc nécessaire.

- **La diffusion des bonnes pratiques** auprès des automobilistes est également extrêmement utile car de nombreux gestes peuvent permettre des

économies importantes. L'ADEME, en collaboration avec le CCFA, a diffusé 20 millions d'exemplaires d'une plaquette indiquant comment économiser cinq pleins de carburant par an. Intitulée « *Dix conseils pour chasser le gaspi en voiture* », elle s'intègre dans la campagne « *Faisons vite, ça chauffe* » sur le réchauffement climatique. Elle pointe comment, par l'entretien rigoureux de sa voiture (filtre à air, gonflage des pneumatiques) et l'adoption de certains comportements (diminution de la vitesse, usage modéré de la climatisation, suppression de la galerie), il est possible de réduire la consommation de 3 à 40 %.

## 10 conseils

pour chasser le gaspi en voiture...

### Le pétrole flambe : levez le pied !

**J'adopte une conduite souple** et sans à coup : une conduite agressive en ville augmente ma consommation de 40 % soit 4 € de dépense inutile pour 100 km.

**Je limite les petits trajets urbains.** Je prends les transports en commun quand je peux ou j'y vais à vélo ou à pied.

**J'entretiens mon véhicule.** Un filtre à air encrassé consomme 3 % de plus et un moteur mal entretenu, encore plus. Je pense aux pneus "basse consommation" : jusqu'à 5 % d'économie.

**J'évite de pousser les vitesses.** La route n'est pas un circuit de compétition ! Je peux économiser ainsi jusqu'à 20 % de carburant.

**Je diminue ma vitesse de 10 km/h** sur autoroute. C'est bon pour ma sécurité et je gagne 7 € sur un trajet de 500 km.

**Faire des économies de carburant, c'est aussi moins de gaz à effet de serre et un climat qui se dérègle moins vite.**

**Je gonfle correctement mes pneus.** Rouler sous gonflé, c'est dangereux et ça consomme plus.

**Je n'abuse pas de la climatisation.** C'est jusqu'à 4 € d'économisés par 100 km.

**J'utilise les équipements** permettant de mieux maîtriser ma consommation : indicateur de consommation, régulateur limiteur, système de navigation et info trafic.

**Je n'oublie pas d'enlever ma galerie :** même à vide, elle fait consommer 10 % de plus.

**Les véhicules économes** arrivent sur le marché, j'y pense pour ma prochaine voiture.

**Suivez ces conseils, vous économiserez jusqu'à cinq pleins par an !**

Ne plus jeter ces conseils sur la voie publique: ils pourraient servir à votre voisin !

Nota : l'évaluation des gains de consommation et de coût prend en compte comme référence le parc français 2004 et son activité : 44 % des distances sont parcourues par des véhicules à essence et 56 % par des véhicules diesel. Les coûts carburant ont été fixés à 1,20 €/l pour l'essence et 1,00 €/l pour le diesel.

En association avec les professionnels de l'industrie pétrolière, les constructeurs et les services automobiles.

**ADEME**  
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie  
Pour en savoir plus, [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

**ECONOMIES D'ENERGIE  
FAISONS VITE  
ÇA CHAUFFE**

- La mise en place d'une étiquette énergie dans les concessions, sur le modèle de celles existant pour l'électroménager, a été décidée par le Gouvernement sur proposition de la Commission interministérielle du véhicule propre et économe (CIVEPE). Seront ainsi transposés en France en 2006 des dispositifs existant d'ores et déjà dans plusieurs pays européens, notamment le Royaume-Uni, comme vos rapporteurs avaient pu le constater lors de leur mission dans ce pays.

En France cette étiquette permettra de classer les véhicules en sept classes, de A à G, en fonction de leurs émissions de CO<sub>2</sub>.

Classe	CO <sub>2</sub> en g/km	Part des ventes 2004 (%)	Couleur
A	<= 100	0,02	vert foncé
B	101-120	14	Vert
C	121-140	24	vert clair
D	141-160	34	Jaune
E	161-200	20	jaune-orangé
F	201-250	6	Orange
G	>250	2	Rouge

Classes d'étiquetage CO<sub>2</sub> des véhicules particuliers

Cette classification doit permettre d'influer sur la décision d'achat des automobilistes en leur fournissant une information claire et en leur délivrant un signal. Ils restent entièrement libres dans leur choix.

- **Incitation des conducteurs**

Au-delà de la simple information, il est nécessaire d'inciter les conducteurs à modifier leurs comportements pour les rendre plus compatibles avec le respect de l'environnement. Plusieurs mesures ont été proposées. Toutes n'ont pas été retenues.

Ainsi, un bonus-malus à l'achat avait été envisagé. Le Gouvernement a préféré **moduler le coût de la carte grise** de véhicules neufs à partir de 200 g de CO<sub>2</sub>/km. Ainsi, au-delà de 200 g, le prix de la carte grise est augmenté de 2 € par gramme et au-delà de 250 g de 4 €. Peu pénalisante, cette mesure se veut être un signal indiquant un achat peu « *éco-compatible* ». Au regard, de la réglementation européenne, il ne s'agit pas d'une taxe.

**Vos rapporteurs sont favorables à l'extension de ce dispositif aux véhicules anciens mais aussi aux véhicules utilitaires légers et aux deux-roues.**

Au niveau européen, la Commission européenne a publié, en juin 2005, un projet de directive sur la fiscalité basée sur les émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules particuliers. Elle a indiqué sa préférence pour une taxe annuelle de circulation plutôt qu'une taxe unique à l'immatriculation. Il faut d'ailleurs relever que depuis la suppression, en 2001, de la « *vignette* », qui était en partie fondée sur les émissions de CO<sub>2</sub> (depuis 1998), la France est le seul pays européens à ne plus avoir de taxe à la circulation ou à l'immatriculation.

L'incitation à changer de comportement passe aussi par **le respect des limitations de vitesse**. Cette mesure à elle seule représente autant que le respect par les constructeurs de leurs engagements, en termes de réduction de consommation soit 3 MteCO<sub>2</sub>.

Une réduction de 10 km/h de la vitesse sur autoroute induirait une réduction supplémentaire de 2 MteCO<sub>2</sub>. Elle n'a pas été retenue par le Gouvernement qui préfère pérenniser l'évolution des comportements vis-à-vis des limitations de vitesse et mettre en place une « *signalisation verte* » incitant à diminuer sa vitesse de 10 km/h.

Par ailleurs, il faut rappeler que **l'INRETS a montré que l'accroissement de la vitesse de pointe de 10 km/h à la construction d'un modèle se traduisait par une augmentation de consommation de 0,4 à 0,7 l/100 km en ville et de 0,2 à 0,3 l/km sur route**. Les propositions commerciales des constructeurs et l'attitude des consommateurs sont donc très importantes.

Au-delà des mesures incitatives prévues par le plan climat, **vos rapporteurs souhaitent que les mesures incitatives ne soient pas que des mesures négatives réduisant la liberté des conducteurs et accroissant les taxes**.

**Il est temps de promouvoir des mesures d'incitation positive donnant un avantage aux automobilistes ayant une attitude éco-compatible**. Il leur semble que pourraient être utilement mises en avant : la gratuité du parking dans les centres urbains, la possibilité d'utiliser certaines voies réservées, la possibilité de ne pas réduire sa vitesse lors des pics de pollution, d'utiliser sa voiture en cas de circulation alternée...

- **La gestion de la circulation**

**La gestion de la circulation automobile, notamment en milieu urbain est un facteur très important d'augmentation ou de réduction des émissions de gaz à effet de serre**. Si ce point n'entre pas directement dans le champ de ce rapport, il est important d'en connaître l'impact potentiel pour mesurer ce qui peut être gagné grâce à certains progrès ou peut être entièrement perdu par une mauvaise gestion du trafic ou une politique « anti-voiture » organisant la congestion.

L'exemple d'un poids lourds de 40 t sur un trajet de 10 km est une illustration frappante car l'énergie nécessaire à dépasser la force d'inertie est très importante.

Conditions		Consommation sur 10 km
<b>Fluide</b>	75 km/h constants	<b>3,4 litres</b>
<b>Congestion moyenne</b>	15 remises de vitesse de 0 à 30 km/h	<b>16 litres</b>
1 arrêt tous les 400 m en moyenne	15 remises de vitesse de 0 à 90 km/h 25 minutes au ralenti	
<b>Congestion forte</b>	85 remises de vitesse de 0 à 30 km/h 15 remises de vitesse de 0 à 90 km/h 1 heure au ralenti	<b>36 litres</b>

- **Les marchés d'émission**

Enfin, vos rapporteurs estiment qu'une voie nouvelle devrait être explorée, celle de l'incorporation des véhicules particuliers dans le marché européen des émissions de CO<sub>2</sub>.

En effet, dans le cadre du protocole de Kyoto et de la « bulle européenne », la Commission a mis en place un marché d'échange de droits d'émissions de CO<sub>2</sub>. Celui-ci permet d'inciter les entreprises à diminuer leurs émissions tout en minimisant le coût pour chaque entreprise et l'économie européenne dans son ensemble. L'industrie automobile y est déjà soumise pour son activité de production.

La question se pose aujourd'hui de savoir quelles mesures devront être prises si, en 2008 ou en 2012, les constructeurs ne respectent pas leur engagement volontaire de réduire collectivement la moyenne des émissions des véhicules vendus en Europe.

Or, vos rapporteurs ont souligné que des progrès très importants ont été accomplis, mais qu'il serait très difficile d'atteindre les objectifs de 2008 et 2012 et que les constructeurs étaient dans des positions très différentes les uns par rapport aux autres.

**Vos rapporteurs proposent donc que la Commission européenne lance les études préliminaires pour évaluer les impacts positifs et négatifs de l'incorporation des émissions des véhicules vendus dans le marché des émissions de CO<sub>2</sub>.**

Si la participation des particuliers à ce marché est impossible, il est en revanche envisageable d'attribuer des quotas d'émission à chaque constructeur en fonction de la structure de ses ventes à partir d'une moyenne de consommation, de kilométrage et de durée de vie. Les constructeurs répercuteraient naturellement l'impact financier de ce dispositif sur les prix de vente. Cela permettrait d'influer à la fois sur les comportements d'achat et sur les choix des constructeurs, les moins vertueux étant pénalisés. Un tel dispositif permettrait de préserver la liberté des constructeurs et des automobilistes, tout en les responsabilisant, et d'éviter une nouvelle réglementation et un nouveau recours à la fiscalité.

## ***B. LES PROGRÈS DU MOTEUR À COMBUSTION INTERNE : INCONTOURNABLES À COURT TERME, INSUFFISANTS À LONG TERME***

Le moteur à combustion interne reste, selon tous les experts consultés, la pierre angulaire de l'automobile pour plusieurs décennies encore. Les voitures futures ressembleront beaucoup à celles d'aujourd'hui mais consommeront moins de carburant grâce à de nouveaux procédés de fonctionnement. C'est ce qu'a démontré l'IFP en cherchant à quantifier les progrès significatifs possibles dans la configuration du cycle européen d'homologation. Il en ressort que **la principale source d'économie de carburant est le rendement du moteur (20 % de gain espéré)**, puis la masse du véhicule (10-15 %), les frottements à l'intérieur du moteur (environ 10 %), **l'augmentation du couple spécifique (environ 10 %)**, puis les frottements et l'aérodynamique générale du véhicule. Ce sont les questions relatives au rendement et au couple que vos rapporteurs vont ici examiner, soit 20-30 % de gains potentiels.

Les moteurs diesel et essence ne sont toutefois pas à placer sur le même plan. En matière de diesel, des progrès considérables ont déjà été obtenus au niveau technique et en terme d'émissions dans le parc automobile. Le succès de cette motorisation repose sur sa diffusion massive, son faible coût et ses performances élevées qui ont un impact mesurable important sur les émissions de gaz à effet de serre. Des progrès supplémentaires sont encore possibles. Les moteurs à essence n'ont pas encore bénéficié de tous les progrès des diesels, c'est un enjeu très important au niveau mondial puisque les États-Unis et le Japon sont des marchés « essence ».

### **1. La diésélisation : solution d'aujourd'hui, solution de demain ?**

La diésélisation du parc a permis de diminuer significativement les consommations et les émissions globales de gaz à effet de serre. Cette diffusion progressive d'une technologie performante est représentative du temps nécessaire pour obtenir un impact important sur l'ensemble du parc. Aujourd'hui, deux questions principales se posent : le moteur diesel peut-il encore progresser significativement ? L'offre de diesel pourra-t-elle suivre la demande de diesel ?

- **La diésélisation du parc : un gain très important d'émissions**

Pour avoir un impact sur les émissions globales de CO<sub>2</sub>, il est indispensable qu'une technologie donnée soit diffusée rapidement et massivement sur le marché, c'est-à-dire à un prix raisonnable. La diésélisation du parc automobile en France et en Europe est un très bon exemple.

**Les économies de consommation par rapport à l'essence sont comprises entre 20 et 30 %. Selon le CCFA, la diésélisation du parc en Europe permet d'économiser 50 MteCO<sub>2</sub>. La diésélisation de 30 % du parc américain permettrait d'économiser 135 MteCO<sub>2</sub>, soit l'équivalent des émissions de la route en France.**

Le CCFA a par ailleurs effectué les calculs suivants permettant d'évaluer les économies de CO<sub>2</sub> réalisées, en France, en fonction de la diffusion des différentes technologies par rapport à la moyenne européenne :

Types de motorisation	Nombre	CO2 moyen g/km	CO2 évité <sup>3</sup> tonne/an
Tous types	2 013 709	153	302 056
Essence	617 449	162	
Diesel	1 392 925	149	292 514
Moins de 120 gCO <sub>2</sub> /km	287 692 <sup>1</sup>	114	211 454
Gaz bi-carburant (> 99% gpl)	5 107	181 <sup>2</sup>	
Hybride essence	669	105	582
Electrique	460	0	562

(1) dont 239 053 des marques françaises, soit 83%

(2) CO<sub>2</sub> essence - 11%

(3) Nombre × (CO<sub>2</sub> moyen Europe 163 - CO<sub>2</sub> du type) pour 15 000 km/an ou 7 500 km/an électrique

Par ailleurs, la technologie doit être diffusée rapidement. Le secteur des transports reste soumis à de très fortes inerties, les véhicules les plus récents ne remplaçant que très progressivement les véhicules anciens.

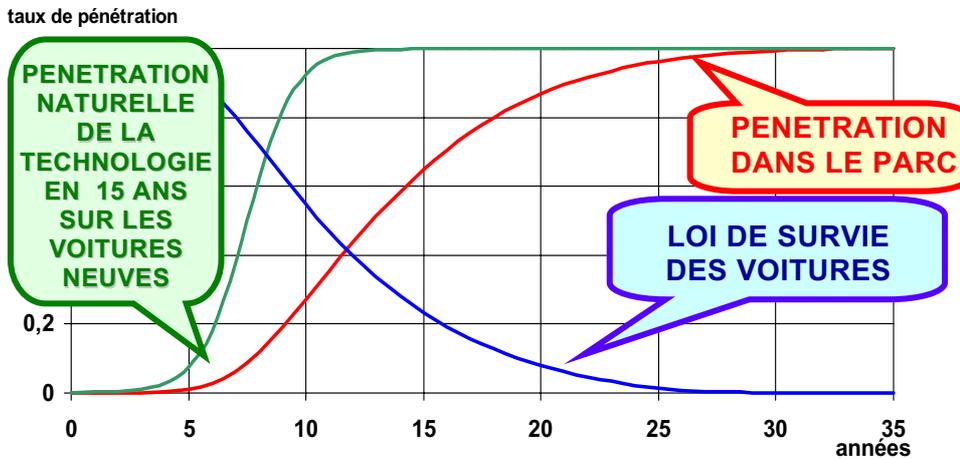
M. Alain Morcheoine a mis en lumière les différents facteurs d'inertie qui limitent le renouvellement du marché <sup>1</sup>:

Délai nécessaire pour la mise sur le marché d'une innovation importante en matière d'amélioration des performances spécifiques de la motorisation des véhicules	Entre 10 et 15 ans
Temps de pénétration d'une innovation sur les ventes neuves (ex : études de pénétration de la climatisation automobile au Japon et aux USA)	Environ 15 ans hors incitation
Temps de pénétration d'une innovation dans le parc (études du rythme de renouvellement du parc de voitures particulières C. Gallez, de l'INRETS, et études du SES/METLTM).	Environ 30 ans dans les mêmes conditions
La mise en place de mesures d'incitation ou de normes permet en moyenne de gagner 2 à 5 ans (simulation ADEME à partir des travaux précédents)	
Temps de pénétration d'une innovation chez les poids lourds neufs	Moins bien connu et évalué à 4 à 5 ans dans le parc
	Environ 10 ans
Temps de déploiement d'un changement complet de politique logistique d'une entreprise	5 à 10 ans
Temps de mise en service d'une infrastructure nouvelle ferroviaire (après décision politique)	Environ 12 ans
Temps d'effet effectif de mesures de réduction en valeur absolue du trafic automobile urbain dans le cadre de PDU	15 à 20 ans (3-4 PDU successifs)
Temps de réaménagement durable du territoire d'une agglomération (une génération à une génération et demie)	30 à 50 ans

Selon M. Morcheoine : « *Les études faites par l'ADEME sur la pénétration de la climatisation automobile sur les marchés américain et japonais, très en avance sur le marché européen, montrent en effet qu'entre le moment où la première voiture neuve équipée est mise en vente et le moment où toutes les voitures neuves sont équipées de cette technologie, il se passe environ 15 ans. La courbe de pénétration n'est bien entendu pas linéaire mais suit plutôt une courbe en « S » (courbe verte). Les études faites par l'INRETS pour le compte de l'ADEME sur la dynamique de renouvellement du parc montrent que selon la loi de survie des véhicules le parc met environ 25 ans pour se renouveler complètement (courbe bleue). Les effets de différentes mesures d'accélération (mise en œuvre de normes, réglementation, incitations, se révèlent n'avoir que peu d'effet (voir figures).* »

<sup>1</sup> Cf. Ibid.

### PENETRATION NATURELLE D'UNE TECHNOLOGIE DANS LE PARC DE VOITURES PARTICULIERE

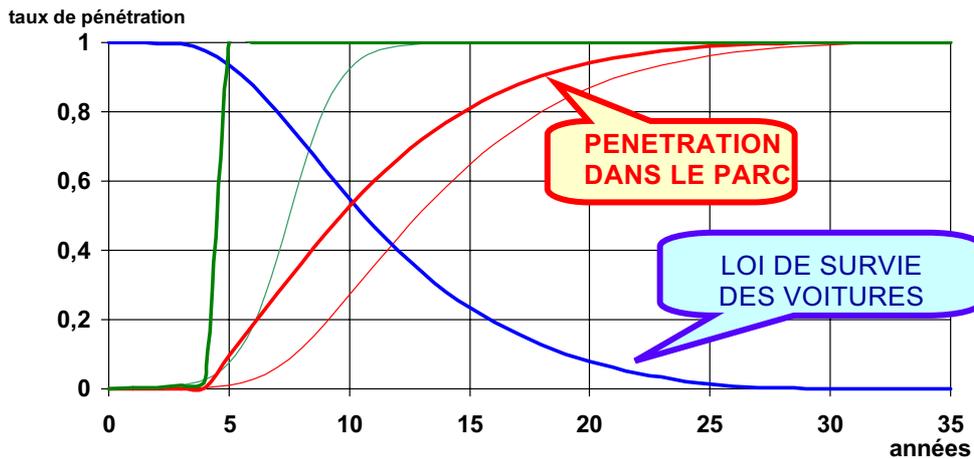


Source C.Gallez INRETS/ADEME

**Ainsi, une technologie n'équipera 100 % du parc que 35 ans après son introduction, 50 % après 13 ans (courbe rouge).**

La pénétration peut être accélérée par l'adoption d'une nouvelle norme. Cette accélération reste cependant très limitée : seulement trois ans.

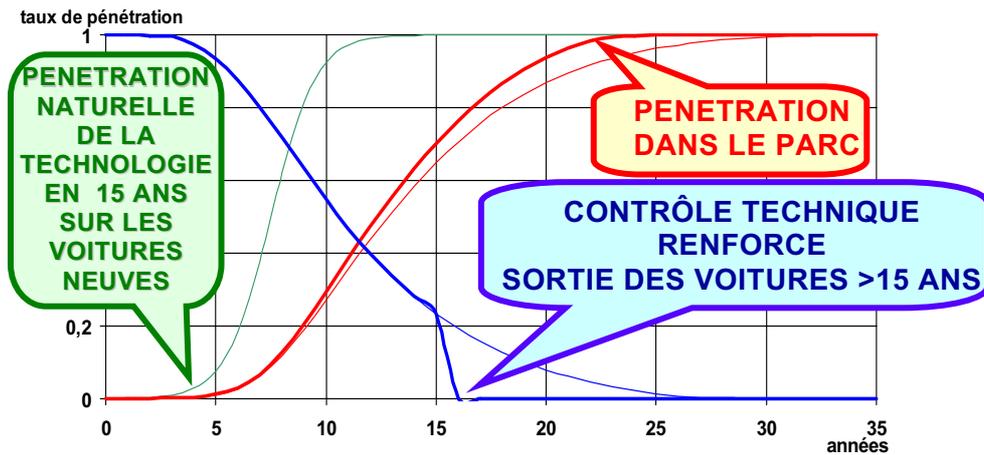
### PENETRATION D'UNE TECHNOLOGIE DANS LE PARC DE VOITURES PARTICULIERES ACCELERATION PAR MISE EN PLACE D'UNE NORME



Source C.Gallez INRETS/ADEME

L'utilisation d'une « prime à la casse » ou d'une nouvelle réglementation pour retirer les anciens véhicules de la circulation n'est pas beaucoup plus efficace. Elle ne permet de gagner que 6 mois sur l'équipement de 50 % du parc et 3,5 ans sur l'équipement de 95 %.

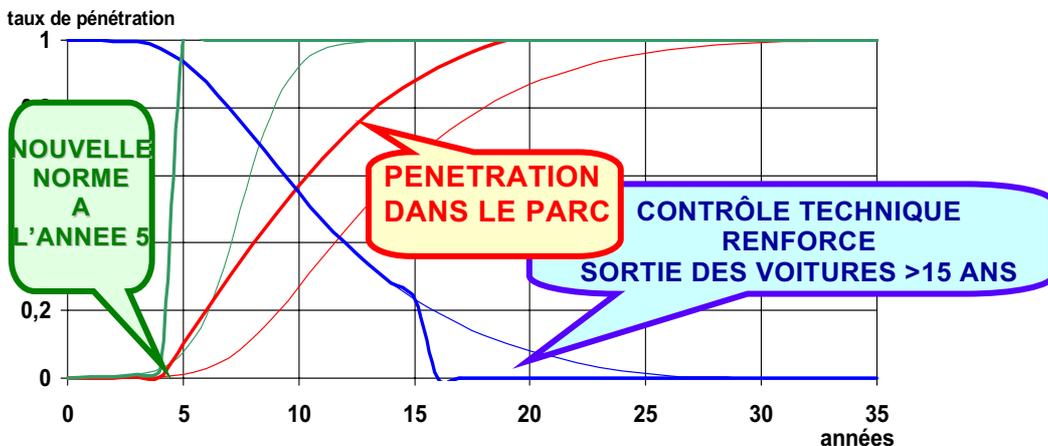
**PENETRATION D'UNE TECHNOLOGIE  
DANS LE PARC DE VOITURES PARTICULIERES  
ACCELERATION PAR MISE AU REBUT DE VEHICULES ANCIENS**



Source C.Gallez INRETS/ADEME

La combinaison de ces deux types de mesures est-elle efficace puisque l'ensemble du parc est équipé/renouvelé au bout de 19 ans au lieu de 35 ? Trois ans et demi sont gagnés sur l'équipement de 50 % du parc et 7 ans sur celui de 95 %.

**PENETRATION D'UNE TECHNOLOGIE  
DANS LE PARC DE VOITURES PARTICULIERES  
ACCELERATION PAR MISE EN ŒUVRE SIMULTANÉE DES DEUX MESURES**



Source C.Gallez INRETS/ADEME

Historiquement, la progression de la technologie diesel en parts de marché correspond à cette modélisation. En 1980, 9,9 % des voitures neuves étaient diesel en France (7,1 % en Europe), le seuil des 50 % de parts de marché a été franchi en 2001 en France (56,2 %) pour atteindre 69,2 % en 2004. En Europe, 48,2 % des voitures neuves sont diesel en 2004.

Les constructeurs français ont pu pleinement exploiter cette nouvelle technologie et en sont les leaders mondiaux. Le groupe PSA est allié depuis 1998 avec Ford pour produire des moteurs en très grande quantité. L'objectif initial d'occuper le premier rang mondial devant Volkswagen est en passe d'être atteint. Dans le cadre de cette collaboration industrielle portant sur six moteurs, plus de 4 millions d'unités ont été produites entre 2002 et 2004. L'objectif est d'en produire 3,7 millions en 2010 sur les sites français de Trémery (Moselle) et Dagenham (RU).

- **Des progrès techniques sont-ils encore possibles ?**

Les performances du moteur diesel reposent sur la maîtrise de l'injection directe à haute pression et de la suralimentation permettant le « *downsizing* ».

Les progrès futurs reposent sur deux voies principales : l'amélioration des techniques actuelles et la mise au point d'un nouveau mode de combustion dit homogène.

**L'amélioration de l'injection directe** est l'une des voies privilégiées<sup>1</sup>. Elle permet d'optimiser le mélange air/carburant. Elle est d'autant plus efficace que le carburant est sous pression, injecté de la manière la plus précise possible en termes de quantité et de moment.

Pendant de nombreuses années l'injection était assurée par un système mécanique lié à chaque cylindre qui assurait en même temps la mise sous pression, les quantités et le moment de l'injection n'étaient pas modulables.

Une évolution sensible a été effectuée par les systèmes d'injection électronique qui ont permis de séparer la mise sous pression de l'injection. La mise sous pression est réalisée de manière mécanique à l'intérieur d'un réservoir dit « rampe commune ». Une pression constante est assurée dans la rampe. Les injecteurs sont commandés électroniquement et sont en fait des aiguilles qui libèrent ou non le trou d'injection par une impulsion électromagnétique.

---

<sup>1</sup> Cf. « Un calculateur dans le moteur », gabriel Martin, *La Recherche*, n°380, nov. 2004.

### Système d'injection Common Rail



Source : IFP

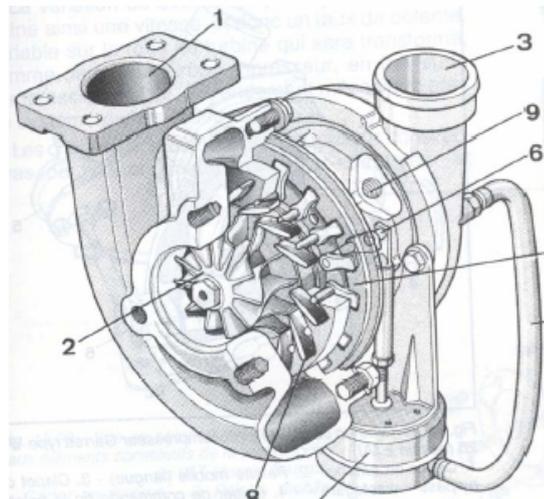
L'injection électronique a également permis de mettre au point une injection multiple. Au lieu d'injecter en une seule fois le carburant, celui-ci est introduit dans le cylindre en plusieurs fois, de trois à cinq actuellement. Ces injections ont pour objectif de réduire les bruits de cliquetis, de mettre sous pression la chambre, d'assurer le meilleur mélange et la meilleure combustion possible et enfin de maintenir une pression élevée. Elles permettent donc de réduire le bruit, d'augmenter le rendement du moteur et d'en diminuer les émissions polluantes. Ces systèmes sont extrêmement pointus, les injections représentent des volumes très faibles pouvant être inférieurs à  $1 \text{ mm}^3$  et dans des intervalles de temps très courts, moins d'une centaine de microsecondes. Ces dispositifs ne peuvent fonctionner que grâce à de nombreux capteurs permettant de connaître l'évolution exacte du fonctionnement du moteur (température, pression, position du piston) mais aussi du circuit d'échappement (taux d'imbrûlés...).

Les nouveaux moteurs Ford/PSA tirent partie de ces évolutions. Le moteur destiné aux véhicules utilitaires (2,2 l) bénéficie de cinq injections par cycle et la pression d'injection a été portée à 1.800 bars contre 1.350 précédemment. Il dispose également de la recirculation des gaz de combustion (EGR).

Ils sont représentatifs **des progrès à court terme des moteurs diesel** qui peuvent désormais atteindre un couple de 150 NM/l et une puissance de 50 kW/l avec une cylindrée comprise entre 1,2 l et 1,5 l. La réduction de consommation est **de l'ordre de 5 à 10 % supplémentaires**. Aux progrès de l'injection s'ajoutent ceux de la **turbosuralimentation à géométrie variable**. Cela permet de récupérer l'énergie disponible à l'échappement sur une turbine

pour entraîner un compresseur, qui introduit l'air d'admission sous pression. L'augmentation de la quantité d'air introduite permet de brûler d'avantage de carburant et donc de produire plus d'énergie. Lorsque la turbine est équipée d'un système à géométrie variable, des ailettes orientables dévient le flux des gaz entrants. Leur orientation est pilotée par un calculateur qui optimise la récupération de l'énergie en fonction du régime du moteur. Le couple du moteur est ainsi plus élevé à haut comme à bas régime.

Turbocompresseur à géométrie variable

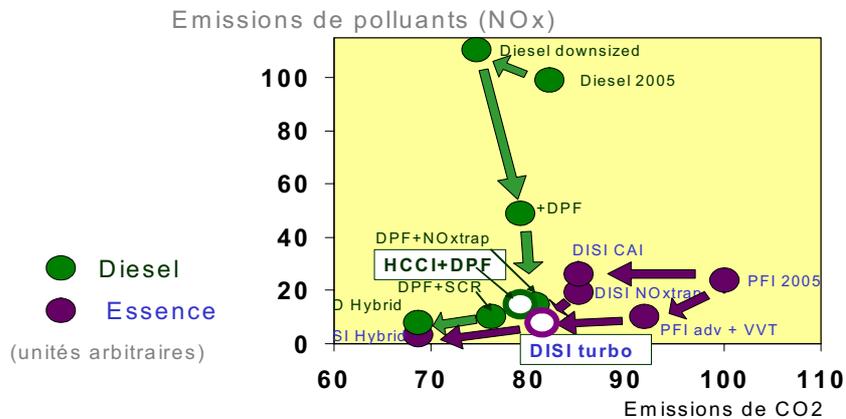


Source : IFP

Au cours des prochaines années, les injecteurs à électro-aimant devraient laisser la place à des injecteurs « piézo-électriques » composés par une céramique qui se dilate ou se rétracte sous l'effet d'un fort courant électrique et commande le mouvement de l'aiguille. Ayant une réaction quasiment instantanée, ils pourraient être jusqu'à six fois plus rapides. Ils permettraient des dosages plus précis et des injections plus nombreuses.

De nouveaux progrès sont attendus par une évolution importante du mode de combustion. Il s'agit de **la combustion homogène HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition)**. Cette combustion consiste à la fois à réduire la consommation et à réduire les polluants, notamment les NOx. Le défi consiste à contrôler le temps d'auto-allumage, la vitesse et la température pour optimiser le mélange et la combustion. Elle conduira à une évolution de la formulation des gazoles. Elle pourrait **aboutir vers 2010 et améliorer légèrement la consommation en diminuant significativement les émissions de polluants.**

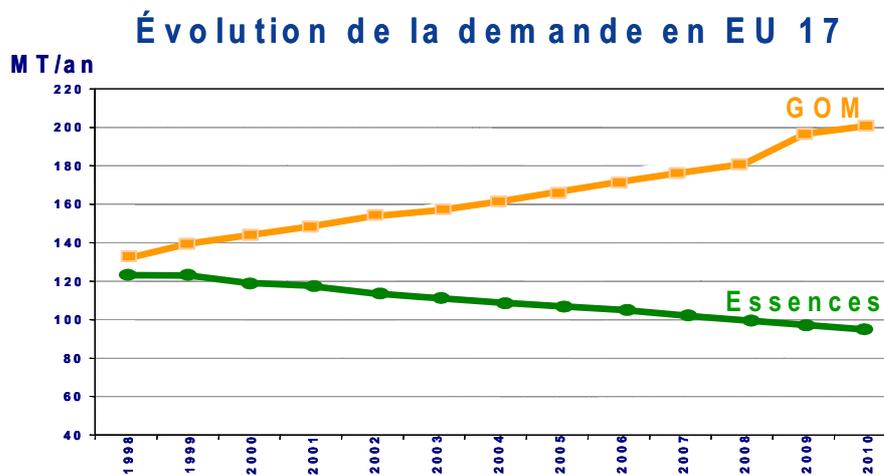
M. Philippe Pinchon a ainsi présenté un chemin de progression possible du moteur diesel vers un niveau d'émission plus faible et pouvant s'accompagner de dispositifs de post-traitement.



Audition Publique Assemblée Nationale 18 oct 2005

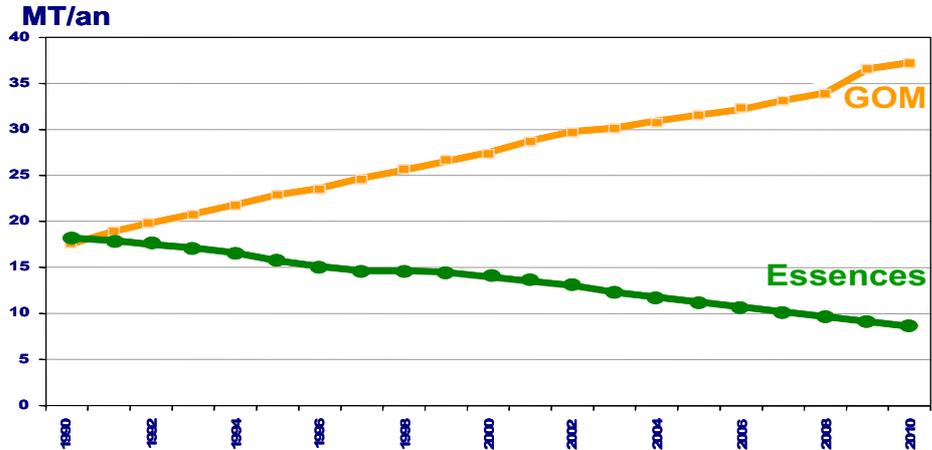
- **Les pétroliers peuvent-ils fournir toujours plus de diesel ?**

Compte tenu de ces évolutions, la demande de carburants en Europe s'est très fortement modifiée depuis la fin des années 1990. D'un partage quasiment égal entre essence et diesel compris entre 120 et 140 Mt/an en 1998, la demande de gazole en Europe est désormais supérieure à 200 Mt/an et celle d'essence inférieure à 100 Mt/an.



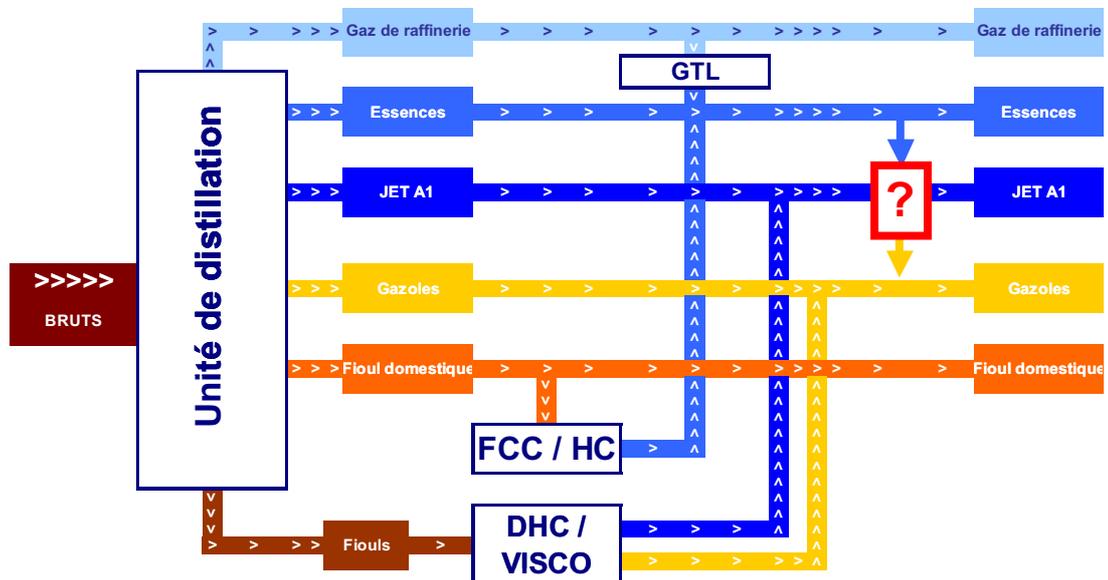
En France, l'évolution est plus rapide et plus forte. Par rapport à 1990, la demande d'essence a été divisée par deux et celle de gazole multipliée par deux. Aujourd'hui, la demande de gazole est comprise entre 35 et 40 Mt/an et la demande d'essence entre 5 et 10 Mt/an.

## Évolution de la demande en France

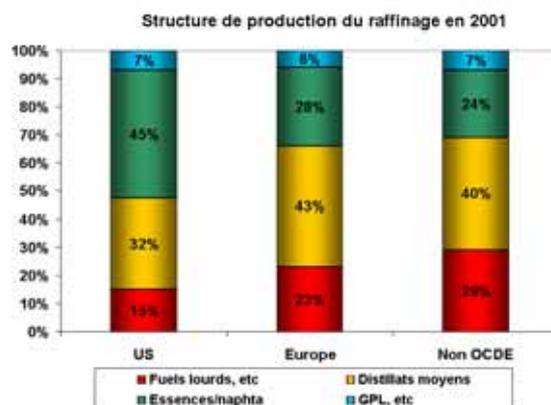


Or, il n'est pas possible, avec un baril de pétrole, de produire autant de gazole ou d'essence que le marché le demande. Certains seuils ne peuvent être dépassés ou représentent une dépense énergétique très importante.

Le groupe Total avait soumis le schéma simplifié suivant à vos rapporteurs pour montrer les possibilités et les impossibilités de conversion d'un produit à un autre :

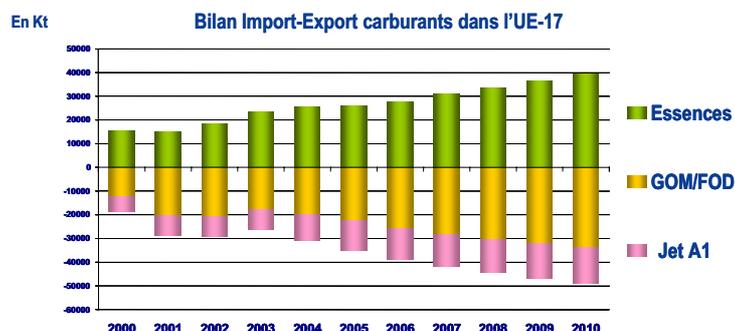


Par rapport aux États-Unis ou au reste du monde, le raffinage européen est déjà tourné en priorité vers la production de diesel qui représentait 43 % du raffinage contre 45 % pour l'essence aux États-Unis :

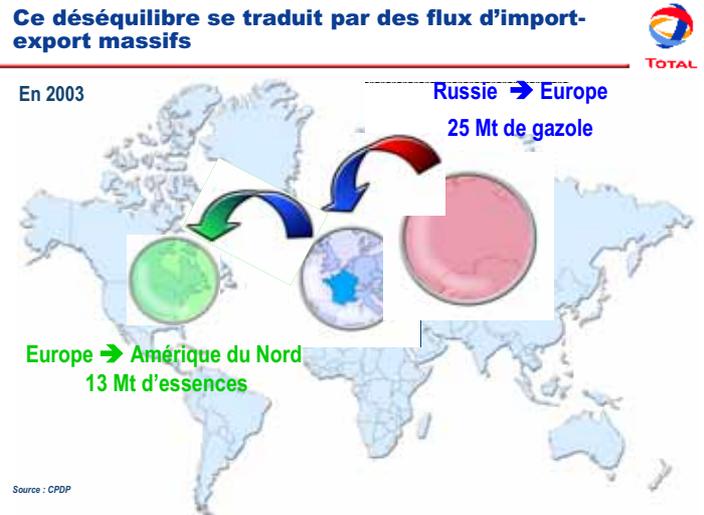


Il en résulte des échanges de carburant entre l'Europe et le reste du monde.

Les caractéristiques de la demande du secteur des transports et les limitations des techniques de raffinage conduisent à des déséquilibres régionaux entre les productions et les consommations qui conduisent à des importations et des exportations de carburants, qui s'aggraveront d'ici à 2010 selon le groupe Total :



Ces flux de carburants peuvent être schématisés entre la Russie (exportation de gazole vers l'Europe), l'Europe (exportation d'essence vers les États-Unis) et les États-Unis.



Cette situation ne va pas sans créer de dépendance vis-à-vis de certaines zones et des tensions sur le marché. Ainsi le gazole est désormais plus cher que l'essence alors que c'était traditionnellement l'inverse, y compris durant l'été où la demande en essence est la plus forte car les Américains prennent leurs véhicules pour les vacances (*driving season*).

La diésélisation du parc automobile européen, voire la diésélisation d'autres régions du monde comme les États-Unis n'est pas sans limite malgré son intérêt en termes d'émissions de gaz à effet de serre.

Cette évolution ne peut être soutenable que si elle s'accompagne de nouveaux progrès en termes de consommations, de solutions industrielles de substitution par des carburants de synthèse issus de la biomasse remplaçant les gazoles, mais aussi par des progrès significatifs d'attractivité des motorisations essence ou alternatives permettant un rééquilibrage de la demande.

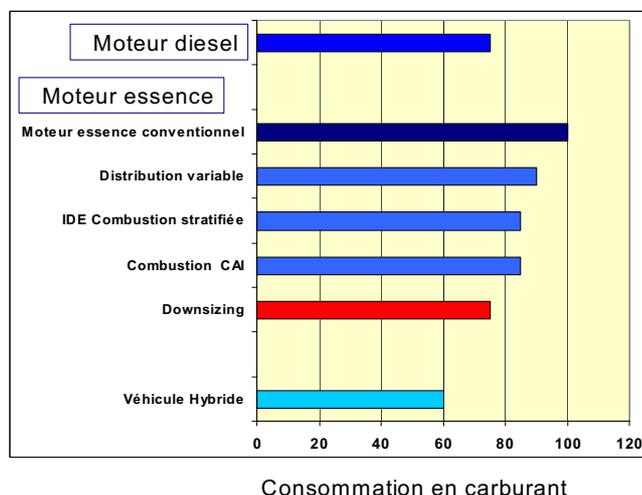
## **2. Le moteur à essence peut-il bénéficier de progrès aussi importants que le moteur diesel ?**

Si le moteur diesel a d'ores et déjà démontré sa capacité à réduire sa consommation de carburant, c'est aujourd'hui l'enjeu principal des recherches sur le moteur à essence, d'autant plus qu'en dehors de l'Europe la très grande majorité des voitures particulières fonctionnent avec ce carburant, les normes d'émissions de NOx et de particules ayant empêché la diffusion des moteurs diesel.

Plusieurs technologies sont aujourd'hui étudiées pour y parvenir<sup>1</sup> :



Quelles solutions potentielles pour réduire la consommation du moteur à essence ?



Audition Publique Assemblée Nationale 18 oct 2005

**L'injection directe** (IDE) du carburant dans la chambre de combustion au lieu de l'injection indirecte en amont des soupapes d'admission est une première solution. Renault a été le premier constructeur européen à commercialiser un moteur de ce type qui, tout en maintenant un fonctionnement stoechiométrique – nécessaire au fonctionnement de la catalyse trois voies –, utilise une forte recirculation des gaz brûlés.

Réaliser une **combustion stratifiée** est également étudié. Celle-ci est obtenue par un contrôle poussé de l'injection. Elle permet de positionner un nuage riche en carburant au voisinage de la bougie d'allumage et de remplir le reste de la chambre avec de l'air. Elle ne peut réussir que si la chambre est dessinée en conséquence et si l'injection s'effectue très peu de temps avant l'allumage et au niveau du point mort haut du piston. Les gains peuvent aller jusqu'à 20 % de consommation à faible charge.

Sur le cycle d'homologation européen, **la combinaison des deux techniques d'injection directe et de combustion stratifiée sont de l'ordre de 10 à 15 %**. Mais cette combinaison n'est pas compatible avec la catalyse trois voies car elle fonctionne en mélange pauvre. Il est alors nécessaire d'équiper le véhicule d'un piège à NOx, d'utiliser un carburant peu soufre (inférieur à 10 ppm). PSA et Volkswagen commercialisent déjà des moteurs de ce type.

Les **nouveaux procédés de combustion de type CAI ou « controlled auto ignition »** visent à obtenir un niveau d'économie similaire mais en évitant de recourir au piège à NOx. Il s'agit de permettre l'auto-inflammation

<sup>1</sup> Philippe Pinchon, IFP, mai 2004 « L'automobile du futur : les technologies de l'IFP » et octobre 2005 auditions publiques.

du mélange air-carburant grâce à l'utilisation de gaz chauds brûlés du cycle précédent. Les recherches en cours visent à maîtriser toutes les phases du fonctionnement, notamment les différents régimes et les transitions CAI-combustion conventionnelle.

Il est en outre possible d'utiliser des systèmes de **distribution variable**. Il s'agit de faire varier le moment d'ouverture, voire la levée des soupapes d'admission et d'échappement et d'optimiser les réglages du moteur. **Les gains sont compris entre 7 et 13 %**. Philippe Pinchon relève que les systèmes déjà en fonctionnement utilisent une variation du calage angulaire de l'arbre à cames qui commande les soupapes. Des **déconnexions de cylindres** sont également possibles. GM et Dephi ont développé un système « *displacement on demand* » permettant de désactiver jusqu'à la moitié des cylindre des V8 pour réduire leur consommation de l'ordre de 8 %. Le système Valvetronic de BMW **fait varier la levée de la soupape en continu** ce qui permet des gains plus élevés (10 %). Dans le futur, il est question de rendre les soupapes indépendantes de l'arbre à cames et de les commander électroniquement.

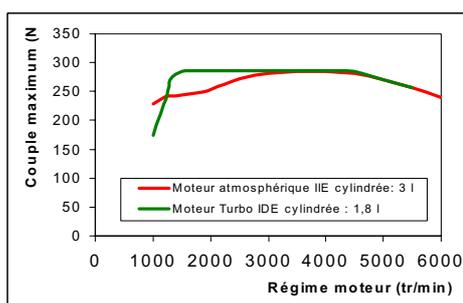
Cependant, l'IFP estime que le « *downsizing* », fondé sur la suralimentation par turbocompresseur et la réduction de la cylindrée est plus prometteur en termes de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. M. Pinchon indique notamment que : « *l'utilisation de l'injection directe de carburant présente un intérêt considérable. En effet, lorsque le carburant est introduit dans le cylindre indépendamment de l'air, il est possible d'utiliser le flux d'air entrant pour balayer vers l'échappement les gaz brûlés chauds issus du cycle précédent et encore présents dans le cylindre. Ces gaz chauds sont en effet très néfastes à la combustion à pleine charge puisqu'ils ont tendance à générer des cliquetis, combustion anormale qui peut conduire à la destruction du moteur. Sur les moteurs suralimentés, on a tendance à combattre l'apparition du cliquetis par la diminution du taux de compression du moteur, au détriment du rendement. C'est ce qui est généralement pratiqué dans le cas de l'injection directe, ceci explique que les gains attendus soient relativement limités dans ce dernier cas : de l'ordre de 10 à 15 % de réduction de la consommation. L'injection directe apporte plusieurs avantages. Tout d'abord, lorsqu'elle est associée à un système de distribution variable à l'admission, il est possible de balayer les gaz brûlés et donc d'augmenter le couple spécifique à bas régime. En injectant le carburant directement dans la chambre, on profite également du refroidissement provoqué par la vaporisation du carburant : le jet d'injection est correctement positionné, les frigories sont communiquées directement à l'air admis et non aux parois du moteur. Cet effet de refroidissement permet d'augmenter la résistance du moteur au cliquetis et la densité de l'air admis. Ces deux effets ont des conséquences très positives sur le couple spécifique du moteur* ».

Au total, l'IFP estime que **la combinaison de ces différents systèmes peut permettre d'atteindre une économie de consommation de l'ordre de 25 à 30 % au maximum ainsi qu'une diminution de 50 % de la cylindrée.**

En collaboration avec Renault, l'IFP a montré qu'il était possible d'obtenir, avec un moteur à essence de 1,8 l suralimenté, les mêmes performances qu'avec un moteur à aspiration naturelle de 3 l :

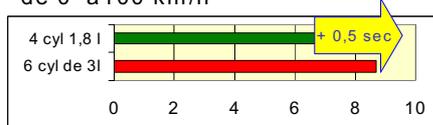


### « Downsizing » du moteur essence : l'approche IFP

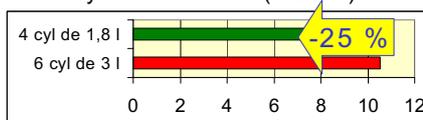


Simulation d'un véhicule  
1800 kg  
boîte de vitesse adaptée

Temps d'accélération  
de 0 à 100 km/h



Gain en consommation  
sur cycle normalisé (NEDC)



Audition Publique Assemblée Nationale 18 oct 2005

Le maximum de gain est atteint, soit 30 %, si est ajouté un système à taux de compression variable permettant de ne limiter le taux de compression qu'à pleine charge.

Une partie de ces dispositifs (distribution variable, suralimentation par turbocompresseur, injection directe et géométrie complexe de la chambre) vont être mis en œuvre sur les nouveaux moteurs à essence produits par BMW et PSA. Le moteur 1,6 l atmosphérique développe une puissance de 85 kW (115 CV) et un couple de 160 Nm à 4.250 tr/min. Le moteur 1,6 l turbocompressé a une puissance maximum de 125 kW (170 CV) et un couple de 240 Nm de 1.400 à 4.000 tr/min.

**Vos rapporteurs tirent de ces éléments les conclusions suivantes :**

- les moteurs à combustion interne restent pour de nombreuses années l'élément central du groupe motopropulseur des automobiles ;

- **le moteur diesel est aujourd'hui la solution la moins polluante, la plus économique et la plus efficace pour réduire les émissions de gaz à effet de serre ;**

- **la diffusion massive d'une technologie fiable et bon marché est nécessaire pour abaisser réellement les émissions de CO<sub>2</sub>, mais elle nécessite au moins 15 ans et ne peut être accélérée aisément ;**

- **la diffusion du moteur diesel n'est toutefois pas illimitée puisque l'offre de carburant ne pourra pas répondre à toute la demande ;**

- **les moteurs diesel et essence offrent de réelles possibilités de progression d'ici à 2015, de l'ordre de 10 % pour les moteurs diesel et jusqu'à 30 % pour l'essence ;**

- **ces gains sont significatifs mais insuffisants pour atteindre les objectifs très ambitieux de réduction des émissions aux horizons 2010 et 2050 ;**

- **des gains supplémentaires doivent être acquis par des solutions complémentaires relevant des carburants, de l'hybridation et des solutions indépendantes du groupe motopropulseur comme l'allègement des véhicules.**

Vos rapporteurs estiment donc qu'il est nécessaire de :

- **poursuivre les recherches sur les moteurs à combustion interne et tout particulièrement sur l'essence ;**

- **poursuivre les recherches sur les carburants à plus faible teneur en carbone ; sont évoqués les biocarburants et le GNV ;**

- **accélérer les recherches sur l'hybridation des moteurs diesel et essence. C'est notamment l'objet des mesures annoncées par le Gouvernement visant à disposer au plus tôt d'une voiture familiale ne consommant que 3,5 l/100 km.**

- **ouvrir le débat sur l'équilibre et les priorités à retenir entre la diminution de la consommation grâce aux progrès techniques et les augmentations de la consommation liées aux dispositifs de confort, de sécurité et de post-traitement.**

### ***C. L'HYBRIDATION : UNE TECHNOLOGIE VRAISEMBLABLEMENT CLEF À MOYEN ET LONG TERMES***

Avec la hausse du prix du pétrole et le lancement très médiatique de la Toyota *Prius* en Europe, la motorisation hybride a acquis une notoriété inattendue, même si son fonctionnement reste bien souvent mal connu.

Plusieurs questions se posent. Qu'est-ce que l'hybridation ? Quel est son principe de fonctionnement ? Qu'apporte la technologie hybride aujourd'hui ? Quelle est sa diffusion ? Quel est son avenir à moyen et long termes ? Va-t-elle se généraliser ?

#### **1. Le principe et les différents types d'hybridation**

L'hybridation consiste à combiner deux énergies pour assurer la propulsion d'un véhicule. On appelle donc hybride tout véhicule qui, en plus de sa source d'énergie primaire, dispose d'un stockage réversible d'énergie sous une seconde forme (hydraulique avec réserve de pression, cinétique avec volant d'inertie, électrique...)¹. Dans la pratique, il s'agit essentiellement du mariage de l'électrique et du thermique, mais cette solution est aussi utilisée pour les voitures à hydrogène qui sont également des hybrides électrique-hydrogène.

L'objectif est de cumuler les avantages des deux modes de motorisation. Sur les véhicules hybrides actuels, la source principale d'énergie est le moteur thermique. L'adjonction d'un moteur électrique et d'une puissante batterie permet d'optimiser le fonctionnement du moteur thermique ou de le remplacer momentanément et donc de réduire la consommation et les émissions. Toute la difficulté est de réussir un fonctionnement bimode harmonieux et pour un coût limité car il ne s'agit pas de la juxtaposition de deux chaînes de tractions fonctionnant en alternance mais de deux chaînes fonctionnant de concert.

Il existe plusieurs niveaux et fonctionnalités d'hybridation du *soft* au *full*, généralement dénommés par leur terminologie anglo-saxonne.

Le premier niveau correspond au *Stop & start*® de Valeo commercialisé sur la Citroën C3. À l'arrêt, un dispositif électrique, un alternodémarrateur, permet la mise en veille du moteur et le redémarrage après relâchement de la pédale de frein. Ce dispositif permet d'économiser entre 6 et 15 % de carburant (8 g de CO<sub>2</sub> /km en moyenne). Citroën avait fait une

---

¹ Cf. Franck Vangraefscheppe et Pascal Megazzi, IFP, Note Panorama 2005 « Véhicules hybrides, quel avenir ? ».

première expérience de ce type avec le « *Dynavolt* » en 1998 sur la Xsara. Un système proche existe sur la Lupo de Volkswagen.

Le second niveau est le freinage récupératif. Il consiste à récupérer l'énergie cinétique du véhicule lorsque la voiture freine ou décélère, au lieu de la dissiper sous forme de chaleur dans les freins. Cette énergie est stockée dans une batterie appropriée et restituée ensuite. Cette opération est dans la pratique très difficile à réaliser.

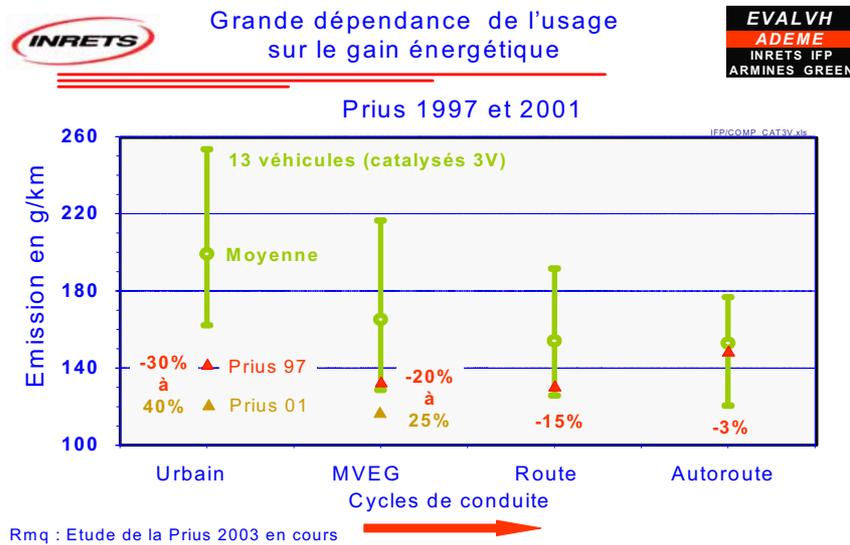
Une troisième fonctionnalité est l'optimisation du moteur thermique. Le principe est de le faire tourner à son niveau de rendement optimal, de stocker l'énergie dans les batteries lorsqu'elle est excédentaire et de la restituer lorsqu'elle est insuffisante, notamment dans les phases d'accélération. Le moteur électrique permet un surcroît de puissance et évite la surconsommation momentanée de l'accélération au moteur thermique. L'hybridation peut donc également permettre de diminuer la cylindrée du moteur thermique.

Enfin, un véhicule hybride peut être propulsé entièrement en mode électrique sans intervention du moteur thermique (fonction *E-drive*® sur la Toyota *Prius*).

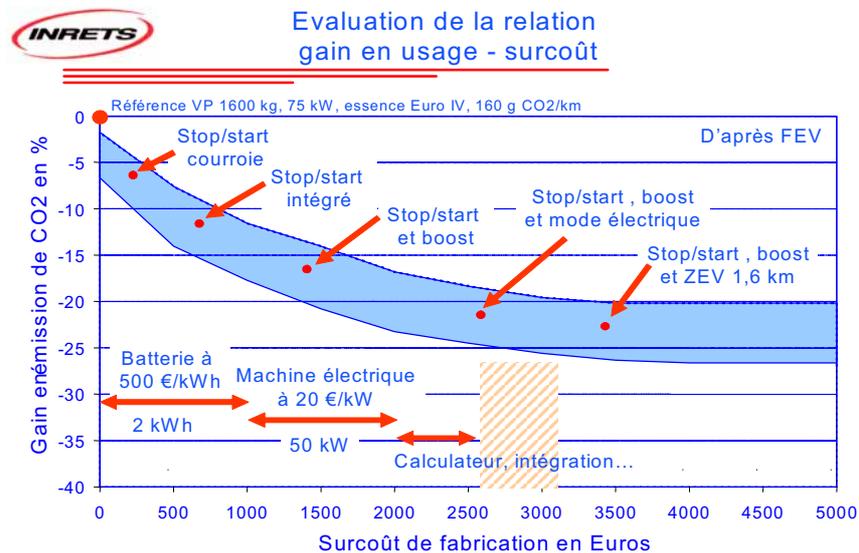
L'IFP propose ainsi une classification des différents types d'hybrides et une évaluation des puissances électriques nécessaires et des économies potentielles en conduite urbaine :

Type d'hybride	Fonctions	Puissance électrique	Gain en CO <sub>2</sub>
Stop & Start	1 – arrêt du moteur au ralenti	2 kW	8 %
Stop & go	1 + 2 (freinage récupératif)	3 kW	13 %
Mild-Hybrid	1 + 2 + 3 (downsizing moteur thermique et assistance accélération)	10 kW	30 %
Full Hybrid (série ou parallèle)	1 + 2 + 3 + 4 (mode électrique)	30 kW	45 %

Ces estimations faites sur cycle urbain sont favorable aux hybrides qui ont les performances le plus élevées dans cette configuration. Les gains sont en revanche plus faibles sur d'autres types de trajets, comme l'a montré François Badin de l'INRETS :



Ces gains doivent d'ailleurs être évalués au regard de leur coût (Source INRETS) :



Parmi les hybrides les plus aboutis, disponibles à l'achat dans les concessions, se trouvent les modèles produits par les constructeurs japonais Honda et Toyota. Leurs technologies ne sont pas identiques quoiqu'elles permettent désormais des performances comparables.

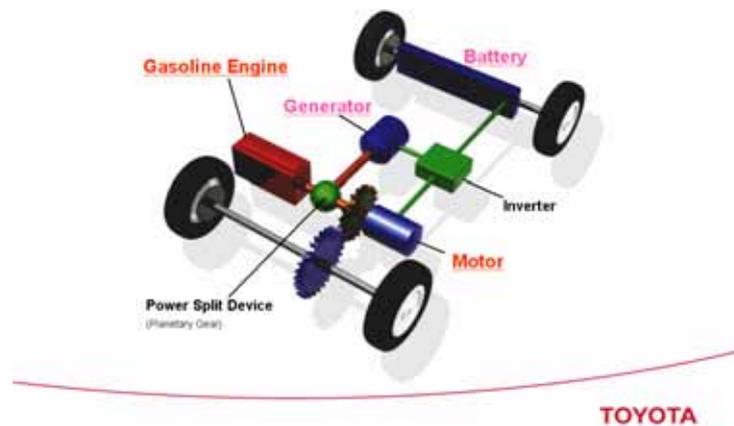
La principale différence perceptible pour le conducteur est le mode de combinaison du moteur électrique et du moteur thermique. Sur les modèles

Toyota, les deux moteurs peuvent fonctionner indépendamment, ce qui permet un mode électrique silencieux tandis que le couplage permanent sur la Honda Civic conduit à la fermeture des soupapes du moteur essence mais pas son arrêt complet.

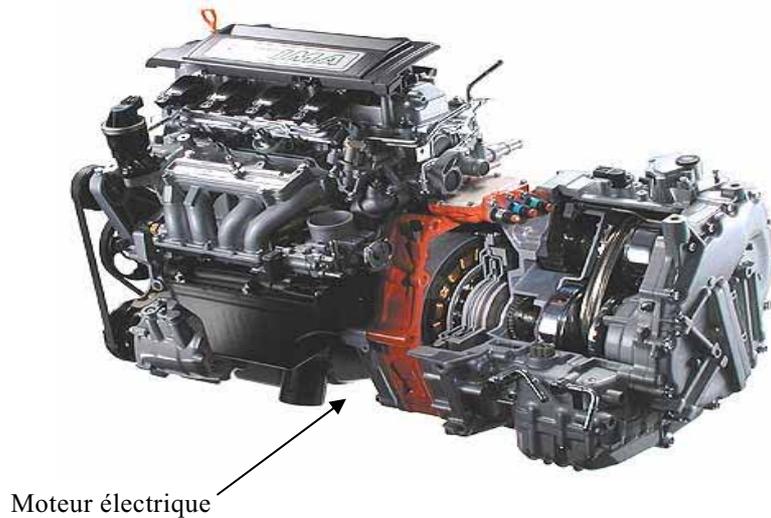
Techniquement, Toyota a choisi une architecture semi-parallèle tandis que Honda a mis en œuvre une architecture parallèle.

Le Toyota Hybrid system (THS) est particulièrement complexe. Ce sont deux moteurs/ générateurs électriques qui sont combinés au moteur thermique permettant un fonctionnement en série (cas de la traction électrique) ou en mode parallèle (apport de couple supplémentaire par un moteur électrique) ou à la fois en mode série et en mode parallèle. Pour parvenir à combiner ces différentes situations sans à-coups, une transmission dite « épicycloïdale » a été développée. C'est ce mécanisme qui permet un découplage entre la propulsion électrique et le thermique, et donc un mode électrique silencieux.

### Toyota Prius: technical configuration



Honda a choisi une architecture parallèle, c'est-à-dire que le moteur thermique et le moteur électrique partagent le même arbre, ce qui permet d'additionner les couples mais impose un rapport fixe entre leurs régimes. Cette architecture est combinée avec une boîte de transmission continûment variable (CVT) par courroie métallique. Commercialisé pour la première fois en 1999 sur le coupé Insight (2 places, carrosserie en aluminium, 90 g CO<sub>2</sub>/ km), le système IMA (integrated motor assist) a été étendu sur la Honda Civic en 2004.



Moteur Honda-IMA – Source : F.Badin INRETS, 2005

Tableau des performances comparées de la Toyota Prius et de la Honda Civic de nouvelle génération :

	Toyota Prius	Honda Civic
Moteur thermique	1,5 l, 77 CV	1.3 l, 95 CV, 123 Nm
Moteur électrique	50 kW, 68 CV	15 kW, 103 Nm
Puissance totale	115 CV à 4.000 tr/min	115 CV, 170 Nm à 2.500 tr/min
Consommation	4,3 l/100 km	4,6 l/100 km
Rejets de CO <sub>2</sub>	104 g/km	109 g/km
Autonomie électrique	- 5 km	- 5 km

Entre les deux constructeurs le point commun est cependant l'utilisation d'une électronique de haute puissance puisque le passage au *mild hybrid* nécessite de dépasser les 60 V. La Toyota Prius se situe, elle, à 500 V.

## 2. Une technologie aujourd'hui efficace, mais chère et marginale

La technologie hybride a désormais **fait la preuve de son efficacité en tant que prototype mais aussi en tant que produit industriel.**

En termes d'émissions, son avantage est double puisqu'elle permet de réduire significativement les émissions de CO<sub>2</sub> lorsque l'hybridation est complète. Les deux véhicules de niveau B sur le marché que sont la Prius et la Civic émettent moins de 110 g de CO<sub>2</sub>, soit 50 % de moins en moyenne que les

véhicules diesel de leur catégorie. Des véhicules diesel font aussi bien ou mieux mais ils sont de classe inférieure.

En termes de polluants locaux également, le gain de l'hybride est très significatif. Les performances de l'hybride sont les suivantes :

Emissions (g/km)	2 <sup>e</sup> génération	1 <sup>ère</sup> génération	Euro IV (essence)	Euro IV (diesel)
NOx	0.01	0.05	0.08	0.25
HC	0.02	0.05	0.10	-
CO	0.18	0.63	1.0	0.50
Particules	-	-	-	0.025

Source : Toyota

La technologie hybride, parce qu'elle consiste à combiner une motorisation thermique et une motorisation électrique, est chère. Son surcoût réel et supposé fait l'objet de débats assez vifs entre constructeurs sur son ampleur.

Les constructeurs japonais qui les commercialisent aujourd'hui mettent d'ailleurs en vente leurs véhicules à un tarif supérieur à celui du reste de leur gamme. Lors du lancement à l'automne 2005 de la nouvelle Honda Civic hybride aux États-Unis, le président de l'entreprise indiquait un surcoût de 2.500 \$ par rapport à la version essence. En France, la Prius est commercialisée entre 25.000 et 29.000 €.

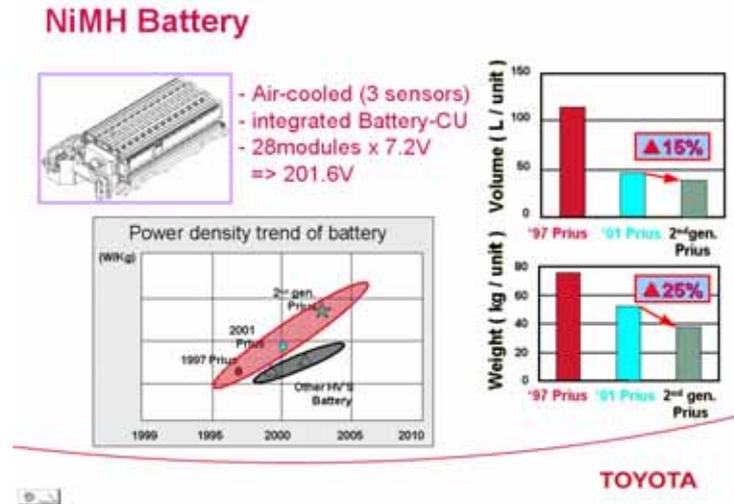
Une étude comparative récente réalisée par le magazine *60 millions de consommateurs*<sup>1</sup> permet d'avoir une idée de la différence de coût sur 4 ans. Il consistait à comparer les coûts respectifs d'achat (prime comprise) et d'usage (20.000 km/an) d'une Renault Mégane avec une Toyota Prius. Il en résultait que la Prius, au bout de quatre années, revenait à un coût identique à la version essence, mais était 2.000 € plus chère que la version diesel ou GPL, et 4.000 € plus chère qu'une Renault Kangoo GNV.

Le prix s'explique également en grande partie par le coût des batteries utilisées. Celles-ci sont particulièrement chères et difficiles à mettre au point. Les véhicules actuels sont équipés de batteries nickel-métal hydrure (Ni-MH) de fabrication Panasonic, Matsushita ou Sanyo. Si elles offrent beaucoup de puissance, elles ne permettent pas une grande autonomie. Une étape supplémentaire devra donc être franchie vers plus de performance et un moindre coût grâce à l'utilisation de batteries lithium-ion (Li-ion) produites à grande échelle. A cet égard, la prise de participation, en octobre 2005, de Toyota dans Subaru et Fuji Heavy industries a été interprétée comme la

---

<sup>1</sup> n°399, novembre 2005.

volonté du 1<sup>er</sup> constructeur mondial de se rapprocher de l'un des principaux fabricants de batteries Li-ion.



La diffusion des véhicules hybrides est aujourd'hui limitée. Toyota a commercialisé 385.000 Prius dans le monde depuis son lancement en 1997. Fin juillet 2005, il y en avait moins de 2.000 en France et de 19.000 en Europe. Honda a commercialisé 100.000 hybrides depuis six ans.

Le marché évolue cependant rapidement. Entre 2003 et 2004, le marché a doublé. 166.000 hybrides ont été vendus en 2004 dont 78 % par Toyota et 17 % par Honda.

La démarche des constructeurs japonais et surtout de Toyota résulte de la conviction que la technologie hybride est l'une des clés du futur de l'automobile, cette technologie devenant progressivement incontournable. Dès 1985, Toyota a investi dans ce domaine. Un centre dédié de recherche et de production de composants a été créé en 1989. Ce sont donc près de 20 ans de recherches continues qui permettent les succès technologiques actuels. Par ailleurs, les responsables de Toyota ont pour objectif d'avoir vendu 1 million de voitures hybrides en 2010 et que celles-ci représentent 20 % de leurs ventes en 2015. Toyota a donc entrepris de multiplier les modèles : Prius, RX 400h, Camry, Lexus GS... Ces modèles devraient être produits en Chine comme aux États-Unis.

### 3. Une technologie demain incontournable ?

Toyota et Honda ont-ils fait le bon choix technologique pour l'avenir ? L'hybride va-t-il devenir une solution commune à tous les véhicules ?

Aujourd'hui marginale dans la rue, la technologie hybride n'est déjà plus ignorée par aucun constructeur. Le salon automobile de Detroit de janvier 2005 en avait donné une première preuve. GM qui expérimente quelques 200 bus hybrides aux États-Unis a présenté deux prototypes intéressants : un SUV GMC Graphyte et une Opel Astra en version diesel hybride. Ces deux véhicules disposent de deux moteurs électriques et non d'un seul comme chez Toyota. Il s'agit d'apporter un complément de puissance au moteur selon le type de conduite. En ville, un moteur électrique est sollicité pour l'arrêt-départ et des accélérations à basse vitesse, l'autre si le véhicule est très chargé ou évolue en terrain accidenté. Ce dispositif est combiné sur le Graphyte avec une désactivation modulable des cylindres, 8, 6 ou 4 pouvant être utilisés selon les besoins. GM évalue le gain de consommation à 25 %. L'Opel est équipé dans le même esprit mais a un moteur diesel de 125 CV, dont la consommation serait inférieure à 8 l/100 km. Ford a, quant à lui, choisi d'acheter la technologie Toyota pour commercialiser très rapidement un SUV hybride, ce qui est le cas du *Escape*<sup>1</sup> dont vos rapporteurs avaient pu voir des exemplaires au cours de leur mission aux États-Unis. Premier SUV hybride commercialisé, il a reçu le prix du « *SUV de l'année* » outre Atlantique. Ford poursuivra dans cette voie en commercialisant d'ici à 2010 une version hybride de tous ses modèles.

Le salon automobile de Francfort qui s'est déroulé mi septembre 2005 a confirmé cette tendance. Tous les grands constructeurs allemands ont présenté des prototypes hybrides. Ceux-ci sont plus proches du *Stop & Start*® que du « *full hybrid* ». Sur le nouveau SUV Q7, Audi a monté un dispositif de ce type mais beaucoup plus puissant puisqu'il s'agit de mettre en veille et de faire redémarrer un V8 de 4,2 l et 350 CV. BMW a présenté sur un X3 *Efficient dynamics* un dispositif semblable mais fonctionnant grâce à des supercapacités (condensateurs de haute puissance capables de fournir une forte énergie sur un temps court, souvent constitués de polymères). Il ne bénéficie pas encore d'une récupération de l'énergie au freinage. Mercedes a présenté sa nouvelle classe S en version hybride essence et hybride diesel. Ces prototypes affichent des gains de consommation de 20 et 25 % très supérieurs à ce qui peut être atteint par la seule mise en veille du moteur à l'arrêt.

BMW a annoncé début septembre 2005 qu'il participerait aux recherches communes Daimler-Chrysler / GM sur l'hybride qui ont débuté en 2005. Deux des principaux constructeurs américains ont donc décidé de trouver une réponse commune au défi lancé par Toyota et Honda sur le marché américain dominé par les gros véhicules à essence. Des versions hybrides des SUV Chevrolet Tahoe et GMC Yukon seront commercialisées d'ici à 2007. Porsche a annoncé une collaboration avec Volkswagen pour réaliser et commercialiser d'ici 2008 une version hybride du Cayenne.

---

<sup>1</sup> Il est en revanche équipé de batteries Sanyo.

En septembre 2005 également, le Premier ministre, M. Dominique de Villepin, a annoncé un plan de recherche doté de 100 millions d'euros en faveur de recherches sur le « *véhicule propre* », afin de réaliser une voiture familiale ne consommant que 3,5 l. de carburant aux 100 km. Cette dotation permettra simplement de prolonger jusqu'en 2010 les financements du PREDIT dans le cadre du plan « *véhicule propre* » lancé par son prédécesseur. Cette annonce a été justement interprétée comme un plan de financement public d'une voiture hybride française, vraisemblablement diesel. PSA devrait présenter un prototype de VUL début 2006.

Volkswagen travaille également sur l'hybride diesel. Le prototype d'une Golf *Eco.Power* a été présenté fin 2004. Doté d'un moteur de 104 CV, il ne consommait que 3,8 l aux 100 km.

**L'intérêt pour l'hybride est très fort aujourd'hui. Il est vraisemblable qu'au cours des dix prochaines années le nombre des modèles augmentera fortement, tous les constructeurs en proposant, certains sur l'ensemble de leur gamme. Les ventes devraient progresser fortement mais de manière contrastée selon les marchés.** Aux États-Unis et au Japon où le diesel est peu présent, la progression devrait être très forte. Certaines sources<sup>1</sup> prévoient une multiplication par 7 de la part de marché, celle-ci passant de 0,5 à 3,5 % d'ici à 2012. Honda prévoit ainsi de vendre 50 % de *Civic IMA* en plus aux États-Unis par rapport à l'ancienne version, soit 40 000 unités par an.

Il est même possible que le marché américain s'ouvre aux véhicules diesel pour les particuliers plus rapidement qu'aux véhicules hybrides. Ceux-ci ne représentent que 3 % du marché aujourd'hui et pourraient en capter 7,5 % en 2012.

**Au Japon**, les objectifs du Gouvernement à l'horizon 2010 ne sont pas très différents. Sur 74 millions de véhicules en service, 132.000 véhicules hybrides roulent en 2004. C'est presque trois fois plus qu'en 2001 où ils n'étaient que 50.000. **Le Gouvernement prévoit qu'il y en ait 2,1 millions en 2010 sur un parc de 75 millions, soit 2.6 %. Un développement spectaculaire est donc prévu – une multiplication par 42 en dix ans –** mais n'en faisant la technologie dominante qu'à moyen terme.

D'autres analystes sont beaucoup plus optimistes et prévoient une croissance extrêmement forte des hybrides sur le marché américain si les prix du pétrole se maintenaient à la hausse. Ils pourraient représenter jusqu'à 20 % de parts de marché<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Cabinet JD Power.

<sup>2</sup> Booz Allen Hamilton Inc.

En revanche, en Europe, l'hybride devrait progresser plus lentement en raison des performances actuelles des moteurs diesel et de leur faible coût.

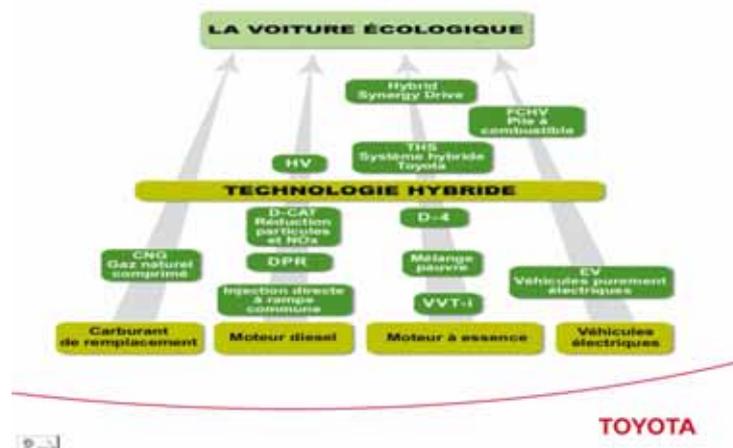
La généralisation de motorisation hybride sera donc réelle dans les dix prochaines années, mais elle ne deviendra pas une technologie majoritaire dans les ventes et le parc. Elle restera marginale, comprise entre 5 et 15 % de parts de marché, sans choc pétrolier majeur.

L'hybride est-il pour autant une technologie à négliger ? Bien au contraire, selon vos rapporteurs, la technologie hybride se trouve à la jonction de la plupart des technologies du futur touchant au caractère moins polluant et économe du véhicule. Touchant l'ensemble du groupe motopropulseur, c'est une technologie transversale pouvant être adaptée à toutes les combinaisons de motorisation, y compris la pile à combustible. Les progrès spectaculaires prévisibles en termes de batteries ouvrent la voie d'une hybridation plus complète et proposant une plus grande autonomie électrique. Il est vraisemblable que seule cette technologie permettra une diffusion importante de véhicules essentiellement électriques.

Cette technologie pourra également se combiner aux moteurs thermiques du futur fonctionnant à base de biocarburants issus de la biomasse ou d'autres carburants liquides et fonctionnant de manière extrêmement économe. C'est en effet un concept technologique qui peut assez facilement être transposé sur plusieurs modèles différents d'un constructeur automobile.

Mais il reste à maîtriser le surcoût important de cette technologie par rapport à la propulsion classique pour en permettre la plus large diffusion.

### La vision technologique de Toyota



Pour le constructeur Toyota, le schéma « Fuji » illustre bien l'orientation choisie : tout véhicule du futur, quel que soit son type de propulsion, utilisera le procédé d'hybridation. C'est un concept jugé incontournable et transposable à tout type de véhicule.

#### ***D. LA VOITURE ÉLECTRIQUE : UNE TECHNOLOGIE QUI DOIT DÉMONTRER SA VIABILITÉ***

La voiture électrique a déjà échoué deux fois à supplanter ou même seulement à concurrencer la voiture à moteur à combustion interne. Deux raisons principales peuvent l'expliquer.

La première était l'immaturation de la technologie. Que ce soit au tout début de l'aventure automobile ou au début des années 1990, les performances des voitures électriques étaient trop faibles et leur coût trop élevé pour qu'elles apparaissent comme des concurrentes sérieuses.

La seconde est la quasi-absence de marché pour les voitures mono usage. En effet, l'autonomie des véhicules électriques est jusqu'à présent restée en-deçà des 100 km, de telle sorte que la voiture électrique ne pouvait être qu'une voiture urbaine, limitant très fortement sa capacité de pénétration sur le marché.

Depuis lors les recherches n'ont pas cessé et plusieurs scientifiques et entreprises misent à nouveau sur la voiture électrique compte tenu des progrès accomplis dans le domaine des batteries et de l'architecture des voitures. **La démonstration de la viabilité technologique et économique de ces prototypes reste cependant à faire.**

Aujourd'hui la question de la voiture électrique est de nouveau d'actualité. Les véhicules électriques se sont progressivement installés dans le paysage urbain. Plusieurs villes ont mis en place une desserte en bus électrique dans les centres historiques (Bordeaux, Rome...). En Asie, les deux roues électriques se développent très rapidement.

En ce qui concerne les voitures, la plupart des personnalités rencontrées par vos rapporteurs aux États-Unis, en Allemagne et au Japon, ne croient pas à un développement important dans les prochaines années en raison de performances toujours limitées. Cependant, les recherches se poursuivent en France et à l'étranger. **De nouvelles batteries à base de lithium sont sur le point d'être commercialisées. En France, les véhicules qui en sont équipés sont encore des prototypes mais pourraient être largement diffusés dans les trois prochaines années.**

Il est donc nécessaire de faire le point sur l'état de la recherche et les performances potentielles des nouvelles voitures électriques puis d'examiner leurs capacités à constituer une réelle alternative.

## **1. Pourquoi la voiture électrique a-t-elle été un échec dans les années 1990 ?**

La voiture électrique, porteuse de grands espoirs au début des années 1990, n'a pas pu trouver son marché.

La voiture électrique fait partie à part entière de l'aventure automobile depuis le commencement.

Avant la première guerre mondiale, le moteur électrique est une concurrente potentielle du moteur à combustion interne. En 1899, la première voiture à franchir les 100 km/h est une voiture électrique française, la *Jamais contente*. Des taxis électriques roulaient à Paris et à Londres en 1911. En 1915, un tiers des véhicules américains étaient électriques.

La voiture électrique a été abandonnée dans les années 1930. Les progrès du moteur à combustion interne (fiabilité, démarrage, facilité d'approvisionnement) l'ont rendue obsolète (problème persistant d'autonomie et de recharge des batteries). En effet, **l'un des problèmes majeurs des véhicules électriques est le stockage de l'énergie dans des batteries à la fois légères et performantes.**

Après ce premier « échec », ce sont les chocs pétroliers et l'évolution de la réglementation californienne qui ont été les éléments déclencheurs d'un retour à la propulsion électrique. L'un des symboles de cette nouvelle génération et de la relance des travaux fut la R5 électrifiée, présentée au G8 de Versailles au début des années 1980.

**Les avantages du véhicule électrique** suscitent de nouveau l'intérêt :

- \* absence de pollution et d'émission locale de gaz à effet de serre,
- \* silence de fonctionnement,
- \* rendement énergétique élevé du moteur électrique (x 2 ou x 3 celui du moteur thermique),
- \* fiabilité mécanique du moteur électrique,
- \* indépendance vis-à-vis du pétrole.

Depuis cette époque également, ses promoteurs mettent en avant la pression croissante de la réglementation et de la population qui amènerait à limiter l'accès des automobiles thermiques dans les centres villes.

**L'une des difficultés de principe du véhicule électrique est l'origine de l'électricité. Si le véhicule ne pollue pas sur le lieu d'utilisation, qu'en est-il de l'électricité qui l'alimente ?** Très peu de pays dans le monde ont une production d'électricité « propre » et exempte de production de gaz à effet de serre. **Ainsi, dans la plupart des pays du monde qui n'ont ni ressource hydroélectrique suffisante, ni un nombre important de centrales nucléaires, la voiture électrique émet autant ou plus de gaz à effet**

**de serre qu'un véhicule thermique.** En France même, l'origine nucléaire de l'électricité ne va pas sans faire hésiter certains partisans de la voiture électrique...

Le véhicule électrique peut être défini de manière large en fonction des différentes filières de provenance de l'électricité et de son lieu de production (en dehors ou non du véhicule) :

- \* au sol à l'aide de centrales électriques ;
- \* dans le véhicule par : un moteur thermique (hybride), un reformeur embarqué et une pile à combustible, de l'hydrogène stocké et une pile à combustible.

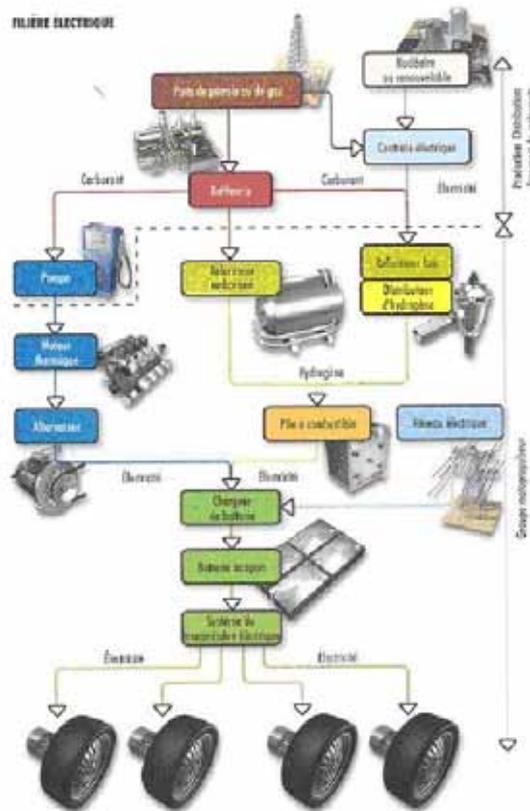


Fig.1 Du puit à la roue, extrait de La Recherche, n° 357 octobre 2002, p63.

Cela conduit à proposer de distinguer **trois catégories de véhicules électriques** :

- les véhicules électriques à **batteries**. Ils utilisent l'énergie emmagasinée dans les batteries à travers un moteur électrique propulsant le véhicule (BEV : battery electric vehicle) ;

- les véhicules électriques **hybrides**. Ils sont propulsés à partir de différentes sources d'énergie (fossile et électrique) (HEV : hybrid electric vehicle) ;

- les véhicules alimentés **à l'hydrogène**. Ils sont propulsés à partir de l'hydrogène soit produit, soit stocké à bord (FCV : fuell-cell vehicle).

Vos rapporteurs ne traiteront ici que du véhicule électrique à batteries.

**Au début des années 1990, les recherches menées depuis le premier choc pétrolier ont semblé devoir porter leurs fruits. En effet, la mise au point des batteries Nickel Cadmium était un véritable saut technologique permettant des performances très nettement supérieures à la traditionnelle batterie plomb acide.**

A l'époque, les principaux experts et plusieurs industriels français de l'automobile pensaient que les temps étaient mûrs pour un développement rapide de la voiture électrique. La production de 50 000 véhicules par an en France en 1995 était estimée très probable.

Les performances atteintes, 100 km d'autonomie, semblaient suffisantes pour que les consommateurs qui ont un usage quotidien urbain de leur véhicule et effectuent peu de trajets par jour se tournent massivement vers cette technologie. De plus, les évolutions des recherches devaient permettre de commercialiser rapidement de nouvelles batteries plus performantes.

Des politiques publiques très favorables vont être mises en place en France et en Europe :

Pays	Aides d'état	Autres incitations financières	Réduction de la TVA	Réduction d'autres taxes	Aides des assurances	Parking	EV imposés par la loi	Limitation de la circulation
<b>Autriche</b>			12%	Pas de première taxe d'immatriculation Pas de taxe sur la motorisation	Oui	Oui		
<b>Belgique</b>								
<b>Finlande</b>		A Hämeenlinna, 10 véhicules ont 30% d'aide à l'achat				A Hämeenlinna, 41 emplacements gratuits		
<b>France</b>	5000 FF/VE	ADEME & EDF		Road tax - no TIPP		Oui	Loi sur l'air	
<b>Allemagne</b>				Pas ou moins de taxes		Oui		
<b>Grande Bretagne</b>				Road Fund Tax EV= 25% ICE				
<b>Italie</b>	En Lombardie, 50% du prix			Pas de taxe	50% de réduction	Dans certaines villes (Turin)		Dans certaines villes
<b>Pays Bas</b>			Dans certains cas	Pas de BPM payé depuis 1997				
<b>Norvège</b>				Pas de taxe		A Oslo		
<b>Suède</b>				Pas de taxe d'achat, taxe annuelle bientôt exemptée		Dans certaines villes		
<b>Suisse</b>	Dépend de chaque canton							

Tab.1. Aides nationales pour le soutien à la diffusion des véhicules électriques selon les différents pays européens.  
Source : AVERE

Elles comprendraient notamment une politique de développement des bornes de recharges et de mise à disposition gratuite.

En effet, les véhicules électriques se rechargent normalement dans des lieux privés à partir d'une prise de 16 A protégée par un disjoncteur différentiel de 30 mA, identique à celui d'une salle de bains. Ce sont les prises installées dans les maisons ou les parkings d'entreprises.

Les bornes mises à la disposition des usagers sur la voie publique sont du même type (16 A). L'électricité peut être facturée mais plusieurs villes ont choisi de les mettre à disposition gratuitement (Paris et La Rochelle). L'électricité n'étant pas soumise à la TIPP, le « *plein* » coûte de l'ordre de 1 € aux 100 km. Ces bornes permettent de retrouver une autonomie de 5 km par 10 minutes de charge. Ces bornes, comparables aux bornes domestiques conviennent aux usages actuels de la voiture électrique (longue recharge de nuit et petit complément le jour). **La longueur du temps de charge est cependant une telle contrainte et une telle peur – celle de la panne électrique – que d'autres solutions doivent être envisagées.**

**Des bornes de recharge rapide ont été mises en place dans quelques villes dont La Rochelle. Elles permettent de récupérer 20 km d'autonomie en 10 minutes. Il en existe 90 exemplaires.**

Au total, en France, il y aurait environ 850 bornes de recharge.

- **Les ventes de véhicules électriques entre 1995 et 2000<sup>1</sup> :**

Pays	1996	1997	1998	1999	2000	Source	Remarques
<b>Autriche</b>	440	480	520	500	460	Austrian Mobility Research	2 roues inclus
<b>Belgique</b>	60	60	120	130	145	ASBE	
<b>Danemark</b>	300	330	298	305	320	VCE	
<b>Finlande</b>	120	130	150	148	130	SAY	
<b>France</b>	2160	2887	4248	5608	6835	AVERE-France	
<b>Allemagne</b>	2000	2200	2250	2275	2300	DGES	
<b>Italie</b>	850	950	1100	1150	1275	QVES	
<b>Pays Bas</b>	60	70	85	98	110	ASNE	
<b>Norvège</b>	100	135	178	300	300	NORSTART	
<b>Suède</b>	300	400	420	500	520	SWEVA	
<b>Suisse</b>	2100	2500	3173	3447	3580	E-Mobile	2 roues inclus
<b>Royaume Uni</b>	100	100	250	320	280	EVA	milk floats non indus ~ 15000
<b>Total</b>	5890	10242	12792	14781	16255		

Tab.2. Ventes de véhicules électriques depuis 1995.  
Source : AVERE

**En réalité, ce sont moins de 15 000 véhicules électriques qui auront été produits depuis le début des années 1990 par les constructeurs français. Aujourd'hui une centaine de véhicules électriques sont vendus chaque année. Comment expliquer cet échec technique et commercial ?**

Tout d'abord le marché a été surestimé. Très peu de ménages ont les moyens d'acheter une voiture mono usage, uniquement pour la ville. Peu de

<sup>1</sup> L'AVERE est l'association européenne des professionnels du secteur. Elle a été créée en 1978 sur l'incitation de la Commission européenne.

ménages ont également l'habitude de louer un véhicule pour les fins de semaine et les vacances. Seuls les cadres supérieurs urbains déjà bimotorisés et sensibles à l'environnement pouvaient donc acheter un véhicule électrique. Ce n'était pas suffisant pour vendre 50 000 véhicules par an, surtout quand les produits ne correspondent pas à cette tranche très spécifique de la population. Chacun souhaite pouvoir tout faire avec sa voiture, c'est un outil de liberté individuelle. Or, l'autonomie limitée et le temps de charge excessif des véhicules électriques étaient opposés aux fondements de l'achat automobile.

Ensuite, la préoccupation environnementale de la population était et reste faible au regard des autres critères d'achat d'une voiture : performance, beauté, sécurité, budget...

La troisième raison est le coût trop élevé des batteries. Le surcoût à l'achat étant inacceptable pour le consommateur, des solutions de location ont été proposées mais n'ont pas permis de proposer le véhicule électrique à un coût équivalent de la petite voiture diesel qu'elle était censée remplacer. Ni les consommateurs, ni les administrations n'ont souhaité ou pu investir dans une technologie chère et inadaptée.

En effet, la quatrième raison est l'insuffisance des performances. En effet, l'autonomie de ces véhicules se situe plutôt autour de 80 km que de 100 km. Encore cela doit-il être converti en heures d'utilisation ou être réévalué du fait de l'usage du chauffage ou d'autres équipements de confort. Il était également difficile de connaître l'état de charge exact de la batterie et de mesurer sa durée de vie restante en raison d'effets mémoire indésirables. Plusieurs utilisateurs se sont aperçus que dans un relief mouvementé ou par faible température l'autonomie devenait trop faible pour envisager d'utiliser de tels véhicules.

Le problème technologique est complexe car les capacités des batteries sont liées à la nécessité de les recharger sur le réseau électrique normal. Dès lors elles doivent être rechargées pendant près d'une dizaine d'heures car elles supportent mal les recharges partielles ou rapides. Une fois l'autonomie épuisée, il faut donc attendre une journée ou une nuit entière pour retrouver une voiture avec tout son potentiel. L'échange standard des batteries pose jusqu'à présent des problèmes insolubles car elle n'est pas aussi aisée que celle des chevaux de poste. Il s'agit de 200 à 400 kg à manipuler. De plus, comme il est difficile de connaître leur état exact en raison des effets mémoire, le consommateur ne peut pas être sûr de disposer d'une capacité identique. C'est en définitive beaucoup trop complexe par rapport au plein d'essence dans une station-service.

L'échec de la voiture électrique dans les années 1990 permet de tirer un enseignement principal. **Une voiture électrique ne pourra concurrencer avec succès les véhicules thermiques que si elle respecte le principe de transparence, c'est-à-dire proposer aux consommateurs un véhicule ayant**

**les mêmes performances, la même polyvalence et le même coût qu'un véhicule thermique.**

## **2. Les projets et les potentialités**

### **• Les principes d'une pile/batterie**

Une pile est un convertisseur d'énergie chimique en énergie électrique grâce au contrôle d'une réaction d'oxydoréduction spontanée, c'est-à-dire l'échange d'électrons entre deux pôles ou électrodes : une anode (oxydation/perde d'électrons) et cathode (réduction, gain d'électrons).

Entre les deux se trouve un milieu, l'électrolyte, permettant le passage des ions mais non conducteur des électrons. C'est un conducteur ionique mais un isolant électrique.

La possibilité d'inverser la réaction permet de créer une batterie. Les caractéristiques principales d'une batterie sont les suivantes :

- \* tension (volts),
- \* capacité massique (milliampère-heure par gramme/mAh/g),
- \* capacité volumique (milliampère-heure par litre/mAh/l),
- \* puissance massique (watt par kilogramme/W/kg, elle détermine la capacité d'un véhicule à changer de régime et donc à accélérer),
- \* densité d'énergie massique (Wh/kg, elle détermine l'autonomie du véhicule),
- \* densité d'énergie volumique (Wh/l),
- \* stabilité thermique,
- \* température d'utilisation,
- \* stabilité au cours des cycles de charge et décharge qui commande la durée de vie par le nombre des cycles possibles.

Il existe deux grands types de batteries :

- \* Les accumulateurs en milieu aqueux comprenant des systèmes
  - acides (batterie au plomb),
  - alcalins (nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique, nickel- hydrogène) ;
- \* Les accumulateurs en milieu organique (ion-lithium).

### **• La batterie au plomb**

La batterie au plomb ou « acide-plomb » a été inventée en 1839 par Gaston Planté. Elle a notamment permis à Camille Jenatzy, en 1899, d'atteindre la vitesse de 105 km/h et une autonomie de 50 km à bord de la voiture *Jamais contente*.

Cette batterie utilise le plomb, l'oxyde de plomb ( $\text{PbO}_2$ ) et le sulfate de plomb ( $\text{PbSO}_4$ ). L'électrolyte est une solution aqueuse d'acide sulfurique. Elle peut délivrer une tension élevée (2,1V) mais sa masse réduit son énergie spécifique (35 Wh/kg).

- **Les batteries alcalines**

Elles ont pour point commun une électrode à base d'hydroxyde de nickel  $\text{Ni(OH}_2)$  et une solution aqueuse de potasse (KOH) concentrée comme électrolyte.

La réduction du matériau se fait par réduction de l'ion métallique ( $\text{Ni}^+$ ) tandis qu'un ion ( $\text{H}^+$ ) est inséré dans la structure du matériau (intercalation). Au cours de la recharge, l'ion métallique libère un électron et un ion  $\text{H}^+$  est désintercalé et expulsé de la structure.

Ces batteries souffrent de deux handicaps : un effet mémoire (limite de la durée de vie) et une instabilité thermodynamique vis-à-vis de l'eau (décharge d'autant plus rapide que la température est élevée).

Les batteries alcalines se différencient par la nature de la deuxième électrode : un gaz ( $\text{H}_2$ ) ou des matériaux métalliques (Ni-Cd ou Ni-MH).

Les batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd) offrent une bonne densité d'énergie (50 Wh/kg) mais une mauvaise stabilité et souffrent de la toxicité des composants.

Les hydrures métalliques fonctionnent grâce à leur capacité à stocker l'hydrogène et à libérer des hydrures (ions  $\text{H}^-$ ). Ces batteries nécessitent des terres rares et une température élevée.

- **Les batteries au lithium**

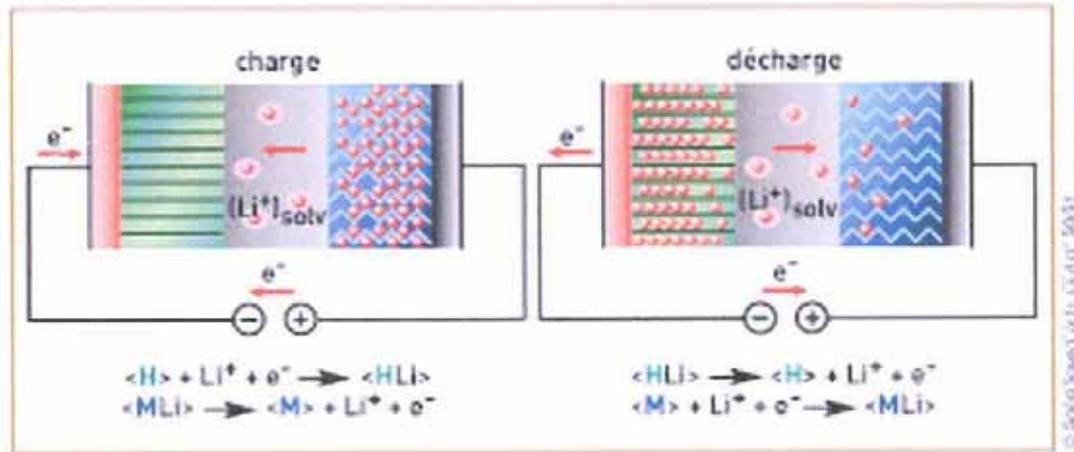
Il en existe deux types principaux : lithium-graphite et lithium-polymère.

Le lithium est un métal alcalin très léger (numéro atomique  $Z=3$  et masse molaire 6,94 g/mol). Il réagit violemment au contact de l'eau et s'oxyde en présence d'oxygène ou d'azote, d'où la nécessité d'un électrolyte organique anhydre et d'un conditionnement sous atmosphère inerte. Il faut en outre éviter la formation de filaments métalliques entre les électrodes (dendrites). Ces particularités expliquent les différences entre les deux types de batteries au lithium.

Dans les batteries lithium-graphite (dites lithium-ion), le métal pur est remplacé par un composé d'intercalation, le graphite, accueillant un ion lithium pour six carbones. L'autre électrode est composée d'un autre matériau

d'intercalation ( $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$  ou  $\text{LiMnO}_4$ ). Les ions lithium circulent donc d'un matériau à un autre.

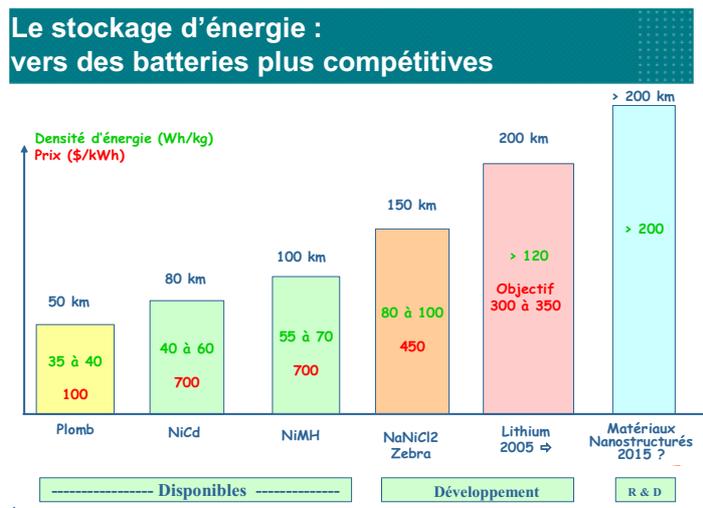
Cette technologie a un coût élevé mais permet de fortes tensions et une grande densité d'énergie sans effet mémoire.



Les batteries lithium-polymère intègrent tous les matériaux actifs dans un fil plastique poreux « polymère » conducteur ionique.

**Les recherches se poursuivent sur les différents types de batteries en fonction de leur usage potentiel.**

Les batteries plomb-acide (électrode en plomb, acide sulfurique comme électrolyte) sont une technologie éprouvée et sûre. Elles équipent la totalité des véhicules. Leur coût moyen est faible et compris entre 15-30 €/kWh pour le démarrage et 50-100 €/kWh pour le transport. Son principal handicap est sa faible densité massique en énergie (30 Wh/kg). Parfaitement adaptées au démarrage, elles semblent aussi offrir le meilleur rapport performance/prix pour le « stop & start » demandant peu d'énergie. Des batteries « plomb comprimé » verront prochainement le jour et seront certainement utilisées plusieurs années encore pour les applications industrielles et le transport de proximité (petits bus de 22 places).



Source : EDF, 2005.

Les batteries Nickel utilisant une électrode Nickel se subdivisent en deux catégories : Nickel Cadmium (NiCd) et Nickel métal hydrure (NiMH). La batterie NiCd fabriqué par SAFT et placée sur les véhicules électriques produits au cours des années 1990 leur a conféré une autonomie de l'ordre de 70 à 80 km. Sa densité en énergie est 50 % plus élevée que les batteries au plomb. Ce type de batterie va progressivement disparaître en raison de l'évolution des normes environnementales (dangerosité du cadmium). Il était également difficile de connaître précisément son niveau de charge et sa durée de vie dépendait de cycles complets de charge-décharge.

Les batteries Nickel métal Hydrure permettent un nouveau progrès dans les performances. La densité d'énergie est deux fois plus importante (70 Wh/kg) que dans une batterie au plomb. Elles sont pour l'instant essentiellement utilisées dans les véhicules hybrides (Toyota Prius et Lexus RX400 h) et produites par des firmes japonaises (Panasonic, Matsushita, Sanyo). Elles offrent une puissance massique très élevée (1.500 W/kg à 20 °C). Elles sont sûres d'utilisation (sécurité, gestion de la charge, durée de vie), mais onéreuses à fabriquer. Des recherches sont effectuées sur le nickel zinc mais il n'est pas certain que cette technologie soit suffisamment performante pour concurrencer les batteries au lithium.

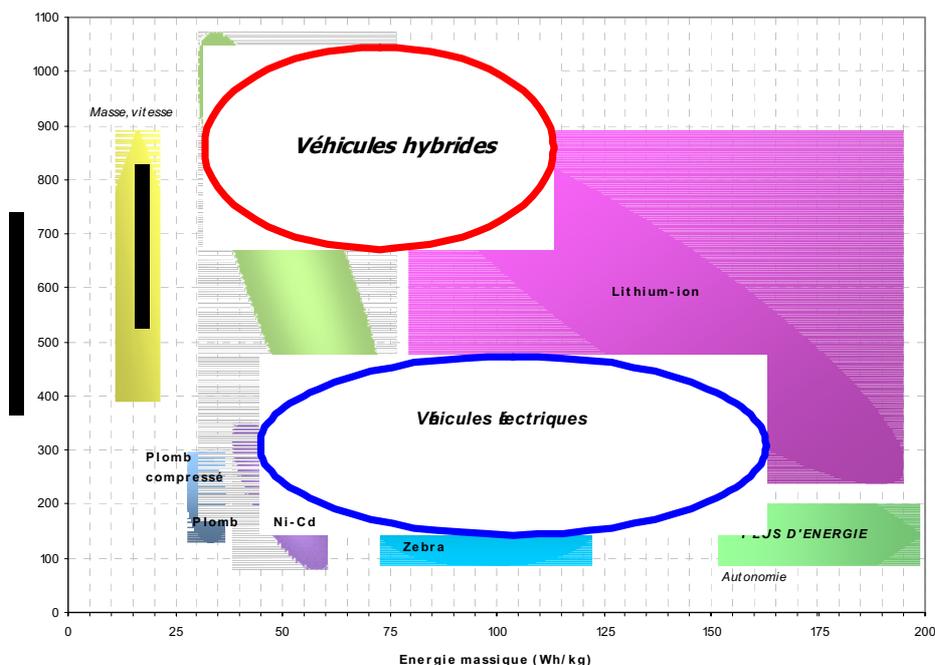
Les batteries Sodium Nickel Chlorure (NaCl et NiCl<sub>2</sub>) – ZEBRA –, de la société suisse MES-DEA, ont pour intérêt d'avoir une densité d'énergie supérieure à 100 Wh/kg. Il s'agit de batteries « chaudes » fonctionnant à 300 °C. Contenant un électrolyte liquide, elles doivent être conditionnées dans un caisson étanche. Elles occupent donc un volume relativement important ce qui les destine à être essentiellement utilisées par les bus électriques et véhicules lourds. Un usage automobile n'est toutefois pas exclu.

Les batteries au lithium (lithium ion et lithium polymère) sont celles qui offrent le plus grand potentiel pour les futures voitures électriques. Elles pourraient fournir une autonomie comprise entre 200 et 300 km. Elles pourraient aussi équiper des véhicules hybrides rechargeables.

Les batteries lithium ion sont des batteries à électrolyte liquide. Peu de sociétés en fabriquent pour assurer l'alimentation de véhicules électriques, l'essentiel des usages étant réservés pour l'instant à l'électronique portable. Selon les modèles ou les sociétés, les batteries ont des caractéristiques variables. La société française SAFT, l'une des plus performantes au monde dans ce secteur, a mis au point des batteries de haute puissance (2 850 W /kg), de moyenne puissance (1170 W/kg) et de haute énergie (420 W/kg et 150 Wh/kg).

Les batteries lithium polymère sont des batteries solides. Tous les éléments sont sous forme de films plastiques pour l'électrolyte et la cathode et métallique (lithium) pour l'anode. Elles sont fabriquées en France par la société BatScap et au Canada par la société Avestor mais pour des usages stationnaires.

Enfin les super condensateurs qui permettent de délivrer une puissance très élevée pendant un faible laps de temps seront sans doute adaptés à des usages spécifiques de transport en commun (tramway – stop & go) et pour l'équipement de voitures *mild-hybrid* en complément du système d'alternodémarrage.



**Logiquement, les deux voies les plus explorées par les constructeurs qui espèrent mettre sur le marché un véhicule électrique polyvalent sont les batteries lithium ion et lithium polymère.**

**Dassault-Heuliez et Bolloré relancent la réalisation d'une voiture électrique compétitive.**

Dans le cadre du programme interministériel PREDIT, **la Société de la voiture électrique (SVE) qui résulte de l'association en 2001 du groupe Dassault et de Heuliez**, a été aidée par l'État pour construire 30 véhicules électriques et hybrides, et les expérimenter dans les conditions réelles d'utilisation.

SVE a ainsi mis au point trois véhicules successifs Cleanova I, II et III. La Cleanova I était dotée d'une carrosserie propre. La Cleanova II a été élaborée sur la base de la Renault Kangoo, sans toutefois que logo Renault apparaisse. Enfin, la troisième version est fabriquée sur celle de la Renault Mégane Scenic dont le losange est à nouveau présent sur la calandre, petit détail qui a montré au salon de Genève la volonté du constructeur français d'être à nouveau présent dans ce secteur.

Les Cleanova sont équipées de batteries SAFT lithium-ion. Cette technologie est testée depuis près de 10 ans. Elle disposerait d'une autonomie de 210 km en cycle urbain. L'énergie massique est de 150 Wh/kg. La batterie de 25 kWh se recharge sur le secteur (230 V – 16 A) en 7 heures et peut être rechargée à hauteur de 70 % en 30 minutes mais à partir de prises spécifiques (35 kW – 150 A).

Le coût affiché est de 350 €/kWh. Les accumulateurs représenteraient un poids de 250 kg dont le coût à l'achat serait de 11.000 € pour une production de 2000 à 5000 par an.<sup>1</sup>

SVE a également présenté au Mondial de Paris une Cleanova dotée d'un prolongateur d'autonomie permettant de parcourir plus de 400 km. Cette voiture hybride est d'une puissance électrique de 22 kWh et dispose d'un moteur essence et d'un réservoir de 20 litres.

	Cleanova II	Cleanova II + prolongateur
Énergie embarquée	25 kWh	22 kWh & 20 l
Cycle urbain euro	210 km	530 km
Cycle extra urbain	150	390
Cycle mixte	170	450

Source : SVE

---

<sup>1</sup> Industrie et technologie, n°865, février 2005.

SVE espère placer ces véhicules auprès des grands opérateurs publics (Poste, EDF, État et collectivités territoriales) puis auprès du grand public. La commercialisation est envisagée à partir de 2007.

Au-delà de son expérimentation en France, SVE a signé, le 9 octobre 2004, un partenariat avec le chinois Wanxiang pour la vendre dans ce pays notamment à l'occasion des Jeux olympiques de Pékin en 2008. Il est question d'une commande de 70 000 taxis électriques.

**Bolloré et sa filiale Batscap sont le deuxième grand acteur en France de ce secteur.** La voiture électrique Batscap intitulée *BlueCar* a été présentée pour la première fois au Salon de Genève en 2005. Ce prototype vise surtout à démontrer la faisabilité et la viabilité de la technologie des batteries lithium polymère. L'architecture de la voiture et la traction électrique ont été conçues avec Matra Auto Engineering, Pininfarina et Philippe Guédon. Celui-ci a d'ailleurs coutume de dire que la *Blue Car* est la première voiture électrique dans sa conception, toutes les autres n'étant que des « voitures électrifiées » n'ayant pu bénéficier de toutes les avancées permises par la propulsion électrique, notamment en termes d'habitabilité et de capacité de chargement.

La batterie lithium polymère développée par Bolloré est issue du savoir-faire acquis par le groupe dans les papiers minces puis les films plastiques et les condensateurs. Des travaux sont engagés depuis 1993 pour un montant total de 70 millions d'euros. Depuis novembre 2001, EDF collabore à ces recherches et a pris une participation de 20 % dans Batscap.

Cette batterie est composée de multiples unités de base de 2,5 V constituées du bobinage d'un film de 150 µm. Ce film est composé de quatre couches : anode en lithium métallique, électrolyte en polyoxyéthylène et sels de lithium, cathode en oxyde de vanadium, carbone et polymère et d'un collecteur de courant. Ces batteries fonctionnent à une température de 90 °C.

Batscap indique qu'elle sera à même de répondre aux besoins. Elle doit procurer une autonomie supérieure à 200 km, une bonne accélération et une vitesse de pointe de 120-130 km. Son niveau de charge sera facile à connaître et son temps de recharge plus court que les technologies actuellement disponibles (total en 6 h). Sa durée de vie serait supérieure à 1000 cycles et donc supérieure à 10 ans et 150 000 km. Le poids total des batteries ne dépasserait pas 200 kg et un volume de 150 litres au lieu des 400 kg pour le NiCd. Elle permettrait un coût de 250 €/kWh environ.

Ces batteries entièrement sèches sont très stables et ont une longue durée de vie. Elles peuvent fonctionner à une température extérieure comprise entre -20 °C et +60 °C. La densité d'énergie est de 150 Wh/kg et la puissance est de 300 W /kg.

La batterie LiPM et ses concurrentes :

	Plomb-acide	NiCd	NiMH	Li ion	Li PM
Densité d'énergie (Wh/kg)	30-40	45-60	80-90	120-150	150
Densité de puissance (W/kg)	120	150	150	200/300	300
Nombre de cycles	500	1500	800	1000	1000
Coût (€/kWh)	110	400	400	350	< 250

Source : Batscap

Bolloré prévoit un marché de l'ordre de 120 000 véhicules électriques dans le monde en 2010 sur un total de 50 millions.

- **La voiture électrique urbaine ou très sportive ?**

En dehors de ces deux industriels français du secteur, une observation attentive de l'actualité permet de voir le paysage évoluer dans deux autres directions : les toutes petites voitures électriques et les voitures électriques à haute performance.

Dans le domaine des très petites voitures électriques, on observe un intérêt croissant pour des voitures exclusivement urbaines permettant d'accueillir une à deux personnes et qui seraient mises à disposition en libre service.

Une voiture indienne, la G-Wiz, de marque Reva, est commercialisée au Royaume-Uni depuis quelques mois. Elle est alimentée par des batteries au plomb classiques, dispose d'une autonomie de 64 km. Sa vitesse maximum est de 64 km/h. Elle se régénère en partie grâce à l'énergie du freinage. Vendue au prix de 13 000 € environ, ses ventes sont pour l'instant confidentielles. Elle pourrait connaître un certain succès à Londres puisqu'elle est exempte du péage et peut se garer gratuitement en centre ville.

Une autre voiture électrique proche du prototype est la Tango, conçue par la firme américaine Commuter Cars. Ne mesurant que 99 cm de large, elle embarque deux passagers l'un derrière l'autre. Deux moteurs électriques sont installés dans les roues arrière. Elle dispose d'une autonomie théorique comprise entre 100 et 130 km et d'une pointe de vitesse à près de 192 km/h. elle devrait être vendue 85 000 \$.

Elle se rapproche donc des prototypes électriques à très haute performance qui ont été mis au point ces derniers temps. Parmi ceux-ci on

peut citer le roadster Venturi Fetish qui propose une autonomie de 350 km avec une vitesse de pointe de 170 km/h. Son point fort est l'accélération. Le 0 à 100 est atteint en 4,5 s. Il est le résultat d'une collaboration avec la firme AC Propulsion. La production sera confidentielle (25 exemplaires) d'autant que le prix proposé est très élevé (540.000 €).

Vos rapporteurs, lors de leur mission au Japon, ont pu rencontrer le Professeur Shimizu, de l'université Keio de Tokyo. Celui-ci dirige un programme de recherche visant à construire et mettre au point des véhicules électriques capables de surpasser les voitures à moteur thermique. Il est ainsi parvenu à construire des prototypes nommés Eliica pour *Electric lithium-ion battery car*. Deux véhicules ont été mis au point, dont l'un a atteint la vitesse record de 370 km/h et l'autre l'accélération spectaculaire du 0 à 160 km/h en 7 secondes.

Ces deux prototypes sont représentatifs des recherches effectuées sur les véhicules électriques à la fois en termes d'architecture, de composants et de performance. En termes d'architecture, les deux véhicules sont dotés de huit roues motrices avec un moteur électrique dans chacune d'elles (*in wheel motor*). Les batteries au lithium sont situées dans le plancher de telle sorte que l'habitacle est entièrement libéré des contraintes traditionnelles : bloc moteur, transmission... En termes de composants les recherches visent à approfondir les connaissances sur les batteries et les moteurs électriques en fonction de la performance recherchée. Ainsi, le véhicule le plus rapide n'est pas celui qui accélère le plus vite, les mêmes qualités n'étant pas requises. Enfin, en termes d'autonomie et de rechargement, ces modèles affichent 300 km d'autonomie et une recharge partielle très rapide : 70 % entre 4 et 30 minutes en fonction du type de batterie.

Il est évident que ces différentes voitures électriques ne seront pas des modèles grand public mais ils permettent de mesurer l'évolution des recherches en la matière, l'intérêt renouvelé pour ce type de véhicule et surtout la volonté de démontrer les performances sportives d'un mode de propulsion présenté habituellement comme peu attractif.

- **Le véhicule hybride rechargeable**

Malgré les efforts déployés pour mettre au point un véhicule électrique compétitif, les limitations d'autonomie et la crainte de se trouver à bout de batterie, conduisent la plupart des consommateurs à ne pas percevoir la voiture électrique comme pouvant devenir une voiture multi usages convenant à tous les besoins.

Au contraire, les véhicules hybrides, principalement thermiques, qui existent aujourd'hui et qui rechargent leurs batteries à partir de l'énergie produite par le moteur thermique et l'énergie cinétique, apparaissent comme affranchis de ces contraintes. Les affiches publicitaires de Toyota montrant le

profil d'une voiture dessiné par un fil électrique dont les prises mâle et femelle se rejoignent vont tout à fait dans ce sens. Cependant, ces véhicules ne permettent de rouler en électrique pur que sur une faible distance – quelques kilomètres.

Dès lors, apparaît l'idée d'un véhicule hybride rechargeable sur le réseau (VHR). Un tel véhicule pourrait disposer d'une autonomie électrique très supérieure tout en garantissant une autonomie beaucoup plus large grâce au moteur thermique ainsi qu'une totale polyvalence.

Cette « vision » est corroborée par les études sur les trajets types des Français. 60 % des trajets journaliers seraient couverts par un VHR disposant d'une autonomie électrique de 30 km. Une autonomie électrique de 40 km permettrait d'atteindre 70 % des trajets en mode électrique pur. En dehors des déplacements journaliers, les Français utilisent leurs véhicules pour des grands trajets, des fins de semaine ou les vacances. Cela représente 30 % de leur kilométrage annuel.

EDF a mené des études pour évaluer les émissions de CO<sub>2</sub> du moteur à la roue d'un véhicule familial moyen essence. Ce véhicule émet normalement 155 g CO<sub>2</sub> /km<sup>1</sup>. S'il s'agit d'un hybride de type Prius environ 100 g, s'il s'agit d'un VHR ayant une autonomie comprise entre 10 et 60 km, il émettrait en France entre 80 et 40 g CO<sub>2</sub> / km. **Ainsi le VHR 60 permettrait d'atteindre le facteur 4 dans le secteur automobile, ce qui est l'objectif affiché par les pouvoirs publics en 2050.**

**Évaluation des émissions de CO<sub>2</sub> du puits à la roue selon la motorisation :**

Type de véhicule	Puits au moteur (g CO <sub>2</sub> /km)	Moteur à la roue	Émissions totales
Conventionnel	20 à 35	130 à 180	150 à 210
Hybride	24	104	128
Electrique	10 à 14	0	10 à 14
VHR 10	22	73	95
VHR 30	21	52	73

Source : EDF/ADEME

Cependant, ce type de véhicules n'apporte de gains importants que si le mix-énergétique conduisant à la production de l'électricité est exempt de CO<sub>2</sub>, ce qui est le cas en France ou en Norvège.

---

<sup>1</sup> Moyenne ADEME du parc français.

Ainsi, en Chine, Inde, Australie ou Afrique du Sud, l'utilisation d'un véhicule entièrement électrique est plus inefficace qu'un véhicule thermique, tant l'électricité est aujourd'hui chargée en carbone.

Dans le monde en moyenne, et plus particulièrement aux États-Unis, en Italie, en Allemagne, au Royaume-Uni et en Espagne, il en est de même des véhicules hybrides rechargeables car le mix énergétique est mauvais en termes d'émissions de GES.

Les moyennes OCDE et UE 15 sont favorables. C'est tout particulièrement le cas en Norvège, en Suisse, en France, au Canada et en Belgique en raison du recours massif à l'hydroélectricité et au nucléaire.

Ces véhicules hybrides rechargeables sont à l'état de prototypes.

**Vos rapporteurs ont cependant acquis la conviction que cette technologie était sans doute parmi les plus prometteuses et doit faire l'objet d'une attention beaucoup plus importante de la part des pouvoirs publics et des industriels.**

### **3. Une démonstration nécessaire des capacités réelles des voitures électriques**

La technologie ayant sensiblement évolué, la voiture électrique est-elle prête à conquérir le grand public et à être produite de manière industrielle ? Le secteur est-il réellement à un tournant dont les conséquences apparaîtront clairement dans les trois prochaines années ?

EDF et La Poste sont deux très grands opérateurs de flottes captives. Ils ont aussi la particularité d'être très impliqués dans le développement et la mise au point de véhicules électriques.

Aujourd'hui, **EDF** met en œuvre 1 357 véhicules électriques (3,1 % de sa flotte), soit la 1<sup>ère</sup> flotte électrique professionnelle du monde. Il s'agit majoritairement de véhicules utilitaires légers (77 %). 23 % sont des véhicules particuliers, répartis entre Renault (27 % : Clio, Express, Kangoo), Peugeot (31 % : 106 et Partner) et Citroën (42 % : Saxo, Berlingo et AX). Ces véhicules sont utilisés à 86 % en Ile-de-France et dans les grandes villes. 20 % sont détenus en pleine propriété, 51 % à travers E.Lease et 29 % en location longue durée (LLD).

L'un des éléments le plus intéressant est le profil d'utilisation de la flotte d'EDF, ce qui permet de mesurer la proportion qui pourrait être électrifiée si les nouvelles batteries permettaient effectivement d'effectuer plus de 200 km par jour.

- \* 35 % de la flotte réalisent en moyenne 20 à 25 km/j,
- \* 40 % des véhicules roulent entre 60 et 100 km/j,
- \* 20 % roulent environ 200 km/j,
- \* 5 % ont une distance d'utilisation non prévisible.

On voit ainsi que la quasi-totalité de la flotte d'EDF pourrait devenir électrique si les performances et les coûts de ces véhicules devenaient compétitifs.

EDF doit expérimenter dans sa flotte la Cleanova II de SVE au cours de la période 2005-2007. Huit véhicules seront à l'essai en Île-de-France, en Aquitaine et en Poitou-Charentes. Leur aménagement intérieur sera identique aux fourgonnettes Kangoo thermiques.

Au cours de l'expérimentation, ces véhicules seront équipés de plusieurs types de batteries (SAFT et ZEBRA) afin d'évaluer leurs performances (autonomie, accélération, recharge...) au regard de leur coût de production et d'entretien.

EDF devrait ensuite expérimenter la *Blue Car* de Bolloré et Matra.

Pour développer la voiture électrique, la bonne volonté environnementale et la contrainte ne suffiront pas. Elles ont déjà échoué. Il est absolument nécessaire de **disposer d'un produit compétitif et de le proposer aux sociétés et aux particuliers d'une manière adaptée à leurs besoins.**

A cet égard, plusieurs initiatives sont intéressantes. Elles permettent de répondre aux inquiétudes des consommateurs en matière d'entretien et de valeur de revente de ces nouveaux types de véhicules. EDF a créé, en 1978, une filiale E.LEASE avec les principales sociétés de location longue durée. Elle a pour objectif de gérer une partie de la flotte d'EDF et de développer le marché de la voiture électrique. Elle apporte une garantie de valeur résiduelle aux loueurs longue durée qui ont une clientèle d'entreprises. Ils sont ainsi sûrs de pouvoir récupérer une certaine proportion du prix. Car la revente du véhicule est une composante non négligeable de l'équilibre économique d'un contrat de location longue durée. Cette filiale propose également des contrats de service complets sur 36, 48 et 60 mois comprenant l'entretien et le remplacement du véhicule et des batteries ainsi que leurs recyclages.

**Des solutions clefs en main** doivent également être proposées aux particuliers. Plusieurs expériences de mise à disposition de véhicules sont en cours en France et à l'étranger. Il s'agit de constituer un *pool* de petits véhicules électriques disponibles dans un endroit donné que des conducteurs peuvent utiliser en fonction de leurs besoins. Il s'agit en quelque sorte de voitures en multipropriété. La plupart des véhicules effectuent entre deux et cinq trajets par jour. Il peut donc s'avérer intéressant d'en mutualiser l'usage. Une expérimentation de ce type est en cours à La Rochelle.

**La Poste** est un autre grand opérateur public de véhicules qui souhaite s'engager dans des voies moins polluantes par souci d'optimisation de son parc et de diminution de sa facture énergétique. Elle est aussi soucieuse de l'évolution des règles d'accès dans les centres villes en France et en Europe. 47 % du courrier est distribué en voiture et 11 % en deux roues motorisés.

Elle s'est engagée à une réduction de 5 % de ses émissions directes de CO<sub>2</sub> du fait de sa flotte de transport d'ici à 2007. De même, elle a pris la décision d'éliminer d'ici à trois ans tous les véhicules ne répondant pas à la norme européenne euro 3. S'y ajoute la formation des conducteurs à « *l'éco-conduite* ».

La Poste gère la deuxième flotte européenne de véhicules électriques avec 530 unités.

Ces véhicules n'ont pas donné pleine satisfaction et se trouvent condamnés à terme par la réglementation sur le cadmium présent dans les batteries. La Poste est donc à la recherche de nouvelles solutions correspondants à ses besoins spécifiques : des utilitaires légers effectuant 15 000 km par an et 50 km/j en moyenne.

L'intérêt de La Poste pour les véhicules électriques s'explique en partie par son retrait de filières « alternatives » comme le GPL et le GNV. En effet, dans la majorité des cas, les véhicules de La Poste s'approvisionnent en carburant dans le réseau commercial et y sont entretenus. Dès lors, le faible nombre de stations-service proposant du GPL et l'absence totale de réseau commercial GNV rendent leur développement difficile. De plus, La Poste souhaite disposer de véhicules bénéficiant des derniers progrès en termes de consommation et de dépollution, ce qui n'est pas le cas des véhicules GPL ou GNV dont les petits volumes ne permettent pas d'amortir des investissements de recherche et développement. La Poste a donc arrêté de s'intéresser aux véhicules GNV et diminue son implication dans le GPL, sa flotte étant passée de 20.000 à 1.300 véhicules. De même, aucune offre hybride ne correspond à ses besoins. Les véhicules Toyota sont trop luxueux et disponibles en trop petit nombre pour présenter une solution globale. La C3 *Stop & Start* intéresserait La Poste si elle n'était pas uniquement disponible sur une motorisation essence puissante et fortement équipée. Les véhicules de La Poste utilisés en zone urbaine ou périurbaine restent 50 % à l'arrêt selon les estimations et dépassent rarement les 60 km/h. Il semble que les négociations n'aient pu aboutir pour fournir à La Poste un véhicule de base équipé de ce dispositif.

Comme EDF, La Poste a donc choisi d'expérimenter en situation réelle huit véhicules SVE (Dassault-Heuliez) équipés de batteries SAFT puis ZEBRA. Son objectif est de disposer d'un véhicule adapté à ses usages et à un coût équivalent à celui du diesel.

**Vos rapporteurs estiment donc que les cinq prochaines années seront décisives pour les véhicules électriques. Les progrès accomplis laissent espérer une avancée significative des performances permettant enfin la diffusion dans les flottes captives et le grand public, au moins pour les véhicules utilisés en cycle urbain et périurbain, souvent la seconde voiture de la famille. Il appartient aux chercheurs et aux constructeurs impliqués de démontrer en situation réelle les performances de ces nouveaux véhicules.**

## ***E. LES BIOCARBURANTS : DE L'AGRICULTURE À LA CHIMIE***

Les biocarburants représentent aujourd'hui moins de 1 % des carburants distribués. Pourtant au début de l'histoire automobile, l'intérêt était fort. Le moteur présenté par Rudolf Diesel aux expositions universelles de 1894 et 1900 fonctionnait à l'huile d'arachide. Longtemps des véhicules de course ont fonctionné avec des biocarburants. En 1936, la production de biocarburants était encore le double de celle de 2003. Mais le faible prix du pétrole devait avoir raison de cette filière.

Ce sont d'ailleurs l'évolution du cours des produits pétroliers comme celle des règles de la politique agricole commune (PAC) européenne qui ont fortement contribué, depuis une dizaine d'années, à l'attention portée aux biocarburants. Depuis trois ans, un grand nombre de rapports en France comme à l'étranger ont abordé cette question.

Vos rapporteurs ont notamment consulté : *Assessing the biofuels option*, juin 2005, Agence internationale de l'énergie, *Biofuels*, House of Commons, Environment, food and rural affairs Committee, 70th report of Session 2002-03, *Biocarburants : un moyen efficace mais encore onéreux de respecter nos engagements écologiques internationaux*, Alain Marleix, juin 2004, Commission des finances de l'Assemblée nationale, *Les débouchés non alimentaires des produits agricoles : un enjeu pour la France et l'Union européenne*, Jean-Claude Pasty, mai 2004, Conseil économique et social, Le rapport 2005 de la Commission interministérielle du véhicule propre et économe (CIVEPE), *L'optimisation du soutien à la filière biocarburant*, Inspection générale des finances (IGF), Conseil général des mines (CGM), Conseil général du génie rural et des eaux et forêts (CGGREF), septembre 2005.

L'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques s'était, en outre, déjà saisi de la question à travers le rapport de MM. Claude Birraux et Jean-Yves Le Déaut, *L'état actuel et les perspectives techniques des énergies renouvelables*, novembre 2001, puis d'une table ronde, le 13 juillet 2004, sur le thème : « *Biocarburants : quelles perspectives techniques de développement en France ?* ».

Pour vos rapporteurs, il ne s'agissait donc pas une nouvelle fois d'effectuer une évaluation et un bilan complet de la filière biocarburants et de ses perspectives mais plutôt, à partir des études déjà menées, de déterminer avec le plus de précision possible :

- la position de notre pays dans le monde en matière de production, de politique et de recherche sur les différentes filières de biocarburants,

- les bénéfices en termes d'émission de gaz à effet de serre des biocarburants,
- les coûts de production et le caractère potentiellement compétitif ou non des filières,
- la capacité de substitution aux carburants fossiles en quantité et qualité et la concurrence éventuelle avec les cultures alimentaires.

Ces questions ont pris d'autant plus d'importance que, le 1<sup>er</sup> septembre 2005, le Premier ministre a annoncé l'accélération du plan biocarburants avec l'incorporation, dès 2007, de 2 % de biocarburants, puis de 5,75 % en 2008, 7 % en 2010 et 10 % en 2015.

### **1. Les filières actuelles de biocarburants dans le monde**

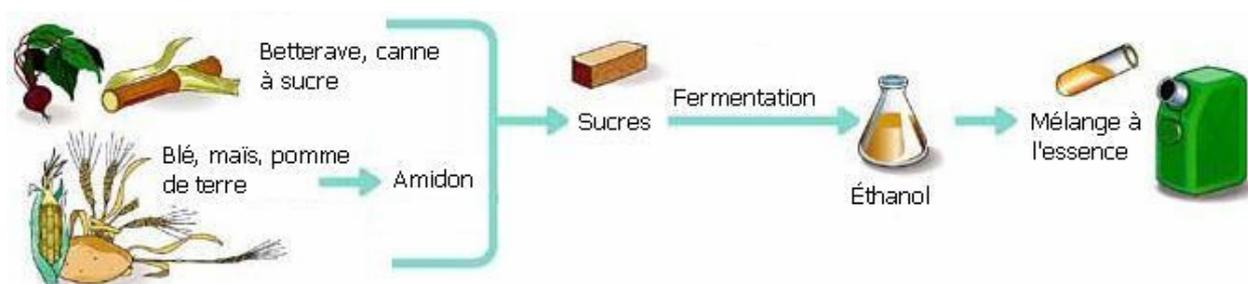
Les biocarburants sont les carburants liquides ou gazeux produits à partir de matières organiques végétales ou animales. Une dizaine de biocarburants sont envisagés au niveau européen. Dans la pratique, deux principaux dominent largement les usages automobiles : l'éthanol et les esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV).

Les biocarburants sont donc composés de deux grandes filières : la filière alcool permettant de produire de l'éthanol, particulièrement développée au Brésil et aux États-Unis, et la filière huiles végétales permettant de produire du biodiesel et développée en Europe.

- **La filière éthanol**

L'éthanol est le biocarburant le plus produit et le plus utilisé dans le monde. Il est fabriqué à partir de la fermentation de sucres (betteraves, cannes à sucre) ou d'amidon (amylacées : blé, maïs) puis distillation pour séparer l'alcool de l'eau. Produit et utilisé essentiellement au Brésil et aux États-Unis, il peut être incorporé dans l'essence.

La filière canne à sucre, notamment au Brésil, est l'une des plus performantes. Le principal coproduit, la bagasse, est énergétiquement valorisée puisqu'elle permet le chauffage nécessaire à la distillation. La filière betterave engendre 0,75 tonne de coproduit par tonne d'éthanol. Le blé ou le maïs engendre 1,2 t. de drèches pour 1 t. d'éthanol. Ces coproduits sont utilisés dans l'alimentation animale. La rentabilité de ces filières dépend pour partie de leur prix de vente.



**Lorsqu'il n'est pas utilisé directement, l'éthanol est utilisé pour la fabrication de l'éthyl tertio butyl éther (ETBE).** C'est un composé oxygéné issu de la réaction en quantités presque égales d'éthanol et d'isobutène, co-produit d'origine pétrolière.

Ce produit **a la préférence des pétroliers.** Il est utilisé en remplacement du MTBE, interdit en raison des pollutions qu'il pouvait occasionner. **Il présente l'avantage de parfaitement se mélanger à l'essence, de pouvoir y être incorporé à tout moment et d'être transporté avec elle sans précaution particulière.** Il est communément utilisé pour améliorer le degré d'octane des essences.

L'éthanol peut être incorporé directement dans l'essence mais cette opération pose certaines difficultés techniques qui ont toujours conduit les pétroliers à lui préférer l'ETBE. Dès une incorporation à faible dose, l'éthanol augmente significativement **la volatilité** de l'essence (tension vapeur). Cela pose des problèmes pour respecter les normes européennes en matière de protection de la santé et de l'environnement. Celle-ci interdit une tension vapeur supérieure à 60 kp (kilopascals) en été et 90 kp en hiver. Or, comme l'incorporation de 5 % d'éthanol accroît de 50 kp la tension vapeur, l'incorporation directe d'éthanol ne peut s'effectuer qu'à partir de bases essences dont la tension vapeur est inférieure à 10 kp.

De plus, la tendance de l'éthanol à se mélanger avec l'eau peut occasionner des problèmes de **démixtion**, c'est-à-dire de séparation de l'essence et de l'éthanol. Cela doit évidemment être absolument évité et nécessite donc des précautions spécifiques lors du mélange, du stockage et du transport. Dans les faits, cela contraint les pétroliers à n'effectuer le mélange qu'en dépôt avant distribution et à exclure le transport par oléoducs afin d'éviter un mélange avec le carburant aérien.

L'éthanol peut être utilisé à des niveaux très élevés par les automobiles dans le cadre de véhicules dits « *fuel flexible* ». Grâce à un calculateur qui adapte la combustion au mélange et à des modifications du moteur, ces véhicules acceptent indifféremment de 0 à 85 % d'éthanol (E 85). Ces véhicules sont massivement commercialisés au Brésil mais aussi aux États-Unis. Plusieurs constructeurs souhaitent désormais les diffuser en France. Une étude est en outre conduite aux Antilles pour y diffuser le modèle brésilien.

- **La filière huile végétale**

Les huiles végétales sont issues du colza et du tournesol (Europe) et du soja (États-Unis). Lorsqu'elles proviennent du broyage de graines (colza, soja, tournesol), le résidu solide dit « tourteau » représente environ 1 à 1,5 tonne pour une tonne d'huile.

Les huiles végétales, si elles ne peuvent plus être utilisées dans les nouveaux moteurs diesel des automobiles, sont en revanche la base de production des esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV). Les EMHV sont fabriqués par transestérification d'huile végétale avec du méthanol. 90 tonnes d'huile et 10 t. de méthanol donnent 90 t. d'EMHV et 10 t. de glycérine. Le marché de la glycérine n'est pas sans limite. Il s'établit aujourd'hui à 0,8 Mt dont 100.000 t proviennent déjà de la production d'EMHV.



Le rendement à l'hectare est relativement faible : 1 tep/ha pour l'EMHV issu du colza ou du tournesol.

**La première unité de production est établie à Compiègne depuis 1988 sous l'impulsion de l'IFP et de l'ADEME. Ce n'est que depuis 1994 que son homologation pour incorporation à hauteur de 5 % dans le gazole a été obtenue.**

L'EMHV est parfaitement soluble dans le diesel. Il peut être incorporé aussi bien en raffinerie qu'en dépôt. Il peut être stocké et distribué par tout mode de transport, y compris les oléoducs.

Les EMHV peuvent être mélangés au gazole sans difficulté technique jusqu'à un taux de 30 % (B 30), les constructeurs français ont fait plusieurs déclarations en ce sens au cours des derniers mois. Près d'un millier de véhicules PSA roulent au B30 au Brésil. En Europe, ce taux d'incorporation n'est toutefois effectif que dans certaines flottes captives de transport public. L'Allemagne a autorisé son usage pur.

- **La valeur énergétique des biocarburants**

**La valeur énergétique des biocarburants n'est pas identique à celles de l'essence ou du gazole ; elle est inférieure. Ainsi, avec le même volume de carburant, un automobiliste pourra faire d'autant moins de kilomètres que le volume d'incorporation de biocarburants sera important.**

Cette valeur énergétique est exprimée en « pouvoir calorifique inférieur » ou PCI. Il mesure la quantité d'énergie libérée lors de la combustion.

La directive européenne incitant à l'usage de biocarburants, comme le plan français pris pour son application, tient compte de cette valeur. Les pourcentages de substitution sont exprimés en pourcentage de capacité énergétique d'origine renouvelable, c'est-à-dire le pourcentage de biocarburant en volume multiplié par le rapport entre le PCI du biocarburant et le PCI du carburant dans lequel il est incorporé.

**Les rapports sont de 0,92 pour l'EMHV par rapport au gazole et de 0,66 pour l'éthanol par rapport à l'essence.** Pour l'ETBE, le rapport IGF-CGM-CGGREF indique qu'aucun consensus n'existe. Les douanes ont fixé un PCI renouvelable de 0,39 mais le ministère de l'agriculture de 0,31. Ce point est pourtant très important, puisque le volume maximum d'éthanol incorporé dépend de cette valeur pour respecter les normes européennes.

Ainsi, 1,063 litre d'EMHV et 1,5 l. d'éthanol sont nécessaires pour produire la même énergie qu'un litre de gazole ou d'essence. Un automobiliste qui parcourt 17 km avec un litre de gazole ne parcourt que 16 km avec un litre d'EMHV, celui qui parcourt 12 km avec l'essence, ne parcourt que 8 km avec l'éthanol. Ces différences sont aujourd'hui insensibles puisque les biocarburants représentent moins de 1 % des carburants distribués mais apparaissent à partir de 25 %<sup>1</sup>.

- **La production de biocarburants dans le monde**

Depuis le lancement des premiers plans biocarburants au début des années 1970, à la suite du premier choc pétrolier au Brésil (programme Proalcool en 1975) et aux États-Unis, la situation a évolué. **Il n'est notamment plus question aujourd'hui que les biocarburants puissent remplacer en totalité le pétrole. Il s'agit soit de permettre un remplacement partiel par mélange, soit de développer des filières alternatives grâce aux véhicules « *fuel flexible* ».** Par ailleurs, l'objectif n'est plus de les utiliser pour diminuer la pollution urbaine, ce qui avait été

---

<sup>1</sup> Source : rapport IGF-CGM-CGGREF, cf. supra.

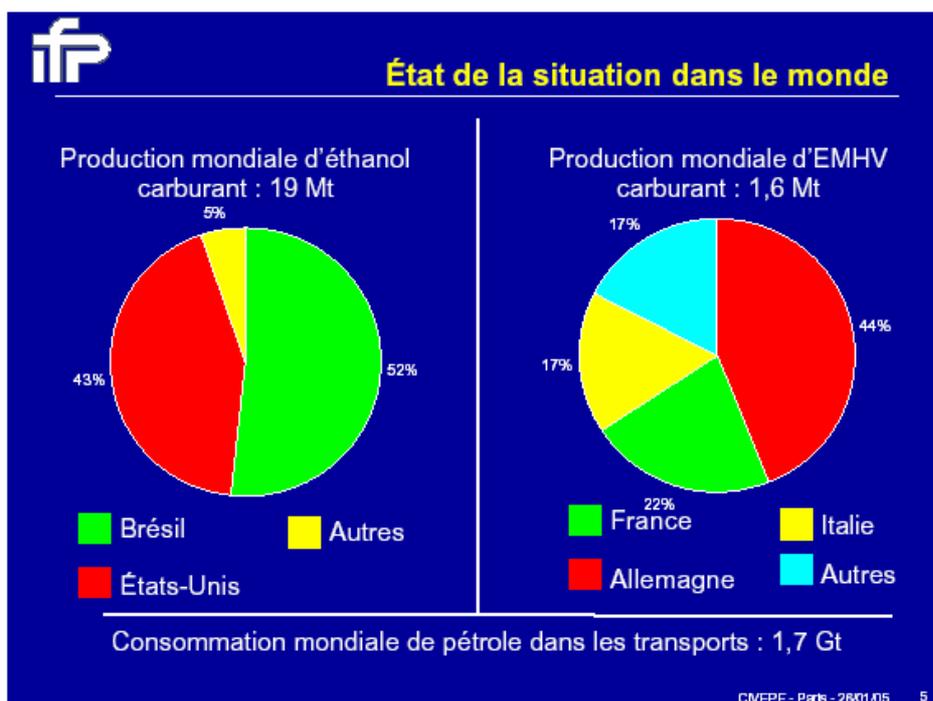
envisagé dans les années 1980, car les progrès spectaculaires de la dépollution des émissions ne les rendent plus indispensables.

Les plans biocarburants lancés à la fin des années 1990 en Europe, au Brésil et aux États-Unis ont maintenant pour préoccupation essentielle l'effet de serre. **Les États-Unis ont ainsi retenu l'objectif de 4 % de biocarburants en 2010 et 20 % en 2030 dans les transports.**

**La production mondiale d'éthanol en 2003 est de 19 Mt et la production d'EMHV de 1,6 Mt<sup>1</sup>.**

**La production d'éthanol se répartit de la manière suivante : Brésil 62 %, États-Unis 43 %, reste du monde 5 %.**

**La production d'EMHV a une origine très différente : Allemagne 44 %, France 22 %, Italie 17 %, reste du monde 17 %.**



**Le Brésil** représente donc près des deux tiers de la production d'éthanol grâce à une mobilisation de plus de 30 ans. Entre 1973 et 1990, le développement de l'éthanol reposait sur une forte aide publique : volume d'éthanol garanti acheté par la compagnie pétrolière nationale, prix garantis de l'éthanol, incitations à l'investissement dans de nouvelles unités par des taux d'intérêt préférentiels, subvention à l'achat de véhicules fonctionnant à l'éthanol pur. A partir de 1986, la chute des prix du pétrole a progressivement rendu insoutenable le coût du développement de l'éthanol. Le dispositif a donc été réformé en profondeur. Les aides à l'achat de véhicules spécifiques ont été

<sup>1</sup> Source : IFP « Les biocarburants dans le monde », Stéphane His, novembre 2003.

supprimées et la préférence a été donnée au mélange essence-éthanol. A la fin des années 1990, les prix garantis de l'éthanol ont été abandonnés. Cependant, des volumes d'incorporation dans l'essence ont été rendus obligatoires par le Gouvernement à hauteur de 24 % et l'éthanol a été défiscalisé.

Aujourd'hui, le parc automobile brésilien comporte encore 3 millions de véhicules dédiés à l'éthanol et 16 millions de véhicules adaptés à une forte incorporation d'éthanol. Depuis 2003 et son introduction par le groupe Volkswagen, l'achat de véhicules admettant jusqu'à 85 % d'éthanol (*fuel flexible vehicle* – FFV) progresse très rapidement (35 % de parts de marché) et est soutenu par une déduction fiscale. 30.000 stations délivrent du E 85. En 2003, 10 millions de tonnes d'éthanol ont été consommées, soit 40 % de la consommation d'essence.

Cette filière est en pleine expansion. Le Brésil a désormais l'ambition d'exporter de l'éthanol vers l'Europe et souhaite réduire les aides à la production de sucre. Les producteurs s'intéressent aussi au marché japonais, ce pays n'ayant pas d'importantes capacités agricoles.

Le Brésil souhaite également développer sa filière EMHV à partir du soja, dont il est le 2<sup>e</sup> producteur mondial, mais aussi d'huile de ricin. Le Brésil envisage d'imposer une incorporation de 2 % dans le diesel. Le développement d'une filière EEHV, c'est-à-dire d'ester éthylique d'huile végétale, est très étudié car il permettrait l'utilisation d'éthanol en remplacement du méthanol pour estérifier les huiles.

**Les États-Unis** sont le 2<sup>e</sup> pays producteur et consommateur d'éthanol. La production se développe très rapidement (+ 90 % entre 1998 et 2003) et atteint 8,4 Mt et devrait dépasser 11 Mt en 2004. La principale source est le maïs du Middle West.

La filière se développe depuis le début des années 1970 : *Clean air Act* de 1970 et l'*Energy policy Act* de 1978, le Président Carter a beaucoup fait pour son développement.

Par la modification intervenue en 1990, le *Clean air Act* rend obligatoire la commercialisation d'essence oxygénée à 2 % dans toutes les zones où la qualité de l'air n'est pas conforme aux normes fédérales. Utilisé jusqu'en 2003, le MTBE est désormais interdit pour des raisons de santé publique. Il a été remplacé par de l'éthanol. La réglementation en matière de volatilité a été aménagée pour le permettre. La plupart de l'éthanol est consommée en mélange avec l'essence à hauteur de 10 % (E10) et minoritairement à hauteur de 85 % (E 85).

Les grands constructeurs américains, depuis 1996, et des constructeurs japonais comme Mazda et Isuzu commercialisent des FFV. On estime leur nombre à 2 millions, mais bien souvent sans que leur propriétaire le sache et sans qu'ils puissent se ravitailler en E 85.

Depuis 1978, une défiscalisation, toujours reconduite, est accordée à l'éthanol à hauteur de 13-14 cts/l jusqu'en 2007. De nombreux états financent une défiscalisation supplémentaire, jusqu'à 5 cts/l.

Les États-Unis développent eux aussi une filière EMHV à partir du soja dont ils sont les premiers producteurs mondiaux. Il est pour l'instant essentiellement utilisé dans des flottes captives. Les spécifications américaines sont différentes des européennes. En effet, le soja conduit à un EMHV très iodé (indice 135) alors que la norme européenne est plus faible (120)<sup>1</sup>. L'EMVH devrait également prochainement bénéficier d'une incorporation obligatoire et d'une défiscalisation.

- **La production de biocarburants en Europe**

Les pays européens n'ont pas de programmes aussi développés et suivis dans le temps que le Brésil ou les États-Unis. Les marchés des carburants sont très différents puisque, en Europe, la motorisation diesel domine avec 60 % de la consommation de carburant.

**L'Europe est très logiquement leader mondial pour la production d'EMHV. La production a crû de 35 % par an entre 1992 et 2003, pour atteindre 1,5 Mt.**

L'Allemagne est le premier producteur mondial avec 715.000 t d'EMHV en 2003.

L'Italie est le 3<sup>e</sup> producteur européen avec 273.000 t, dont 25 % sont utilisés pour le chauffage. De nouveaux pays apparaissent sur ce secteur : la République tchèque et la Pologne.

---

<sup>1</sup> L'indice diode évalue la tendance à encrasser les systèmes d'injection.

Pays	Production k/an	Capacité de production kt/an
Allemagne	715	1025
France	357	500
Italie	273	420
Autriche	32	50
Danemark	41	40
Espagne	6	-
Royaume-Uni	9	5
Suède	1	8
Total	1.434	2.048

Source : IFP/European biodiesel Board – 2004

La production d'éthanol se répartit entre la France, l'Espagne et la Pologne.

Le 1<sup>er</sup> producteur est l'Espagne avec 180.000 t d'éthanol essentiellement issu du maïs et produit par la société Abengoa. La Pologne est le second producteur avec 131.000 t. L'Allemagne a décidé de se doter d'une capacité de production de 500.000 t. La Suède présente la particularité d'importer plus d'éthanol qu'elle n'en produit, soit respectivement 100.000 et 50.000 t. Cela s'explique par la décision de développer une filière E 85 –FFV, comme au Brésil et aux États-Unis. La Suède garde néanmoins l'ambition de produire la totalité de son carburant à partir de ses déchets forestiers.

La production d'éthanol et d'ETBE en Europe en 2003 :

	Éthanol		ETBE	
	En tonnes	En tep	En tonnes	En tep
Espagne	180.000	115.200	383.400	329.724
France	77.200	49.408	164.250	141.255
Suède	52.300	33.472	-	-
Pologne	131.640	84.250	280.390	241.135
Rép. tchèque	5.000	3.200	-	-
Total	446.140	285.530	828.040	712.114

(Source IFP)

- **La production de biocarburants en France**

La France, leader au cours des années 1990 de la production de biocarburants en Europe, s'est laissé distancer par d'autres pays.

La production d'EMHV, 1<sup>ère</sup> jusqu'en 2001, est 2<sup>e</sup> d'Europe avec 357.000 t en 2003.

Il en est de même pour l'éthanol, la France produisant 77.000 t en 2003.

## **2. Les biocarburants agricoles : une solution utile mais marginale**

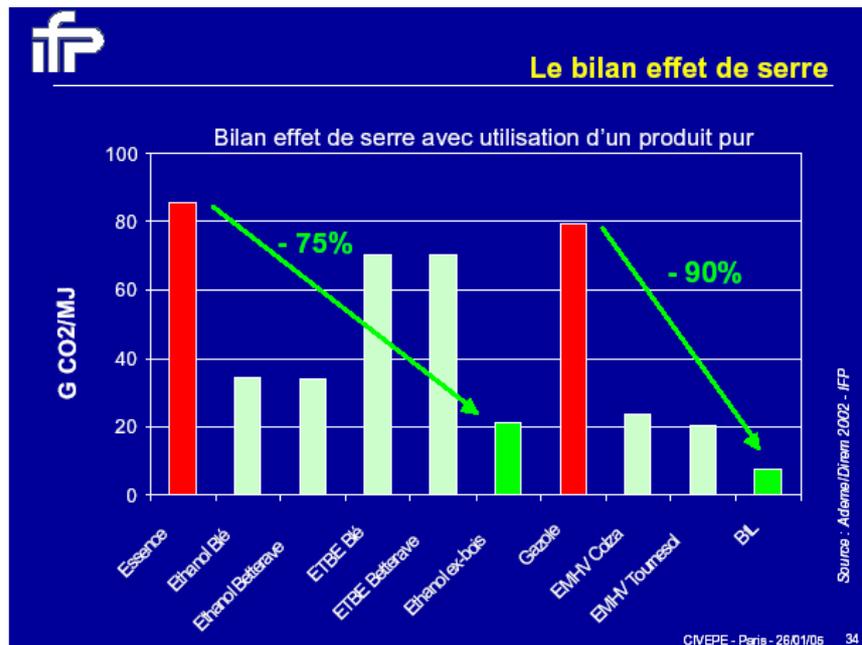
- **Quel gain écologique ? À quel coût ?**

L'intérêt pour les biocarburants en matière environnementale vient du fait que le carbone contenu dans les biocarburants n'est pas un carbone fossile mais issu de l'atmosphère. Ainsi, le carbone brûlé et rejeté ne vient pas s'ajouter à celui qui est déjà présent.

La difficulté est cependant de mesurer ce gain avec précision.

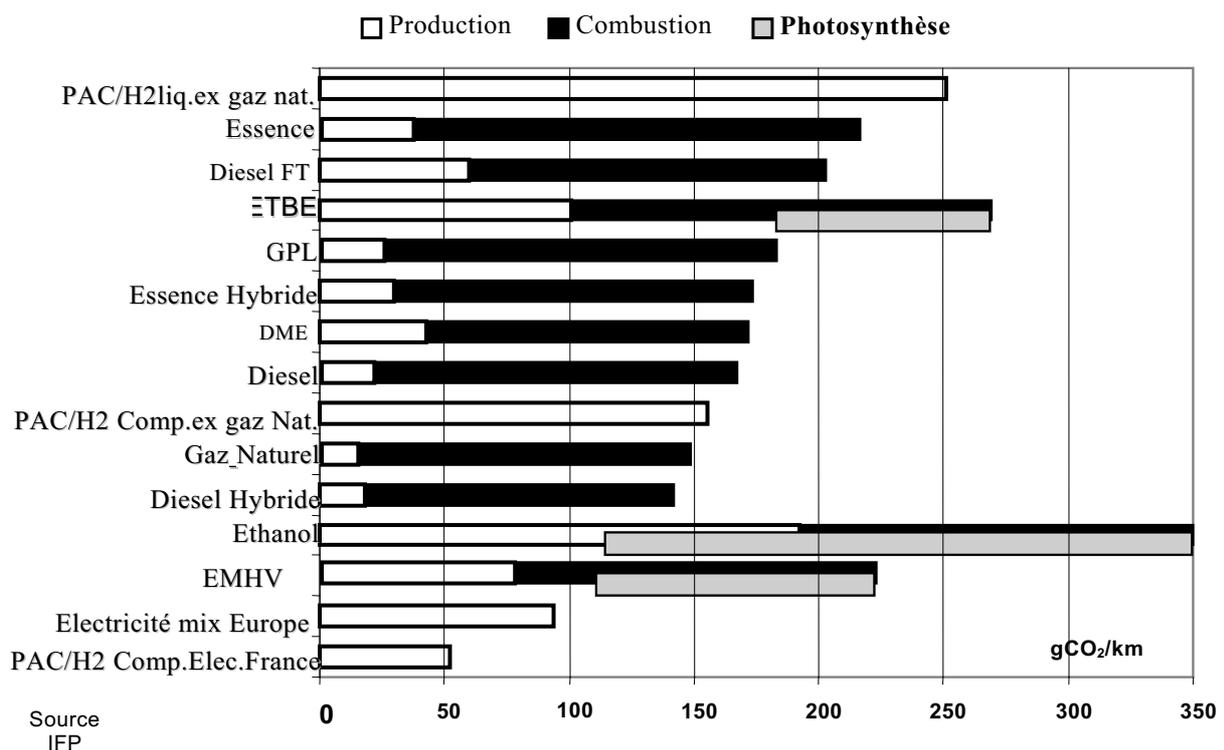
**Les évaluations de l'ADEME et de la DIREN en 2002 conduisaient à estimer que l'usage d'éthanol issu du blé ou du maïs permettait une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 60 % par rapport à l'essence. La réduction est de 22 % avec de l'ETBE issu de ces deux filières.**

**Selon la même étude, la réduction serait de 70 % avec les EMHV issus du colza et du tournesol.**



Il est également possible de visualiser l'intérêt des biocarburants par rapport aux autres sources d'énergie dans les transports en comparant leurs émissions de CO<sub>2</sub> du puits à la roue. L'étude menée par l'IFP place les biocarburants au premier rang des solutions alternatives immédiatement disponibles. Seuls l'électricité et l'hydrogène produits par énergie nucléaire font mieux.

Emissions de CO<sub>2</sub> "du puits à la roue" : énergies actuelles et alternatives :



Le CCFA a quant à lui publié les évaluations suivantes :

A partir de ces évaluations et des rendements respectifs, le CCFA évalue le coût par litre des biocarburants et **le coût de la tonne de CO<sub>2</sub> évité.**

	g CO <sub>2</sub> /km du puits à la roue	Facteur de réduction des émissions de CO <sub>2</sub> par rapport à l'essence
Essence	161	1
Gazole	134	1.2
Éthanol céréale	93	2
Éthanol betterave	50	3
EMHV colza	46	4
EMHV tournesol	36	4
Éthanol de synthèse (bois)	33	5
Éthanol canne Brésil	22	7
Gazole de synthèse (bois)	13	12

	Facteur de réduction du CO <sub>2</sub> par rapport à l'essence	M <sup>2</sup> pour 1l. équivalent essence	Coût ht €/l éq. Essence (sep 2004 : 40 \$/bl)	€/tonne CO <sub>2</sub> évité
Essence	1	-	0.25/0.27	-
Gazole	1.2	-	0.25/0.28	-
Éthanol céréale	1.7	5.5	0.42/0.67	154/400
Éthanol betterave (France 2004)	3	2.4	0.56	160/370
EMHV colza	4	6.3	0.34	50/200
EMHV tournesol	4	9	0.3/0.6	25/300
Éthanol de synthèse	5	4	0.25/0.56	0/160
Éthanol de canne	7	2.4	0.19	0
Gazole de synthèse	12	4	0.33/0.6	30/160

Cette étude, qui aboutit à des fourchettes très larges d'évaluation des coûts de la tonne de carbone évitée, permet de se rendre compte que dans l'état actuel des connaissances et des méthodes de production, le coût du CO<sub>2</sub> évité grâce aux biocarburants dans les transports est très élevé et n'en fait pas forcément une voie à privilégier immédiatement.

Le rapport IGF-CGM-CGGREF parvient à des évaluations similaires.

**Ainsi, vos rapporteurs estiment qu'un large consensus existe au niveau international pour estimer que les quantités de CO<sub>2</sub> évitées sont importantes mais que, compte tenu des coûts de production et des mesures d'aide, leur coût est très élevé. Ils ne peuvent se justifier que dans une conjoncture de pétrole cher (+ 120 \$/bl) et pour permettre le démarrage de ces filières en Europe.**

- **Le coût économique : les biocarburants sont-ils compétitifs ?**

Les différents rapports mettent tous en avant la grande difficulté de connaître les coûts exacts de la filière et de mesurer les progrès possibles.

Les estimations sont très variables et vont du simple au triple. C'est-à-dire que selon les mesures et les prévisions les productions d'EMHV et d'éthanol se voient reconnaître une compétitivité respectivement entre 35 et 85 \$/bl et de 90 à 150 \$/bl.

L'IFP faisait, fin 2003, les évaluations suivantes <sup>1</sup> :

	Eth. UE	Eth. Brésil	Eth. USA	EMHV EU	Pétrole à 25 \$/bl	Pétrole à 50 \$/bl	Pétrole à 75 \$/bl
€/l	0,4-0,6	0.23	0.3	0.35-0.65	0.2	0.4	0.6
€/GJ	19-29	11	14	10.5-20	6	12	18

Il en ressort que **si l'éthanol brésilien est d'ores et déjà compétitif, l'éthanol américain peut le devenir si les prix du pétrole se maintiennent autour de 50 \$/bl, en revanche ce n'est pas le cas des biocarburants européens.**

---

<sup>1</sup> Cf. *Ibid.*

- **La réglementation européenne et son évolution**

La stratégie mise en œuvre par la Commission se développe à partir du livre blanc de 1997 : *Énergie pour l'avenir : les sources d'énergie renouvelables*. La Commission y affichait l'objectif de porter les sources d'énergie renouvelables à 12 % de la consommation brute d'énergie en 2010. Dans le livre vert, « *Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement énergétique* », publié en 2000, étaient relevées la dépendance et la consommation croissante de l'Union et étaient proposées des mesures d'économie d'énergie et de diversification. Notamment le secteur des transports est à 80 % dépendant du pétrole alors que la demande devrait croître entre 1998 et 2010 de 19 % pour les passagers et de 38 % pour les marchandises. Il proposait donc que d'ici à 2020, 20 % des carburants traditionnels soient remplacés par des biocarburants, du gaz naturel et de l'hydrogène. Cette analyse a été confirmée par le livre blanc « *La politique européenne des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix* », publié en 2001.

La réglementation européenne intervient à deux niveaux : les normes en matière de carburant au sein du marché unique et la directive d'incitation au développement des biocarburants.

- **Les spécifications des carburants :**

La directive 98/70/CE sur la qualité des carburants fixe les seuils d'incorporation des biocarburants dans l'essence et le gazole afin de respecter la santé publique et l'environnement. Aujourd'hui, il n'est pas possible, hors flottes captives, d'incorporer plus de 5 % d'EMHV et d'éthanol et 15 % d'ETBE (directive 85/538/CE). Des taux plus élevés sont possibles mais le consommateur doit en être informé sur les pompes. La masse d'oxygène ne peut être supérieure à 2,7 %. Des États peuvent en outre demander à mener des expérimentations.

Pour l'éthanol, il est toutefois possible, dans le cadre actuel, en incorporant 15 % d'ETBE, d'y inclure jusqu'à 7 % d'éthanol et ainsi de dépasser le seuil limite d'incorporation directe.

- **L'incitation au développement des filières biocarburants :**

Le développement des biocarburants résulte de deux directives :

- **la directive sur la promotion des biocarburants (2003/30/CE) qui fixe des objectifs indicatifs dans le secteur des transports routiers : 2 % en 2005, 5,75 % en 2010, calculés sur une base énergétique, soit pour l'éthanol 2,9 et 8,3 % en volume, et pour l'EMHV 2,2 et 6,4 %.** Les États doivent informer la Commission de la manière dont ils comptent les atteindre.

- la directive (2003/96/CE) sur la fiscalité des biocarburants rendant possibles des mesures de défiscalisation. Seuls des taux d'accises minimum sont votés à Bruxelles.

De fait, le niveau de défiscalisation est très variable d'un pays à l'autre. En 2003, pour l'EMHV, 350 €/m<sup>3</sup> en France avec un quota de 317.500 t/an, 470 €/m<sup>3</sup> en Allemagne sans quota, 403 €/m<sup>3</sup> en Italie avec un quota de 300.000 t/an, 290 €/m<sup>3</sup> en Autriche, totale en Espagne soit 294 €/m<sup>3</sup>, 344 €/m<sup>3</sup> en Suède et 138 €/m<sup>3</sup> au Royaume-Uni.

Pour l'éthanol, la situation est identique : 380€/m<sup>3</sup> en France, 654 €/m<sup>3</sup> en Allemagne, 390 €/m<sup>3</sup> en Espagne (exemption totale), 520 €/m<sup>3</sup> en Suède (exemption totale) et 138 €/m<sup>3</sup> au Royaume-Uni.

Ces mesures de défiscalisation représentent un coût financier très élevé, mais ne sont pas du tout perceptibles par les conducteurs. L'IFP a fait la simulation suivante pour la France :

Défiscalisation	Prix à la pompe	Carburant pétrolier pur	Impact sur le consommateur
Gazole 5% EMHV	0.787 €/l	0.801 €/l	- 0.014 €/l
Essence 5% éthanol	0.991	1.005	-0.014

Sans défiscalisation	Prix à la pompe	Carburant pétrolier pur	Impact
Gazole 5 % EMHV	0.807	0.801	+ 0.006
Essence 5 % éthanol	1.013	1.005	+ 0.008

L'IFP aboutit à un coût potentiel de 880 M€ pour une incorporation de 5 %.

- **Un exemple de stratégie nationale en Europe : la Suède**

En Europe, la Suède se place désormais comme **le laboratoire européen de la généralisation de l'usage de l'éthanol**. Les premières expérimentations débutées il y a plus de 15 ans sur les flottes captives de bus se sont accompagnées du développement d'un réseau de distribution d'éthanol pur unique en Europe. Aujourd'hui 150 stations le proposent, elles devraient être 300 en janvier 2006 et un millier en 2008, soit une sur quatre.

La Suède est aujourd'hui le premier consommateur européen d'éthanol, dont plus de 80 % sont importés du Brésil. L'éthanol y est totalement exempt de taxe jusqu'en 2013. Cela lui permet d'être 40 % moins cher que l'essence à la pompe.

Des mesures supplémentaires d'accompagnement ont été prises au niveau local (gratuité du parking) ou à l'initiative d'entreprises privées (réduction des polices d'assurance).

De ce fait, les grands constructeurs mondiaux ont choisi de développer sur le marché suédois leurs premiers véhicules « *fuel flexible* », c'est-à-dire capables de fonctionner avec une proportion variable d'éthanol ou d'essence dans un seul réservoir. Ford a commercialisé une Focus fonctionnant à l'E 85 (85 % éthanol – 15 % essence) ou à l'essence. Ford a indiqué que 15.000 modèles avaient été vendus depuis 2000 et que désormais, 80 % des Focus vendues en Suède étaient des FFV. Le groupe Ford développera également des Volvo. De même, le constructeur suédois Saab, appartenant au groupe américain GM, a lancé une 9-5 2.0 l disposant du même potentiel de flexibilité d'usage du carburant. Ces véhicules paraissent particulièrement attractifs. Ainsi la Saab « *biopower* » est parfaitement transparente à l'usage entre l'essence et le E 85. Elle propose une motorisation très dynamique (180 CV, 225 km/h, 0 à 100 en 8''5) mais **des émissions de CO<sub>2</sub> par km en diminution de 80 % soit 42 g/km. Le modèle 9-5 2.3 l Turbo de 185 CV à essence émet, quant à lui, 217 g en moyenne.** En revanche la consommation d'E 85 est beaucoup plus importante en volume. Les constructeurs prévoient que ces **FFV représenteront 24.000 unités en 2006, soit 10 % du marché.**

Comme au Brésil, une sonde est capable de déterminer le contenu du réservoir grâce à la mesure de la quantité d'oxygène à l'échappement, car l'éthanol contient beaucoup plus d'oxygène que l'essence (35 %).

- **Le plan biocarburants du gouvernement français**

L'intérêt du Gouvernement pour les biocarburants résulte du cumul de **quatre types d'arguments principaux résumés par le rapport remis au ministre de l'industrie : la politique agricole, l'emploi, la diminution des émissions de gaz à effet de serre et l'indépendance énergétique.**

En matière agricole, il ne peut être nié que l'intérêt pour les biocarburants a resurgi après la réforme de la PAC en 1992, dès lors que des cultures énergétiques pouvaient être effectuées sur les jachères, puis hors jachère avec une prime à l'hectare à hauteur de 45 €/ha. Le plan biocarburants français **aboutirait, pour 5,75 % d'incorporation, à cultiver 220.000 ha pour l'éthanol et 1.800.000 ha pour l'EMHV, soit 20 % de la production de Betterave, 3 % de la production de blé et 75 % de la production**

**d'oléagineux. Il va très au-delà de la seule utilisation des jachères qui représentent aujourd'hui 1.200.000 ha<sup>1</sup>.**

Les retombées en termes d'emploi sont très débattues. Le rapport du Conseil économique et social s'appuie sur une étude menée par le consultant Price Waterhouse Coopers. 26.000 emplois, en moyenne, seraient créés. Pour l'IGF, le CGM et le CGGREF, il ne s'agirait que d'emplois maintenus.

**En matière d'effet de serre, de réels bénéfices sont établis mais à un prix élevé compte tenu des tarifs actuels (cf. supra). Ce sont 7 millions de tonnes équivalent CO<sub>2</sub> qui doivent être économisées d'ici 2008 en multipliant par 7 la production de biocarburants par rapport à 2004.**

En matière d'indépendance énergétique, le bénéfice est là aussi réel mais il ne doit pas être surévalué puisqu'il est aujourd'hui inexistant et qu'il est envisagé que les biocarburants se substitueront au pétrole dans les transports à hauteur de 30 % en 2030.

Depuis le 1<sup>er</sup> septembre de cette année, le Gouvernement a décidé d'accélérer le plan biocarburants avec l'incorporation, dès 2007, de 2 % de biocarburants, puis de 5,75 % en 2008, 7 % en 2010 et 10 % en 2015.

Ces objectifs s'accompagnent d'une augmentation de la production agréée bénéficiant d'une défiscalisation et de la mise en place de l'indexation de la taxe sur les activités polluantes (TGAP) pesant sur les pétroliers sur le respect des objectifs d'incorporation.

La mise en œuvre du plan biocarburants a débuté. La direction générale des Douanes a attribué les agréments aux six nouveaux sites de production :

- Cristanol (groupe sucrier Cristal Union et Champagne-Céréales) à Bazancourt-Bétheniville, dans la Marne, pour 80.000 t d'éthanol d'ici à 2007. 280.000 t à terme et une centaine d'emplois,

- Éthanol à Lillebonne (Seine-Maritime), par Terreos,

- Éthanol également à Lacq (Pyrénées Atlantiques), par AB. Bioenergy (espagnol Abenagoa Energy, Dynef, Association générale des producteurs de maïs et Aquitaine Industrie Innovation). 180.000 t d'éthanol pourront y être produites à partir de 300.000 t de maïs, soit 50.000 ha environ<sup>2</sup>.

- Diester Industrie (Sofiprotéol), à Mériot, dans l'Aube, pour une production annuelle de 130.000 t d'esther méthylique, dans le cadre d'un accord plus large avec Total pour la production de 600.000 t en 2012.

---

<sup>1</sup> Source : rapport IGF-CGM-CGGREF.

<sup>2</sup> Figaro Economie, 03.06.2005.

Sofiprotéol est également installé à Compiègne (Oise), et à Montoir (Loire-Atlantique). A Compiègne, une seconde tranche sera mise en place en 2006. Sur le site de Montoir, la capacité de production sera portée à 250.000 t en 2007. Enfin, sur le site de Sète (Hérault), une nouvelle usine sera construite à partir du nouveau procédé de l'IFP.

Un nouvel appel d'offres a été lancé mi-octobre 2005 pour atteindre les objectifs fixés par l'accélération du plan biocarburants.

Par ailleurs, le Gouvernement poursuit la politique de **défiscalisation** des biocarburants : **33 €/hl pour l'EMHV, 38 pour l'éthanol entrant dans l'ETBE et 37 pour l'éthanol entrant dans l'essence selon la loi de finances 2005.**

De plus, **par un amendement à la loi de finances 2005, un prélèvement supplémentaire de la TGAP a été créé afin de pénaliser les pétroliers n'incorporant pas autant de biocarburants que l'objectif national.** Fixé à 1,2 % en 2005, le taux doit s'élever à 5,75 % en 2010. La taxe est réduite à due proportion des biocarburants incorporés. Si un pétrolier ne pouvait justifier d'aucune incorporation, il aurait à acquitter la taxe sur l'ensemble des carburants d'origine fossile mis en vente. Cette pénalité est donc extrêmement élevée qui conduit *de facto* à une obligation d'incorporation pour les pétroliers.

**Le cumul de ces deux mécanismes conduit l'IGF, le CGM et le CGGREF à évaluer en 2010, aux conditions économiques de juin 2005, les incitations financières accordées à plus de 1,2 milliard d'euros : « Il apparaît que l'effort budgétaire envisagé au seul titre de la défiscalisation est tout à fait considérable au regard des 26.000 emplois maintenus, des 2 Mha concernés et des quelques 7 MteCO<sub>2</sub> économisées : 50.000 € par emploi créé ou maintenu, 600 €/ha et 180 €/t de CO<sub>2</sub> évité ».**

Dès lors, il paraît logique de s'interroger sur la pertinence des outils fiscaux et sur l'ampleur du dispositif d'aides. Le rapport remis au ministre de l'industrie insiste donc sur la nécessité de chercher à maintenir un dispositif le plus conforme au fonctionnement normal du marché et aux prix qui y sont pratiqués, en évitant la formation de rentes indues et en maintenant ou en accroissant la concurrence entre les différents acteurs.

Il relève notamment que les surfaces agricoles seront d'ici 2010 vraisemblablement insuffisantes pour satisfaire aux objectifs de production de biodiesel et qu'il faut donc prévoir à la fois des importations et l'autorisation de produits bientôt disponibles comme les EEHV à hauteur de 300 à 500.000 t.

Le rapport souligne également que le « *plan biocarburants* » ne peut justifier de maintenir de manière structurelle un prix des cultures énergétiques

supérieur à celui des cultures alimentaires, dès lors que l'utilisation des jachères ne suffira pas à subvenir aux besoins.

Si la production d'éthanol ne souffre pas des mêmes limitations que celle d'EMHV, il ne peut être question de trop l'accroître, compte tenu du coût de cette production et du surplus d'essence en France et en Europe. Le rapport préconise donc la poursuite d'une incorporation privilégiée sous forme d'ETBE, tout en rendant possible une expérimentation d'incorporation directe d'éthanol durant l'hiver, puisque les normes de tension vapeur le permettent à cette période de l'année.

Plus généralement, le rapport reconnaît la nécessité d'utiliser la fiscalité pour réguler le marché et développer une filière française de production de biocarburants mais souhaite en limiter l'ampleur car l'État doit aussi avoir comme objectif de favoriser l'émergence de solutions techniques moins coûteuses et d'inciter les producteurs à s'aligner sur les prix internationaux, les prix pratiqués aux États-Unis apparaissant comme un point de référence.

Lors de la table ronde organisée par l'Office, M. Alain d'Anselme, président du Syndicat des producteurs d'alcool agricole, déclarait : *« Les coûts n'étant pas déconnectés des volumes produits, la profession est prête à s'engager sur une baisse des prix si une impulsion de démarrage est donnée. Aux États-Unis, le prix du bioéthanol est de 30 €/hl et au Brésil de 20 €/hl, ce qui correspond à 40-60 % du prix de l'essence. En réalité, avec les outils de production optimisés et dédiés, le niveau des États-Unis peut être atteint, ce qui diminuera le coût pour la société »*.

**La France ne montre pas pour l'instant un grand intérêt pour les FFV.** Les véhicules diesel représentent aujourd'hui près de 70 % des ventes de voitures neuves. Cette technologie pourrait toutefois se développer dans notre pays de manière plus rapide que prévu. En effet, des constructeurs automobiles qui construisent et vendent à l'étranger (Brésil, États-Unis, Suède...) des FFV ont indiqué leur intention de les introduire sur le marché français. C'est notamment le cas de Ford qui a indiqué la commercialisation de quelques centaines de Focus et de Focus C-Max. Le carburant E 85 n'étant pas encore disponible en France, le pétrolier BP s'est engagé à développer un réseau de distribution. De grands opérateurs (villes, entreprises) pourraient être intéressés. Cette solution est très séduisante puisqu'elle est transparente pour le consommateur qui peut se ravitailler à n'importe quelle pompe à essence.

En dehors de la métropole, une expérimentation est à l'étude aux Antilles, avec l'éthanol produit à partir du sucre de canne, pour servir à monter une filière FFV sur le modèle du Brésil. Les constructeurs français comme les pétroliers soutiennent cette initiative.

Vos rapporteurs jugent ces initiatives particulièrement intéressantes et souhaitent qu'elles soient encouragées.

### **3. La biomasse : une réelle opportunité à long terme et un enjeu de recherche**

Les limitations inhérentes aux biocarburants d'origine agricole : quantité et coût, conduisent à envisager la production de biocarburants de manière chimique et industrielle à partir de la totalité des plantes et plus généralement de la biomasse.

Celle-ci est définie dans la réglementation européenne comme « *la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux* »<sup>1</sup>.

Le saut qualitatif entre la génération actuelle de biocarburants et la prochaine peut être schématisé grâce au tableau suivant présenté par M. Daniel Le Breton (Total) lors de l'audition publique que vos rapporteurs ont organisé le 18 octobre 2005 :

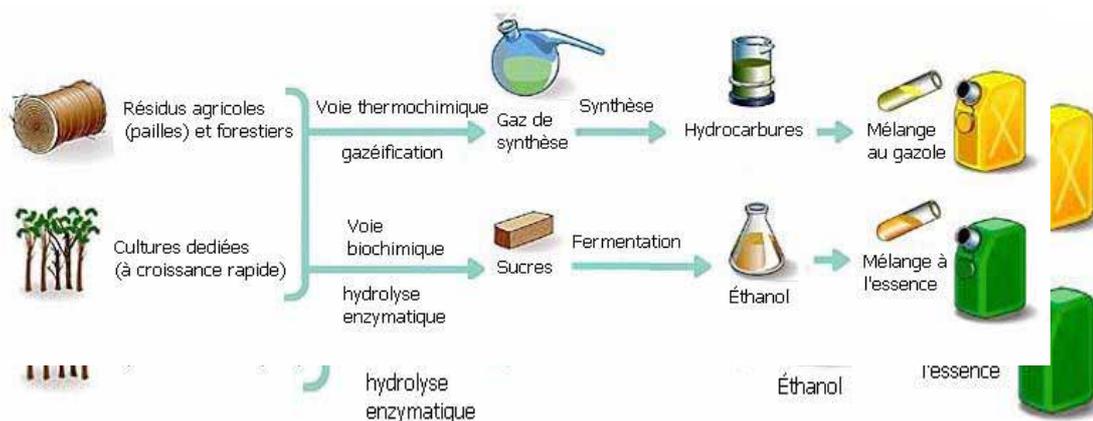
<b>Ressource actuelle</b>	<b>1<sup>ère</sup> génération</b>	<b>2<sup>e</sup> génération</b>
<b>Alcool (bio-éthanol), et huiles (colza, tournesol..)</b>	<b>Les éthers et les esters, issus des alcools et des huiles</b>	<b>Les bio-hydrocarbures de synthèse issus de la biomasse au sens large</b>
Fortement oxygénés, ils posent des problèmes de logistique ou de compatibilité avec les moteurs. Leur ressource est limitée (surfaces, cultures dédiées, transformation)	Entièrement compatibles et fongibles avec les carburants conventionnels, mais contenant encore de l'oxygène, limité en % par la Directive	Chimiquement identiques aux hydrocarbures fossiles, et donc substituables aux carburants classiques mais renouvelables  Souplesse plus grande par la multiplicité des ressources

---

<sup>1</sup> Dir. 2003/30/CE.

- **Les filières futures : Biomass to liquid (BtL)**

Les filières du futur visent à transformer non pas seulement les graines ou racines des plantes agricoles en carburant, mais l'ensemble de la plante ou biomasse. Au-delà même des plantes agricoles, il s'agit de tirer parti de tous les déchets de la biomasse, par exemple de l'exploitation forestière. Ces procédés sont regroupés sous la dénomination anglo-saxonne de « biomass to liquid » ou BtL.



Comme le montre le schéma ci-dessus, deux voies principales sont aujourd'hui explorées. Elles font l'objet du programme national de recherche sur la biomasse lignocellulosique (PNRB), conduit par l'ADEME et l'ANR.

La voie thermique vise à transformer sous forme gazeuse un matériau qui aura pu être préalablement fluidifié ou non. La gazéification permet de dégager de l'hydrogène et du CO<sub>2</sub>. Ces gaz sont ensuite recomposés via le processus « Fischer-Tropsch » pour former un gazole de synthèse d'excellente qualité.

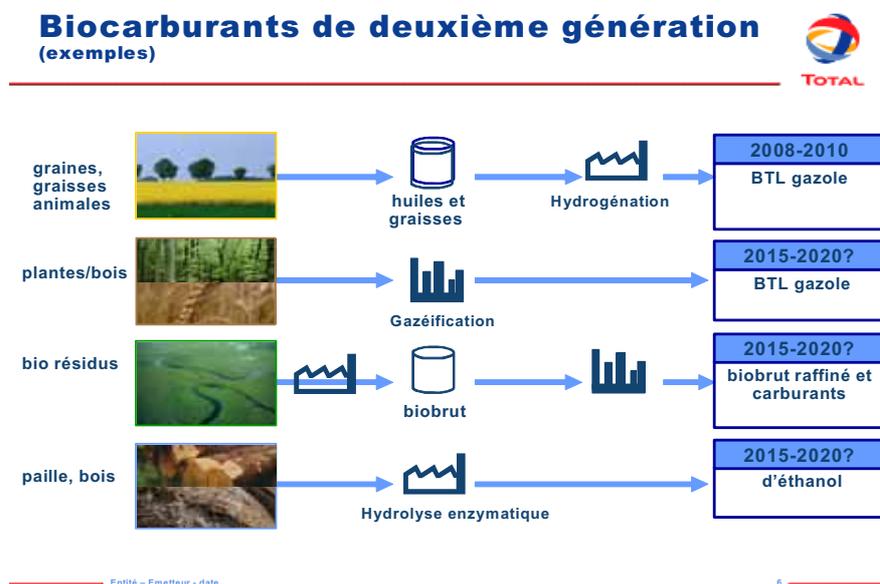
L'Allemagne est le pays le plus avancé dans ce domaine à travers la société Choren, soutenue par Daimler-Chrysler et Volkswagen. Une usine pilote fonctionne. 15.000 t/an devraient être produites dès 2006. Dans cette unité, la biomasse sèche est carbonisée entre 400 et 600°C. S'en dégagent du biocoque et du gaz. Ce gaz dégagé par distillation lente est ensuite brûlé avec de l'oxygène à environ 1.500°C, ce qui permet d'éliminer le goudron. Le gaz est ensuite purifié et liquéfié selon le processus Fischer-Tropsch.

Pour Daimler-Chrysler, cette technologie doit permettre de répondre à 20 % des besoins actuels en carburant grâce à la mobilisation de 14 millions d'hectares de culture de plantes énergétiques dont toute la biomasse serait utilisée (15 t/ha de biomasse sèche). Le passage à cette nouvelle méthode de production est apparu incontournable en Allemagne puisque les calculs de rendement conduisent à estimer qu'en 2010 il serait nécessaire de consacrer au

colza une surface plus grande que le Land de Thuringe (1,677 Mha) et en 2020 un quart de la surface cultivable de l'Allemagne (2,308 M ha).

La voie biochimique permettra, à la suite d'une hydrolyse enzymatique, de transformer la cellulose en sucres. Puis, par fermentation des sucres, il sera possible de produire de l'éthanol qui se substituerait à l'essence. Ces solutions sont notamment explorées dans les pays nordiques pour tirer parti des résidus de l'exploitation forestière.

L'ensemble de ces recherches devraient déboucher au niveau industriel entre 2010 et 2015.



L'un des points clefs de ces nouvelles filières est leur capacité à trouver une ressource abondante, adaptée et dont la collecte soit bon marché.

Des cultures annuelles pérennes produisant une grande quantité de matière sèche et de tep potentielles à l'hectare sont envisagées comme le triticale, le miscanthus, le sorgho, la canne de provence. L'exploitation de taillis dédiés et à rotation rapide, comme le peuplier, est aussi sérieusement étudiée.

Avant l'émergence de ces carburants, il est probable que pourront être mis sur le marché un ensemble de nouveaux biocarburants intermédiaires :

- les esters éthyliques d'huiles végétales (EEHV) utilisant l'éthanol au lieu du méthanol (remplacement de l'EMHV). Une usine à Sète commencera à en produire dès 2007 à partir d'un procédé mis au point par l'IFP.

- les esters éthyliques d'acides organiques (biomasse non végétale).

- l'hydrotraitement d'huiles végétales et de graisses animales (société NESTE – Total) dès 2008.

- **Une solution écologique et économique ?**

L'étude déjà évoquée ADEME-DIREM de 2002 a permis d'évaluer à **90 % au lieu de 70 % les gains de CO<sub>2</sub> entraînés par la production d'un gazole issue de la biomasse.**

- **Une solution économique ?**

L'IFP a présenté à vos rapporteurs une prévision optimiste de l'évolution des coûts permettant d'espérer une baisse significative avec l'industrialisation des procédés.

	Aujourd'hui	Demain	Après-demain
Ethanol ex-lignocellulose	0.36 \$/l 17 \$/GJ	0.29 \$/l 14 \$/GJ	0.19 \$/l 9 £/GJ
BtL		0.8 \$/l 21 \$/GJ	0.4 \$/l 11 \$/GJ

Vos rapporteurs estiment qu'il est possible de tirer **les conclusions suivantes :**

- **Les biocarburants sont parfaitement compatibles avec les motorisations modernes sans modification à hauteur de 30 % pour le biodiesel, 10 % pour l'éthanol et 15 % pour l'ETBE. Avec modifications des moteurs et des normes antipollution, des taux supérieurs à 85 % sont possibles.**

- **Les biocarburants présentent un réel avantage, dès maintenant, pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. C'est même la seule solution disponible pour toucher l'ensemble du parc automobile et s'affranchir des contraintes de renouvellement.**

- **Les biocarburants européens ne sont pas aujourd'hui compétitifs par rapport au pétrole, sauf dans le cadre d'un prix durablement supérieur à 120 \$ le baril au minimum. Le coût de la tonne de CO<sub>2</sub> évitée est plus de trois fois celui du prix du marché.**

**- L'Europe paraît en retard dans ce domaine par rapport aux États-Unis et au Brésil.**

**- La France a perdu sa position de leader européen du secteur et est moins avancée que certains de ses partenaires, notamment l'Allemagne, en termes de préparation du futur.**

**- Les objectifs du Gouvernement en matière de biocarburant ne pourront pas être satisfaits à partir des seules cultures oléagineuses françaises et impliqueront vraisemblablement une évolution de la réglementation européenne.**

**- Les objectifs du plan biocarburants développant pour l'essentiel le biodiesel est conforme à l'orientation du marché**

Ces conclusions conduisent vos rapporteurs à formuler les propositions suivantes :

**- La constitution d'une filière européenne des biocarburants doit être encouragée car c'est la seule solution immédiatement disponible et applicable à tout le parc automobile avec des gains importants.**

**- L'encouragement de la filière doit être limité dans le temps et dégressif en termes financiers avec pour objectif de conduire les producteurs aux niveaux de prix des États-Unis, les niveaux actuels de soutien n'étant pas soutenables à long terme.**

**- La priorité doit être donnée à la production d'EMHV et d'EEHV pour faire face aux besoins croissants de diesel.**

**- Au-delà du plan biocarburants du Gouvernement, un objectif de substitution de 30 % en 2030 paraît pouvoir être retenu.**

**- La France doit accroître les recherches en matière d'exploitation de la biomasse, seule technologie permettant d'abaisser les coûts et d'accroître les quantités aux niveaux espérés.**

**- Les véhicules à carburant flexible admettant aussi bien de l'éthanol que de l'essence doivent être encouragés en métropole comme outre-mer. Transparents pour le consommateur, leur diffusion n'a pas les inconvénients des filières alternatives : pas de bicarburation, un seul réservoir, pas de réseau spécifique indispensable en tout point du territoire. En outre, ils peuvent contribuer à un rééquilibrage gazole-essence du marché français, voire européen.**

**- L'incorporation directe d'éthanol dans l'essence en hiver devrait être expérimentée conformément au rapport IGF-GM-CGGREF.**

## ***F. L'HYDROGÈNE ET LA PILE À COMBUSTIBLE : LE RÊVE EST-IL POSSIBLE ?***

La vingtième édition du « *Shell éco-marathon* » à Nogaro, dans le Gers, a été marquée par la première victoire d'une voiture à pile à combustible (PAC) présentée par l'université de Valenciennes et l'École polytechnique fédérale de Zurich. Elle a en outre battu le record de l'épreuve avec une distance extrapolée parcourue de 3 836 km avec un litre de carburant<sup>1</sup>. En 1985, le gagnant n'avait parcouru que 680 km. Cette victoire est particulièrement symbolique marquant les progrès considérables effectués en matière de consommation et pour la maîtrise de la technologie de la PAC.

**La question est désormais de savoir quand et par qui sera commercialisé le premier des véhicules de série à pile à combustible.**

Les États-Unis et General Motors sont engagés très fortement. Ainsi, M. Larry Burns, le vice-président chargé des nouvelles technologies de GM a indiqué que le groupe serait à même de produire 1 million de véhicules à hydrogène en 2010, dont les performances et le coût seraient comparables aux véhicules essence, alors qu'aujourd'hui il ne produit que quelques prototypes. Le programme de recherche lancé en 1997, ayant mobilisé plus d'un milliard de dollars et près de 600 personnes, serait sur le point d'aboutir. Pourtant, en termes de coût, GM serait encore dix fois plus cher que le moteur à essence (50 \$/kW) et sa pile ne serait capable d'effectuer que 100.000 km environ, contre un objectif de 220.000 correspondant à la durée de vie d'une voiture classique.

Un fossé reste donc à franchir et pose la question de savoir si cette technologie sera à même de s'imposer aussi rapidement et donc de rendre caduques d'autres voies, comme les hybrides ou les biocarburants, ramenées à de simples transitions. La plupart des autres constructeurs rencontrés par vos rapporteurs ne croient pas en de tels scénarios et n'imaginent pas une percée des véhicules à PAC avant une décennie compte tenu des obstacles économiques et technologiques.

La PAC s'imposera-t-elle à grande échelle dès 2010, ou faudra-t-il attendre 2020 ou 2030, ou plus tard encore ?

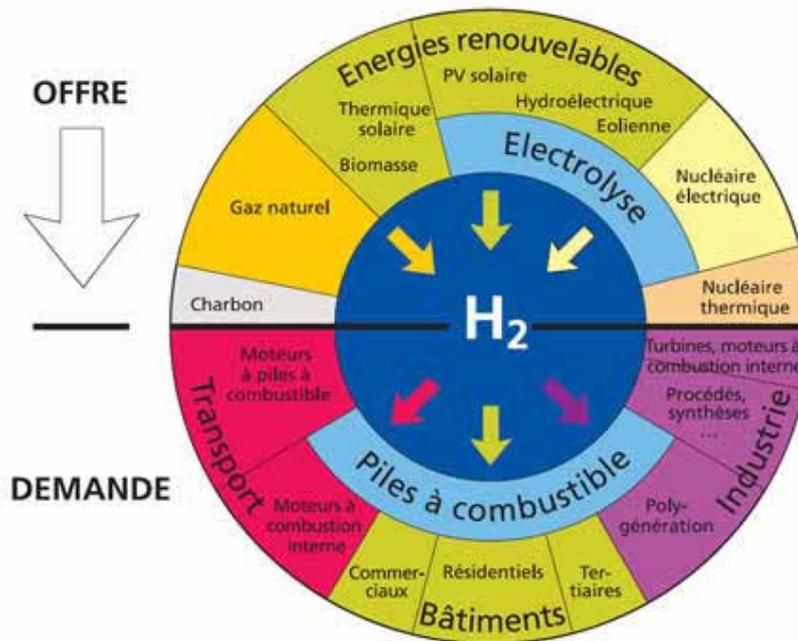
La pollution urbaine, les émissions de gaz à effet de serre, la dépendance des transports vis-à-vis des hydrocarbures – à hauteur de 95 % - et les difficultés d'approvisionnement, tout concourt à ce que l'hydrogène soit devenu l'option centrale des politiques énergétiques du futur. **Le calendrier et les conditions du passage à « l'économie de l'hydrogène » sont devenus des enjeux majeurs.**

---

<sup>1</sup> Cette distance est extrapolée, les concurrents n'effectuant avec les prototypes que 7 tours du circuit, soit 25, 272 km en un temps maximal de 50'34'', soit 30 km/h de moyenne.

Les questions à se poser sont donc multiples :

- Quelles formes d'utilisation de l'hydrogène pour la propulsion des véhicules ?
- Quels modes de production pour en disposer suffisamment et ne pas avoir d'incidence environnementale ?
- Quelles infrastructures sont nécessaires pour assurer la distribution aux usagers ?



*Synthèse de l'économie de l'hydrogène. Source – RDT info n°42, août 2004, p.4.*

L'hydrogène est une sorte de «  ***pierre philosophale***  » de l'automobile, puisqu'un moteur ainsi alimenté ne fabriquerait que de l'eau, cette eau pouvant elle-même être traitée pour la production d'hydrogène et d'oxygène. La voiture à PAC serait donc le véhicule «  ***zéro émission***  » s'affranchissant des limites du véhicule électrique à batteries (temps de recharge et faible autonomie). La **production d'hydrogène via des sources d'énergies renouvelables** aléatoires (solaire, éolien ...) permettrait de pallier les problèmes d'intermittence en autorisant le stockage de l'énergie produite. *Last but not least*, l'hydrogène est l'un des éléments les plus présents à travers le monde, il assurerait **l'indépendance énergétique** des nations dépourvues d'hydrocarbures.

Aujourd'hui, entre 600 et 800 véhicules équipés d'une PAC sont à l'essai dans le monde et environ 70 stations-service hydrogène.

Trois constructeurs seulement poursuivent la voie de l'utilisation directe d'hydrogène dans des moteurs « *classiques* ».

Les autres étudient la possibilité d'utiliser l'hydrogène dans des piles à combustible soit directement, issu d'un réservoir embarqué, soit après reformage d'un combustible liquide. Cette pile pourrait dans un premier temps être un générateur auxiliaire puis/ou fournir l'énergie nécessaire à la propulsion de la voiture.

Mais cette technologie, qui a déjà fait l'objet d'un rapport de l'Office, pose de très nombreuses difficultés<sup>1</sup>.

La production d'hydrogène en grande quantité, son stockage, son transport et sa délivrance en toute sécurité et en respectant l'environnement ne semblent pas suffisamment maîtrisés pour un usage de masse dans l'automobile.

### **1. L'hydrogène direct : une voie marginale ?**

L'utilisation directe de l'hydrogène dans un moteur à combustion interne est explorée par trois constructeurs dans le monde. BMW, Mazda et Ford.

Ford a mis au point un Ford C-Max de 4 cylindres, 2,3 litres et 100 CV. Trois réservoirs permettent de stocker 2,75 kg d'hydrogène à 350 bars de pression, soit 119 litres. Son autonomie est d'environ 200 km. Il est injecté à 5,5 bars dans le moteur doté d'une compression variable, ce qui permet de conserver la puissance produite et d'adapter la consommation aux besoins.

BMW poursuit des recherches dans ce domaine car il souhaite répondre à la demande de clients particulièrement exigeants en termes de couple et de puissance.

Un prototype baptisé H2R a été mis au point et montré à la presse à Miramas. Il avait pour but de démontrer la faisabilité de cette technologie et ses potentialités en termes de performances et de plaisir de conduite. Sa motorisation est un V12 de la 760i développant 286 CV, dont les performances sont très élevées : 0 à 100 km/h en moins de 6 secondes, 320 km/h en vitesse de pointe...

---

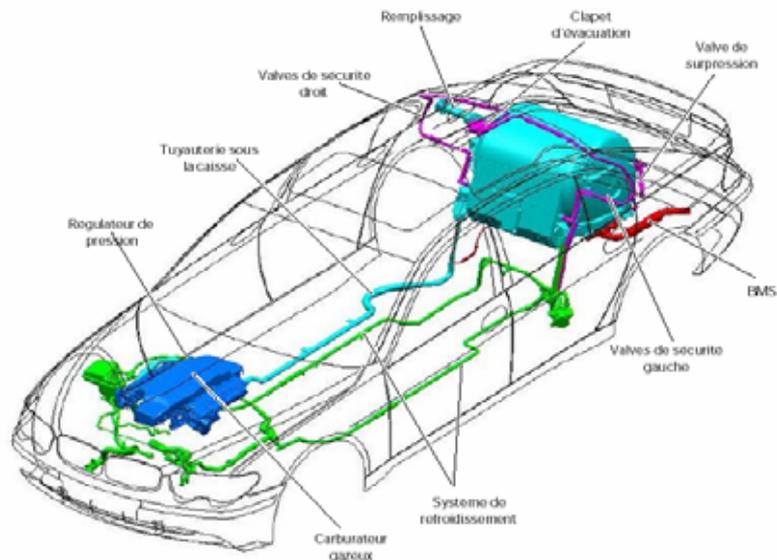
<sup>1</sup> MM. Robert galley et Claude gatignol, députés, *Les perspectives offertes par la technologie de la pile à combustible*, n°3216 Assemblée nationale, N°426 Sénat, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2000-2001, 163 p.

Sur cette base, BMW met au point une série 7 hydrogène dont la commercialisation pourrait s'effectuer au tournant de la décennie. Elle serait à bicarburation essence et hydrogène et assurerait une autonomie de 345 km avec l'hydrogène et de 800 km supplémentaires avec l'essence.

L'hydrogène est stocké sous forme liquide à  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Son injection dans le moteur nécessite de le réchauffer entre le réservoir et le moteur.

### **BMW CleanEnergy.**

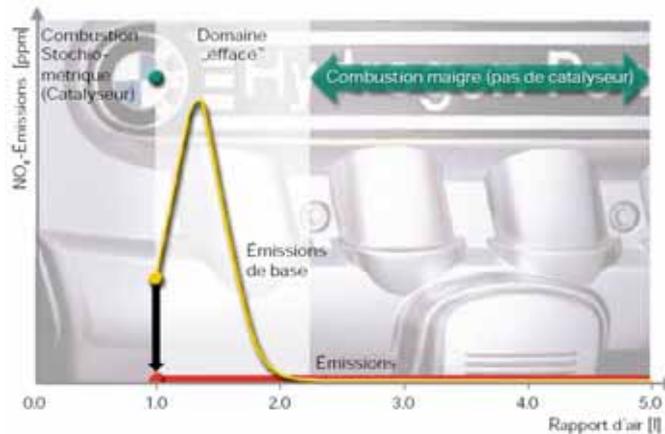
#### **Vue d'ensemble du système LH<sub>2</sub> de la 7.**



BMW semble assez seul sur cette voie. Pourtant, les chercheurs y affichent une réelle confiance dans le potentiel de cette technologie qui est aujourd'hui au stade de la précommercialisation. Des essais poussés ont été réalisés (150 000 km avec 15 véhicules).

Les émissions d'oxydes d'azote, l'un des principaux handicaps de cette filière, semblent avoir été très fortement réduites par BMW, elles seraient inférieures aux normes californiennes les plus strictes (SULEV – Super ultra low emission vehicle)

**BMW CleanEnergy.**  
Le Moteur à combustion interne.



Pour BMW, le potentiel de ces véhicules est supérieur à celui des moteurs classiques en termes de puissance.

## 2. La pile à combustible : peut-on surmonter les obstacles ?

Découverte il y a plus de 150 ans, la pile à combustible n'est pour l'instant pas parvenue à s'imposer. Le précédent rapport de l'Office avait conclu qu'il s'agissait d'une technologie d'avenir, mais qu'une diffusion à grande échelle nécessitait que plusieurs obstacles techniques soient levés.

### a) Histoire et principe technologique

Le principe de base de la pile à combustible a été découvert en 1839 par le physicien anglais William Grove. Un premier générateur de 1 kW a été réalisé en 1953 à partir des travaux de Francis T. Bacon. Elle a été utilisée par la NASA dans les années 1960 pour les programmes Gemini (1963) et Apollo (1968), programmes dans lesquels le prix était une question secondaire. En 1970, Du Pont met au point le *Nafion*, membrane polymère destinée à l'origine à la pétrochimie. Cette découverte va permettre de relancer les travaux sur les piles à membrane. En 1973, General Motors et Ford présentent des prototypes de véhicules fonctionnant grâce à une pile à combustible.

Cependant, à la fin des années 1970, les recherches sont presque complètement arrêtées. Elles ne seront relancées qu'après l'échec de la voiture électrique au début des années 1990<sup>1</sup>.

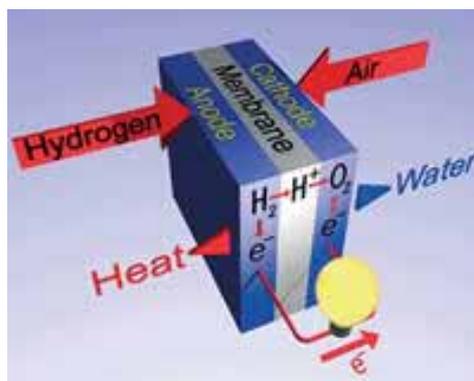
<sup>1</sup> Pour un historique plus complet cf. rapport galley-Gatignol, *ibid*.

Comme toutes les piles, la pile à combustible est l'empilement de cellules produisant de l'électricité. C'est un générateur d'électricité qui transforme l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique. Dans une pile conventionnelle, l'oxydant et le réducteur sont progressivement consommés, tandis qu'une pile à combustible fonctionne tant qu'elle est alimentée en comburant et combustible.

L'originalité de ces cellules est de combiner de l'hydrogène (réducteur) et de l'oxygène (oxydant) en eau tout en produisant de l'électricité, selon un principe électrochimique inverse de l'électrolyse de l'eau. L'électrolyse consiste à faire circuler un courant électrique entre deux électrodes plongées dans l'eau. A l'électrode positive (anode) apparaît de l'oxygène ( $O_2$ ), et à l'électrode négative (cathode) de l'hydrogène ( $H_2$ ). Il faut donc deux molécules d'eau ( $H_2O$ ) pour obtenir deux molécules d'hydrogène et une d'oxygène.

Dans une cellule de pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM-FC), c'est exactement l'inverse qui se produit. Les deux électrodes sont poreuses et recouvertes sur leur face externe d'un catalyseur à base de platine. L'hydrogène est introduit au niveau de l'anode. Il s'y décompose en protons et en électrons sous l'effet du catalyseur. Les électrons circulent dans un circuit spécifique qui permet la fourniture d'électricité. Les protons traversent la membrane. Au niveau de la cathode, ils se combinent avec l'oxygène et les électrons pour former de l'eau.

La membrane est un film de polymère qui joue à la fois le rôle d'un séparateur entre hydrogène et oxygène et de l'électrolyte permettant le passage des protons. Il faut noter que la réaction est exothermique et que les PAC sont aussi des générateurs de chaleur, élément particulièrement utile pour un usage stationnaire dans les habitations.



Présentation simplifiée du fonctionnement d'une cellule de pile à combustible<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Source : RDT info n°42, août 2004, p.4.

Le rendement d'une PEM est très élevé puisqu'on estime qu'elle convertit 55 % de l'énergie du combustible en travail contre 30 % environ pour les moteurs à combustion interne. A l'avenir, elle devrait également être sans danger, silencieuse et plus facile à entretenir et utiliser.

Les piles à combustible sont donc alimentées en continu et peuvent être très facilement rechargées en combustible. De plus, elles n'ont aucun composant mécanique en mouvement.

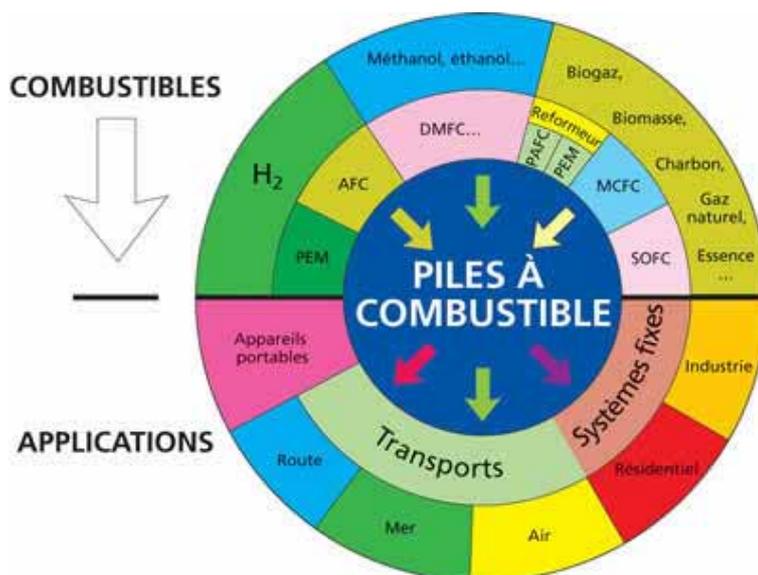
*b) Quelle pile pour les transports : PEM ou SOFC ?*

La PEM-FC n'est qu'un type parmi d'autres de piles à combustible qui toutes, avec des électrolytes différents, aboutissent à la production d'électricité et d'eau. Mais tous les types de PAC ne sont pas adaptés à l'automobile.

Les piles alcalines à potasse ont été développées pour le secteur spatial (AFC). Celles à l'acide phosphorique (PAFC) semblent limitées dans leurs applications. Il existe également des piles à carbonates fondus (MCFC) utilisées à ce jour pour produire, en stationnaire, de l'électricité et de la chaleur (pile GDF à Chelles).

Les piles à méthanol direct (DMFC) sont des piles dont la puissance et le carburant sont plus adaptés aux utilisations portables comme les téléphones et les ordinateurs.

Les piles à oxydes solides (SOFC) semblent très intéressantes. Elles fonctionnent à haute température (plusieurs centaines de degrés) et dégagent une forte puissance. Elles semblent adaptées à la cogénération d'électricité et de chaleur pour les applications stationnaires (logement, chauffage) et maritimes. Elles peuvent être alimentées aussi bien par du méthane, du méthanol, du biogaz ou du charbon gazéifié.



Compte tenu de ces caractéristiques, la plupart des constructeurs automobiles ne poursuivent plus de recherches sur les SOFC, ils considèrent que les contraintes – notamment la température – l’emportent sur les avantages.

Vos rapporteurs ont néanmoins constaté que des travaux étaient poursuivis par BMW et par Delphi.

L’alimentation électrique des voitures est aujourd’hui un sujet de préoccupation pour les constructeurs et les équipementiers. Les instruments et équipements consomment toujours plus de puissance sans que les performances des batteries installées à bord n’aient progressé. Même à bord de la Toyota Prius, une batterie 12 V alimente les équipements. Dès lors plutôt que d’installer deux batteries de 12 V comme sur certains modèles de prestige, ou de passer au 42 V, il est envisagé d’installer à bord un générateur auxiliaire (auxiliary power unit – APU). Cet APU serait en fait une SOFC de 4 à 8 kW.

- **Les blocages technologiques et économiques**

Aujourd’hui des blocages techniques et économiques<sup>1</sup> empêchent de pouvoir mettre en place une production de masse et de rendre disponible cette technologie pour le grand public. **De longues années de recherche sont encore nécessaires sur les différents éléments de la pile.**

L’un des premiers obstacles est **l’efficacité des membranes.**

---

<sup>1</sup> Le coût d’une pile serait aujourd’hui de 6000 à 8000 €/kW alors que les prix du marché pour le stationnaire sont entre 750 et 1500 €/kW, de 150 €/kW dans les transports en commun et de 30 à 50 €/kW pour les véhicules individuels. Cf. Clefs CEA n°50/51 p.66.

La membrane joue le rôle essentiel d'électrolyte<sup>1</sup>. Presque toutes les PEM fonctionnent avec une membrane polymère perfluorosulfonée, le *Nafion*® de Du Pont. Cette membrane doit à la fois séparer les éléments de la pile et être conductrice tout en étant très stable chimiquement, très fine et très solide. On estime habituellement qu'une surface totale de 10 à 20 m<sup>2</sup> est nécessaire à la construction d'une pile destinée à propulser une automobile.

Ce type de membrane pose de nombreuses difficultés que les chercheurs tentent de résoudre en raison de l'insuffisance des performances du *Nafion*® et de son prix (500 €/m<sup>2</sup>). Elle est limitée en température (80 °C) car elle doit rester parfaitement hydratée, alors qu'il serait souhaitable de porter la température de fonctionnement à 160-180 °C pour accélérer la réaction et éviter l'empoisonnement du catalyseur par le monoxyde de carbone. L'augmentation de la température de fonctionnement est aussi un objectif pour faciliter le refroidissement. En effet, il est difficile de refroidir une pile à 80 °C. Un très grand radiateur est nécessaire, voire des ventilateurs, ce qui est un handicap dans la conception du véhicule.

Pour l'instant dominante, cette technologie pourrait être remplacée par une membrane à base de polymère hydrocarboné. Ce type de membrane serait moins cher (150 contre 500 €/m<sup>2</sup>) et plus performant. L'un des principaux fabricants est une *start up* californienne, PolyFuel. Cette membrane est plus mince (un film de cellophane), supporte des températures plus élevées (95°C au lieu de 80), et produirait 10 à 15 % d'électricité en plus. Cette performance est due à l'assemblage de polymère très conducteur avec du polymère organique rigide qui renforce la structure mais n'est pas conducteur. Honda a adopté ce type de membrane sur la FCX ; 20 exemplaires sont en service dans des sociétés ou des administrations au Japon. Une entreprise britannique, ITM Power, vient par ailleurs de mettre au point une membrane en polymère d'hydrocarbure adaptée pour les PEMFC fonctionnant au méthanol. Elle serait trois fois plus conductrice que le *Nafion*® et près de 100 fois moins chère. Le CEA et le CNRS travaillent, eux, sur des membranes à base de polyamide sulfoné.

**Le catalyseur** est un second point bloquant.

Aujourd'hui, seul le platine est véritablement efficace. Or, la rareté de ce métal et son coût (supérieur à 1 000 \$/once à New York en janvier 2006. L'once d'or valait entre 500 et 600 \$ l'once) empêchent la généralisation d'une telle technologie. Entre 50 et 100g de platine sont nécessaires pour le fonctionnement d'une PAC. Dans ces conditions, la seule généralisation de cette technologie au marché automobile français équivaldrait à la consommation mondiale actuelle de ce métal. De plus, les gisements sont peu répandus dans le monde. 90 % de la production est assurée par deux pays :

---

<sup>1</sup> Un électrolyte est une substance qui permet la dissociation, en présence d'eau, d'un élément en ions chargés négativement et positivement.

l'Afrique du Sud (75 %) et la Russie (15 %). La dépendance pétrolière serait donc remplacée par une dépendance vis-à-vis du platine.

Il faut donc réussir soit à en diminuer très fortement les quantités (division par 10), soit à trouver un autre matériau sans pour autant augmenter la production de peroxyde d'hydrogène ou de monoxyde de carbone, nocifs pour la membrane ou le catalyseur et qui réduisent la durée de vie de l'ensemble.

L'une des solutions est la mise au point de membranes nanotexturées qui augmentent la surface d'échange. Une autre solution est d'utiliser des métaux non précieux, tels le chrome ou le cobalt ou des alliages (catalyseurs trimétalliques mais fonctionnant à des températures supérieures à 100 °C). Des travaux sont aussi menés au CEA sur les catalyseurs enzymatiques.

**Les plaques bipolaires** constituent l'interface entre le cœur de la cellule électrochimique élémentaire et le système, l'isolant des cellules élémentaires entre elles et un élément déterminant de l'architecture de la pile (dimension, poids...). Elles assurent l'alimentation en gaz, l'évacuation de l'eau et la collecte du courant. Les plaques en graphite sont pour l'instant les plus performantes mais elles sont chères (1 €/cm<sup>2</sup>).

Là aussi d'importants travaux sont menés. Le CEA Grenoble a réussi à diviser par 3 la masse et le volume, et par 100 le coût potentiel des plaques en utilisant des tôles métalliques embouties. Les plaques en composites organiques moulés pourraient offrir des perspectives intéressantes mais les recherches ne sont pas encore assez avancées.

Il est aussi question de remplacer les structures à canaux par des mousses métalliques à pores ouverts. La surface en contact serait supérieure à 90 % au lieu de 60 ou 70 %. Mais les mousses de nickel ou chrome-nickel sont encore trop sensibles à la corrosion (quelques dizaines d'heures de fonctionnement).

Un autre sujet de préoccupation pour les constructeurs est **la résistance au froid**. L'eau présente dans la pile risque de geler dès que la température est négative, ce qui pose des problèmes dans de nombreux pays du monde constituant les principaux marchés automobiles (Amérique du Nord, Japon, Allemagne...). Vos rapporteurs ont pu le constater. Honda semble avoir fait des progrès spectaculaires en la matière puisque son modèle FCX est normalement à même de fonctionner jusqu'à -20 °C. Dans les usages stationnaires, des progrès très significatifs ont également été accomplis. Ainsi, une pile Axane, société filiale d'Air Liquide, a été utilisée par Jean-Louis Etienne au cours de son expédition sur la banquise du pôle Nord.

### 3. Comment fournir l'hydrogène massivement ?

L'hydrogène, tout en étant un des éléments les plus abondants de la planète - il suffit de rappeler qu'il est présent dans l'eau - n'est pas pour autant disponible à l'état pur. Il n'en existe aucun gisement. Il faut donc l'extraire.

Pour cela il faut disposer d'une source d'hydrogène (gaz naturel, eau), et d'une source d'énergie (hydrocarbures, électricité...). L'hydrogène n'est donc pas une source d'énergie primaire, mais, isolé, devient un vecteur énergétique, permettant de transporter une certaine quantité d'énergie d'un lieu de production à un lieu d'utilisation.

C'est donc un raccourci dangereux que de considérer l'hydrogène comme systématiquement « *propre* ». Tout dépend de la manière dont il est produit et utilisé. Si sa production provoque le rejet de gaz à effet de serre, si elle est dépendante d'hydrocarbures ou si elle consomme plus d'énergie que l'hydrogène n'en restitue, il n'est pas certain que le procédé soit vraiment rentable.

L'hydrogène est d'ores et déjà un produit industriel. La consommation mondiale s'élève à 50 Mt par an et représente près de 140 Mtep (2 % de la consommation mondiale d'énergie).

96 % de l'hydrogène est produit à partir d'énergie fossile, dont 48 % à partir du gaz naturel, 30 % des hydrocarbures liquides, 18 % du charbon. 4 % seulement est produit à partir de l'électricité.

Il s'agit presque exclusivement d'une production sur site dédiée à un usage particulier : la production d'ammoniac (51 %), le raffinage pétrolier (35 %) et le méthanol (8 %). C'est donc un produit habituel pour l'industrie pétrolière et l'industrie chimique. Air Liquide est très présent dans ce domaine. L'hydrogène est aussi extrait pour des applications spatiales.

Son usage pour les transports et l'automobile en particulier serait une véritable révolution qui nécessiterait un changement d'échelle et de méthode de toute la filière.

Trois grandes questions se posent : Comment le fabriquer ? Où le fabriquer ? Comment le stocker, le transporter et le distribuer ?

Ces questions, qui doivent être dissociées pour mieux comprendre les différents enjeux, doivent néanmoins pouvoir être évaluées simultanément pour dégager l'écobilan et les coûts de l'ensemble d'une filière.

a) *Comment le fabriquer ?*

Quel que soit le lieu de la production d'hydrogène, **deux grands types de méthode existent : le reformage thermochimique et l'électrolyse de l'eau**. Plusieurs autres sont explorées mais restent du domaine de la recherche fondamentale.

La méthode choisie dépend de la source dont on veut extraire l'hydrogène.

**A partir des sources hydrocarbonées, c'est le reformage** qui est la solution la plus efficace. Trois méthodes différentes sont possibles : le **vaporeformage**, l'oxydation partielle et le reformage autotherme.

La production d'hydrogène à partir du **méthane** est la plus répandue auprès des industriels pour les besoins de raffinage de l'industrie pétrolière. Au cours de ce processus, la molécule de  $\text{CH}_4$  est brisée par la chaleur et la vapeur d'eau sur un catalyseur au nickel. La réaction est dite « *endothermique* », c'est-à-dire qu'elle nécessite un important apport de chaleur (840-950 °C). Le CO issu de cette première réaction est ensuite converti en  $\text{CO}_2$  par l'adjonction d'eau (*Water gas shift*). Il en résulte la production d'hydrogène et de dioxyde de carbone. Une troisième étape est la purification de l'hydrogène sur tamis moléculaire<sup>1</sup>.

Un autre procédé est utilisé pour traiter les carburants plus lourds comme le gazole, il s'agit de **l'oxydation partielle**. Cette opération s'effectue à plus haute température (1 200–1 500 °C) et sous assez forte pression (20 à 90 bars). L'hydrocarbure est oxydé en présence d'oxygène. Les deux opérations suivantes sont identiques au vaporeformage : conversion du CO et purification. Cette réaction est elle « *exotherme* », c'est-à-dire qu'elle dégage de la chaleur.

La troisième méthode est le **reformage autothermique**. Elle consiste à tirer parti du caractère endo et exothermique des deux réactions précédentes. Elle fait encore l'objet d'importantes recherches.

**Dans tous les cas, seul l'hydrogène est conservé. Le carbone est rejeté sous forme de gaz carbonique.**

Sans séquestration du carbone, cette méthode contribue à l'effet de serre et ne permet donc pas d'atteindre l'objectif visé. La séquestration du carbone est donc une des technologies clefs de l'économie de l'hydrogène et de la lutte contre le changement climatique, c'est pourquoi l'Office a été saisi d'une étude sur ce sujet.

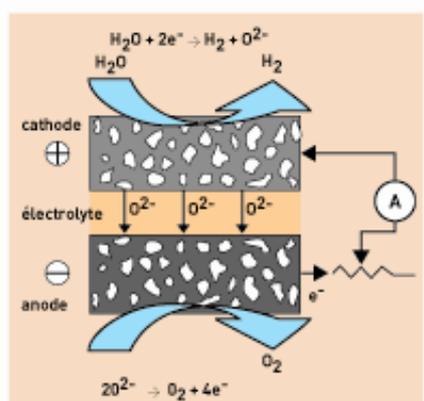
---

<sup>1</sup> *Matériau qui, possédant des pores de dimension équivalente à celle des molécules à retenir permet de séparer et capturer ces dernières.*

**L'électrolyse de l'eau** est la deuxième grande famille de méthode d'extraction de l'hydrogène disponible aujourd'hui. Elle est très marginale – 1 % de l'hydrogène produit – et réservée à la production d'hydrogène de très grande pureté où lorsque le coût n'est pas un obstacle. Un tiers des stations-service en démonstration dans le monde fonctionne grâce à ce procédé. **Pour être rentable écologiquement et économiquement l'électricité utilisée doit être bon marché et sans émission de CO<sub>2</sub>**, c'est-à-dire venant des centrales nucléaires et hydrauliques. En effet, si elle provient de centrales fonctionnant avec des combustibles fossiles, la production d'hydrogène redevient source de gaz à effet de serre. L'objectif poursuivi serait manqué.

Beaucoup de scientifiques rencontrés ne croient pas en l'avenir de l'électrolyse. On estime notamment que l'alimentation du parc automobile français en hydrogène nécessiterait le doublement ou le quadruplement du parc nucléaire actuel.

En effet, les meilleurs résultats de production d'hydrogène par électrolyse auraient été obtenus par des laboratoires américains qui seraient parvenus à récupérer 50 % de l'énergie investie grâce à un procédé d'électrolyse à haute température (1000 °C) et utilisant une membrane de céramique pour séparer les deux gaz. **L'électrolyse haute température** présente plusieurs avantages liés à l'utilisation de la chaleur qui accélère la réaction et abaisse le coût de production de l'hydrogène. Elle fonctionne selon le principe inverse des piles SOFC et rencontre des problèmes analogues, notamment la tenue des matériaux à haute température.



Le principe de l'électrolyse haute température est l'inverse de celui d'une pile à combustible de type SOFC (à oxyde solide).

Deux types de fonctionnement sont possibles. Ils sont dits « allothermique » et « autothermique ». Le système est dit allothermique lorsque l'électricité et la chaleur seraient fournies par un réacteur nucléaire de génération IV. Il est dit autothermique lorsque l'alimentation en vapeur d'eau serait fournie par une source géothermique et en électricité par une autre source, par exemple un barrage hydroélectrique.

**La source d'électricité nécessaire à la production d'hydrogène** est maintenant au cœur des débats politiques et scientifiques aux États-Unis et en Allemagne. Le passage à l'économie sans carbone nécessite la production massive d'hydrogène. Trois sources sont possibles : les énergies fossiles, le nucléaire et les énergies renouvelables.

Aux États-Unis, le Gouvernement étudie actuellement le projet d'une centrale nucléaire de nouvelle génération permettant la production industrielle d'hydrogène grâce aux deux méthodes d'électrolyse à très haute température (+ 900 °C) et par réaction thermochimique. Cette centrale serait installée dans l'Idaho et nécessiterait un investissement supérieur à 1,5 milliard de dollars pour un début de production à l'horizon 2020. Le rendement énergétique envisagé est de l'ordre de 45 %. Un tel dispositif permettrait également le stockage de l'électricité au cours des périodes de moindre consommation. Les centrales de génération IV sont aussi étudiées en France. Dans le cadre international du Forum génération IV, le programme bénéficie d'une dotation de 30 millions d'euros par an et de 65 millions à partir de 2008.

Un tel projet suscite de vives critiques de la part des associations écologistes, notamment la Green Hydrogen Coalition qui promeut une production à partir d'énergies renouvelables, à l'instar de l'un de ses porte-parole, l'essayiste Jeremy Rifkin, auteur de *L'économie de l'hydrogène*.

Produire de l'hydrogène à partir d'énergie éolienne est possible mais reste aujourd'hui au stade expérimental. La rentabilité est très faible car il faut 4,5 kWh pour produire 1 kg d'H<sub>2</sub>. Une expérimentation est en cours en France, dans le Nord-Pas-de-Calais. Dans le cadre du PREDIT et d'un partenariat entre la ville de Dunkerque, Gaz de France et Espace éolien développement, un bus fonctionnera à un mélange d'Hythane (80 % de méthane, 20 % d'hydrogène) comprimé à 200 bars. L'hydrogène nécessaire sera produit par une éolienne.

Au niveau européen, le projet RES2H2 a permis l'installation en Grèce et aux Canaries de deux unités de production d'hydrogène par électrolyse.

L'Europe soutient également un projet en Espagne (Heliosol) de génération d'hydrogène par le solaire thermique.

En dehors des deux grandes méthodes (reformage des hydrocarbures et électrolyse de l'eau) de nombreuses recherches sont menées mais ne permettent pas d'envisager une véritable production d'hydrogène avant plusieurs années, voire plusieurs décennies.

Parmi celles-ci, la **production d'hydrogène à partir de la biomasse** est peut-être celle dont la réalisation est la plus proche. Cette filière est l'une des plus prometteuses. L'ADEME estime qu'à l'horizon 2015, la biomasse pourrait représenter jusqu'à 21 Mtep/an, dont 15 Mtep/an pourraient être mobilisées pour la production d'hydrogène.

Il s'agirait de transformer la biomasse par voie thermochimique. Ce processus s'effectue en trois étapes : thermolyse de la matière première, gazéification et purification. A haute température le rendement masse de carburant est de l'ordre de 25 %. L'énergie nécessaire est comparable à celle utilisée pour le vaporeformage. Des essais sont effectués par l'IFP et le CEA.

Une dizaine de projets européens et 23 millions d'euros ont été consacrés par le 5<sup>e</sup> PCRD sur ce sujet.

Par ailleurs, sont explorées **deux voies thermochimiques**. Des travaux existent depuis le milieu des années 1960. Pour dissocier la molécule d'eau par la chaleur seule, il faudrait opérer à 4 500 °C, ce qui est très difficile et inaccessible aux réacteurs nucléaires, même de génération IV. Il faut donc chercher à combiner l'usage de la chaleur avec d'autres réactions. **Le cycle iode-soufre** est une solution envisageable. Il est basé sur la dissociation de deux acides (sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et iodhydrique HI) à haute température (400 à 900 °C). Il pourrait conduire à la production d'hydrogène en grande quantité dans un réacteur nucléaire à très haute température qui devrait voir le jour en 2020. Les recherches les plus avancées ont été conduites au Japon, avec des expérimentations en laboratoire. Un dérivé du cycle iode-soufre, faisant appel à l'énergie électrique, a été expérimenté en Russie dans les années 1980. Il s'agit du « *cycle hybride Westinghouse* ». Un troisième cycle est le « cycle UT-3 » à partir d'acide bromhydrique. Il est de conception japonaise et est également au stade de la recherche fondamentale.

D'autres recherches permettent d'espérer produire de l'hydrogène par :

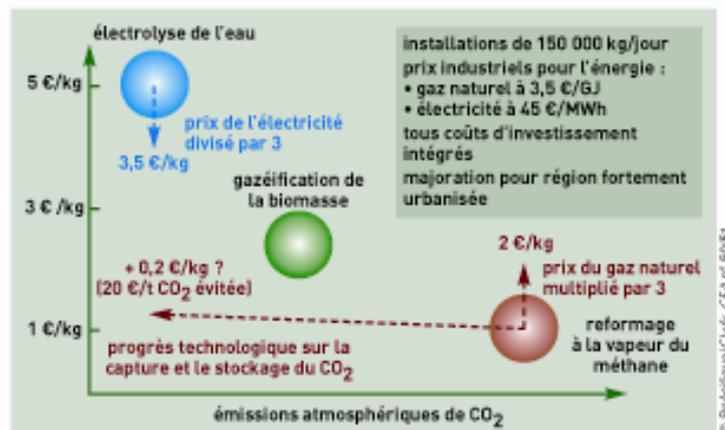
- photolyse de l'eau (dissociation photoélectrochimique de l'eau par la lumière solaire) grâce à des cellules photoélectriques spécifiques,

- photosynthèse de certains micro-organismes puis de catalyseurs biomimétiques. Certaines algues (*Chlamydomonas reinhardtii*) ont la faculté de produire de l'hydrogène par phase (hydrogénase). Ces recherches font

l'objet d'un projet international, Solar H : hydrogen from sun and water financé par le 6<sup>e</sup> PCRD.

**Au-delà des expérimentations, c'est bien le coût qui sera déterminant, coût de la production mais aussi de la chaîne complète de distribution.** Le département de l'énergie des États-Unis (DOE) a fixé pour 2010 des objectifs très ambitieux, de 0,4 €/lee d'hydrogène distribué, fabriqué à partir du méthane et hors séquestration.

Le consultant américain SFA Pacific a réalisé sur ce sujet une étude pour le DOE en 2002. SFA Pacific a considéré que l'hydrogène était produit dans de grandes installations (150 000 kg/j) puis transporté dans 411 stations service dans un rayon de 150 km de la centrale, soit sous forme gazeuse par des canalisations, soit sous forme liquide par camions. Le reformage à la vapeur du méthane s'est révélé le plus économique à produire (1 €/kg) mais ce résultat est très dépendant du prix du gaz naturel (50 % du coût) et ne prend pas en compte la séquestration du CO<sub>2</sub>. L'électrolyse est cinq fois plus coûteuse (5 €/kg).

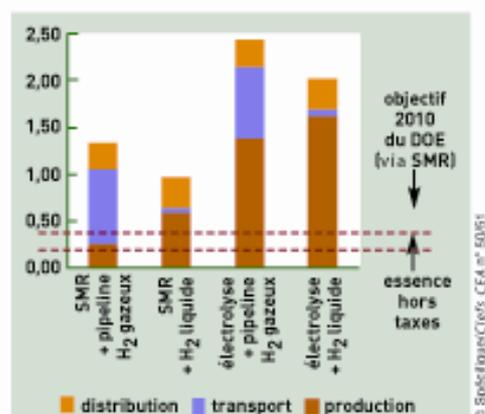


Coûts relatifs de production centralisée d'hydrogène gazeux.  
Sources : SFA Pacific 2002 et IFP [capture et stockage CO<sub>2</sub>].

Dans le coût final à la pompe, le mode de transport joue un rôle très important. Le transport par canalisation représente un coût supérieur à 1,7 €/lee<sup>1</sup>, alors que le transport liquide est très bon marché (0,1 €/lee). Ainsi

<sup>1</sup> Litre équivalent essence.

l'hydrogène pourrait être disponible entre 1 et 1,5 €/kg par vaporeformage et entre 2 et 2,5 €/lee par électrolyse.

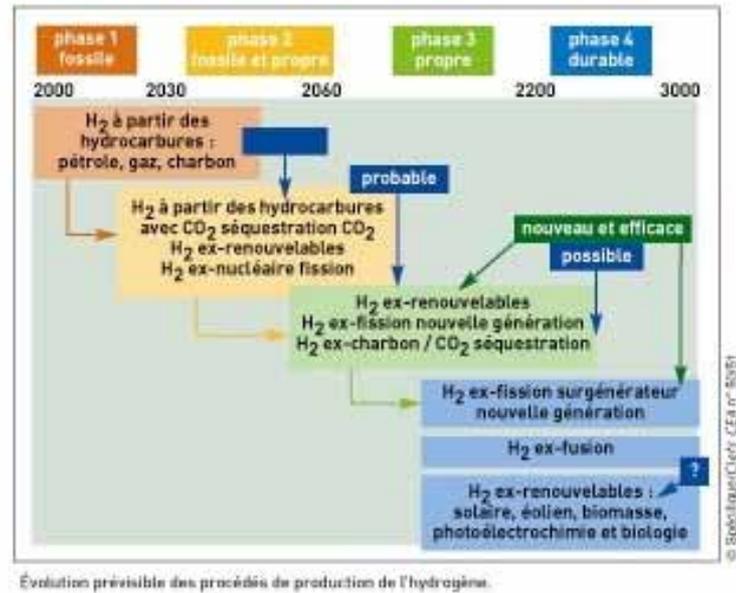


Coûts de l'hydrogène distribué en station-service (€/litre équivalent essence).  
SMR = Steam Methane Reforming, reformage à la vapeur du méthane. [Source : SFA Pacific 2002].

Il est probable que les pays mettront en place un « bouquet » de solutions pour produire de l'hydrogène, chacune d'entre elles offrant des avantages différents et plus ou moins prononcés selon les lieux de production.

La maturité et les coûts des différentes techniques conduit M. Paul Lucchese<sup>1</sup> à estimer qu'elles ne sont pas concurrentes mais se succéderont au cours du 3<sup>e</sup> millénaire. Il propose un scénario d'évolution en quatre périodes successives de plus en plus propres. La période actuelle dite « fossile » pourrait se prolonger au-delà de 2030, l'hydrogène serait essentiellement produit à partir d'hydrocarbures. A partir de 2020-2030 et sans doute jusqu'à la fin du 21<sup>e</sup> siècle (phase « fossile et propre »), la séquestration se mettra en place et une production d'hydrogène par électrolyse (nucléaire et/ou renouvelable) se développera. Au-delà de 2060, et peut-être pendant 50 ou 200 ans, les méthodes propres de fabrication d'hydrogène domineraient. Une quatrième phase dite « durable » pourrait débuter vers 2100. Elle se caractériserait par la fabrication d'hydrogène à partir de ressources renouvelables exclusivement (H<sub>2</sub> ex-fusion, solaire, photoélectrochimie et biologie).

<sup>1</sup> Direction de la recherche technologique, CEA Fontenay-aux-Roses.



b) Où le fabriquer ? A bord du véhicule ou de manière centralisée ?

L'hydrogène peut être fabriqué dans trois lieux principaux : dans des centrales spécialisées, dans les stations-service et à bord des véhicules.

La production centralisée d'hydrogène est celle qui est aujourd'hui pratiquée à travers le vaporeformage ou qui pourrait l'être dans des centrales nucléaires de 4<sup>e</sup> génération. Elle offre l'avantage d'une production à grande échelle et donc a priori plus économique. C'est la solution qui paraît la plus naturelle. Une étude a été réalisée en 2003 par le CEA, l'IFP et Total. Elle donne les résultats suivants :

Procédé	Type de production	Coût de la matière première (€/GJ)	Coût de production de l'hydrogène (€/GJ)	Coût final de l'hydrogène avec l'infrastructure <sup>56</sup> (€/GJ)
Référence : essence (2003)	Extraction raffinage	2,5 €/GJ	Essence : 6 €/GJ	Essence : 7 €/GJ
Reformage du gaz naturel	Centralisé (3 millions m <sup>3</sup> /jour)	3 €/GJ	5-8 €/GJ	22-30 €/GJ <sup>57</sup>
Reformage du gaz naturel	Décentralisé	4-5 €/GJ	7-12 €/GJ	28-33 €/GJ
Gazéification du charbon	Centralisé	1,2 €/GJ	13-16 €/GJ	32-37 €/GJ
Gazéification de la biomasse	Intermédiaire	2,4 €/GJ	17-22 €/GJ	33-40 €/GJ
Électrolyse	Décentralisé	14 €/GJ (5 c€/kWh)	20-25 €/GJ	35-40 €/GJ

Cependant l'hydrogène est très léger (14 fois plus que l'air) et fortement inflammable. Il ne peut être transporté que compressé ou liquéfié et dans des conditions sévères de sécurité. 2 500 km de pipelines existent dans le monde, 1 500 en Europe et 900 aux États-Unis mais l'extension de ce réseau est coûteuse et difficile, surtout en l'absence de d'une forte demande.

Dès lors, pour contourner ces difficultés, ne serait-il pas judicieux de produire l'hydrogène soit sur les lieux de distribution, soit à bord des véhicules et d'alimenter les PAC au fur et à mesure ?

Ces deux hypothèses reposent sur le reformage *in situ* d'un hydrocarbure : le méthanol, le méthane, l'essence ou le gazole.

Le méthanol est la solution technique la plus aisée, la génération d'hydrogène s'effectuant vers 300 °C, mais ce carburant n'est pas facilement disponible et renvoie à nouveau sur la question du réseau de distribution.

Le méthane serait aussi intéressant mais, excepté dans quelques pays, le réseau de distribution n'existe pas.

<sup>56</sup> Comprend le stockage, le transport et la distribution.

<sup>57</sup> La part station-service représente plus de 75 % du coût de l'infrastructure, le transport par pipeline environ 10 %.

Les recherches se focalisent donc sur le reformage des carburants pétroliers.

Cette solution présente l'avantage de régler la question du mode de distribution, les automobilistes continuant à faire le plein comme à l'accoutumée. Mais elle a aussi l'inconvénient de continuer de reposer uniquement sur la fourniture d'hydrocarbures liquides ce qui ne résout pas le problème de long terme de la disponibilité de cette ressource, sauf à considérer qu'ils puissent être synthétiques et/ou issus de la biomasse.

Il paraît en outre difficile de séquestrer le carbone. Peuvent-ils être stockés ou recyclés à bord ? Dans le cas contraire, le dispositif n'aurait plus d'intérêt écologique.

Un autre handicap est le coût induit du système. Ces véhicules devraient ainsi comporter une unité de reformage et une PAC renchérissant le dispositif.

A toutes ces difficultés techniques s'ajoutent celles propres à la mise au point d'un reformeur suffisamment compact pour tenir dans un véhicule. Le reformage s'effectuant à haute température, un temps de démarrage de plusieurs minutes est nécessaire et il consomme beaucoup d'énergie au démarrage. C'est en fait une usine chimique miniature qu'il faut mettre à bord.

Ces inconvénients expliquent que **la plupart des constructeurs se focalisent sur l'utilisation directe d'hydrogène dans les véhicules**, la production se faisant dans les stations-service ou de manière centralisée.

Certains constructeurs ou équipementiers poursuivent néanmoins des recherches. **L'absence pendant de longues années d'un réseau de distribution d'hydrogène rend vraisemblablement nécessaire le passage par une étape intermédiaire** : le reformage à bord (Renault, Delphi).

Renault a pu effectuer des progrès spectaculaires. Les reformeurs ont été miniaturisés, ils tiennent dans un volume compris entre 50 et 100 l. La qualité de l'hydrogène produit est devenue réellement satisfaisante (taux de CO inférieur à 100 ppm). D'importantes recherches sont en cours avec la société Nureva Fuel Cells. L'objectif est de disposer d'un reformeur démarrant en moins de 30 secondes et dont le coût ne serait pas supérieur à 700 €.



*c) Comment le transporter et le stocker ?*

Si l'hydrogène n'est pas produit à bord du véhicule, deux problèmes doivent être résolus, son transport et son stockage. Toute la difficulté vient du caractère très léger et inflammable de l'hydrogène.

- **Le stockage**

Plus léger que l'air, seuls cinq à sept kilos suffiraient pour assurer une autonomie supérieure à 500 km à un véhicule, mais 1 kg d'hydrogène représente un volume de 12 m<sup>3</sup>.

Pour résoudre cette difficulté, **trois solutions** sont possibles : la compression, la liquéfaction et l'incorporation à des hydrures ou des matériaux nanostructurés. En la matière, les objectifs à atteindre ont été définis par le DOE. Ils constituent le fil rouge des chercheurs car aucune technologie ne satisfait les objectifs 2015 :

paramètre	2005	2010	2015
énergie spécifique utile (kWh/kg)	1,5	2	3
densité d'énergie utile (kWh/kg)	1,2	1,5	2,7
coût (\$ par kWh)	6	4	2
nombre de cycles (réservoir aux 3/4 vide à réservoir plein)	500	1,000	1,500
débit de remplissage	0,5	1,5	2
perte d'hydrogène utile (grammes)	1	0,1	0,05
capacité massique (énergie spécifique)	1,5 kWh/kg 0,045 kg H <sub>2</sub> /kg	2,0 kWh/kg 0,045 kg H <sub>2</sub> /kg	3,0 kWh/kg 0,045 kg H <sub>2</sub> /kg
poids du système	111 kg	83 kg	55,6 kg
capacité volumique (densité d'énergie)	1,2 kWh/L 0,036 kg H <sub>2</sub> /L	1,5 kWh/L 0,045 kg H <sub>2</sub> /L	2,7 kWh/L 0,081 kg H <sub>2</sub> /L
volume du système	139 l	111 l	62 l
coût du système de stockage	6 \$/kWh	4 \$/kWh	2 \$/kWh
coût du système	1 000 \$	666 \$	333 \$
débit de remplissage	0,5 kg H <sub>2</sub> /min	1,5 kg H <sub>2</sub> /min	2,0 kg H <sub>2</sub> /min
temps de remplissage	10 min	3,3 min	2,5 min

© CRETEC 2011

Objectifs du DOE pour le stockage embarqué de l'hydrogène (en haut) et cahier des charges des réservoirs pour 5 kg d'hydrogène (en bas). [Source : United States Department of Energy, The Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies (HFCCIT) Program Multi-year Program Plan, May 1, 2003].

**La compression** est la solution la plus répandue car elle ne consomme que 5 à 10 % du pouvoir calorifique de l'hydrogène (PCI). Elle s'effectue dans des bonbonnes en alliage d'aluminium renforcé de fibre de verre imprégnée de résine époxy qui permettent une compression de l'ordre de 350 bars. Les prototypes actuels stockent moins de 4 kg d'hydrogène. Les solutions actuelles sont également très chères, de l'ordre de 1.000 €/kg, quoique certaines sources l'estiment au quadruple... C'est donc 7 à 28.000 € qu'il faudrait aujourd'hui dépenser pour s'assurer la même autonomie qu'avec un réservoir de 40 l à 100-150 €... Des progrès spectaculaires devront donc être accomplis.

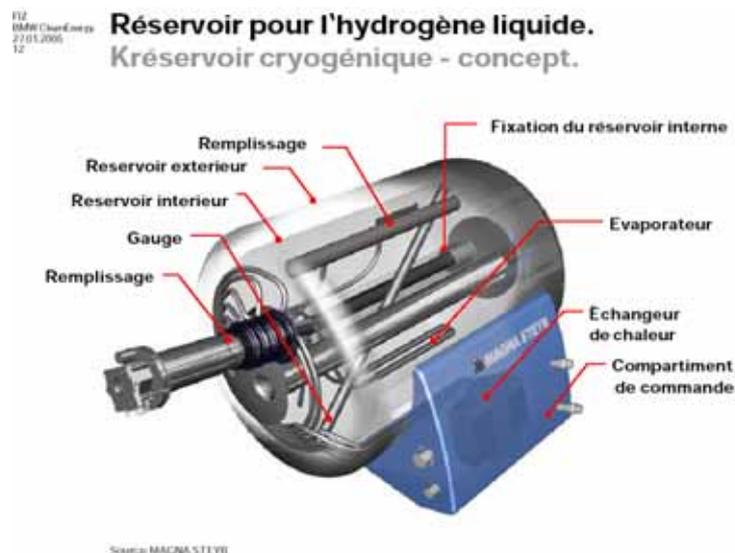
Les réservoirs hyperbares sont classés en quatre types : I entièrement métalliques, II métalliques avec frettage en fibre de verre, III composites avec liner métallique (revêtement interne), IV composites avec liner polymère.

Le poids des types I et II exclut tout usage embarqué. L'ensemble des travaux de recherche se focalisent sur les types III et IV. Le gain de poids est au minimum de 25 % et au maximum de 75 %. Entre les types III et IV, le gain est moindre, de l'ordre de 4 %. Les types IV présentent a priori tous les avantages : poids, durée de vie, résistance. Ce sont vraisemblablement les seuls réservoirs qui permettront d'atteindre les objectifs et une pression de 700 bars.

Le CEA développe des réservoirs de ce type depuis 1998. En 2000, un réservoir de 3 litres et 300 bars a été réalisé dans le cadre du programme Physe. Dans le cadre du 6<sup>e</sup> PCRD, un projet Storhy et un sous-programme Pressure, CEA est responsable du développement d'un réservoir de 48 à 150 litres à 700 bars.

**La liquéfaction à  $-253\text{ °C}$**  est une solution très intéressante, 5 kg d'hydrogène étant contenus dans 70 litres à cette température. La faible pression (0,5 bar) autoriserait des réservoirs multiformes plus faciles à intégrer dans les automobiles. Sur la 750 hl de BMW, un réservoir de 120 litres contenant 8 kg d'hydrogène est placé derrière la banquette. Des pompes robotisées permettent de faire le plein en 3 minutes.

Mais cette opération utiliserait jusqu'à un tiers du PCI. Il rend l'hydrogène difficile à manipuler et nécessite une très bonne isolation des réservoirs et le réchauffement de l'hydrogène pour son utilisation. Très volatile, l'hydrogène a aussi tendance à s'évaporer rapidement, jusqu'à 5 % du volume chaque jour.



*Réservoir d'hydrogène liquide susceptible d'être placé à bord d'une série 750 hl*

L'un des systèmes d'avenir serait **le stockage solide**. L'hydrogène sous pression se lierait à des cristaux de métal pour former des hydrures métalliques. Ils sont classés en trois groupes en fonction du type de liaison : ionique, covalente et métallique. Seuls les métaux de transition formant des liaisons métalliques permettent un stockage réversible (hydruration et déshydruration) et seraient donc utilisables dans l'automobile. Il s'agirait en quelque sorte d'une éponge libérant l'hydrogène grâce à la chaleur de la pile. Seraient ainsi éliminés une grande partie des risques liés à la manipulation de l'hydrogène gazeux (étanchéité, sécurité). Le stockage solide égalerait la solution liquide en termes de compacité.

Le programme européen StorHy (6<sup>e</sup> PCRD) est consacré en partie à ces recherches. Les alliages les plus légers sont explorés : magnésium, nickel, lithium, à base d'aluminium (alanates) ou de bore (borohydrure). Les hydrures de sodium et les hydrures d'aluminium sont également étudiés par General Motors et Sandia.

Ces réservoirs ont plusieurs inconvénients. Pour l'instant, le poids des réservoirs est de l'ordre de 300 kg. Plusieurs sont pyrophoriques, c'est-à-dire qu'ils prennent feu spontanément au contact de l'air. Enfin, les températures et les pressions nécessaires sont souvent très élevées. Cela conduit certains experts à considérer que cette voie ne pourra pas être utilisée dans l'automobile.

Des recherches plus prospectives sont néanmoins menées dans le domaine du stockage solide.

Des chercheurs néerlandais de l'université de Delft cherchent à stocker l'hydrogène dans la glace en formant des hydrates d'hydrogène. Ces recherches permettraient le stockage de 6 kg d'hydrogène dans un volume de 120 litres.

Les nanomatériaux carbonés, nanotubes ou charbons actifs, offrent des perspectives intéressantes. Depuis 1997<sup>58</sup>, de nombreuses publications ont été faites sur les nanotubes, notamment par des laboratoires japonais. Il n'est cependant pas possible d'avoir une certitude sur l'avenir de cette filière. Les charbons actifs pourraient être utilisés dans des réservoirs cryogéniques. Le CEA travaille sur ce sujet dans le projet Cash (Charbons actifs pour le stockage de l'hydrogène) en partenariat avec Veolia et l'École des mines. Pour l'instant, aucun prototype de réservoir n'a été construit.

- **La distribution**

La diffusion de voitures à pile à combustible est bloquée par la faiblesse du nombre de stations de ravitaillement. Il en existe 70 dans le monde et encore nombre d'entre elles sont uniquement expérimentales et ne

---

<sup>58</sup> A.C. Dillon, *Nature* n°386, p.377

peuvent en aucun cas servir le grand public. Est d'ailleurs expérimentée en même temps la production *in situ* d'hydrogène.

Honda exploite un site pilote dans l'état de New-York, aux États-Unis (Latham) qui produit, par vaporéformage du gaz naturel, l'hydrogène nécessaire à une seule voiture chaque jour. Honda dispose également d'une autre station en Californie (Torrence) qui fabrique de l'hydrogène pour une seule voiture par jour mais par électrolyse de l'eau grâce à l'électricité fournie par des panneaux photovoltaïques. A la connaissance de vos rapporteurs, une seule station existe en France, sur la piste d'essai de Miramas.

En réalité, très peu de stations sont proches d'un modèle grand public. Le groupe Total met en œuvre une station-service de ce type à Berlin. Les réservoirs d'hydrogène sont enterrés et la pompe d'hydrogène jouxte celles des autres carburants. Elle donne une bonne idée de ce que pourrait être ce type d'installation à l'avenir. Mais alors l'hydrogène n'est pas fabriqué sur place.

La création d'un véritable réseau de stations à hydrogène n'est toutefois pas hors de portée. **General Motors espère diffuser rapidement des modèles aux États-Unis et a fait réaliser une étude qui évalue entre 10 et 15 milliards d'euros la construction de 11 700 stations**, ce qui permettrait de disposer d'une station tous les trois kilomètres en zone urbaine et tous les 40 km sur autoroute.

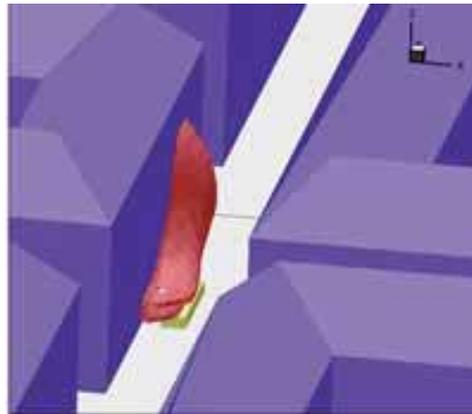
L'État de Californie, ainsi que le Canada en Colombie britannique à l'occasion des JO de Vancouver, ont entrepris la construction d'une « *autoroute de l'hydrogène* ». En Californie, d'ici 2010, 150 à 200 stations-service devraient être construites (une tous les 35 km) le long des principales routes de l'État. L'hydrogène devrait être produit par des panneaux solaires. Cela semble difficile car les performances actuelles sont insuffisantes et la plupart des stations existantes ne fonctionnent pas selon ce principe, selon ce qu'ont pu constater vos rapporteurs.

Par ailleurs, l'existence de stations ne résoudrait pas le problème de leur alimentation soit par canalisation, soit par camion citerne. Les deux solutions se pratiquent déjà mais les déployer à tel niveau n'est pas sans inquiéter. Des accidents anciens ont entraîné une forte défiance vis-à-vis de l'hydrogène.

Les questions de sécurité sont fondamentales. Le risque est un peu différent de celui du méthane : 8 fois plus léger, il se diffuse 4 fois plus vite, ce qui réduit les risques. Par unité volumique de gaz, l'énergie explosive théorique est 3,5 fois plus faible. En revanche, sa limite inférieure d'inflammation est plus basse (4 % au lieu de 5 %) et sa limite supérieure d'inflammation (concentration à partir de laquelle il n'est plus inflammable) est nettement plus élevée (75 % contre 15). L'énergie nécessaire pour

l'enflammer est 10 fois plus faible. Enfin, si la flamme d'hydrogène rayonne peu, elle se propage 7 fois plus vite.

De très nombreux travaux sont menés à ce sujet aux États-Unis, en Allemagne ou au Japon. Vos rapporteurs ont pu voir à plusieurs reprises les résultats des études et des tests.

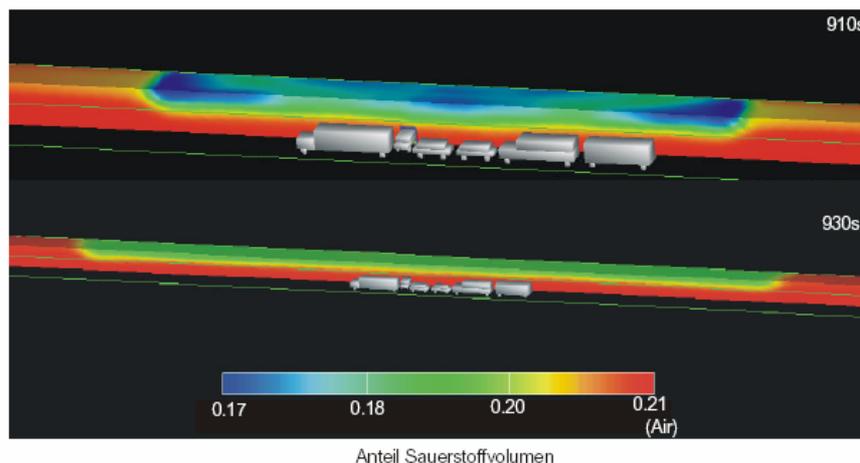


*Modélisation de l'explosion d'un camion citerne en ville, 10 secondes après la fuite<sup>59</sup>*

De même, dans un tunnel, la phase d'inflammation est très rapide et, surtout, l'hydrogène ne reste pas au niveau des véhicules et des passagers mais monte immédiatement au niveau du toit du tunnel où il se diffuse. Sa combustion utilise

**Vertikale Verteilung von Sauerstoff im Tunnel:  
- geschichtete Struktur einer Verbrennung unterhalb der Decke**

Untere Sauerstoffgrenze für Personen ist 12%



<sup>59</sup> Source : RDT info n°42 idid.

*d) Les programmes de démonstration*

Les programmes de démonstration ont tendance à se multiplier aujourd'hui aux États-Unis, au Japon et en Europe. Ils permettent de démontrer les potentialités de la filière et de mettre en lumière les difficultés à surmonter avant la généralisation.

L'un des points clefs est la détermination de la nature et de la qualité de l'hydrogène à fournir (compression, niveau de pureté...). Il s'agira ensuite de développer et normaliser les technologies attenantes. Ce travail s'effectue à Genève au sein d'un groupe de travail ISO. Les premiers cadres normatifs pourraient être prêts en 2010.

En Europe, la Commission et les PCRD sont de puissants fédérateurs. La politique globale en la matière a été définie par un « *groupe de haut niveau* », créé en 2002 et qui a rendu son rapport en juin 2003 : « *Hydrogène et piles à combustible : une vision pour notre avenir* ». Plusieurs programmes sont achevés ou en cours. Ce rapport a notamment conduit à la création en septembre 2003 d'une plate-forme technologique « Hydrogène et PAC » et a influencé la préparation du 6<sup>e</sup> PCRD. Depuis janvier 2004, la plate-forme est formée. Elle est dirigée par les spécialistes hydrogène de Shell, Daimler-Chrysler et de l'ENEA italienne. Le développement de la PAC dans les transports est aussi le fruit des réflexions menées dans le cadre du *Livre Blanc sur le transport* et du *Livre Vert sur l'énergie*.

Cette préoccupation est croissante dans les différents PCRD. Dans le 4<sup>e</sup> (1994-1998) 54 M€ y avaient été consacrés.

Dans le 5<sup>e</sup> PCRD (1998-2002), ce sont 150 M€ qui ont permis de financer 70 projets animés par quelques réseaux européens. Ainsi, le réseau Fuero regroupe des constructeurs automobiles qui évaluent différents types de PAC (Fiat, Peugeot, Renault, Volkswagen, Volvo).

Le 6<sup>e</sup> PCRD (2003-2006) consacre 810 M€ pour l'énergie, dont 640 M€ pour les transports. Cela résulte en partie de la prise de conscience qui s'est opérée au début des années 2000 avec la mise en place d'un groupe de haut niveau, d'une plate-forme technologique et d'un programme *Quickstart*.

**Le programme CUTE** (Clean urban transport for Europe) est doté d'un budget de 54 millions €, dont 18 de l'UE. Il fédère une trentaine de participants : constructeurs, chercheurs, opérateurs de transport et municipalités.

Il a pour objectif de mettre en service et d'étudier le fonctionnement, en condition réelle de service, de 27 prototypes de bus à hydrogène dans neuf villes européennes. Les bus roulent depuis début 2004 à Porto, Madrid, Stockholm, Stuttgart, Londres et Reykjavik (programme spécifique ICTOS). Il

a notamment l'intérêt d'expérimenter toutes les possibilités de production, de transport et de stockage d'hydrogène.

Vos rapporteurs n'ont pu que constater, sans en avoir l'explication, **l'absence complète d'acteurs ou de villes françaises**. Peut-être est-ce lié à l'arrêt au bout de trois ans de l'expérience menée à Chicago avec trois bus et qui a du être arrêtée en raison de son coût ?

La France participe cependant à ces recherches difficiles. Les initiatives ne datent que de la fin des années 1990 (création du réseau PACO en 1999) et le financement reste peu important, 10 M€ dans ce cadre.

Malgré ces efforts, les États-Unis, le Japon et le Canada semblent beaucoup plus avancés. Dans tous ces pays, les États prennent en charge le développement des infrastructures.

Au Canada, deux projets de couloirs à hydrogène sont en cours : liaison États-Unis-Whistler (Colombie britannique) pour les Jeux olympiques d'hiver de 2010 et un autre entre Windsor (Ontario – ville frontière de Detroit) et Montréal (Québec), soit plus de 900 km. Ces initiatives visent à conforter l'avance technologique de la firme canadienne Ballard installée à Vancouver et à utiliser de confortables surplus budgétaires.

**Pour les États-Unis, l'économie de l'hydrogène est un objectif majeur visant à les libérer de la dépendance du pétrole importé du Moyen-Orient** et du risque de changement climatique sans modifier leur mode de vie.

Le principal souci du DOE est bien la dépendance du secteur des transports vis-à-vis de sources pétrolières et gazières étrangères alors même que la demande mondiale va croissant. La production domestique est inférieure à la consommation américaine depuis le milieu des années 1980 et inférieure à celle des « light trucks » et des automobiles depuis l'an 2000. L'environnement et la qualité de l'air ne viennent qu'ensuite dans l'ordre des priorités.

Pour faire face à ces défis, le FreedomCar Partnership est le principal programme Gouvernemental. Il a pour objectif d'assurer le développement des technologies liées à l'hydrogène, des infrastructures et de permettre le passage à l'étape commerciale. Il s'inscrit dans une vision en plusieurs phases permettant le passage à l'économie sans carbone. La phase de transition (infrastructures, applications stationnaires) devrait se dérouler entre 2010 et 2025. Le développement commercial devrait se développer à partir de 2015 et l'économie de l'hydrogène prendre une réelle ampleur à partir de 2025. Selon le DOE, la production de voitures à PAC ne devrait pas intervenir avant 2020, mais la décision sera prise dès 2015.

Au total, ce programme et celui plus spécifique sur la pile à combustible représentent un budget pluriannuel (2004-2008) de **1,7 milliard de dollars**. Ces investissements vont de pair avec des objectifs précis de performance en termes d'autonomie (+ 300 miles en 2015), de durée de vie (5000 h) et de prix.

Au niveau des États, plusieurs initiatives sont en cours, dont principalement le *California Fuel Cell Partnership*, créé en 1999. Il s'agit d'un ambitieux programme de démonstration visant à promouvoir les véhicules zéro émission fonctionnant à l'hydrogène. Il devrait regrouper 300 véhicules en 2007. Tous les constructeurs présents aux États-Unis en font partie. En 2005, 33 stations-service sont sous sa direction.

- **Quel bilan écologique global ?**

En novembre 2003, une étude intitulée « *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context* » a été publiée. Elle a été menée conjointement par le Centre commun de recherche de la Commission européenne (JRC), le CONCAWE (association européenne des compagnies pétrolières) et EUCAR, dépendant de l'association européenne des constructeurs automobiles (AECA).

Cette étude a permis d'évaluer les performances écologiques du puits à la roue des différentes filières sur 100 km, tant en termes de consommation que d'énergie et d'équivalent CO<sub>2</sub> émis.

Elle a ainsi démontré que le véhicule PAC alimenté par de l'hydrogène comprimé issu de l'électrolyse de l'eau avec de l'électricité d'origine éolienne ou issu de la gazéification du bois (biomasse) présentait les meilleurs résultats en termes de rejet des gaz à effet de serre. En termes de consommation d'énergie, le gain est faible par rapport aux performances d'un véhicule hybride. Surtout, le potentiel de production d'hydrogène par ces deux voies est aujourd'hui très faible.

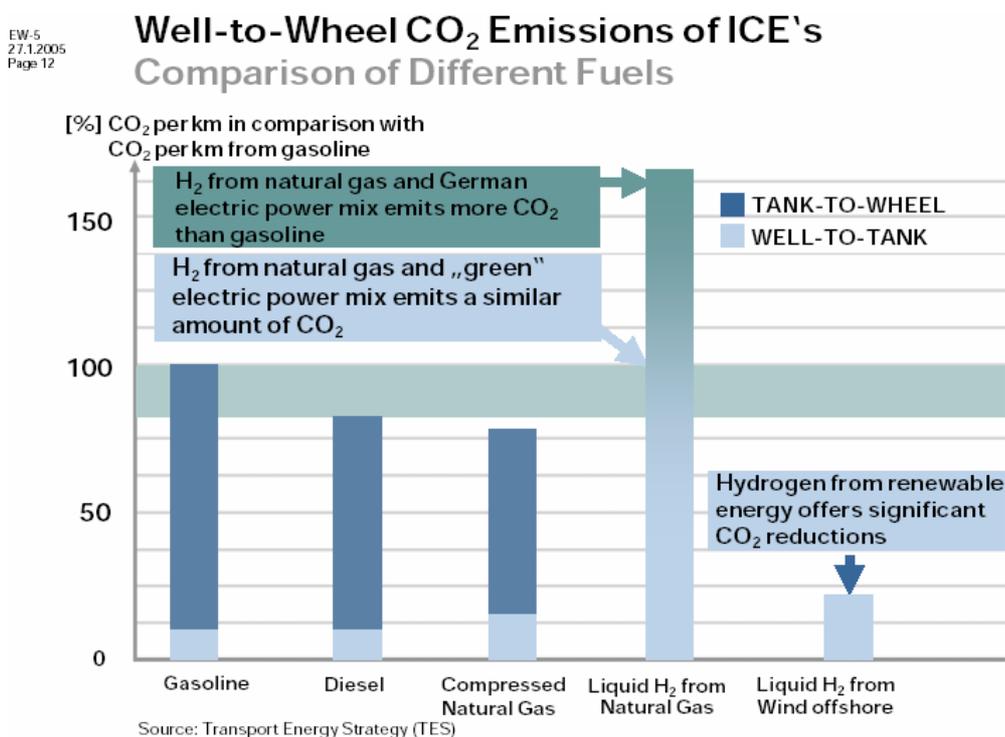
Le véhicule PAC alimenté en hydrogène comprimé issu de l'électrolyse a des performances très contrastées. Si l'électricité n'est pas d'origine nucléaire, elle ne présente aucun avantage. D'origine nucléaire, elle assure une excellente performance en termes de rejet de gaz à effet de serre mais plus médiocre en termes de consommation d'énergie (500 MJ environ, contre 150 pour les deux filières précédentes).

Le véhicule PAC utilisant de l'hydrogène issu du gaz naturel est intéressant. Il permet une réduction de 30 % de la consommation d'énergie et de 50 % des rejets de GES par rapport au MCI gazole. Les performances potentielles d'un hybride gazole réduisent très sensiblement l'intérêt de cette filière : - 15 % d'énergie et - 35 % de GES. L'utilisation d'un hydrogène liquéfié pénalise de 30 % les performances d'un tel dispositif.

Les solutions étudiées avec PAC et reformeur embarqué ne donnent que peu d'avantages par rapport aux moteurs à combustion interne actuels et équivaldraient à un hybride gazole.

Il faut ainsi noter que le véhicule MCI hybride gazole serait plus efficace que plusieurs solutions à pile à combustible lorsque l'hydrogène est issu du charbon (équivalent au moteur gazole actuel) ou de l'électricité non nucléaire.

Le graphique ci-dessous qui a été présenté à vos rapporteurs chez BMW confirme ces données.



- **Quel bilan économique global ?**

Le bilan écologique du puits à la roue de chaque filière ne peut conduire, seul, à une décision de politique publique. Il faut croiser ces données avec un bilan économique. A cet égard, M. Stéphane His, qui a rédigé la note Panorama 2004 de l'IFP, apporte des informations très utiles.

La prise en compte du critère économique met à égalité les filières hydrogène comprimé et hydrogène liquéfié. Si la liquéfaction consomme beaucoup d'énergie, elle est beaucoup moins onéreuse que la compression. Il se focalise néanmoins sur la seule filière hydrogène comprimé, puisque c'est celle-ci qui est surtout explorée aujourd'hui.

Le coût « du puits au réservoir » varie de 20 à 50/GJ. La filière la moins chère est l'extraction de l'hydrogène à partir du gaz naturel. L'extraire du charbon ou de la biomasse est 30 à 50 % plus cher. L'électrolyse est l'une des méthodes les plus onéreuses mais elle varie en fonction du prix de l'électricité (+ 40/GJ en France).

Évidemment, ces évaluations sont relatives et soumises à l'évolution des cours. En prenant pour base un prix de brut à 25 \$/b, le coût de revient « du puits au réservoir » est de 8/GJ. Il faudrait donc que le prix du brut soit multiplié par 4 ou 5 (100-125 \$/b) pour rendre compétitives les filières hydrogène actuelles.

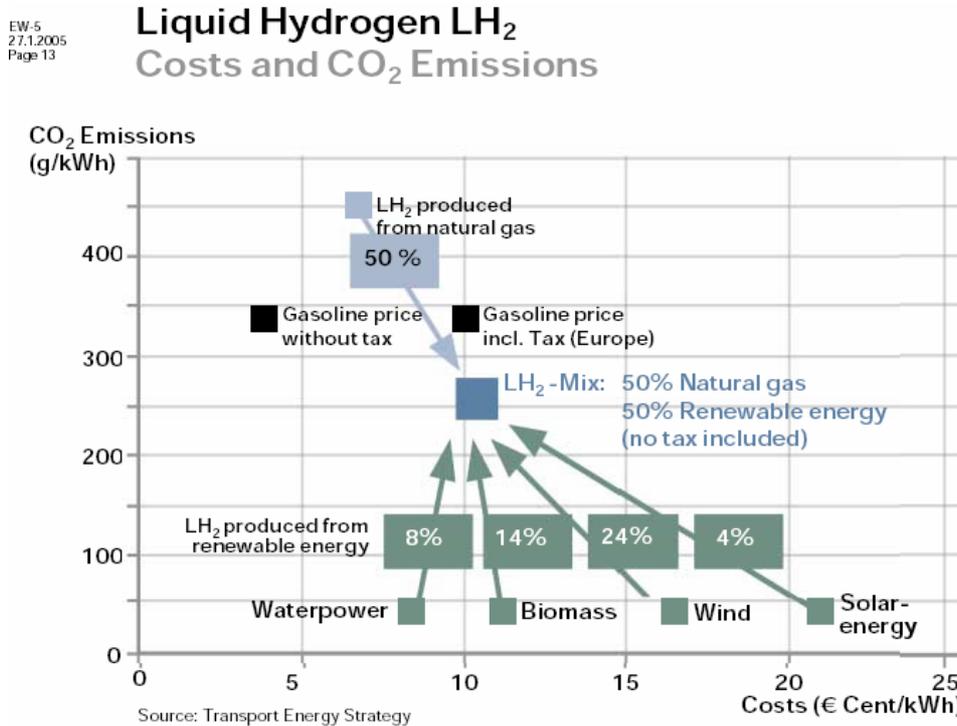
Pour approfondir l'analyse, il faut vérifier si, une fois à bord, les véhicules équipés de PAC ne sont pas moins chers. Pour effectuer ce calcul, l'étude européenne a pris pour hypothèse que le véhicule PAC coûterait le même prix d'achat et d'entretien qu'un véhicule doté d'un MCI— ce qui est aujourd'hui extrêmement optimiste et favorable à la filière hydrogène. Un coût de revient aux 100 km alors été calculé :

	Consommation (MJ/100 km)	Coût du carburant (euros/GJ)	Coût (euros/ 100 km)
MCI + essence	224	8	1.8
MCI + gazole	184	8	1,5
MCI hybride + gazole	141	8	1.1
PAC + H <sub>2</sub> comprimé ex-gaz naturel	84	25	2.1
PAC + H <sub>2</sub> comprimé ex- charbon	84	32	2.7
PAC + H <sub>2</sub> comprimé ex- biomasse	84	37	3.1
PAC + H <sub>2</sub> comprimé ex-EDF	84	42	3.5

Cette analyse est extrêmement intéressante. Elle montre que la filière PAC, quelle que soit l'origine de l'hydrogène, est jusqu'à 100 % plus chère que les solutions traditionnelles, dans une hypothèse extrêmement favorable d'égalité de coût d'achat et d'entretien qui ne correspond pas à la réalité.

Le coût des piles actuelles est de l'ordre de 3.000 €/kW, contre 30 à 50 €/kW pour les MCI actuels.

Là aussi l'analyse coût-émission présentée par BMW converge :



Au final, l'analyse de l'ensemble de la filière hydrogène permet d'aboutir aux conclusions suivantes :

- l'hydrogène est l'un des vecteurs énergétiques du futur. Son potentiel est très élevé mais ni la technologie, ni son coût économique ne permettent d'envisager une large diffusion dans le moyen terme et même tout simplement à un horizon fiable ;

- la technologie hybride diesel est le mode de transition énergétique le plus prometteur car il procure le meilleur rapport gain écologique/efficacité énergétique/coût économique. Cette technologie sera largement disponible dès le début de la prochaine décennie ;

- si la rupture technologique annoncée en matière de batteries et de stockage de l'électricité se produit, il est très probable qu'elle réduise énormément l'intérêt d'une filière hydrogène, voire qu'elle en reporte l'apparition pour de nombreuses décennies.

## V. PRINCIPALES CONCLUSIONS ET PROPOSITIONS DES RAPPORTEURS

### *A. LA MOBILITÉ DURABLE POUR PRÉSERVER L'ENVIRONNEMENT ET LA CROISSANCE ÉCONOMIQUE*

La croissance de l'économie se nourrit d'une demande toujours plus importante d'énergie et de transport. *A contrario*, le renchérissement de l'énergie ou la limitation de la mobilité a un impact négatif sur le développement économique.

**Les prévisions faites actuellement d'évolution de la demande d'énergie, + 60 % à l'horizon 2030, et de transport routier, doublement du parc à l'horizon 2020, ne sont pas soutenables au regard de la protection de l'environnement** compte tenu de la prépondérance des hydrocarbures. Le danger est d'autant plus fort que nos sociétés demandent aux constructeurs des voitures de plus en plus confortables et sûres et donc plus lourdes et consommatrices de carburant.

**Pourtant, préserver le potentiel de croissance économique par la fourniture d'une énergie abondante à prix raisonnable et par le libre usage des moyens de transport apparaît comme un objectif politique majeur pour le futur.**

Dès lors, il paraît impératif de chercher à rendre la croissance et les transports moins producteurs de polluants et de gaz à effet de serre en leur apportant une énergie propre ou en mettant au point des dispositifs plus économes.

Cependant, les progrès technologiques peuvent-ils apporter seuls la solution ? La consultation des experts conduit **vos rapporteurs à estimer qu'une part prépondérante des économies d'émissions attendues dans le secteur des transports peut provenir de nouvelles technologies**, l'ordre de grandeur des deux tiers a été avancé. **Mais elles ne suffiront pas et nos sociétés devront s'engager vers une évolution importante de l'organisation du système de transport mais aussi des comportements.**

## ***B. POURSUIVRE LA RÉDUCTION DE LA POLLUTION LOCALE : UNE NÉCESSITÉ***

**Les progrès spectaculaires en matière de rejet de polluants locaux** accomplis grâce aux progrès technologiques et à la sévérisation des normes européennes **a permis une amélioration sensible de la qualité de l'air.**

Toutefois **des problèmes subsisteront, à l'horizon 2010, à proximité des axes les plus fréquentés, notamment en matière d'oxydes d'azote et de particules.**

**La pollution urbaine est une importante question de santé publique.** Si les études sont difficiles à mener puisqu'elles doivent se faire dans la durée, sur un grand nombre d'individus, et prendre en compte un ensemble particulièrement complexe de critères, **le lien entre les principaux polluants et des risques sur la santé, y compris d'aggravation de la mortalité, sont de plus en plus fermement établis.**

Ce constat ne peut inciter qu'à **approfondir les recherches et accélérer la réduction des émissions polluantes.**

Pour les particules, **la technologie des filtres fermés mise au point par PSA Peugeot Citroën donne pleine satisfaction** car elle assure la capture de la quasi-totalité des particules y compris les plus fines.

**Sa diffusion est insuffisante et doit être accélérée.**

**Pour les oxydes d'azote, les technologies étudiées sont proches de la maturité et pourront vraisemblablement commencer à entrer en service avant 2010.**

A partir de 2010, pourront être commercialisés de nouveaux types de technologies de combustion qui diminueront beaucoup l'importance des systèmes de post-traitement en éliminant une grande partie des polluants dans le moteur.

En revanche vos rapporteurs sont réservés sur le développement futur du GPL et du GNV.

### ***C. RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE : LE DÉFI DE L'AUTOMOBILE***

**Le respect de la division par quatre des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 dans le secteur des transports est un véritable défi.** A plus court terme, le respect par les constructeurs automobiles de leur engagement volontaire à réduire les émissions à hauteur de 140 g/km, puis 120 g/km, paraît ardu.

Aujourd'hui, de nombreuses technologies ou filières sont scientifiquement et économiquement concurrentes ou complémentaires.

En matière d'émissions de gaz à effet de serre, la priorité doit être donnée à des solutions massivement diffusables pour avoir un impact significatif.

**Dans l'immédiat, la motorisation diesel est la solution la plus efficace et la moins chère pour réduire les émissions en Europe, où le diesel est massivement diffusé.** Les constructeurs sont parmi les mieux placés.

En revanche, au Japon et aux États-Unis, marchés sur lesquels très peu de voitures diesel sont commercialisées, l'hybride prendra une part croissante dans les prochaines années.

**Les filières GPL et GNV peuvent apporter un complément intéressant, mais l'absence de véhicules dédiés en dehors des flottes captives et les difficultés de développement de ces filières empêcheront vraisemblablement que leur apport à la réduction des émissions de gaz à effet de serre soit significatif.**

**L'expérience suédoise en matière de développement des véhicules flexibles en carburant** admettant aussi bien de l'éthanol que de l'essence est également **extrêmement prometteuse**, d'autant plus que des constructeurs pourraient commercialiser ce type de véhicules en tous pays.

**A moyen terme, le développement des biocarburants en mélange avec les carburants classiques est très intéressant puisqu'il peut toucher l'ensemble du parc automobile.**

A moyen terme également, vos rapporteurs **sont convaincus que la motorisation hybride se développera fortement sur tous les marchés, compte tenu de sa polyvalence de combinaison avec tous les types de carburants et de motorisations (diesel, essence, biocarburants, hydrogène...),** tout en laissant durablement une part prépondérante du marché à d'autres types de motorisation.

Vos rapporteurs estiment également que **la voiture électrique pourra prendre une part significative du marché si elle confirme dans les prochaines années les progrès accomplis en matière de batteries faisant espérer un rayon d'action allant au-delà de 200 km et si elle reste compétitive en matière de coût.**

**Durant les dix prochaines années, les recherches se poursuivront pour améliorer très significativement la consommation des moteurs à essence et permettront de mettre sur le marché de nouveaux modes de combustion.**

A partir de 2010-2015, il est tout à fait envisageable que les progrès faits en matière de batteries puissent permettre soit un développement supplémentaire des véhicules purement électriques, qui monopoliseront alors certains usages, soit un accroissement significatif des performances des véhicules hybrides. **Vos rapporteurs sont convaincus qu'un véhicule hybride rechargeable présente de grandes potentialités qui pourraient alors se concrétiser.**

A partir de 2015, il est également possible que la production de biocarburants à partir de la biomasse se développe.

Des scénarios au-delà de 2015 sont très difficiles à écrire, mais la majorité des experts s'accordent à dire que la voiture à pile à combustible ne sera, au mieux, qu'au tout début de sa vie commerciale. **Il est même probable que la filière hydrogène ne se développera pas avant 20 ans.**

**Dans tous les cas, c'est à l'aune d'une analyse approfondie du cycle de vie des véhicules que devront se faire les choix futurs.** La voiture électrique ne pourra se développer que si elle trouve à s'alimenter en une énergie sans CO<sub>2</sub> et la pile à combustible en un hydrogène exempt de gaz à effet de serre.

#### ***D. PROPOSITIONS DE VOS RAPPORTEURS***

**1-** Faire un bilan coût avantage des nouvelles réglementations en matière d'automobile au regard de l'objectif prioritaire de réduction de l'effet de serre.

**2-** Généraliser rapidement les filtres à particules « fermés » sur les véhicules diesel.

**3-** Définir une date de généralisation des dispositifs d'élimination des NOx en liant la norme Euro VI à la norme Euro V.

**4-** Décider dans cinq ans de l'arrêt ou de la poursuite du soutien public à certaines filières.

**5-** Intégrer la climatisation et les autres auxiliaires dans les cycles européens normalisés de contrôle de consommation et d'émission.

**6-** Proposer au niveau européen, à l'horizon 2010, la création d'une étiquette synthétique multicritère apposée sur les voitures dans les concessions pour les modèles de conception nouvelle.

L'analyse du cycle de vie des automobiles doit se généraliser pour donner au consommateur une information fiable et comparable. L'étiquette énergie mise en place en 2006 est très positive mais insuffisante.

**7-** Étendre dès 2007 l'application de l'étiquette énergie aux véhicules d'occasion vendus par des professionnels, aux véhicules utilitaires légers et aux deux roues.

**8-** Mettre en œuvre des mesures favorables aux utilisateurs des véhicules les moins polluants : parkings gratuits, voies rapides (couloirs bus, covoiturage), circulation à vitesse normale les jours de pics de pollution...

**9-** Au niveau européen, lancer les études préliminaires pour évaluer l'impact de l'intégration des émissions des véhicules vendus par les constructeurs dans le marché européen des émissions de CO<sub>2</sub>, si l'ACEA ne tient pas son engagement volontaire de réduction des émissions.

**10-** Accélérer les recherches sur les hybrides.

**11-** Réaliser le plan biocarburants et abaisser les coûts de production pour les rendre compétitifs sans soutien financier public.

\* Donner la priorité à la substitution au gazole.

\* Étudier la mise en place d'une filière « *fuel flexible* » aux Antilles puis en métropole.

- \* Étudier l'incorporation directe d'éthanol en hiver.
- \* Modifier la réglementation européenne pour permettre des incorporations plus importantes.

**12-** Modifier la loi sur l'air pour retenir une définition de la voiture dite « propre » à partir de ses performances et non de filières *a priori*, une définition révisable tous les cinq ans et qui pourrait être fondée pour l'instant sur l'émission de 115 g de CO<sub>2</sub>/km ou moins et le respect anticipé de la norme Euro V (particules).

### ***E. LE VÉHICULE DU FUTUR : ÉCONOME ET MOINS POLLUANT***

Le véhicule du futur sera nécessairement plus propre et plus économe. C'est-à-dire qu'il **tendra de plus en plus vers une valeur d'émission nulle et la réduction de son impact global sur l'environnement.**

Définir le véhicule « propre et économe » n'a pas pour finalité un absolu distinguant le propre du sale et l'économe du dispendieux en carburant. Cette définition, permettant de distinguer les véhicules les plus vertueux par rapport aux autres, est un outil législatif et fiscal visant à orienter l'offre des constructeurs et la demande des consommateurs.

Aujourd'hui, **la majorité des experts s'accordent sur le caractère obsolète de la définition légale de 1996, tandis que fleurissent des classements réalisés par différents organismes ou associations ayant tous pour objectif une définition multicritères.**

**En effet, vos rapporteurs estiment que cette définition ne doit pas se fonder sur la technologie ou le type de carburant mais sur les performances, soit les émissions polluantes, les rejets de gaz à effet de serre et finalement l'impact environnemental du puits à la roue sur l'ensemble du cycle de vie.**

**La distinction par filière, telle qu'elle existe depuis 1996 dans la loi sur l'air et le code général des impôts, n'est plus pertinente.** De plus, la définition retenue en 1996 **ne prend pas en compte l'impact de l'automobile sur l'effet de serre.** Or, depuis cette date, les recherches ont suffisamment progressé pour établir avec un très haut degré de probabilité le lien de corrélation entre les émissions anthropiques de GES et l'effet de serre. La réduction de l'impact sur l'effet de serre doit devenir un des critères à côté de la diminution de la pollution locale.

Une filière n'est pas propre par nature. La voiture électrique est « sale » si l'électricité qui l'alimente rejette des polluants et des GES. Il en est de même du GPL, du GNV, de l'hybride ou de la voiture à hydrogène en fonction des situations. De même, au regard de la santé comme du climat et des objectifs fixés, la distinction technique entre les performances des véhicules diesel et des véhicules essence ne devra plus être retenue.

De même, **la prise en compte de l'usage (nombre de places, charge, fonction, type) ou du lieu d'utilisation (ville, extra urbain) n'est pas pertinente** pour définir le caractère propre et économe d'un véhicule de manière générale. Un 4 x 4 hybride peut être beaucoup plus propre que bien des monospaces, un roadster que de petites citadines. Inversement, les deux roues sont fréquemment beaucoup plus polluantes que les voitures.

Par ailleurs, la définition du véhicule propre et économe sera **nécessairement révisable en fonction des évolutions technologiques, des capacités de mesure des émissions et des recherches en matière de climat et de santé.**

**Vos rapporteurs proposent donc une réforme de la loi sur l'air de 1996 pour sortir d'une logique de filière et passer à une logique de performance et d'objectif en matière de protection de la santé et du climat.**

Cette définition légale doit être **révisable tous les cinq ans.**

Elle doit **servir de base aux éventuelles incitations fiscales** destinées à favoriser le renouvellement du parc par des véhicules dont les émissions sont moindres, dans le cadre de la réglementation européenne.

A cet égard, la question se pose aujourd'hui de savoir s'il vaut mieux afficher une prime importante (1.500 à 3.000 €) touchant très peu de véhicules et restant peu utilisée ou donner une incitation plus générale mais peut-être moins importante à acheter des véhicules de plus large diffusion. Vos rapporteurs estiment qu'il est **temps de promouvoir un réel renouvellement du parc et d'orienter les consommateurs vers les véhicules disponibles et accessibles en termes de prix. Les objectifs de protection du climat et de la santé ne seront atteints que si les technologies économes et propres se diffusent très largement** et non au sein d'une élite étroite. Ce qui n'interdit pas, dans le principe, de créer une incitation spécifique pour les véhicules les plus avant-gardistes atteignant des performances exceptionnelles.

Cette définition sera aussi la base des **éventuelles incitations commerciales**, comme les primes d'assurance, relatives au caractère peu polluant et économe en carburant des véhicules.

Elle pourra enfin être la base d'éventuelles **réglementations d'accès aux centres villes, attributions d'avantages (parking gratuit, voie prioritaire...) ou créations de péages urbains.** Il appartiendra alors aux autorités locales de prendre éventuellement en compte le nombre de passagers comme cela se fait dans les pays étrangers.

**Aujourd'hui, selon vos rapporteurs, compte tenu de la technologie, de la réglementation, des objectifs de réduction des émissions et de leur évolution dans les cinq prochaines années, devraient être considérés comme propres et économes les véhicules émettant 115 g de CO<sub>2</sub> ou moins et respectant par anticipation la norme européenne Euro V sur les particules.**

Vos rapporteurs n'ont pas retenu la limite de 120 g/km difficile à retenir car elle conduit à prendre en considération près de 300.000 véhicules, ce qui semble au-delà des financements disponibles pour une incitation fiscale.

La valeur de 115 g (140 000 véhicules vendus en 2004) leur semble cohérente car entrent dans cette catégorie **les 10 véhicules diesel et les 4 véhicules essence les plus économes** selon le classement de l'ADEME. Il s'agit pour les véhicules essence des Toyota Prius, Daihatsu Cuore et Smart Fortwo. La Honda Civic hybride IMA serait exclue (116 g). Parmi les véhicules diesel se trouvent la Smart ForTwo de 1<sup>ère</sup> génération, certains modèles de Citroën C 2 et C 3, de Peugeot 206 et 1007, de Renault Clio, un modèle de Toyota Yaris et de Fiat Panda.

**Cette valeur devra dans tous les cas être définie en pleine concertation avec les constructeurs.**

La référence à la norme Euro V correspond pour les véhicules diesel à **l'équipement systématique en filtres à particules**. Son subventionnement est permis par la réglementation européenne. Il est pratiqué par certains de nos partenaires.



# **ANNEXES**



## ANNEXE 1 : EXAMEN DU RAPPORT PAR L'OFFICE

L'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques a examiné le rapport de MM. Christian Cabal et Claude Gatignol, députés, sur « *La définition et les implications du concept de voiture propre* », au cours de sa réunion du 13 décembre 2005, sous la présidence de M. Henri Revol, sénateur, Président, puis de M. Claude Birraux, député, Premier vice-président.

**M. Christian Cabal, député, rapporteur**, a indiqué que la notion de « véhicule propre » avait émergé dans les années 1990, en fonction du développement de la pollution locale et de ses effets sanitaires. Ce n'est seulement que depuis quelques années qu'elle vise aussi les émissions des gaz à effet de serre. La hausse récente des prix du pétrole l'a reliée à la question des économies d'énergie. Les Etats-Unis se sont, pour leur part, engagés dans d'importants programmes de recherche visant à mettre au point une voiture fonctionnant avec de l'hydrogène pour se soustraire à la dépendance des hydrocarbures importés.

La voiture reste avant tout un phénomène de société, symbole de la liberté individuelle, a souligné **M. Claude Gatignol, député, rapporteur**. Trente-six millions de véhicules circulent en France, dont trente millions de voitures particulières. Leur nombre croît chaque année, quoique de moins en moins vite (+1,2 % en 2004). L'industrie automobile a, en outre, un poids très important dans notre économie : elle représente près de 90 milliards de chiffre d'affaires et 300.000 emplois. Au-delà de ces approches sociales et économiques de l'automobile, le rapport avait pour objectif de traiter les questions environnementales liées à la pollution locale et aux émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'usage des automobiles. A cet égard, la France apparaît comme l'un des pays les mieux placés, les petites cylindrées diesel y étant nombreuses, permettant des émissions sensiblement inférieures à celles d'autres pays européens. Le développement du diesel est une spécificité française, puisque cette motorisation est réservée aux usages lourds aux États-Unis et au Japon.

**M. Christian Cabal, député, rapporteur**, a ensuite abordé la première partie du rapport consacrée à la problématique de la mobilité durable. Un lien fort existe entre la croissance économique et la croissance de la

demande d'énergie et de transport. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) prévoit une hausse de 60 % de la demande, essentiellement en hydrocarbures fossiles, d'ici à 2030. De surcroît, le parc de véhicules devrait passer d'environ 700 millions aujourd'hui à 1,2 milliard en 2020. Ces véhicules sont d'ailleurs de plus en plus sûrs et confortables mais aussi plus lourds et plus puissants et donc consommateurs de carburants. Ces évolutions ne sont pas soutenables au regard des engagements pris dans le cadre du protocole de Kyoto et de la volonté de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050. Il faut donc impérativement chercher la voie d'une croissance durable grâce à des évolutions de nos comportements et aux progrès des technologies. Les résultats de l'étude réalisée par l'OCDE sur l'arc alpin en 2030, visant à déterminer comment atteindre le futur souhaitable, donnent une indication sur les solutions possibles. Il en ressort que deux tiers de la solution pourraient être technologiques, tandis qu'un tiers relèverait de changements structurels.

Présentant la deuxième partie du rapport consacré à l'analyse du cycle de vie (ACV) dans l'automobile, **M. Christian Cabal, député, rapporteur**, a indiqué que l'ACV se développait depuis la fin des années 1990 et faisait l'objet d'une standardisation internationale de type ISO. L'ACV a pour but d'évaluer l'impact d'un produit tout au long de sa vie depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa mise en décharge. L'ACV permet notamment d'évaluer l'importance de la pollution à chaque étape et d'éviter les déplacements d'émissions, de comparer des modèles de véhicules entre eux, de préparer le recyclage pièce par pièce de l'ensemble du véhicule, soit à terme, en Europe, 95 % de la masse des véhicules, dont 10 % en valorisation énergétique.

**M. Christian Cabal, député, rapporteur**, a, dans un troisième temps, traité de la pollution locale, de son évolution et des solutions pour la réduire. Il a souligné que les Français pouvaient en percevoir directement les effets, notant qu'en Ile-de-France, depuis 1998, l'indice Atmo de qualité de l'air fourni par Airparif est « bon à très bon » 80,8 % des jours. Les voitures particulières contribuent à la pollution, mais elles sont minoritaires. En matière de particules, les véhicules personnels représentent 12 % des émissions, en matière de NOx (oxyde d'azote), 23 %. D'ici à 2010, la diminution de la pollution liée aux transports routiers sera spectaculaire, au minimum une division par deux. Cependant, les normes de qualité de l'air ne seront pas atteintes au plus près des grands axes de trafic.

Cette pollution a un impact sur la santé qui est de mieux en mieux mesuré, que ce soit à court terme à travers les maladies respiratoires, ou à long terme à travers les cancers et les maladies cardiovasculaires. Les études tendent à démontrer que l'exposition chronique est plus dangereuse que les pics de pollution. La poursuite des recherches comme des mesures réglementaires et techniques de réduction des émissions est donc indispensable.

Depuis 1986, la succession régulière de normes européennes d'émissions de plus en plus sévères a conduit à une diminution d'un facteur 100 de tous les polluants, suivant et incitant les progrès technologiques accomplis par les constructeurs. La norme Euro V conduira à une division par cinq des émissions des particules et à une réduction de 20 % des oxydes d'azote des véhicules diesel. Sera donc généralisé le filtre à particules fermé, technologie mise au point par PSA Peugeot Citroën. Dans l'avenir, grâce à la mise à disposition de carburants désulfurés (10 ppm en 2009), des systèmes de catalyse des NOx pourront progressivement être installés sur les véhicules. En outre, de nouveaux modes de combustion permettront d'éliminer la plus grande partie des polluants dans la chambre de combustion et non plus par post-traitement des gaz. Les filières alternatives comme le Gaz de pétrole liquéfié (GPL) ou le Gaz naturel véhicule (GNV) paraissent moins prometteuses, notamment en raison de l'indispensable mise en place de réseaux spécifiques de distribution et du trop faible nombre de modèles disponibles.

**M. Claude Gatignol, député, rapporteur**, a dressé l'état des lieux en matière d'émission de gaz à effet de serre. Il a rappelé que le secteur des transports émettait 35 % du total des émissions en France, une proportion plus élevée qu'à l'étranger, mais qui s'explique par la très faible part prise par le secteur énergétique en raison de l'importance du parc électronucléaire français. Depuis 1990, les transports sont cependant le secteur le plus dynamique, leurs émissions ayant augmenté de 23 %, alors que la France doit stabiliser ses émissions dans le cadre du protocole de Kyoto. Cette tendance pourrait s'infléchir puisque les émissions stagnent depuis 2001 en raison de la diésélisation du parc et du respect croissant des limitations de vitesse.

Les motorisations diesel apparaissent, en effet, comme la réponse la moins chère et la plus efficace dans l'immédiat à la question des émissions de gaz à effet de serre dans l'automobile. Ces moteurs peuvent encore progresser de l'ordre de 10 % pour le diesel et de 30 % pour l'essence. La voiture électrique qui n'avait pu s'imposer au cours des années 1990, en raison d'une autonomie insuffisante, pourrait connaître des jours meilleurs au vu des progrès potentiels des véhicules actuellement à l'essai à La Poste et produits par Dassault-Heuliez. Le véhicule hybride apparaît comme un véhicule d'avenir susceptible de permettre des économies significatives en matière de gaz à effet de serre. Il s'agit d'une technologie transversale pouvant s'appliquer à toutes les motorisations et à tous les types de véhicules. Chère en raison de sa complexité et ayant encore des performances limitées, elle dispose d'une importante marge de progression. La voiture à pile à combustible sera peut-être le véhicule du futur. Elle existe pour l'instant à l'état de prototype, en concurrence avec les autres motorisations. La filière devra surmonter de très nombreuses difficultés pour parvenir à produire (réformage avec capture du CO<sub>2</sub>, hydrolyse dans des réacteurs nucléaires à haute température), transporter et stocker de l'hydrogène de manière sûre, écologiquement compatible et à un coût raisonnable. Les piles à membrane devront également

beaucoup progresser en performance et fiabilité mais aussi pour économiser le platine utilisé comme catalyseur. Les réductions de coût à réaliser sont d'un facteur 100 par rapport au moteur classique. Dans le futur, les biocarburants pourraient apporter une part de la solution. Produits industriellement à partir de la totalité de la biomasse, ils pourraient conduire à des réductions d'émission de CO<sub>2</sub> de l'ordre de 75 à 90 %.

En définitive, la voiture du futur sera progressivement moins polluante et plus économe et doit être définie non pas en fonction de filières a priori mais en fonction des performances atteintes, tout en ayant un coût acceptable pour pouvoir se diffuser massivement.

Les rapporteurs ont ensuite formulé les propositions suivantes :

- dresser un bilan coûts-avantages des nouvelles réglementations en matière d'automobile au regard de l'objectif prioritaire de réduction de l'effet de serre ;

- généraliser rapidement les filtres à particules « fermés » sur les véhicules diesel ;

- définir une date de généralisation des dispositifs d'élimination des NOx en liant la norme Euro VI à la norme Euro V ;

- décider dans cinq ans de l'arrêt ou de la poursuite du soutien public à certaines filières ;

- intégrer la climatisation et les autres auxiliaires dans les cycles européens normalisés de contrôle de consommation et d'émission ;

- créer au niveau européen, à l'horizon 2010, une étiquette synthétique multicritère apposée sur les modèles de conception nouvelle dans les concessions automobiles.

L'analyse du cycle de vie des automobiles doit se généraliser pour donner au consommateur une information fiable et comparable. L'étiquette énergie mise en place en 2006 est très positive mais insuffisante ;

- étendre dès 2007 l'application de l'étiquette énergie aux véhicules d'occasion vendus par des professionnels, aux véhicules utilitaires légers et aux deux roues ;

- mettre en œuvre des mesures favorables aux utilisateurs des véhicules les moins polluants : parking gratuit, voie rapide (couloirs bus, voies de covoiturage), circulation à vitesse non limitée les jours de pics de pollution... ;

- lancer les études préliminaires pour évaluer l'impact de l'intégration des émissions des véhicules vendus dans le marché européen des émissions de CO<sub>2</sub>, si les constructeurs ne respectaient pas leur engagement de réduction des émissions ;

- accélérer les recherches sur les motorisations hybrides ;

- réaliser le plan biocarburants et abaisser les coûts de production pour les rendre compétitifs sans soutien financier public ;

- donner la priorité à la substitution au gazole ;

- étudier la mise en place d'une filière « fuel flexible » aux Antilles puis en métropole et expérimenter l'incorporation directe d'éthanol en hiver ;

- modifier la réglementation européenne pour permettre des incorporations plus importantes de biocarburants ;

- modifier la loi sur l'air pour retenir une définition de la voiture dite « propre » en fonction de critères de performance et non plus de filière. Cette définition serait révisable tous les cinq ans en fonction des progrès des connaissances et des technologies.

Elle pourrait, dès 2007, se fonder sur deux critères : une valeur limite d'émission de 115 g de CO<sub>2</sub>/km ou moins, c'est-à-dire les dix premiers véhicules diesel du classement ADEME 2005 et les quatre premiers modèles essence ; le respect anticipé de la norme Euro V, c'est-à-dire, pour les voitures diesel, l'équipement avec un filtre à particules.

Il s'agit d'une définition relative, ayant pour seul objectif de servir d'outil aux pouvoirs publics pour mettre en œuvre des mesures incitatives. Elle se doit donc d'être suffisamment restrictive tout en permettant aux consommateurs d'acheter une voiture « propre » à un coût raisonnable et donc de favoriser une large diffusion de ces modèles.

A l'issue de l'exposé des rapporteurs, **M. Claude Birraux, député, premier vice-président**, s'est interrogé sur la position des compagnies pétrolières à propos des biocarburants, sur la stratégie à mener en matière de GNV puisque certains pays, notamment l'Italie, avaient réussi à développer cette filière, sur la pertinence du maintien en l'état de la prime accordée aux « véhicules propres », sur le recyclage des véhicules en fin de vie et sur l'évolution de l'architecture des voitures dans l'avenir, compte tenu de l'engagement de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050.

**MM. Christian Cabal et Claude Gatignol, députés, rapporteurs,** ont apporté les précisions suivantes :

- le groupe Total participe à la mise en œuvre du plan biocarburant, plus particulièrement actif dans l'incorporation d'ETBE (éthyl tertio buthyl éther) dans l'essence et d'esthers méthyliques d'huiles végétales (EMHV) dans le gazole ;

- l'expérience italienne en matière de GNV est liée à la présence d'importantes ressources de méthane dans le bassin du Pô. En France, l'implantation de cette filière sera beaucoup plus difficile, même en mettant en place des bornes de compression dans les pavillons ;

- la prime actuellement accordée à l'achat d'une voiture propre privilégie en effet des véhicules en fonction de leur filière et non de leurs performances ;

- le recyclage est un aspect important, pleinement pris en compte dans le cadre de l'analyse du cycle de vie, et sur lequel d'importants progrès ont été réalisés ;

- l'hybridation peut apparaître comme une transition vers des véhicules à pile à combustible mais il n'y aura pas une révolution brutale de la structure et des modes de production des automobiles. Seule la généralisation de la propulsion électrique modifierait profondément l'architecture des voitures.

**L'Office a adopté, à l'unanimité des membres présents, le rapport sur « la définition et les implications du concept de voiture propre », ainsi que l'ensemble des recommandations proposées par les rapporteurs.**

## ANNEXE 2 : LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES

### I. PERSONNES AUDITIONNÉES EN FRANCE

M.	Olivier	APPERT	Président	Institut français du pétrole (IFP)
M.	Régis	BACCINO	Direction de la recherche technologique Département des technologies pour l'énergie et les nanomatériaux (DTEN)	CEA Grenoble
M.	François	BADIN	Directeur de recherche Véhicules électriques et hybrides Laboratoire Transport et Environnement	INRETS
M.	Luc	BASTARD	Chargé des relations avec les pouvoirs publics	Renault
M.	Gérard	BELOT	Directeur de l'Environnement automobile et du développement durable  Carburants et Emissions automobile	PSA Peugeot Citroën
Mme	Céline	BIÉCHY	Direction commerciale	Gaz de France
M.	Jean-Louis	BOUQUET	Directeur délégué chargé de mission auprès du Président  Président	Bolloré  BATSCAP
M.	Christophe	CEVASCO	Chargé des relations avec le Parlement et les élus	TOTAL France
M.	Dominique-Paul	CHATTON	Attaché – Bureau Asie-Océanie Délégation aux relations internationales et à la coopération	Ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche

M.	Patrick	COROLLER	Chef du département Technologies des Transports	ADEME
M.	Bruno	COSTES	Délégué aux affaires techniques et à l'environnement	PSA
Mme	Louise	d'HARCOURT		Renault
Mme	Alice	de BRAUER	Directeur de la politique environnement	RENAULT
M.	Jacques	de NAUROIS	Directeur des relations institutionnelles	TOTAL France
M.	Pierre-Louis	DEBAR	Directeur économique et transports	CCFA
M.	André	DOUAUD	Directeur technique	CCFA
Mme	Anne	FALANGA	Direction de la recherche technologique Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (LITEN)	CEA Fontenay-aux-Roses
M.	Shigefumi	GOTO	Directeur général	Toyota Motor Europe
M.	Dominique	GRAND	Direction de la recherche technologique Développement régional	CEA Grenoble
M.	Bertrand	HEILBRONN	Directeur adjoint Direction Transports électriques	Electricité de France
M.	R.	HUIN	Directeur du centre de Lyon	IFP
M.	S.	JULLIAN	Directeur du département procédés	IFP
M.	Daniel	LE BRETON	Chargé de mission	TOTAL France
Mme	Jacqueline	LECOURTIER	Directrice scientifique	Institut français du pétrole
M.	Cedric	LEWANDOWSKI	Directeur des transports et des véhicules électriques	EDF
M.	Paul	LUCCHESI	Direction de la recherche technologique LITEN	CEA Fontenay-aux-Roses

M.	B.	MARTIN	Chef du départements moteurs	IFP
M.	Sébastien	MARTINET	Direction de la recherche technologique Département des systèmes pour les énergies nouvelles (DSEN) Laboratoire de stockage électrochimique	CEA Grenoble
Mme	Thérèse	MARTINET	Directeur de l'Environnement automobile et du développement durable	PSA Peugeot Citroën
M.	Christophe	MARVILLET	Direction de la recherche technologique LITEN	CEA Grenoble
M.	Yoshihiko	MATSUDA	General Manager power train	Toyota
M.	Alain	MORCHEOINE	Directeur de l'Air, du Bruit et de l'Efficacité énergétique	ADEME
M.	Claude	MOREAU	Président	CIVEPE (Commission interministérielle pour les véhicules propres et économes) Ministère de l'Écologie et du Développement durable
M.	Stéphane	MOREL	Chef de projet « Cycle de vie des produits	RENAULT
Mme	Françoise	NOUVION	Chargée des relations internationales Direction de la technologie	Ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche
M.	Joël	PEDESSAC	Directeur général	Comité français du butane et du propane
Mme	Chantal	PHILIPPET		
M.	Hervé	PICHON		Peugeot-Citroën
M.	Philippe	PINCHON	Directeur du centre de résultats Moteurs-Énergie	Institut français du pétrole
M.	Patrice	POISSON	Directeur du matériel roulant	La Poste

M.	Alexis	RINCKENBACH	Chef du bureau Asie-Océanie Direction aux relations internationales et à la coopération	Ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche
M.	Fabien	SUPIZET		Toyota Motor Europe
M.	Miho	TERASHIMA		Toyota Motor Europe
M.	André	TRICOIRE	Directeur général	TOTAL France
M.	Ludovic	VALADIER	Directeur de projet CIVEPE	Ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche
M.	Christian	VICENTY	Chargé de mission pour le Japon et la Corée du Sud DIGITIP	Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie
M.	Jean-Pierre	VIGOUROUX	Direction des programmes Chargé des relations avec le Parlement	CEA siège social
M.	Patrick	WIDLOECHER	Directeur du développement durable	La Poste
M.	Pascal	ZANETTA	Chef de mission GNV	Gaz de France

## II. PERSONNES AUDITIONNÉES À LA COMMISSION EUROPÉENNE

M.	Thomas	CARROLL	Chef d'Unité	DG Fiscalité et union douanière
M.	Carlo	CUCCHI	Direction Émission et fuels	European Automobile Manufacturers Association
M.	Pierre	GAMMELTOFT	Chef d'Unité	DG Environnement
M.	Christos	LIOLIOS	Administrateur principal	DG Fiscalité et union douanière
M.	Gilles	PAQUE	Administrateur	DG Environnement
M.	Marcel	ROMMERTS		DG Énergie et Transport
M.	Christophe	SAROLI	Expert national	DG Énergie et Transport

### **III. PERSONNES AUDITIONNÉES EN BELGIQUE**

M.	Shigenobu	UCHIKAWA	Vice-président	Toyota Europe
M.	Gerald	KILLMANN	Directeur général	Toyota Europe
M.	Michio	MIYAMOTO	Directeur général	Toyota Europe
M.	Masahisa	NAGATA	Directeur général	Toyota Europe

#### IV. PERSONNES AUDITIONNÉES AUX ETATS-UNIS

Mrs.	AnaLisa	BEVAN	Manager	California Air Resources Board
Dr.	John	BOTTI	Chief Technologist Innovation Center Chief Technologist Innovation Center Dynamic and Propulsion	Delphi Technical Center
M.	Paul E.	CAMPBELL	General Management	Car Top Systems
Dr.	David E.	COLE	Chairman	Center for Automotive Research
Mr.	James A.	CROCE	Chief Executive Officer	Next Energy
M.	Frédéric	DESAGNEAUX	Consul général de France	San Francisco
Mrs	Catherine	DUNWOODY	Executive Director	California fuel cell partnership
M.	Greg	DOTSON	Counsel	Henry A. Waxman
M.	Richard J.	GERTH	Assistant Director, Manufacturing Systems	Center for Automotive Research
Mr.	Donald F.	GREYER	Deputy Division Director	Berkeley National Laboratory
Mme	Deborah L.	HOPKINS	Material Scientist	Berkeley National Laboratory
M.	Philippe	JAMET	Attaché pour la science et la technologie	Ambassade de France à Washington
M.	William P.	KELLY	Director International Governmental Affairs	Ford
M.	Arnaud	LERETOUR		IFANA
M.	Christophe	LEROUGE	Attaché pour la science et la technologie	Consulat de France à San Francisco
M.	Jean	MALLEBAY-VACUQUER	Director, Emissions and Environmental Testing	Daimler Chrysler Corporation
M.	J.D.	MARGULICI	Senior Development Engineer	California Center for Innovative Transportation
M.	Brett	SMITH	Director, Product & Technology Forecasting	Center for Automotive Research
Mr.	Daniel	SPERLING	Director	Institute of Transportation Studies, University of California
M.	Venkat	SRINIVASAN	Scientist	Berkeley National Laboratory

Mme	Molly	SWART		IFANA
M.	Tom	TORLAKSON	Senator, Seventh District	State Capitol Office of California
M.	Georges	UCKO		IFANA
Mme	Simonetta	VERDI	Manager International Strategy & Trade International Governmental Affairs	Ford
Mr.	Tom	WENZEL	Energy Analysis Program	Lawrence Berkeley Laboratory University of California
M.	Ronald	WESTBY	Director, Global Public Policy Governmental Affairs	Ford
Mrs.	Phyllis	YOSHIDA	Director	Freedom Car and Fuel Partnership

## V. PERSONNES AUDITIONNÉES EN ALLEMAGNE

M.	Jens-Arik	ALMKERMANN	Electric vehicle/Fuel cell development	Volkswagen AG
Mme	Gabriele	BAEKER	Responsable du protocole	Volkswagen AG
M.	Hans-Joachim	BERG	Commission de l'éducation, de la recherche et répercussion des développements technologiques	Bundestag
M.	Jens	BORKEN	Verkehrssystemanalyse	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.
M.	Nicolas	CONDETTE		
M.	Torsten	CRAMM		
M.	Jean-François	DUPUIS		
M.	Axel	FRIEDRICH		UBA (Umweltbundesamt)
M.	Kurt-Dieter	GRILL	Député	Bundestag
Mme		GÜHNEMANN	Leiterin der Abt Systemanalyse	
Mme		HAEHLE	Responsable de la communication	BMW
Dr.		HERTKORN	Verkehrsgeographie	
Mme	Martina	HINRICHER	Directrice de la division des politiques de transport	Ministère fédéral des transports et de l'habitat
Mme	Anne	KOESTER	Service des relations internationales	Ministère bavarois de l'Economie, des infrastructures de transport et des technologies
M.	Reinhold	KOPP	Directeur des relations publiques	Volkswagen AG
M.		KÜHNE	Institutsleiter	
M.	Thierry	LE COQ	Attaché économique	Mission économique de Berlin
M.	Bertrand	LE TALLEC	Chef de la mission économique	Munich
Mme		LENZ	Leiterin der Abt Verkehrsgeographie	
Mme	Martha	LUX-STEINER	Directrice du département systèmes de matériaux hétérogènes	Hahn Meitner Institut
M.	Dietmar	MEYER	Directeur Techniques des véhicules et protection de l'environnement	Ministère fédéral des transports, de la construction et du logement

M.	Michael	MÜLLER	Député	Bundestag
M.	Ralf	NAGEL	Secrétaire d'État	BMVBW Ministère fédéral des Transports
Dr.	Gerhard	OLK	Directeur du département de l'énergie nucléaire	Ministère fédéral des transports, de la construction et du logement
Mme	Nigüln	PARKER	Chargée de mission Responsable pour les carburants alternatifs et les systèmes de propulsion	Referat A10
M.	Joachim	PFEIFFER	Député	Bundestag
M.	Matthias	RABE	Directeur de la recherche	Volkswagen AG
M.	Thomas	ROBERTSON		HMI
M.		ROUGNON- GLASSON	Service scientifique et de technologie	Ambassade de France à Berlin
M.	Klaus	SCHEUERER	Représentant de la présidence	BMW
M.		SCHLUMBERGER	Consul général de France	Munich
M.	Patrick	SCHNELL		Total Deutschland
M.	Helmut	TRIBUTSCH	Directeur du département énergétique solaire	Hahn Meitner Institut
M.	Jean-Michel	VERNIER	Ingénieur développement	BMW
M.	Daniel	VOSGIEN	Ambassade de France	Berlin
Mme	Petra	WINKLER-MAITRE	Déléguée aux relations franco-allemandes	Ministère fédéral des transports, de la construction et du logement
M.	Dirk	van GOGH	Chairman of Education Committee of Interior Design	Ghent University Association Belgique

## VI. PERSONNES AUDITIONNÉES AU ROYAUME-UNI

M.	Greg	ARCHER	Directeur	Low Carbon Vehicle Partnership
Mrs.	Eva	ASSAYAG	Attaché scientifique	Ambassade de France au Royaume-Uni
M.	Gilbert	BALAVOINE	Conseiller pour la science et la technologie	Ambassade de France au Royaume-Uni
M.	David	BATES	Comité Transports	Chambre des Communes
M.	Jean	DUCHENE	Attaché commercial	Ambassade de France au Royaume-Uni
Mrs	Gwyneth	DUNWOODY	Member of Parliament	Chambre des Communes
M.	Robert	EVANS	Directeur des Affaires publiques	Johnson Matthey Catalysts
M.	Rupert	FURNESS	Conseiller en stratégie	Department for Transport Cleaner Fuels & Vehicles Division
M.	Clare	MALTBY	Comité Transports	Chambre des Communes
M.	Jon	MAYTOM	Directeur R&D	Ambassade de France au Royaume-Uni
M.	Bob	PACKARD	Division européenne	Ministère du commerce et de l'industrie
M.	Ashley	ROBERTS	Directeur de l'unité automatismes	Ministère du commerce et de l'industrie
M.	Alex	VEITCH	Directeur de la stratégie Transports	Energy Saving Trust
M.	Dave	YUILL	Directeur des technologies carbone	Ministère du commerce et de l'industrie
M.	Okada	AKIRA	Researcher	Institute for Transport Policy Studies

## VII. PERSONNES AUDITIONNÉES AU JAPON

M.	Shugo	AKIZUKI	Deputy General Manager – Government and Industrial Affairs Office	HONDA
M.	Takao	AOKI	Deputy General Manager Government&Industrial Affairs	HONDA
M.	Jean-Yves	BAJON	Ministre Conseiller pour les affaires économiques	Ambassade de France au Japon
M.		BOUSQUET		AREVA Japon
M.	Hubert	de MESTIER	Président	Chambre de commerce et d'industrie française du Japon
M.	Yukihiro	EZAKA	Director for environmentally friendly vehicle Environment division Road transport bureau	Ministry of Land, Infrastructure and Transport
M.	Masana	EZAWA	Deputy Director Automobile division	Ministry of Economy, Trade and Industry
M.	Shigeo	FURUNO	General Manager Power train engineering div.2	TOYOTA Motor Corporation
M.	Olivier	GEORGEL	Chargé de mission	Ambassade de France au Japon
M.	Serge	HAGEGE	Directeur de recherche au CNRS Attaché pour la Science et la Technologie	Ambassade de France au Japon
M.	Atsuhiko	HARA	Research and Engineering Affairs Manager	DENSO Corporation
M.	Tadayoshi	HAYASHI	Executive Director	Japan Automobile Research Institute (JARI)
M.	Yoshitsugu	HAYASHI	Vice-Dean Graduate School of Environmental Studies	Nagoya University
M.	Takashi	HIBINO	Graduate School of Engineering	Nagoya University
M.	Izuho	HIRANO	Deputy Director FC-EV Center	Japan Automobile Research Institute (JARI)
M.	Shin-ichi	HIRANO	President	Nagoya University
M.	Yumi	ISONO	Government & Regulatory affairs dept.	TOYOTA Motor Corporation
M.	Michel	ISRAËL	Conseiller pour la Science et la Technologie Professeur des Universités	Ambassade de France au Japon

M.	Nobuo	IWAI	Senior chief researcher	Japan Automobile Research Institute (JARI)
M.	Masanao	IWASE	General Manager	DENSO Corporation
M.	Etienne	JOLY	Chargé de mission	Ambassade de France au Japon
M.	Kazuo	JONO	Deputy Director	TOYOTA Group Pavilion – Expo 2005
M.	Nobuhisa	KANEKO	Deputy Director Environmental Transport Policy Div. Environmental Management bureau	Ministère de l'Environnement
M.	Hirokazu	KATO	Associate Professor Graduate School of Environmental Studies	Nagoya University
M.	Yoshiaki	KATO	Executive Chief Engineer Development Center management	TOYOTA Motor Corporation
M.	Gaku	KAWABE	Conseiller économique et commercial Adjoint au chef de la mission	Ambassade de France au Japon
M.	Yasumichi	KIGAKU	Director of JR Central Pavilion	Central Japan Railway Co
M.	Akiko	KOBAYASHI	Planning & Demonstration Group FC-EV Center	Japan Automobile Research Institute (JARI)
M.	Hikaru	KOBAYASHI	Director General Environmental Management bureau	Ministère de l'Environnement
M.	Masakazu	KUME	Director General Engineering Safety Department Road bureau	Ministry of Land, Infrastructure and Transport
M.	Frédéric	KÜNKEL	Attaché commercial	Ambassade de France au Japon
M.	Takakashi	MASAKAZU		Ministry of Economy, Trade and Industry
M.	Tomohiro	MIURA	Deputy General manager	DENSO Corporation
M.	Akira	MIWA	Deputy Director-General for International policy	Ministry of Economy, Trade and Industry
M.	Shigeru	MORICHI	President	Institute for Transport Policy Studies Japan Society of civil engineers
M.	Toshinari	NAGAI	Project Manager Government & Regulatory affairs department	TOYOTA Motor Corporation
M.	Seiichi	NAGATSUKA	Director Automobile division	Ministry of Economy, Trade and Industry

M.	Hideo	NAKAGAWA	Membre du Parlement Président du groupe parlementaire Espace	Parlement japonais
M	Rie	NAKAJIMA	International Government & Industrial affairs div.	TOYOTA Motor Corporation
M.	Mikio	OGASAWARA	Director	TOYOTA Group Pavilion – Expo 2005
M.	Norikazu	OGINO	Researcher Planning & Demonstration Group FC-EV Center	Japan Automobile Research Institute (JARI)
M.	Hiroataka	OHKI	General Manager – Government and Industrial Affairs Office	HONDA
M.	Akira	OKADA		Institute for Transport Policy Studies
M.	Yoshimi	OKUNUSHI	Director Environmental Transport Policy Div. Environmental Management bureau	Ministère de l'Environnement
M.	Shinya	ONO	Membre du Parlement Secrétaire général du groupe parlementaire Espace	Parlement japonais
M.	Hidemi	OONAKA	Project General Manager Fuel Cell System Development group	TOYOTA Motor Corporation
M.	Satoru	OTAKA	Deputy General Manager	Japan Automobile Tire Manufactures Association (JATMA)
M.	Ichiro	SAKATA	Project General Manager Power train engineering div.2	TOYOTA Motor Corporation
M.	Minoru	SAKURAMOTO	Attaché sectoriel Automobile Industries des transports	Ambassade de France au Japon
M.	Toshiyuki	SEKO	Director- Energy and Environment research division	Japan Automobile Research Institute (JARI)
M.	Ichiro	SHIMIZU	Executive Director	Japan Automobile Tire Manufactures Association (JATMA)
M.	Juntaro	SHIMIZU		Ministry of Economy, Trade and Industry
M.	Hiroshi	SHIMIZU	Professor	Keio University
M.	Motomu	SHINOHARA	Secretary General	Japan Automobile Tire Manufactures Association (JATMA)
M.	Michio	SHINOHARA	Manager – Environment & Safety Planning Office	HONDA
M.	Keiji	TACHIKAWA	Président	Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

M.	Masakazu	TAKAHASHI	Deputy Director Hydrogen and Fuel Cell Promotion Office	Ministry of Economy, Trade and Industry
M.	Hiroshi	TAKANO	Senior Vice Minister	Ministry of Environment
M.	Toshifumi	TAKAOKA	Project General Manager Hybrid vehicle system engineering div.	TOYOTA Motor Corporation
M.	Kazuhiko	TAKEMOTO	Deputy Director General Global Environment bureau	Ministère de l'Environnement
M.	Masataka	TARAHARA	Deputy Chief of Protocol	Japan Association for the 2005 World Exposition
M.	Bernard	TESTU	Commissaire général Président du Collège des Commissaires	Commissaire Général du Pavillon de la France Exposition Universelle de 2005 Aïchi-Japon
M.		TSUTSUMI		Keio University
M.	Toshiro	UDO	Deputy Director General	NEDO
M.	Tatehito	UEDA	Managing Officer Power train engineering div. II	TOYOTA Motor Corporation
M.	Nicolas	VASSITCH	Attaché économique	Ambassade de France au Japon
M.	Shogo	WATANABE	Deputy General Manager	Japan Automobile Research Institute (JARI)
M.	Tetsuya	YAMADA	Project General Manager International Government & Industrial affairs div.	TOYOTA Motor Corporation
M.	Takaaki	YAMASAKI	Senior Officer	Ministry of Land, Infrastructure and Transport
M.	Hisashi	YANO	Planning & Demonstration Group FC-EV Center	Japan Automobile Research Institute (JARI)



**ANNEXE 3 : COMPTE-RENDU DE L'AUDITION PUBLIQUE  
DU MARDI 18 OCTOBRE 2005**

« POLLUTION URBAINE – EFFET DE SERRE :

QUELLE EST LA PART DE L'AUTOMOBILE ?  
QUELLES SOLUTIONS ? »

## I. THÈME DE LA MATINÉE : QUEL DIAGNOSTIC, QUELLES SOLUTIONS ?

Première table ronde :  
**LA POLLUTION URBAINE ET LES ÉMISSIONS AUTOMOBILES :  
QUEL LIEN AUJOURD'HUI ?**

Interventions de :

- \* M. Philippe **LAMELOISE**, Directeur technique, **Airparif**
- \* M. Laurent **SELLÈS**, Chef d'unité adjoint, DG Entreprises et industrie, **Commission européenne**
- \* Mme Valérie **PERNELET**, Chef de projet « Air et Santé », **AFSSE**
- \* Dr. Jean-Bernard **RUIDAVETS**, **INSERM Toulouse**

Deuxième table ronde :  
**QUELLES SOLUTIONS DANS LES DIX PROCHAINES ANNÉES ?**

Interventions de :

- \* M. Patrick **OLIVA**, Vice-président, **Michelin**
- \* Dr. Gérard **BELOT**, direction de l'environnement automobile et de développement durable, **PSA**
- \* M. Daniel **LE BRETON**, chef du département « Transport-Énergie », **Total**
- \* M. Dominique **HERRIER**, Directeur-adjoint, **IFP**
- \* M. Alain **MORCCHOINE**, Directeur de l'air, du bruit et de l'efficacité énergétique, **ADEME**

*La séance est ouverte à 9 heures 15 sous la présidence de M. Christian CABAL, député de la Loire, rapporteur.*

**A. PREMIÈRE TABLE RONDE :  
LA POLLUTION URBAINE ET LES ÉMISSIONS AUTOMOBILES :  
QUEL LIEN AUJOURD'HUI ?**

**1. Introduction par M. Christian Cabal, député de la Loire**

Avec Claude GATIGNOL, je voudrais tout d'abord remercier les différentes personnes qui ont participé dans les mois écoulés aux auditions sur des questions précises. Cela nous permet aujourd'hui d'organiser cette audition publique, qui est un des moyens, pour l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, d'approfondir un sujet tout en ouvrant le débat avec la société civile.

Cette journée d'audition s'inscrit dans le rapport que Claude GATIGNOL et moi-même préparons à la demande du Président de l'Assemblée nationale et du Président du groupe UMP de cette assemblée sur la question de la voiture propre, de sa définition et de ses implications. Le sujet est d'une actualité que je qualifierais de brûlante, et ce depuis plusieurs mois, ou années. Il revêt maintenant un tour peut-être encore plus aigu compte tenu du contexte lié à l'approvisionnement énergétique et aux problèmes posés par l'évolution du prix du pétrole et de sa disponibilité sur le marché.

Nous sommes donc au nœud d'un certain nombre de problématiques qui sont à un niveau élevé dans l'échelle des urgences :

- problématique sur la filière énergétique, qui pose le problème du prix de l'énergie et de sa disponibilité ;
- problématique sur les questions de santé publique, avec les relations entre la pollution urbaine, la qualité de l'air en général et ses implications et conséquences sur la santé en général ;
- problématique sur les questions de l'environnement de façon globale (émission de gaz carbonique et de différents gaz à effet de serre), avec ses implications vraisemblables sur les modifications climatiques, notamment le réchauffement du climat ;
- implications également sur le plan technologique : quelles sont les technologies du futur, les filières qu'il va falloir choisir et

quelles en seront les conséquences économiques, aussi bien en termes d'emploi et de position concurrentielle ? Le secteur automobile est un des secteurs les plus dynamiques de l'économie française et européenne à l'heure actuelle. Avec pour le territoire national plus de trois cent mille emplois et 90 milliards d'euros de chiffre d'affaires, c'est actuellement l'une des principales industries nationales.

Dans ce cadre général, le rôle de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques consiste à informer le Parlement (Sénat et Assemblée nationale), puisque l'Office parlementaire est une structure commune au Sénat et à l'Assemblée, afin de préparer les décisions publiques et évaluer les différentes filières et technologies sur une base scientifique, mais avec un œil politique, au sens général du terme.

Avec Claude GATIGNOL, nous avons procédé depuis un peu plus d'un an à un nombre important d'auditions d'intervenants du secteur en France mais aussi en Europe et dans un certain nombre d'autres pays étrangers qui disposent d'une industrie automobile importante. A partir de ces auditions, et compte tenu de cette journée qui va se dérouler aujourd'hui avec vous, l'objectif est de définir avec le plus de précision possible les enjeux de la situation présente, les perspectives d'avenir, et comment orienter l'action du Parlement et des décideurs sur les choix qu'il va falloir opérer : quels choix, sur quelle échéance, quel horizon, et dans quelles conditions ?

Voilà, en quelques mots, les raisons qui ont amené le Parlement à se pencher sur cette question. Le Parlement n'est pas seul dans cette analyse, puisque de multiples structures privées ou officielles, différents départements ministériels, des missions interministérielles, se penchent sur cette question d'importance. Le hasard du calendrier fait qu'un certain nombre de conclusions vont être rendues publiques dans une échéance assez ramassée, dans les semaines ou les mois à venir.

Voilà la thématique générale, tout en cadrant sur deux problèmes essentiels dans l'audition d'aujourd'hui :

- quelles sont les conséquences ou les risques liés à un certain nombre de polluants, au sens général du terme, sur la santé ? Cela relève de l'analyse précise des émissions des moteurs à explosion et de leur impact sur l'organisme humain pour l'essentiel (nous nous limiterons aux effets sur la santé humaine) ;
- quels sont les effets liés à l'émission de gaz à effet de serre sur les implications climatiques et climatologiques liées au fonctionnement de ces différents systèmes thermiques ?

D'un côté, les effets toxicologiques, ou supposés, et de l'autre les effets sur les variations climatologiques dans le cadre du protocole de Kyoto, maintenant bien connu. Ces deux thématiques seront le fil rouge de cette journée, et nous aurons à déterminer, à l'issue de celle-ci, quels sont les liens existants entre pollution et effets sur la santé et le climat, avec un certain nombre de mesures à mettre en œuvre pour pallier ou contrer ces différents effets.

La thématique de la matinée couvre l'essentiel des questions de pollution urbaine et des émissions automobiles. Nous aurons donc les interventions successives de :

- M. Philippe LAMELOISE, Directeur d'Airparif en charge de la mesure de la qualité de l'air en Région parisienne, avec un premier point d'approche sur la qualité de l'air, voire l'évolution de celle-ci sur le passé récent,
- M. Laurent SELLES, expert à la Commission de Bruxelles, interviendra sur la question des normes dites Euro de pollution liée aux véhicules. Nous aurons ainsi des éléments comparatifs sur la situation dans les pays proches de l'Europe et les réglementations correspondantes.
- Nous aurons ensuite deux interventions sur l'impact des émissions automobiles sur la santé présentées par Mme Valérie PERNELET, Chef de projet à l'Agence française de sécurité sanitaire et environnementale (AFSSE), avec un panorama global des travaux de cette agence sur ce sujet, et le Dr. Jean-Bernard RUIDAVETS, de l'INSERM, qui nous présentera les recherches qu'il a conduites avec son équipe sur la relation entre les pics de pollution à l'ozone et l'infarctus du myocarde dans l'agglomération toulousaine.

Dans la seconde partie de la matinée, nous aurons ensuite l'intervention de :

- M. BELOT, du groupe PSA, sur les dernières technologies et les perspectives du futur en matière de traitement des émissions polluantes, avec l'expérience du groupe PSA, qui est à la pointe des technologies dans ce domaine ;
- M. LE BRETON, Chef du Département « Transport Energie » du groupe Total, présentera les évolutions futures des carburants. Il nous entretiendra notamment sur les possibilités ou les perspectives d'épuration de certains carburants, en particulier vis-à-vis du soufre, permettant de réduire la pollution, et sur l'apport des biocarburants.

- M. HERRIER, motoriste de l'IFP, abordera les progrès des moteurs à combustion interne et les possibilités d'éviter le rejet des polluants ou de les brûler directement dans le moteur.

Enfin, deux interventions aborderont des solutions non technologiques :

- M. MORCHEOINE, Directeur de l'air et du bruit à l'ADEME, nous présentera les simulations faites par l'Agence sur le renouvellement du parc automobile et sur son impact potentiellement positif sur la pollution : peut-on miser sur l'accélération de ce renouvellement, et quels effets en attendre ?
- Le Professeur Rémy PRUDHOMME présentera une expérience qui intéresse beaucoup, concernant les résultats des travaux d'évaluation sur la mise en place du péage urbain à Londres. Quel est son impact en matière de gestion de la circulation ? Est-ce un exemple qu'il faut suivre ?

Nous avons un temps relativement limité pour ces présentations, sachant que nous avons ensuite un laps de temps non négligeable pour les débats, les questions et les réponses qui seront apportées aux questions posées aux différents intervenants.

Je laisse la parole à M. LAMELOISE, Directeur d'Airparif, sur la première question.

## **2. M. Philippe LAMELOISE, Directeur d'Airparif**

Quelle est la perception de la qualité de l'air en Ile-de-France ? Sans parler des progrès réalisés, qui ont été nombreux, les Franciliens, et les habitants de l'agglomération parisienne, n'ont pas vraiment besoin de nous pour savoir que le problème demeure, à travers la simple variation des conditions météorologiques, qui agit plus comme un révélateur plus ou moins intense que comme une cause de la pollution atmosphérique. A huit jours d'intervalle, à la même heure, en termes de visibilité de particules en suspension dans l'air, il existe une certaine différence entre un jour avec beaucoup de vent, où l'air nous vient de l'Atlantique, et un jour où les masses d'air vont stagner pendant un certain temps sur l'agglomération parisienne, accumulant et transformant la pollution atmosphérique.

Cela se traduit vis-à-vis de ce que perçoit l'opinion publique sur deux grands types d'indicateurs de la pollution. Le premier est l'indice de la qualité

de l'air ATMO, qui caractérise la qualité de l'air d'une journée sur l'agglomération parisienne. Si l'on déploie l'observation sur les sept ou huit dernières années, la qualité de l'air à Paris est bonne, ou relativement bonne 80 % du temps, ce qui signifie que pendant les 20 % des jours restants, la pollution atmosphérique pose encore des problèmes. Cela se traduit également par la médiatisation relativement forte des épisodes de pollution atmosphérique correspondant aux journées les plus polluées de l'année, avec deux grands types de journées. Le premier, qui disparaît progressivement, se caractérise par de mauvaises conditions dispersives de l'hiver qui conduisent à des dépassements principalement de dioxyde d'azote sur l'agglomération parisienne, aux alentours de cinq jours par an, contre quinze jours par an voici une dizaine d'années. L'autre problème est celui récurrent de l'ozone pendant l'été, qui concerne toute l'Ile-de-France, avec une fréquence qui se maintient aux alentours de quinze jours par an où l'on dépasse ces objectifs de qualité, premier seuil des valeurs d'alerte.

Au point de vue de la pollution atmosphérique, l'Ile-de-France, c'est d'abord une énorme concentration d'émissions. C'est notre difficulté principale : l'intensité des émissions au centre de l'agglomération pour le dioxyde d'azote. Cette ville de presque dix millions d'habitants, qui n'est comparable qu'à Londres, en termes d'importance, au niveau européen, induit une densité d'émissions au centre qui lui pose un certain nombre de problèmes. Par ailleurs, cette agglomération a beaucoup d'avantages : elle est dans une plaine, elle « bénéficie » d'un climat fréquemment pluvieux et venteux (mais « bénéficie » est un terme de spécialiste atmosphérique car ces avantages ne plaisent pas forcément à tout le monde). En ce qui concerne les responsabilités, les transports, et plus particulièrement le trafic routier, sont encore les activités dominantes pour l'agglomération parisienne, en termes d'émissions polluantes. Il convient de garder à l'esprit qu'au cours des prochaines années, cette situation risque de changer car ces activités connaissent une baisse très intense des émissions, par rapport à d'autres activités qui stagnent ou qui augmentent.

Pour ce qui est de l'oxyde d'azote, problème principal dans l'agglomération parisienne, 51 % des émissions sont liées au trafic routier, avec quatre parts pratiquement égales entre les véhicules personnels à essence, les véhicules personnels diesel, les véhicules utilitaires légers et les poids lourds, sur lesquels il faudrait revenir car ils représentent un bon tiers. Paris à lui seul ne représente que 10 % des émissions régionales, qui ne sont elles-mêmes que 10 % des émissions nationales. En termes d'importance des émissions, l'Ile-de-France, par rapport à l'activité économique, est une « petite » émettrice. Le problème concerne la concentration. Il convient également de surveiller le secteur des autres transports (9 %), comprenant le trafic aérien, qui n'est pas vraiment en baisse. Alors que les autres secteurs ont connu d'importants progrès technologiques, pour le trafic aérien on constate une croissance de l'activité des plates-formes aéroportuaires et peu de progrès technologiques permettant de réduire fortement les émissions.

En ce qui concerne les poussières, une grande accusation, partiellement injuste, est portée sur le diesel. Lorsqu'on observe de près les émissions de particules en Ile-de-France, le transport est un gros contributeur, mais c'est l'industrie qui reste majoritaire. A l'intérieur du transport, les véhicules personnels diesel comptent pour un tiers, les poids lourds et les véhicules utilitaires légers faisant le reste. C'est bien sûr principalement la motorisation diesel qui génère des particules, mais ce n'est pas forcément toujours le diesel qui génère toutes les particules que l'on trouve en Ile-de-France. La situation est très compliquée, puisqu'à la différence des gaz les particules sont remises en suspension par le vent, et elles sont chimiquement fabriquées à partir des gaz. On a donc trois sources. L'action sur les émissions dites primaires, qui sortent des pots d'échappement ou des cheminées, n'est pas forcément aussi efficace qu'on peut l'imaginer sur les niveaux immédiats de poussière.

Un autre élément important consiste à observer les différentes émissions par type de véhicule, avec quelques ordres de grandeur qui sont relativement frappants. Un poids lourd, c'est en termes d'oxyde d'azote l'équivalent de neuf véhicules particuliers. Il convient également de poser la question des deux roues, qui pour le monoxyde de carbone correspondent à l'heure actuelle à trois véhicules particuliers, ainsi que pour les hydrocarbures imbrûlés. Cela tient à des décalages de réglementation. Il existe une réglementation très forte au niveau européen sur les véhicules particuliers. Sur les deux roues, elle commence à se mettre en place, mais le parc moyen est loin d'être exemplaire en termes d'émissions de polluants atmosphériques.

Je n'évoquerai pas le dioxyde de soufre, car cela ne concerne pas vraiment le trafic automobile, mais de grands progrès ont été réalisés en quarante ans. En ce qui concerne le trafic automobile, on peut évoquer le monoxyde de carbone. L'effet de la modernisation du parc automobile permet une réduction très importante des niveaux de monoxyde de carbone à proximité du trafic. Je n'évoque pas les limites européennes, car elles sont très loin de l'échelle du diagramme, et nous n'avons plus de problèmes de ce point de vue. On peut observer que sur un endroit symboliquement congestionné comme Victor Basch, que tout le monde connaît sous le nom de carrefour d'Alésia, congestionné depuis des décennies, et les Champs-Élysées, dont le type de trafic change progressivement, pour aller du relativement fluide vers le congestionné, on a des variations de réductions qui ne sont pas tout à fait les mêmes. L'amélioration du parc s'observe dans les deux cas, mais la congestion favorise les émissions de dioxyde de carbone, et les progrès se font moins vite sur les Champs-Élysées. En ce qui concerne le benzène, on constate également d'importants progrès, avec l'efficacité d'une action sur les carburants. La nouvelle réglementation dans ce domaine en 2000 a entraîné des effets immédiats, alors que lorsqu'on agit sur le parc, les effets sont beaucoup plus longs du fait des délais du renouvellement du parc. En situation de fond, loin des sources de pollution, nous n'avons plus de problèmes avec le

benzène. Près des sources de pollution, le problème demeure sur un certain nombre d'axes.

Trois polluants sont critiques à l'heure actuelle parmi les polluants réglementés : le dioxyde d'azote, l'ozone et les particules. On a beaucoup parlé du dioxyde d'azote, avec une évolution favorable, contrairement à ce que l'on pense, mais avec des dépassements récurrents. Cela évolue bien, mais pas assez vite. Lorsqu'on observe les émissions d'oxyde d'azote, on s'aperçoit que l'on gagne sur les sites trafic aux alentours de 27 % et sur les sites de fond aux alentours de 42 % en l'espace d'une petite dizaine d'années. En ce qui concerne le dioxyde d'azote, on gagne beaucoup moins. En dix ans, on ne gagne rien sur les sites de proximité, et l'on gagne péniblement 20 à 22 % sur les sites de fond. Cela tient à des phénomènes de chimie relativement complexes entre l'ozone et les oxydes d'azote, qui font que les efforts réalisés sur les oxydes d'azote totaux n'ont pas une résultante immédiate et aussi intense qu'on le souhaiterait sur le dioxyde d'azote. Or, c'est celui-ci qui est réglementé. Cela donne, non pas en pointe de pollution mais en exposition chronique, au niveau moyen annuel, une zone supérieure aux objectifs de qualité, en fonction des conditions météorologiques. 2003 a été une année très défavorable, non seulement en raison de la canicule, et 2004 a été une année très favorable. Tout le cœur de l'agglomération parisienne est au-delà de ces objectifs, ce qui représente d'une année sur l'autre entre deux et quatre millions d'habitants exposés chaque jour à des niveaux supérieurs aux objectifs de qualité.

Le Plan de protection de l'atmosphère concentre tout l'enjeu de rattraper cette situation, en s'appuyant notamment sur les progrès technologiques qui vont être réalisés par les véhicules. Sur les véhicules particuliers, pour tous les polluants d'ici 2010 des progrès considérables seront faits en termes d'émissions unitaires. On le constate également sur les émissions totales. La zone du trafic se réduit très fortement alors que les autres secteurs progressent nettement moins. A travers la modélisation mise en œuvre, on n'aura pour les années favorables pratiquement plus de problèmes en matière de pollution de fond, sauf autour de l'aéroport de Roissy. Pour les années défavorables, les problèmes seront beaucoup plus atténués que ceux qui peuvent exister à l'heure actuelle. C'est plutôt une bonne nouvelle. En revanche, à la pollution de fond, loin des sources, il faut ajouter la situation près du trafic. Cela va dépendre de l'intensité du trafic et des caractéristiques de l'environnement immédiat (rue encaissée par exemple). Le long des grands axes, 65 % du réseau francilien dépassera l'objectif de qualité actuel, la moitié étant situé dans la Grande couronne, ce qui est assez surprenant. Même loin de Paris, près des axes, on aura des problèmes de pollution en niveau moyen pour le dioxyde d'azote, et la totalité du réseau de Paris et de la Petite couronne dépassera ces objectifs de qualité, le long des trottoirs des grands axes. Si l'on observe la situation en 2010 à proximité du trafic sur les cinq stations de mesure, on s'aperçoit que les réductions liées aux différentes mesures européennes ne suffiront pas à respecter notre valeur limite 2010 de l'Union

européenne. On va diminuer de 20 à 30 % les niveaux en bordure des axes, alors que dans certains il faudrait le faire de 50, voire 60 %.

Une autre problématique est l'ozone, polluant en hausse pour des raisons de chimie relativement complexes. La diminution du dioxyde d'azote a tendance à favoriser dans un premier temps la formation de l'ozone. C'est un polluant qui voyage. L'importation du reste du continent européen nous amène pratiquement les deux tiers de l'ozone que nous subissons sur la Région parisienne. C'est un polluant plutôt des zones rurales sous le vent de l'agglomération. Le secteur sud-ouest rural de l'Ile-de-France subit les maximums d'ozone, mais cela ne s'arrête pas à l'Ile-de-France, et l'agglomération parisienne va avoir un effet au-delà, sur la région Centre, voire même sur les Pays de Loire. En ce qui concerne la carte de l'ozone le 8 août 2003, en pleine canicule, on constate que c'est la coulée d'ozone qui part du Nord de l'Europe qui nous arrive sur la Région parisienne. Ainsi, si l'on avait pu arrêter toutes les émissions de l'agglomération parisienne, on n'aurait pas évité les dépassements d'ozone. On observe également que lorsque le « panache » repart de l'agglomération parisienne, il est encore plus « chaud ». Les niveaux maximums ont été atteints dans la région Centre du fait conjugué de l'Europe et de l'agglomération parisienne. Lorsqu'on projette à 2010, c'est un peu plus difficile pour l'ozone. On n'arrivera sans doute pas à respecter les équivalents objectifs de qualité de l'Union européenne en Ile-de-France pour l'ozone.

Enfin, sur les particules en suspension PM10 et PM2-5, on n'identifie pas pour le moment très fortement les problèmes, par rapport à la réglementation européenne, mais ils vont apparaître car celle-ci va en se durcissant. On est de plus en plus sûr que des effets importants des particules agissent sur la santé. Les normes de la qualité de l'air vont se durcir, et l'on voit que nos niveaux ne baissent pas. Ils n'augmentent pas, mais ils restent stables. Si le plafond descend et que les niveaux restent les mêmes, on rencontrera des problèmes. En termes de proximité au trafic, sur environ 4 % du réseau francilien on dépasse l'objectif de qualité, et la situation est plus grave à proximité du trafic. Voilà ce que je voulais signaler sur la situation en matière de pollution urbaine.

- **M. Christian CABAL**

Merci, Monsieur LAMELOISE. Je propose que nous poursuivions les interventions de la matinée. Nous aurons avant la pause la possibilité de poser des questions et d'apporter des réponses. Je donne la parole à M. Laurent SELLES.

### **3. M. Laurent SELLES, Chef d'unité adjoint, DG Entreprises et industrie, Commission européenne**

C'est une gageure de présenter en dix minutes la législation européenne... Commençons par le début. Nous avons le Marché intérieur, et l'article 95 du Traité. La loi européenne s'applique obligatoirement, et il n'y a pas de législation nationale. Les constructeurs automobiles ne peuvent mettre sur le marché que des véhicules conformes à la réglementation européenne. Des exceptions peuvent exister pour des petites séries ou des véhicules homologués à titre individuel, mais à 99,9 %, c'est la législation européenne qui s'applique. On n'est pas dans un cas de subsidiarité comme pour le code de la route, où notamment les vitesses sur l'autoroute sont différentes selon les Etats.

On parle d'homologation par type de véhicule. Avant de faire des lois, on a des principes, dont celui du développement durable, qui concerne trois axes : la croissance économique, le bénéfice social (la sécurité), et la protection de l'environnement. Certains ont pu penser que dans les années quatre-vingt-dix, lorsqu'on évoquait le développement durable, cela faisait uniquement référence à l'environnement. Il faut également considérer le développement économique car on ne peut pas faire de l'environnement lorsqu'on n'a pas d'argent. Il est toujours très important de considérer les trois axes.

On ne fait pas de la réglementation en prescrivant des solutions. On laisse le libre choix aux industriels et le champ libre à la créativité des chercheurs, des développeurs. On ne légifère donc jamais sur les solutions, mais seulement sur les niveaux nécessaires à atteindre, les valeurs limites par exemple.

On connaît les principaux polluants, avec les transports routiers : les hydrocarbures non brûlés, les oxydes d'azote, qui ont été évoqués, les particules, et le monoxyde de carbone. Il faut appliquer le principe de proportionnalité. Les particules PM sont cancérigènes et les oxydes d'azote provoquent l'asthme. Pour esquisser rapidement le passé, avec une échelle relative on constate les progrès des différents niveaux des directives

européennes : Euro 1 à Euro 4, en application depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2005, et nous préparons Euro 5 pour 2009-2010. Pour les voitures essence, on est assez proche du niveau bas. Pour les voitures diesel, avec Euro 4, les particules sont encore à un niveau significatif et les oxydes d'azote restent présents. Il faudra évaluer une action sur ces polluants, toujours à l'aune des trois critères du développement durable (économie, social et environnement). On prépare maintenant Euro 5. Si la proposition de la Commission est adoptée avant la fin de l'année (elle a été envoyée au Conseil et au Parlement), et si la codécision se fait assez rapidement, l'adoption pourra se faire en 2007 pour permettre une mise en application des niveaux pour les voitures particulières en 2008-2009. Pour les poids lourds (on utilise également les termes Euro IV et Euro V, en chiffres romains), on attend en 2008 la mise en application d'Euro V, qui va avoir un effet très important.

Entre Euro 4 et Euro 5, pour la partie diesel, on va réduire de 80 % les émissions de particules, qui sont suspectées d'être cancérigènes. Sur le NOx, la baisse est de seulement 20 %. En effet, la technologie n'est pas encore prête. On ne sait pas faire des systèmes à grande échelle pour supprimer les émissions de NOx des voitures particulières à un prix acceptable. Etant donné le surcoût de 2 000 €, les clients préfèrent acheter des petits véhicules à essence, qui vont consommer plus. Il s'agit donc de prévoir les aspects pervers des lois, qui sont contreproductifs. On accuse l'Union européenne, et notamment la Commission, d'être sur-réglémentée, ce qui pénalise les industriels. Sur les quatre polluants principaux (particules, NOx, monoxyde de carbone et hydrocarbures non brûlés), Euro 4 diesel est en application depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2005. En 2009, on aura Euro 5. Vous avez sur le schéma les niveaux équivalents japonais pour les diesel et essence en 2009, et les niveaux américains et californiens, autour de 2008-2009. A l'horizon 2009, les Européens, les Américains et les Japonais seront à peu près cadrés. Il convient cependant de relativiser, car les cycles d'essais sont différents. Il ne faut donc pas prendre ce schéma de façon rigoureuse, mais il donne une assez bonne image. Lorsque la Commission propose des législations, il convient de regarder ce qui se passe au Japon ou aux Etats-Unis. Sur les grandes régions automobiles du monde, les autorités convergent assez bien et ont de bons recouvrements.

C'est une bonne chose que l'on ait évoqué les poids lourds, car c'est un point important. Les médias se sont focalisés sur la voiture particulière, mais il convient d'appliquer le principe de proportionnalité. Je passe sur les détails car je n'ai pas le temps d'approfondir (vous avez les références sur les sites). On travaille pour Euro 5 sur les camions avec une limite NOx à 2 g par km. La réduction catalytique sélective va imposer d'avoir un réservoir d'urée à bord des camions. Dans les stations-service, on pourra donc vérifier l'urée. C'est peut-être contraignant, mais c'est très efficace. Il ne faut pas que les chauffeurs oublient de remplir leur réservoir régulièrement. Pour cela, il convient de trouver un moyen coercitif. C'est la police qui doit faire appliquer la loi, vérifier que les chauffeurs respectent leur temps de conduite, par

exemple, mais aussi qu'ils ne polluent pas. Il convient également de trouver des moyens pour les inciter. On pense notamment à un système qui réduit le couple : lorsque le réservoir d'urée est à un niveau zéro, le couple moteur diminue tellement, que le chauffeur n'aura de cesse de s'arrêter dans une station-service pour refaire le plein d'urée.

En dehors de la pollution, on observe le changement climatique. Le CO<sub>2</sub> n'est pas un polluant, comme chacun le sait. On a une action sur l'offre, avec l'engagement volontaire des constructeurs du Japon, de la Corée du Sud, et de l'Union européenne, de réduire les émissions à 140 g/km pour les nouvelles voitures mises sur le marché d'ici à 2008-2009. Cela représente 25 % de réduction par rapport à 2000. On fait un monitoring de cette réduction, mais on agit aussi sur la demande, avec des incitations fiscales. Cela relève de la subsidiarité, et donc de la compétence des gouvernements nationaux. C'est tout de même assez efficace pour orienter, avec une fiscalité adaptée, l'usage de voitures qui consomment moins et qui donc produisent moins de CO<sub>2</sub>. Plusieurs méthodes sont possibles. En ce qui concerne le suivi de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, nous finissons d'évaluer les chiffres pour l'année 2004, et l'on s'aperçoit que l'on est sur la courbe. On n'est pas sûr que les constructeurs européens pourront tenir leurs engagements pour arriver en 2008 à 140 g. Nous verrons l'année prochaine ce que l'on devra faire pour que cette limite soit atteinte. Faire des voitures et des camions propres, c'est une bonne chose, mais le carburant doit également l'être. On a déjà éliminé le plomb, les sulfures, avec l'exigence à 10 PPM en 2009, qui est une condition sine qua non pour introduire de nouvelles technologies et avoir des voitures propres en 2009.

Il faudra penser, vers 2008-2009, à préparer l'après-pétrole avec des carburants alternatifs. Des actions volontaristes ont été lancées il y a quelques années, mais avec l'augmentation du prix des carburants cette année, l'objectif de 20 % de part de marché des carburants alternatifs devient urgent. Cela fait l'objet de la réflexion dite « CARS 21 » menée par un groupe à haut niveau, comprenant M. BARROT, M. VERHEUGEN et le Ministre LOOS. On fait des analyses « du puits à la roue », on examine les questions de mélanges possibles. C'est assez complexe, car l'éventail des biocarburants est très large, ainsi que la façon de les utiliser. Il faut revenir aux analyses systémiques, « du puits à la roue », et au principe du développement durable, pour ne pas déplacer les problèmes, et les traiter globalement. C'est assez compliqué car cela touche à la politique agricole commune, et cela va nous occuper de nombreuses années.

En ce qui concerne l'hydrogène, dont on a beaucoup parlé, ce n'est pas un combustible. Aujourd'hui, 98 % de l'hydrogène est produit par du craquage d'hydrocarbures ou d'ammoniaque. Il convient de le produire de façon compatible avec Kyoto sans utiliser de carburants fossiles. Il y a des enjeux en matière de stockage, de coût et de complexité des membranes. Il faudrait gagner le Loto quatre fois pour avoir des voitures à hydrogène à

grande échelle. On peut en faire tourner quelques-unes, mais sans aucune considération de prix. On est donc assez prudents sur l'hydrogène. C'est une question à long terme, pour après 2020.

En ce qui concerne notre fonctionnement, nous prenons l'avis des Etats membres, et le Parlement européen, en codécision avec le Conseil, prend les décisions, que nous proposons, et établit les politiques de l'UE. Il existe une confluence des différentes politiques. Chaque politique correspond à un article du Traité et il convient de trouver des solutions qui sont compatibles avec les politiques européennes. C'est ce qui fait souvent la difficulté. On peut avoir une très bonne idée, mais il faut la mesurer et la confronter aux différentes implications. Par ailleurs, en ce qui concerne la production, l'automobile c'est un tiers en Europe, un tiers en Asie et un tiers en Amérique. Sur les marchés, c'est similaire. L'approche sur le sujet ne doit pas être européenne, mais mondiale. Nous avons donc entrepris une migration de la législation européenne vers la législation des Nations unies, qui est plutôt un ensemble de règlements sans modalité de mise en œuvre. La Président du Forum mondial pour la réglementation de la construction automobile est un représentant du Ministère des Transports français.

Enfin, il faut considérer la Chine. Avec le textile, on a oublié qu'on avait dix ans pour s'y préparer. Dans l'automobile, certains s'y sont préparés, comme Volkswagen depuis quinze ans. La Chine, c'est compliqué, mais on ne peut pas l'occulter. Tous les grands pays constructeurs sont présents. Je milite beaucoup pour que la Chine signe plus de règlements des Nations unies à Genève.

- **M. Christian CABAL**

Merci. C'est une perspective et prospective sur ce point. Je vais donner la parole à Mme Valérie PERNELET. Je rappelle que notre mission concerne les voitures particulières. Nous avons décidé au niveau de l'Assemblée de nous consacrer uniquement aux véhicules particuliers. Même si les poids lourds occupent une place importante dans la genèse de la pollution de l'air, les thématiques sont relativement distinctes, bien que les conséquences puissent être les mêmes. On peut espérer qu'un autre rapport soit engagé sur la question des poids lourds. Mais aujourd'hui, dans le cadre précis de ce rapport de l'Office, il s'agit uniquement des voitures particulières.

#### **4. Mme Valérie PERNELET, Chef de projet « Air et santé », AFSSE**

Mon intervention vise à apporter quelques éclairages sur les liens entre pollution urbaine et santé. En préambule, je souhaite signaler que l'ensemble des normes sur la qualité de l'air qui existent actuellement en Europe résulte des travaux spécifiques de l'OMS en vue de protéger la santé de la population. La qualité de l'air est donc bien une préoccupation de santé publique.

Je ne reviendrai pas sur les émissions du trafic en tant que contribution substantielle à la pollution urbaine, car M. LAMELOISE en a suffisamment parlé et ses démonstrations ont été concluantes. Je présenterai, sans être exhaustive, quelques effets sanitaires des principaux indicateurs de la qualité de l'air d'origine automobile. En termes d'impact sanitaire de la pollution urbaine, je présenterai les principales références françaises et certains résultats.

Avec l'exemple de l'Ile-de-France, on peut rappeler que le transport routier est un contributeur majeur des émissions de polluants atmosphériques, qui sont des indicateurs de la qualité de l'air. En termes d'effets sanitaires des principaux indicateurs, le dioxyde d'azote est susceptible d'entrer jusque dans les voies aériennes inférieures jusqu'aux bronchioles. Au niveau cellulaire, il est susceptible de provoquer des lésions inflammatoires de l'épithélium. Chez le sujet asthmatique, certains auteurs notent une augmentation de l'hyperactivité bronchique, et certaines études épidémiologiques s'intéressant aux effets à court terme du dioxyde d'azote montrent que l'augmentation des niveaux de NO<sub>2</sub> est corrélée à une augmentation de la mortalité et des hospitalisations pour des pathologies respiratoires.

En ce qui concerne les particules fines, je n'apprendrai rien à l'ensemble des personnes présentes en indiquant que les plus fines sont les plus dangereuses. Elles vont effectivement jusqu'à atteindre les alvéoles pulmonaires et provoquent des inflammations des voies respiratoires. En termes d'impacts à court terme, on observe pour une exposition aux particules fines une augmentation de la mortalité, des admissions hospitalières et des consultations médicales pour des atteintes de l'appareil respiratoire et cardiovasculaire. Sur le long terme, les études épidémiologiques vont dans le sens d'un effet également délétère sur l'appareil cardio-pulmonaire en particulier, avec une augmentation des cas d'asthme lors de l'exposition à des particules fines diesel.

En ce qui concerne le mélange d'émissions diesel (et donc pas seulement des particules fines diesel), avec des gaz, des particules et un composé absorbé sur les particules, on sait que les particules diesel sont dangereuses notamment en raison de substances telles que des métaux ou des

HAP qui seraient absorbés sur ces particules. Le CIRC et l'EPA classent ce mélange en catégorie 2A, c'est-à-dire probablement cancérigène chez l'homme. Ils se fondent pour cela sur des données expérimentales sur l'animal et sur des données observées en milieu professionnel.

Enfin, en ce qui concerne l'ozone, il s'agit d'un polluant secondaire, comme l'a indiqué M. LAMELOISE. C'est un oxydant puissant, qui provoque des réactions inflammatoires et une hyperréactivité bronchique. A court terme, une augmentation des niveaux d'ozone est corrélée à une augmentation de la toux et de la fréquence des crises d'asthme. Cette augmentation des niveaux d'ozone est aussi corrélée à une augmentation des hospitalisations pour des pathologies respiratoires. Les effets à long terme de l'ozone sont encore peu connus. Une étude américaine note cependant l'augmentation de l'incidence de l'asthme chez l'homme.

Qu'en est-il en termes d'impact sanitaire de la pollution urbaine ? Je présenterai à ce sujet trois références françaises, mais elles sont bien plus nombreuses. Je n'évoquerai pas toutes les références européennes et internationales et je me limiterai à évoquer l'étude « Air Pur », qui a été menée par l'ORS Ile-de-France, et qui porte sur une période d'étude de 1987 à 2000, le Programme national de surveillance des effets sur la santé de la pollution de l'air dans neuf villes françaises (PSAS-9), qui a été mené par l'Institut de veille sanitaire, et enfin une étude menée par l'AFSSE en 2004 sur l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine, qui a tenté de mettre en évidence le lien entre une exposition chronique aux particules fines et le cancer du poumon.

L'étude « Air Pur » est une étude épidémiologique de type écologique. On a essayé de voir si des évolutions à court terme des niveaux de pollution étaient corrélées à des indicateurs sanitaires particuliers. Les indicateurs de pollution retenus dans cette étude sont les niveaux journaliers de dioxyde d'azote, d'ozone, de fumée noire, de particules fines et de dioxyde de soufre, tout cela mesuré en situation de fond. Les indicateurs sanitaires retenus ont été le nombre de décès, en particulier pour causes respiratoires et cardio-vasculaires, et le nombre d'hospitalisations pour différentes pathologies, essentiellement respiratoires. Après la prise en compte de nombreux facteurs de confusion, dans les grandes lignes, cette étude a montré que les relations les plus importantes apparaissent avec les particules et les dioxydes d'azote. En effet, on observe des hospitalisations pour maladies respiratoires, en particulier l'asthme. Ces effets sont surtout marqués chez les moins de 15 ans, où l'on observe une augmentation de 8 % des hospitalisations pour asthme en rapport avec le NO<sub>2</sub> (je rappelle que ce sont des effets à court terme), et une augmentation de 5 % des hospitalisations pour maladies respiratoires qui seraient en lien avec les particules fines.

Le Programme de surveillance épidémiologique PSAS-9, de l'INVS est, à gros traits, une application du programme Air Pur à d'autres villes

françaises. Cette étude s'attachait à étudier les risques sanitaires dus à une exposition à court terme à certains indicateurs de la pollution atmosphérique. Elle s'est attachée à caractériser cela dans les villes de Bordeaux, Le Havre, Lille, Lyon, Marseille, Rouen, Strasbourg, Toulouse et Paris, en reprenant partiellement les résultats de l'étude Air Pur. De la même façon que pour cette étude, les indicateurs de pollution ont été les niveaux journaliers de pollution pour le dioxyde d'azote, les particules, ozone et dioxyde de soufre. Les indicateurs sanitaires étaient pratiquement les mêmes que ceux retenus dans l'étude Air Pur, avec le nombre de décès pour des causes respiratoires et cardio-vasculaires et le nombre d'hospitalisations pour différentes pathologies respiratoires. On a essayé de cadrer l'étude par tranches d'âge. Les facteurs de confusion ont également été pris en compte. En conclusion, ce Programme de surveillance a permis de trouver des associations significatives entre l'exposition à la pollution atmosphérique et la mortalité dans les neuf villes, et un impact sur la santé davantage lié à la pollution de tous les jours qu'aux pics observés quelques jours par an.

La dernière étude d'impact sanitaire que je présenterai ici est une étude de l'exposition chronique aux particules fines en lien avec le cancer du poumon. L'objectif de cette étude était d'estimer l'impact de la qualité de l'air sur le risque de décéder des maladies telles que le cancer du poumon, dans la situation actuelle mais aussi en considérant des scénarios d'évolution de la pollution atmosphérique urbaine. L'indicateur de la qualité de l'air retenu est celui des particules fines, considérées comme risque de référence. Cette étude a été menée en écho à de nombreux travaux épidémiologiques menés ces dernières années qui suggèrent tous de manière convergente l'existence d'un risque accru de cancer du poumon après une exposition de longue durée aux particules fines. En ce qui concerne la démarche de l'étude, on s'est d'abord attaché à estimer les expositions, en se rapprochant des niveaux de particules fines en site de fond urbain. On a ensuite utilisé des relations exposition/risque, qui avaient été établies à partir d'études épidémiologiques faites en population générale, pour des niveaux d'exposition comparable et pour plusieurs tranches d'âge. On s'est particulièrement attaché à l'étude de POPE, étude américaine réalisée en 2002, pour laquelle la relation exposition/risque était connue et avait été largement étayée. On détermine enfin le nombre de cas attribuables à la pollution étudiée à partir des expositions déterminées en fonction des niveaux de particules fines mesurées et de cette relation exposition/risque. Pour la mise en œuvre de cette étude, on a tenté de quantifier l'impact estimé pour la situation actuelle et les évolutions possibles de la qualité de l'air. Soixante-seize unités urbaines ont été considérées, soit seize millions de personnes de 30 ans ou plus, qui était la population visée dans cette évaluation. J'insiste sur cet échantillon de population car les résultats que je présente ne sont pas transposables à la population française générale, mais concernent bien la population urbaine. Des limites ont été également largement évoquées et discutées dans ce rapport. Les résultats marquants concernant la situation actuelle et les décès par cancer du

poumon montrent que la classe d'âge la plus touchée est celle allant de 60 à 69 ans, où l'on peut observer jusqu'à 11 % des décès qui peuvent être attribuables à l'exposition aux particules fines. Sur l'ensemble de la population des plus de 30 ans, la fraction attribuable de cette exposition au long cours aux particules fines en termes de cancers du poumon serait de 6 % environ.

En conclusion, les liens entre la pollution urbaine, en particulier les indicateurs dioxyde d'azote et particules, et les atteintes de la santé, que ce soit à court terme en ce qui concerne le développement des maladies respiratoires comme l'asthme par exemple, mais également à long terme, concernant le développement de cancers du poumon et de maladies cardiovasculaires, on constate que ces liens sont de plus en plus clairement établis, et les études sont nombreuses à ce sujet. Les études d'impact sanitaire existantes indiquent également que ce sont les expositions chroniques correspondant à des niveaux de pollution modérés qui sont responsables de l'essentiel de l'impact sanitaire. Cela concerne donc indiscutablement la pollution de tous les jours. Tout cela justifie la poursuite de politiques destinées à maîtriser la pollution atmosphérique urbaine, particulièrement en relation avec les transports routiers.

Je vous remercie de votre attention.

- **M. Christian CABAL**

Merci pour cette présentation. Je vais donner la parole à M. RUIDAVETS, sur un exemple précis dans l'agglomération toulousaine.

### **5. M. Jean-Bernard RUIDAVETS, INSERM, Toulouse**

Je suis médecin, praticien hospitalier au CHU de Toulouse, et j'exerce mon activité médicale et de recherche dans le domaine cardiovasculaire. Le travail que je vais vous présenter a été mené en collaboration avec l'Institut national de veille sanitaire, car si j'ai des compétences dans le domaine des cardiopathies ischémiques, j'en ai peu dans celui de l'environnement. J'ai profité de la présence à Toulouse d'un médecin, le Dr. Sylvie CASSADOU, qui coordonnait le PSAS-9, pour entreprendre ce travail et rechercher de possibles facteurs de risque lié à l'environnement sur les cardiopathies ischémiques. Cela concerne essentiellement l'infarctus du myocarde.

Pour mettre en place cette étude, on avait besoin de trois types de données. Le premier est la météo, car la concentration de l'air atmosphérique

en polluants en est très dépendante, mais surtout parce que certains polluants, et notamment les polluants gazeux, peuvent être plus nocifs par une augmentation de la solubilité due par exemple à un taux d'humidité plus important et donc à une meilleure pénétration des voies aériennes vers la circulation sanguine de certains polluants gazeux. Il est donc important de tenir compte dans l'analyse de ces paramètres pour étudier et contrôler l'effet de la pollution. Le deuxième outil concerne les mesures de la pollution qui est faite dans la région Midi-Pyrénées, et notamment à Toulouse, par l'Observatoire régional de l'air en Midi-Pyrénées (ORAMIP). Enfin, un outil (il en existe trois en France) que l'on appelle un registre des cardiopathies ischémiques, par lequel on enregistre depuis 1985, date à laquelle on a mis en place ce registre sur le département de la Haute-Garonne pour les personnes âgées de 35 à 64 ans, l'ensemble des événements de cardiopathie ischémique (infarctus du myocarde) qui surviennent dans la population résidente de ce département, hommes et femmes. Les mesures sont faites par l'ORAMIP à l'aide de deux types de capteurs. Certains mesurent une pollution spécifique, qui n'est pas celle qui nous intéresse, par exemple la pollution automobile à un carrefour ou l'émission d'ammoniac à AZF, à l'époque. Notre intérêt est porté sur des capteurs qui mesurent la pollution moyenne, c'est-à-dire la pollution à laquelle la population est exposée tous les jours, et non pas seulement à des pollutions très spécifiques, soit en quantité soit en qualité.

Sur l'agglomération toulousaine, un certain nombre de capteurs sont positionnés pour mesurer cette pollution de fond. Plusieurs types de polluants sont mesurés, mais nous avons travaillé sur les trois premiers, les polluants gazeux, ozone, oxyde d'azote et dioxyde de soufre. Nous n'avons pas encore travaillé sur les particules, mais nous avons commencé le travail, car les indicateurs n'étaient pas fiables au moment où nous avons engagé cette étude.

Le registre, depuis 1985, concernait au départ les 35-64 ans, et nous l'avons étendu à une tranche d'âge supplémentaire d'une dizaine d'années. Nous arrivons maintenant à 74 ans. La zone cible étudiée est l'agglomération toulousaine, qui est couverte à la fois par les capteurs et par le registre. La population exposée, d'après le recensement de 1999, était environ de quatre cent mille habitants. Nous avons conduit l'étude de janvier 1997 à juin 1999. Je signale quelques indicateurs, notamment les taux d'incidence de l'infarctus du myocarde sur la communauté urbaine de Toulouse, en prenant en compte également les décès coronaires. En effet, l'infarctus du myocarde est une maladie à mortalité précoce, et souvent, les personnes n'ont pas le temps matériel d'être admises dans une structure hospitalière. Par conséquent, le fait d'enquêter auprès des médecins généralistes sur le dossier médical du sujet permet de qualifier ces décès de coronariens lorsque tous les éléments permettent de l'identifier. Enfin, on a également enregistré les morts subites, car certains infarctus du myocarde peuvent survenir subitement, massivement, entraînant une mort subite. C'est une maladie essentiellement masculine pour cette tranche d'âge, puisqu'elle concerne les hommes à 85-90 %.

La méthode d'analyse utilisée est une méthode à cas témoins croisés : on fait défiler tous les jours de l'année et, à chaque fois que l'on observe un infarctus, on apparie à ce jour-là un jour témoin. Dans ce cas, on a apparié quatre jours témoins. Lorsqu'un infarctus survenait un lundi, on appariait le lundi précédent, et au fur et à mesure, on faisait défiler. Le principe étant que si ce jour-là est survenu un infarctus, on peut penser que l'exposition était plus importante par rapport au jour témoin qui n'a pas eu d'infarctus avec donc une exposition plus faible. On a étudié la relation entre l'exposition au polluant au même jour que la survenue de l'infarctus du myocarde. Nous avons essayé de voir s'il y avait un temps de latence, le temps que les mécanismes physiopathologiques se mettent en jeu pour déclencher la maladie, puis nous avons examiné s'il y avait un effet cumulatif, c'est-à-dire si le fait d'avoir successivement des pollutions importantes entraînait un risque supplémentaire.

Pour l'ozone, on constate que le risque le même jour est de 1,05. Cela signifie que pour chaque augmentation dans l'atmosphère de 5 microgrammes par mètre cube d'ozone, il y a un risque de 5 % de faire un infarctus du myocarde. Ces relations sont très significatives et concernent à la fois le même jour et le jour précédent. En revanche, lorsqu'on remonte sur l'exposition en termes chronologiques, il n'y a plus de relations, puisque le risque relatif diminue à 1 environ. De la même façon, nous avons étudié l'exposition au dioxyde de soufre et au dioxyde d'azote. Aucune relation significative n'a été trouvée sur l'exposition à court terme. Nous avons examiné aussi si des populations particulières dans cet ensemble de population étaient plus à risque que d'autres. Nous avons pensé que probablement, les personnes qui avaient déjà une cardiopathie ischémique étaient plus à risque que ceux qui n'en avaient pas. Mais c'est l'inverse qui a été observé. Les personnes qui n'avaient aucun antécédent de cardiopathie ischémique avaient plus de risque de faire un infarctus du myocarde par rapport à ceux qui avaient déjà des antécédents. Les explications sont nombreuses, et ne restent que des hypothèses. On sait que ces personnes sont traitées par des vasodilatateurs et ce que l'on appelle des IOC, qui ont un rôle protecteur contre la vasoconstriction et la rechute de l'infarctus du myocarde. Probablement, ces traitements ont permis de diminuer le risque chez ces malades. Par ailleurs, on a examiné si le risque était plus important chez les personnes âgées (55-74 ans) par rapport aux plus jeunes (35-54 ans), et l'on s'est aperçu sans surprise que ce sont les plus âgés qui sont les plus à risque.

L'effet marquant est qu'il s'agit d'un risque à court terme. On peut dire que c'est dans les vingt-quatre heures qui précèdent l'infarctus du myocarde que les choses se sont passées. C'est une association spécifique. Jusqu'à présent, on avait travaillé sur des maladies cardio-vasculaires, des hospitalisations, des données hospitalières, de mortalité, mais jamais sur une pathologie spécifique, comme l'infarctus du myocarde. C'est une association robuste car quelles que soient les décisions que l'on prend, on retrouve toujours les mêmes relations. Cela affecte la population jeune (35-64 ans). Les plus âgés sont les plus sensibles, mais cela affecte également les personnes qui

n'avaient aucun précédent vasculaire et les jeunes. Enfin, c'est une relation linéaire, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de seuil. A chaque fois que l'on augmente la concentration de l'ozone, on augmente d'autant plus la survenue de l'infarctus du myocarde.

Sur les mécanismes physiopathologiques qui sont évoqués, on observe que c'est une relation à court terme. On évoque le rôle de l'inflammation, locale mais aussi générale. D'autres travaux ont montré que des marqueurs de l'inflammation produits par le foie sont des marqueurs généraux de l'inflammation, et que les marqueurs locaux produits autour des vaisseaux étaient augmentés lorsqu'on était exposé à de la pollution atmosphérique. Par ailleurs, on a démontré chez l'animal qu'il y avait une stimulation d'un vasoconstricteur (endothéline-1) mais aussi l'inhibition de la sécrétion de vaso-dilatateur. Enfin, on observe un rôle direct sur le système neurovégétatif. On a également montré que l'ozone avait un rôle sur la fréquence cardiaque, en la diminuant, à l'inverse des autres marqueurs ( $\text{NO}_2$  et  $\text{SO}_2$ ), qui sont cardio-accélérateurs.

En conclusion, je présente quelques données comparatives. On s'est posé la question de savoir pourquoi on ne trouvait pas d'association avec le  $\text{NO}_2$  ou le  $\text{SO}_2$ , alors que cela avait été décrit par ailleurs. On constate que, concernant le dioxyde d'azote, si on le compare à Toulouse, toutes les études qui ont montré une relation positive avec des taux très supérieurs à ceux que l'on observe à Toulouse, considèrent le taux moyen ou le taux médian sur la période d'étude. On constate que c'est deux à trois fois plus important. De la même façon, dans toutes les études qui ont montré une association entre le  $\text{SO}_2$  et la survenue de cardiopathies ischémiques, Toulouse a un taux très faible. La population étudiée n'est probablement pas suffisante en nombre pour mettre en évidence ces relations. Cependant, lorsqu'on examine l'ozone, on constate l'effet inverse : Toulouse compte des taux très élevés, comparables à Barcelone ou Mexico, et l'on a mis en évidence dans ces villes des relations équivalentes.

Je vous remercie.

- **M. Christian CABAL**

Merci pour cette présentation et pour les différentes présentations de cette première partie de cette matinée, puisque les intervenants ont respecté le cahier des charges du point de vue de la durée, ce qui les a parfois amenés à être un peu rapides. Nous avons une petite marge de temps pour passer à la partie questions ou commentaires sur cette première série d'interventions sur ces quatre thématiques de la matinée.

## **6. Débat avec la salle**

- **M. André DOUAUD, CCFA**

Je voudrais poser une question aux deux derniers intervenants, au sujet de leurs études, très intéressantes. Celles-ci prennent-elles aussi en compte les autres environnements que celui extérieur et la pollution d'origine automobile ? Je pense notamment à la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments, où l'on n'est pas seulement exposé à la pollution de la rue ?

- **Mme Valérie PERNELET**

Les différentes études que j'ai évoquées se basent en termes de qualification et quantification de l'exposition sur les niveaux de fond ambiants, c'est-à-dire que l'on considère que c'est l'exposition minimale. On peut penser que cela minimise le risque. Si l'on devait prendre en considération la pollution intérieure, on pourrait trouver des associations plus fortes. Mais la réponse est pour l'instant négative, les expositions intérieures n'étant pas prises en compte pour le moment. Les liens qui ont été démontrés concernent la pollution de fond et les maladies.

- **M. Jean-Bernard RUIDAVETS**

Je donnerai la même réponse. Nous avons surveillé quatre cent mille personnes, mais nous n'avons pas installé un capteur derrière chaque individu. C'est impossible à réaliser. De la même façon, on ne peut pas mesurer dans chaque appartement ou maison la pollution intérieure. Mais ce que vient d'indiquer Mme PERNELET est tout à fait exact. En prenant une valeur moyenne basse, on minimise les relations. En ce qui concerne la pollution extra-domicile, les relations ne pourraient être que supérieures à ce que l'on observe.

- **M. Christian CABAL**

Merci pour ces réponses.

- **M. Pascal DOUARD, ministère des Transports**

J'ai une question un peu naïve sur l'influence des oxydes d'azote sur la santé. Pour qualifier cette influence, vaut-il mieux raisonner sur l'ensemble des oxydes d'azote ou sur le NO<sub>2</sub> ?

- **Mme Valérie PERNELET**

Au sein de la famille des oxydes d'azote, c'est exclusivement le dioxyde d'azote qui pose problème sur la santé.

- **M. Christian CABAL**

C'est une réponse claire et précise.

- **Pr. Etienne FOURNIER, Académie de médecine**

Lorsqu'on décrit l'ozone et sa dispersion dans la région parisienne, on décrit une bande avec une zone plus marquante au niveau des agglomérations, mais la bande se prolonge très loin. Retrouve-t-on les mêmes phénomènes dans les hôpitaux parisiens, dans les hôpitaux du Sud, du Nord, et y a-t-il des corrélations établies permettant une comparaison peut-être un peu plus étendue ?

- **Mme Valérie PERNELET**

En ce qui concerne l'étude de l'ORS sur la région Ile-de-France, les corrélations qui ont été mises en évidence entre indicateurs de pollution atmosphérique et indicateurs sanitaires ont concerné l'ensemble de l'agglomération. Cela recouvrait Paris et les départements de la Petite couronne, mais l'étude n'a pas été jusqu'à mettre en évidence de distinction entre les différentes zones de cette couverture géographique qui avait été prise en compte.

- **M. Philippe LAMELOISE**

Ce type d'études complémentaires n'existe pas en France, mais de nombreuses études ont été réalisées aux Etats-Unis, où l'on a étudié les

capacités respiratoires d'enfants dans des camps d'été éloignés de 100 à 150 km de Los Angeles, sur les montagnes. On a pu identifier clairement des problématiques plus importantes pour ces enfants, exposés à des niveaux plus forts que ceux existant en ville.

- **M. Claude GATIGNOL**

Nous avons constaté sur les graphiques une baisse des émissions de nos véhicules. Comment peut-on l'intégrer dans la conséquence vis-à-vis de la santé ? Nous avons des mesures, et la photographie concernant les conséquences sur la santé, qui sont enregistrées depuis plusieurs années : peut-on faire une réflexion sur ce sujet ?

- **Mme Valérie PERNELET**

En termes de parts attribuables aux émissions du trafic routier et ce que l'on pourrait mettre en face en termes d'indicateurs sanitaires, on n'arrive pas à le faire pour l'instant. On part d'indicateurs de pollution mesurée dans l'environnement général et qui considèrent l'ensemble des sources contribuant à ce niveau de pollution. On ne peut pas, pour la population générale, montrer de lien particulier entre la pollution spécifiquement liée au trafic et l'état sanitaire d'une population. On peut le faire pour un indicateur de pollution atmosphérique général, mais pas spécifiquement lié aux émissions du trafic.

- **M. Claude GATIGNOL**

Est-il possible de faire des approches différentes entre le moteur diesel qui est produit par un constructeur en 2005 et celui qui roule toujours, qui a été produit en 1990, par exemple ?

- **M. Philippe LAMELOISE**

Il existe en effet des différences en termes d'émissions qui sont très importantes. En particulier, en matière d'émission de particules fines. C'est intégré dans nos calculs et notre inventaire d'émissions, mais c'est quelque chose que je n'ai pas eu le temps de développer. Un véhicule diesel actuel émet, avec presque un ordre de grandeur à facteur 10, de particules en moins qu'un véhicule non équipé d'il y a une dizaine d'années.

- **M. Claude GATIGNOL**

M. SELLES, représentant de la Commission, a signalé le choix de celle-ci de ne pas réglementer à ce jour les oxydes d'azote. Pouvez-vous nous donner quelques précisions supplémentaires sur les raisons qui vous ont amené à nous dire cela ?

- **M. Laurent SELLES**

J'ai été très bref. Les oxydes d'azote, pour les véhicules particuliers, les voitures de tourisme, ont été réduits de plus de 80 % entre Euro 1 et Euro 4, en application depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2005. Euro 5 va entrer en application en 2009, et nous proposons une réduction de 20 % par rapport à Euro 4. Pour les particules, c'était plus facile, car le filtre à particules développé par le groupe PSA a permis de les réduire. En demandant que dans Euro 5, en 2008, les filtres à particules soient obligatoires, on réduit tout de suite de facteur 10 les émissions de particules. Pour les oxydes d'azote, c'est plus compliqué car la technologie est beaucoup plus chère. On risque donc de tuer le marché des petites voitures diesel. Sur les grosses voitures, il n'y a pas tellement de différences. On s'aperçoit que sur une voiture de 1 000 cm<sup>3</sup> il y a une différence de prix entre l'essence et le diesel de 1 000 à 2 000 €. Pour les voitures à plus de 30 000 €, il n'y a plus de différence. On fait attention au risque de dérapage.

Le gros problème, c'est l'effet de parc. On établit des normes, mais cela ne concerne que les voitures neuves. Le parc moyen a sept ans d'âge. Cela veut dire que certaines voitures ont vingt ans, sans parler des camions et des motocyclettes. Il faut attendre dix ans pour que les bienfaits d'une réglementation européenne se traduisent dans l'air des villes, et des campagnes.

- **M. Christian CABAL**

Justement, sur ce point de méthodologie de définition des normes Euro 4 et Euro 5, dans quelle instance, au niveau de la Commission, et sous quelle forme, sont élaborées ces normes ? Sur un avis d'experts, en fonction de considérations liées à l'industrie ? Quels sont les paramètres qui jouent pour définir ces normes ?

- **M. Laurent SELLES**

D'abord, nous nous appuyons sur les études menées dans les Etats membres essentiellement, sur ce qui est faisable. On obtient ainsi un nuage de points, et l'on examine quel est le niveau de sévérité, en estimant combien de véhicules on va retirer du marché. Il faut être ambitieux, mais pas trop, au risque d'être contre-productifs. Les niveaux de pollution vont continuer à décroître, mais on ne peut pas aller trop vite.

Des études sont faites dans les Etats membres, on fait l'analyse, comme je l'ai indiqué, selon les trois pôles du développement durable : l'impact économique, l'impact du bénéfice social, sur la sécurité (combien de morts pourront être sauvés), l'impact sur l'environnement, et c'est toujours en fonction de ces trois critères que l'on définit un niveau. Les décisions sont prises par les Etats membres. Nous proposons à la Commission, et le Conseil va se réunir dès le début 2006 pour réfléchir sur la proposition Euro 5. C'est lui qui décidera, dans sa sagesse, avec l'aide du Parlement, si c'est trop sévère, pas assez, ou s'il faut une année de plus ou de moins pour mettre cela en application.

- **M. Christian CABAL**

La pratique, ces dernières années, vous a-t-elle montré que vos propositions étaient suivies, ou y a-t-il des réticences ou des objections ?

- **M. Laurent SELLES**

En général, les propositions sont suivies. Par expérience, le Parlement européen est imprévisible, ce qui n'est pas forcément négatif. Pour ce qui est du Conseil, on arrive à savoir car avant de soumettre notre position, on la teste à Paris, à Londres, pour savoir si elle est viable. Au Parlement européen, c'est plus délicat, car on ne peut pas interroger sept cent trente-deux députés. En général, on fait beaucoup d'analyses d'impact afin d'étayer complètement nos propositions de façon à ce qu'elles ne puissent pas être trop amendées. On réagit sur les amendements en arguant, mais le dernier mot, c'est le Parlement et le Conseil qui l'ont.

- **M. Christian CABAL**

Il n'y a pas eu de situations conflictuelles...

- **M. Laurent SELLES**

Pas sur les émissions. Les industriels sont tout à fait favorables au marché intérieur des véhicules, et en matière de sécurité routière et d'émissions des véhicules, nous n'avons jamais eu de gros problèmes au Parlement, ni au Conseil.

- **Un auditeur**

A propos de la consommation de 140 g de CO<sub>2</sub>/km, cela concerne la consommation normalisée, qui est souvent différente de la consommation réelle des véhicules. Au niveau européen, on essaie d'être plus en rapport avec la consommation réelle, en particulier l'influence de l'utilisation de la climatisation sur la consommation. Pouvez-vous nous dire quelque chose à ce sujet ?

- **M. Laurent SELLES**

La question des protocoles d'essai est très compliquée, car la consommation d'un véhicule est une série, qui monte et descend, sur un facteur 100. Il convient donc de lisser cela avec un modèle qui colle le plus possible à la réalité. Comme le marché, la production est mondiale, et le cycle d'essai doit être normalisé au niveau des Nations unies. Nous travaillons avec les groupes de rapporteurs des Nations unies des quarante-quatre pays afin d'obtenir un cycle d'essai normalisé au niveau mondial pour les poids lourds, mais aussi pour les deux roues. La semaine dernière, une proposition a été faite pour les voitures particulières. Mais c'est difficile car chaque culture automobile est différente, aux Etats-Unis, au Japon, en Europe. Il est assez difficile de définir des cycles d'essai. De plus, on note une complication. Les voitures sont maintenant des boîtes auto-adaptatives, semi-automatiques ou des systèmes X-Drive, avec quatre roues motrices et toutes les applications à bord, comme l'air conditionné. C'est donc difficile mais on y travaille. Le problème concerne le consensus car on n'a que des cas particuliers.

- **M. Claude GATIGNOL**

Puisque nous avons la chance d'avoir les représentants d'Airparif et de l'AFSSE, j'aurais voulu savoir comment vous définissez à la fois les objectifs et les seuils d'Airparif, par exemple, pour 2010. Est-ce une réflexion propre à votre structure ? Vous inspirez-vous d'une réglementation internationale, ou européenne, avec les difficultés que l'on vient de nous

signaler ? Comment cela se passe-t-il dans vos définitions de vos objectifs et de vos seuils ?

- **M. Philippe LAMELOISE**

Airparif ne définit ni les objectifs ni les seuils. Dans le cadre de travaux menés jusqu'à maintenant par l'Etat et qui vont l'être aussi par le Conseil régional dans le cadre de la remise en chantier du Plan régional de qualité de l'air (PRQA), avec l'élaboration par l'Etat du Plan de protection de l'atmosphère (PPA), on confie à Airparif, ou à d'autres, un certain nombre de travaux pour évaluer l'efficacité des actions qui vont être mises en œuvre dans ce qu'elles permettent ou non d'atteindre les objectifs de la qualité de l'air définis au niveau européen ou au niveau national. Un certain nombre d'engagements au niveau français sont définis au niveau des directives de l'Union européenne en matière de qualité de l'air, que l'on doit respecter à un certain horizon, celui de 2010 étant important de ce point de vue. A travers des modèles de simulation, Airparif calcule, en fonction des différentes actions et des réductions d'émissions qu'elles génèrent, si elles permettent ou non d'atteindre les objectifs de qualité de l'air que l'on s'est assignés ou que l'on a acceptés pour 2010.

- **M. Claude GATIGNOL**

Ces propositions vont-elles par exemple jusqu'à des analyses des flux de circulation sur certains axes ?

- **M. Philippe LAMELOISE**

On part d'une description du trafic relativement précise. Pour utiliser des termes techniques, on a 256 matrices de trafic qui décrivent tous les grands types de jours, ouvrables, sachant qu'il y a des nuances dans les jours ouvrables, les vendredis ne ressemblant pas aux jeudis, et différentes heures de circulation entre les heures de pointe du matin et du soir, l'heure d'activité de la journée, ou heures creuses de la nuit. Ce sont de grands outils.

- **M. Christian CABAL**

S'il n'y a pas d'autre question sur cette première série d'interventions, je propose que nous marquions une pause avant de prendre la deuxième série d'interventions de la matinée.

***B. DEUXIÈME TABLE RONDE :  
QUELLES SOLUTIONS DANS LES DIX PROCHAINES ANNÉES ?***

• **M. Christian CABAL**

Je propose à M. LE BRETON, de Total, de nous faire une présentation sur les carburants et leur formulation.

**1. M. Daniel LE BRETON, Chef du Département « Transport Energie », Total**

Nous allons examiner rapidement un panorama sur les carburants puis nous ferons un retour en arrière sur l'évolution des carburants, avec comme premier sujet la réduction des émissions polluantes. C'est l'objet des quinze dernières années pour les carburants et des trente dernières années au moins pour les véhicules. Pour commencer, le plomb a disparu avec l'usage des pots catalytiques qui sont arrivés sur les véhicules à essence en 1993. Le plomb des essences n'a pas disparu brutalement à cette époque, puisqu'une grande partie du parc automobile avait encore besoin de l'essence plombée. Il a fini par disparaître en 2000 et à être remplacé pour les quelques véhicules anciens par un substitut permettant de protéger les sièges de soupape. Le soufre est en train de disparaître pour permettre l'efficacité maximale des pots catalytiques. Vous avez eu une illustration du changement de spécification du benzène, qui est passé de 5 à 1 %, et vous avez vu que cela se traduit immédiatement sur les émissions de benzène. Même si le degré n'est pas comparable, les véhicules actuels émettent toujours un peu de benzène par combustion, y compris les véhicules diesel. C'est très faible, mais la combustion est toujours à l'origine d'émissions de benzène et pas seulement de benzène dans les produits. En ce qui concerne les polyaromatiques des gazoles, une famille particulière a été limitée en teneur pour réduire les émissions de particules. Cela a été l'objet de la directive carburants de 1998. Cette directive est d'ailleurs en cours de révision, avec un amendement qui sera proposé par la Commission d'ici la fin de l'année, qui rectifiera ou amendera certaines spécifications actuelles.

Aujourd'hui, on constate que l'on franchit à nouveau des étapes en termes de technologie. J'ai pris deux exemples : les pièges à particules, qui sont déjà en service sur certains véhicules et qui vont probablement être étendus à tous les véhicules diesel neufs européens à partir d'Euro 5. J'évoquerai également la catalyse sélective pour la réduction des oxydes d'azote, qui sont formés également par combustion. Les moyens d'agir sont faibles dans ce domaine. Dans le cadre des poids lourds, la technologie qui va

se développer et qui va se commercialiser à partir de 2005-2006 mais plus notablement 2008-2009, va faire appel à la réduction par l'urée. Nous aurons dans certaines stations-service des distributeurs d'urée. Ce ne sera pas la seule manière de distribuer l'urée, et c'est réservé uniquement aux poids lourds pour l'instant. Pour vous donner une échelle, d'ici quatre ou cinq ans, il y aura près de cinq cents stations en Europe. Deux compagnies pétrolières en ont annoncé : une compagnie autrichienne, WENVE, et nous-mêmes, avec quatre cents stations. Nous verrons si les autres compagnies prévoient d'installer des stations d'ici là.

Par ailleurs, d'ici le 1<sup>er</sup> janvier 2009, il n'y aura plus que des carburants sans soufre en Europe. Une petite quantité est distribuée en France actuellement. Tout le Super 98 en France est sans soufre, ainsi qu'une partie du gazole. Deux émissions de polluants sont donc encore sujettes à problème, qui ont été évoqués longuement, les oxydes d'azote et les particules. La Commission continuera à déployer des efforts pour réduire ces deux polluants. En ce qui concerne les biocarburants, qui sont dans le panorama depuis un certain temps, leur vertu principale est la réduction des gaz à effet de serre. Ils sont sans plomb ni soufre, même s'ils ont quelques PPM de soufre. Ils sont sans aromatiques par nature, mais chacun a ses « petites misères », et en général les oxygénés sont des précurseurs d'émissions d'aldéhydes.

Pour satisfaire la directive européenne, il existe une limite de teneur en oxygène qui tient au fonctionnement des véhicules. Ces carburants (j'ai pris le cas français), sont utilisés depuis plus de dix ans en mélange dans les carburants conventionnels. Vous ne les voyez pas mais vous les avez à la pompe. On a surtout utilisé en France de l'ETBE, produit dérivé de l'éthanol, et l'ester méthylique d'huile végétale, qui est surtout en France de l'ester méthylique d'huile de colza. On parle beaucoup d'éthanol. Si je me place dans un cadre international, on commence à parler d'éthanol en tant que filière avec des véhicules capables de rouler avec des quantités d'éthanol très importantes. Il y en a un peu aux Etats-Unis, et cela se développe très vite au Brésil actuellement, où deux tiers des nouvelles immatriculations sont des véhicules dits flexibles.

En ce qui concerne le futur, je vous présente un schéma avec la ressource actuelle, avec des alcools ou des huiles, des produits oxygénés, qui posent des problèmes de logistique et de compatibilité. C'est une ressource relativement limitée. On est ensuite passé dans la première génération, avec la transformation de ces produits. Au bout de cette transformation, ils deviennent compatibles et fongibles avec les carburants conventionnels, mais ils sont toujours limités par le pourcentage maximum d'oxygène dû à la combustion dans les moteurs. On parle maintenant de seconde génération des biocarburants. Pour simplifier, ce sont des biohydrocarbures issus de la synthèse par transformation de la biomasse. Chimiquement, ce sont les mêmes familles d'hydrocarbures, mais elles ont la vertu d'être renouvelables. Dans cette perspective, les procédés mis en œuvre sont capables de prendre des

ressources beaucoup plus diversifiées que les ressources actuelles. Le premier exemple en Europe avant 2008 concerne les biohydrocarbures fabriqués par le procédé dit NExBTL, invention de la compagnie finlandaise Neste Oil, qui est le pétrolier finlandais. Celle-ci a une usine pilote en cours de construction, et nous avons signé un accord avec elle pour construire une seconde usine qui ne sera plus aussi pilote, puisqu'elle va faire environ 200 000 tonnes de produits, essentiellement du gazole. J'ai illustré avec quelques exemples assez réducteurs ce que cela pouvait être.

Le premier procédé que l'on va voir apparaître en Europe, c'est le procédé NExBTL. On peut utiliser des huiles ou des graisses animales pour les convertir en hydrocarbures. Cela donne une coupe qui est majoritairement du gazole, avec une petite dose d'essence. Il existe d'autres procédés auxquels on s'intéresse, dont un qui commence à être connu, qui est la conversion de « biomass to liquid » (BTL), qui consiste à gazéifier la biomasse puis à faire une synthèse et à recomposer le gaz de synthèse en hydrocarbure. C'est un procédé assez complexe. Il existe une usine pilote en Allemagne. C'est un sujet d'étude très intéressant. L'usine de synthèse des hydrocarbures est assez compliquée et lourde, et elle a des problèmes d'échelle. En général, les usines de ce type sont assez importantes afin de pouvoir les intégrer dans un site industriel. Dès que l'on parle biomasse, on a un problème de diffusion. On ne peut pas imaginer que l'on va récupérer de la biomasse à mille kilomètres de l'usine. Il faut le faire dans un périmètre assez restreint autour de l'usine. C'est porteur de potentiel, avec une flexibilité grande, que ce soit sur les charges ou les sorties, les productions. On fait essentiellement du gazole de cette façon, mais on pourrait aussi faire de l'essence avec ce type de process. Un procédé qui est presque concurrent, mais qui représente une autre voie, est celui dit de la thermolyse. On convertit la biomasse, on la liquéfie en quelque sorte sous la forme d'un biobrut, dont on peut imaginer qu'on le traite de manière fossile dans une raffinerie qu'il faut adapter. Cela a la vertu de prendre beaucoup de charges différentes et de produire d'autres composés utilisables en dehors des carburants, dérivés de la biomasse directement. Une fois que cela rentrera dans l'usine, on ne saura pas nécessairement retrouver les molécules de biomasse.

Un autre procédé, que j'ai mis en seconde génération, mais qui permet de produire un produit de première génération, l'éthanol, est l'hydrolyse enzymatique, qui a la vertu de convertir de la lignocellulose en éthanol avec un bilan de gaz à effet de serre très intéressant. C'est un procédé qui intéresse beaucoup les marchés nord-américains, qui sont principalement à essence. Il existe une usine pilote au Canada. Cela a à peu près le même statut que la gazéification de la biomasse. La perspective pour ces trois derniers types de procédés se situe entre 2015 et 2020. En effet, avoir des démonstrateurs est une chose, mais passer au stade industriel comme on l'est dans la version NExBTL est une autre chose, et cela demande encore pas mal de travaux.

J'ajoute pour terminer quelques mots sur l'hydrogène, qui a été évoqué rapidement, pour dire qu'on le conçoit comme une éventualité dans le futur. Certaines personnes ici ont pu visiter une station d'hydrogène que nous avons en Allemagne et conduire un véhicule à pile à combustible. Cela roule, mais c'est très cher. On n'envisage pas cela avant une quinzaine ou une vingtaine d'années. Nous nous préoccupons de savoir si distribuer l'hydrogène est quelque chose de complexe et acceptable par la clientèle, et à quel prix cela peut conduire à l'hydrogène, en souhaitant qu'une bonne partie soit renouvelable. Comme cela a été dit, la majorité de l'hydrogène fabriqué actuellement dans le monde est issue de la conversion du gaz naturel.

- **M. Christian CABAL**

Merci. Je vais donner la parole à Monsieur BELOT, qui va nous parler du traitement des émissions.

## **2. M. Gérard BELOT, Direction de l'environnement automobile et du développement durable, PSA**

Messieurs les Députés, Mesdames et Messieurs. J'ai au sein de la Stratégie et du Plan du groupe PSA Peugeot-Citroën la responsabilité de coordonner les positions techniques dans le domaine des carburants et des émissions. C'est donc à ce titre que j'ai eu l'honneur d'être invité pour parler des techniques de dépollution des moteurs, et notamment pour faire un bilan en ce qui concerne leur maturité et leur efficacité.

Il existe deux convertisseurs énergétiques utilisés dans l'automobile : l'essence et le diesel. L'essence est un moteur que l'on qualifie de moteur à allumage commandé, qui fonctionne sur une combustion dite stœchiométrique homogène. Stœchiométrique signifie que l'on s'applique à ce qu'il y ait en permanence dans la chambre de combustion autant de carburant que d'air nécessaire à la combustion complète du carburant. C'est donc un équivalent d'oxydo-réduction, pour parler plus savamment. Homogène signifie que le mélange air/essence est fabriqué avant d'être introduit dans la chambre de combustion pour avoir dans cette chambre de combustion un mélange très intime entre l'air et l'oxygène, qui va permettre la combustion, et le carburant vaporisé.

Le diesel fonctionne sur un mode totalement différent, qui est un mode d'allumage par compression. Cela consiste à comprimer de l'air par le mouvement du piston vers le haut. Dans cet air comprimé, qui est de ce fait échauffé, on injecte une petite quantité de carburant qui va donner l'énergie,

par combustion. Cette combustion est dite en excès d'air, parce que, quelles que soient les conditions de fonctionnement, ou pratiquement, on admet toujours dans le moteur, à chaque temps moteur, la même quantité d'air qui est celle imposée par la volumétrie du cylindre du piston. C'est hétérogène parce qu'on injecte le carburant dans une masse d'air chaude, et que cela donne lieu à une combustion essentiellement hétérogène. Le moteur thermique est un système. Ce n'est pas un dispositif destiné à fabriquer de l'énergie uniquement, mais il doit s'intégrer totalement dans la chaîne que l'on appelle thermomécanique, qui doit prendre en compte les systèmes de dépollution.

Un moteur doit être optimisé car il doit satisfaire un certain nombre de critères et d'obligations, liées notamment au rendement énergétique que l'on souhaite le plus élevé possible, à la consommation de carburant, ce qui n'est pas tout à fait équivalent au rendement, à la puissance et au couple, c'est-à-dire la qualité qu'aura un moteur de donner de l'énergie au moment où l'on a besoin, et de la façon la plus régulière possible. Les émissions gazeuses et particulaires font partie de ce que l'on appelle l'optimisation, et l'acoustique et les vibrations sont également prises en compte. Ce n'est pas une liste limitative, mais elle montre que souvent, cette optimisation est basée sur des antinomies, et que l'on est amené à gérer en permanence des compromis.

Je vais parler du moteur essence et de ce que l'on appelle couramment la catalyse trois voies, en m'appuyant sur un schéma qui peut paraître complexe, mais qui est relativement simple. C'est un catalyseur, et c'est donc la pièce de céramique qui est placée dans la ligne d'échappement (cela représente deux litres de volume). Ce catalyseur est constitué d'un support de céramique, forme nid d'abeille, et donc les gaz peuvent traverser ce support. Sur celui-ci sont déposés des matériaux réfractaires, des oxydes métalliques, aluminés, sur lesquels sont dispersés les métaux précieux (platine, palladium, rhodium) à la surface desquels les réactions catalytiques vont avoir lieu. Pour donner une idée, le rôle de ce que l'on appelle le washcoat, c'est-à-dire la phase active sur laquelle sont dispersés les métaux précieux, offre une surface de contact très importante au gaz d'échappement. Pour avoir une référence simple, c'est la taille d'un terrain de football. Autrement dit, le washcoat, du fait de sa très haute porosité, offre au gaz d'échappement une surface d'échange très vaste sur laquelle sont déposés les métaux précieux où s'effectuent les actes catalytiques.

Sur le schéma de fonctionnement de la catalyse trois voies, on voit qu'elle exige que la stœchiométrie soit respectée. Cela signifie qu'en permanence, on va mesurer la quantité d'oxygène présente dans le gaz d'échappement, pour que celle-ci soit le plus près possible de ce que l'on appelle la stœchiométrie, c'est-à-dire la richesse 1. Si l'on s'écarte de cette richesse, si l'on va du côté pauvre ou du côté riche, le catalyseur ne va plus remplir sa fonction trois voies, de convertir simultanément le monoxyde de carbone et les hydrocarbures, qui sont des réducteurs, et l'oxyde d'azote, qui est un oxydant, plus les restes d'oxygène qui sont présents dans les gaz

d'échappement. Moyennant un maintien aussi strict que possible au voisinage de la richesse 1, le dispositif va offrir un taux de conversion optimal pour les trois polluants (CO, HC, NOx) et de ce fait, exercer sur les gaz d'échappement une conversion qui va ramener les niveaux de ces trois polluants à des valeurs très basses. Cette catalyse trois voies est en action depuis très longtemps. Elle remonte aux années 70, où elle a été introduite aux Etats-Unis. Aujourd'hui, on peut dire qu'elle a fait ses preuves, sachant que pour la mettre en œuvre, il faut également respecter des conditions de température, de vitesse d'écoulement, qui permettent d'obtenir son optimum d'efficacité.

En ce qui concerne le diesel, je vais parler des nouveaux moteurs, qui font appel à une technologie d'injection dite « common rail haute pression », qui chez PSA Peugeot-Citroën a pris l'appellation HDI. Cette technologie, lancée en 1998, a la propriété de découpler complètement l'injection de la mécanique. Cela signifie que le système d'injection est devenu autonome. Il peut être commandé de façon électronique, séparément, sur chaque injecteur, de façon à gérer la combustion, cylindre après cylindre, dans tout le cycle moteur. C'est un avantage considérable, car cela permet d'une part de très hautes pressions d'injection et une vaporisation ou dispersion du carburant de très haute qualité, qui donne une combustion que je ne qualifierai pas d'homogène mais qui tend à s'en rapprocher. De ce fait, cela diminue d'une part les NOx et d'autre part les particules. C'est le carré magique, que l'on a pour habitude d'utiliser pour qualifier ces nouveaux moteurs diesel, avec un gain de 15 à 20 % au niveau de la consommation par rapport au moteur remplacé. Cela place le diesel à 25 % de l'essence, avec un agrément de conduite, grâce au couple, le silence de fonctionnement, en raison d'une injection pilotée très finement, ce qui évite les bruits liés à la combustion brutale, et les émissions qui sont réduites de facto par ce nouveau système d'injection.

Grâce à ce système d'injection très performant, qui permet une gestion très précise du mode d'injection, il a été possible de développer le filtre à particules, qui les éradique totalement. Lorsqu'on mesure le nombre de particules, la diminution est de quatre ordres de grandeur. On divise par dix mille le nombre de particules grâce à ce dispositif. Celui-ci repose sur trois contributeurs importants :

- le filtre proprement dit, en carbure de silicium, qui a des propriétés thermomécaniques exceptionnelles, permettant de stocker et de régénérer régulièrement et sans dommages, tout en conservant l'efficacité ;
- le système d'injection « common rail », qui permet de gérer l'injection de façon précise. On peut observer que dans le même cycle moteur, on est capable de générer trois injections distinctes, la première étant appelée pilote, qui va préparer la combustion et diminuer le bruit, la seconde, qui va donner

l'énergie, et la troisième, que l'on active uniquement lorsque c'est nécessaire, qui permet la régénération du filtre à particules, tout simplement parce qu'en injectant du carburant dans la phase de détente du cycle moteur, on fabrique des calories, on réchauffe les gaz d'échappement, on fabrique dans le même temps des hydrocarbures excédentaires qui vont brûler sur le catalyseur d'oxydation en amont du filtre à particules, et qui vont de ce fait contribuer à réchauffer les gaz pour assurer la combustion ;

- le troisième élément indispensable est l'additif. Les véhicules équipés du système filtre à particules disposent d'un petit réservoir renfermant un additif à base d'oxyde de cérium, qui est ajouté au carburant chaque fois qu'on fait le plein. Ainsi, chaque plein est détecté par l'électronique, dont on mesure le volume, et l'on injecte la quantité adéquate de cet additif qui a des propriétés très importantes pour le bon fonctionnement. D'une part, on abaisse la température de combustion des particules d'environ cent degrés, puisque l'on retrouve cet additif dans les particules. D'autre part, la régénération va avoir lieu très rapidement car cet additif joue le rôle de médiateur de l'oxydation, et la combustion des particules va être rapide et complexe (trois à quatre minutes pour nettoyer complètement le filtre).

Voici donc un dispositif qui aujourd'hui confère au diesel une qualité en termes d'émissions particulières que j'ose qualifier de parfaite. Nous revendiquons cette technologie diesel et nous avons des raisons de le faire, puisque nous avons produit un million et demi de moteurs en 2004. Le filtre à particules (il y en a environ un million quatre cent mille), sans failles et sans difficultés, c'est également la possibilité pour PSA Peugeot-Citroën d'implanter du diesel sur d'autres continents, la Chine et l'Amérique du Sud notamment grâce à ses qualités d'économie et de propreté maintenant.

Le point dur du diesel, ce sont les oxydes d'azote. Pour les particules, comme on vient de l'indiquer, le traitement est assuré et il fonctionne. La gestion des émissions d'oxyde d'azote pour le diesel relève de technologies de post-traitement. Nous en avons identifié deux sur lesquelles nous travaillons depuis longtemps, et pour lesquelles nous souhaitons vous faire part de l'état des lieux. La première, c'est la technologie dite piège à NOx. Sur le schéma descriptif du mécanisme de fonctionnement du piège à NOx, on a changé complètement d'échelle et l'on est pratiquement à l'échelle moléculaire. On voit sur le support catalytique les actes catalytiques qui permettent de traiter les oxydes d'azote de façon différée par piégeage. Les oxydes d'azote, NO et NO<sub>2</sub>, sont transformés grâce à l'oxygène résiduel des gaz d'échappement, sur du platine en NO<sub>2</sub>, qui va être piégé par un matériau qui a l'aptitude de réagir avec les oxydes d'azote pour former les nitrates. Pour simplifier, on va dire

que c'est du baryum. Le catalyseur comprend des sites renfermant des petites quantités de baryum, qui vont capturer le dioxyde d'azote, pour en faire du nitrate de baryum. Celui-ci est stable tant et aussi longtemps qu'on ne le perturbe pas du point de vue thermo-chimique. Dans un moteur diesel, qui est essentiellement pauvre à l'échappement (excès d'oxygène), on va fonctionner pendant typiquement soixante secondes dans les conditions pauvres, pendant lesquelles on va piéger les oxydes d'azote. Périodiquement, on va obliger le diesel à fonctionner dans des conditions riches ou stœchiométriques, et dans ces conditions, on déstabilise le nitrate de baryum. Autrement dit, celui-ci va se décomposer pour redonner des oxydes d'azote qui vont être convertis comme sur un catalyseur trois voies sur le rhodium, dans l'atmosphère riche en azote, dioxyde de carbone et eau. On a réussi, par cet artifice, à stocker les oxydes d'azote, puis à les déstocker en les traitant, de façon à les éliminer à l'échappement. Le problème, c'est que les oxydes d'azote et le soufre ont le même comportement vis-à-vis des matériaux chargés de leur piégeage, et que l'on va lentement, mais sûrement, sulfater ces sites de capture des oxydes d'azote, et que périodiquement, il va falloir les désulfater. Cela signifie que l'on monte à des températures supérieures à 600 ou 650 degrés pour que cette désulfatation libère en quelque sorte les sites actifs et les rende disponibles de façon permanente pour traiter les oxydes d'azote. Lorsqu'on combine ces deux opérations, c'est complexe et cela consomme de l'énergie.

Nous étudions les systèmes filtre à particules. Ils fonctionnent, mais leur durabilité n'est pas garantie. A partir de quarante à cinquante mille kilomètres, le dispositif perd de l'efficacité, qui initialement était aux environs de 60-70 % pour tomber à 20-25 %, ce qui est insuffisant pour assurer la dépollution de façon pérenne pour le diesel. La catalyse SCR est une alternative à la catalyse des NOx par piège, basée sur un concept qui existe depuis très longtemps utilisé dans les stations fixes, et qui fonctionne bien. Cela consiste à injecter du gaz d'ammoniac, NH<sub>3</sub>, sur un catalyseur spécifique à base d'oxyde de vanadium, et dans ces conditions les oxydes d'azote sont traités de façon sélective, même en présence d'oxygène, pour donner de l'azote, du dioxyde de carbone et de l'eau.

L'application aux véhicules, aux sources mobiles, est possible. Sur les poids lourds, elle est déjà envisagée et elle entre en action. Elle est possible moyennant un réservoir supplémentaire et un dispositif que je ne vais pas commenter intégralement, mais qui consiste, dans les phases détectées comme particulièrement émettrices d'oxyde d'azote, à injecter de l'urée, sous forme solution aqueuse, qui à température convenable va se décomposer pour donner de l'ammoniac. C'est cet ammoniac, réducteur sélectif, qui va détruire les oxydes d'azote sur un catalyseur qui est tout aussi spécifique. Si cela marche bien dans les stations fixes, c'est parce que la température y est fixe, ainsi que les vitesses spatiales. Sur un moteur, on change en permanence de régime. Cela signifie que l'on va devoir gérer un dispositif de traitement qui prend en compte ce que l'on appelle les transitoires. Sur un poids lourd, c'est faisable, parce qu'il fonctionne sur des rythmes constants. Un véhicule automobile

fonctionne essentiellement sur des rythmes variables. Il existe une perspective claire d'amélioration de la situation, mais elle doit être gérée en évitant d'envoyer de l'ammoniac dans l'atmosphère, en construisant un dispositif de contrôle très précis, dont je rappelle qu'il doit être couplé avec le filtre à particules comme doit être également couplé le piège à NOx. Cela veut dire que c'est la gestion simultanée de deux systèmes séquentiels, et cela nécessite une mise au point.

La technologie SCR à l'urée convertit très bien les NOx. Le réducteur est disponible et M. LE BRETON en a fait état. Dans les stations-service la situation ne fera que s'améliorer. Il reste quelques obstacles à gérer, comme le gel de la solution, ce qui paraît banal. Sur un poids lourd, cela peut être géré, mais pas sur un véhicule particulier. Le volume du réservoir, ce sont vingt litres à implanter ; l'infrastructure de distribution n'est pas encore disponible mais elle se définit. Surtout, le fonctionnement est totalement défaillant à moins de deux cents degrés.

Concernant le post-traitement des émissions gazeuses et particulières des véhicules particuliers, nous avons fait un bilan technologique. La catalyse trois voies, c'est éprouvé robuste ; l'amélioration du rendement de la conversion est liée essentiellement à une charge en métaux précieux, ce qui signifie une dépendance vis-à-vis de la fourniture des métaux précieux (il est important de le souligner car on l'oublie souvent) ; le filtre à particules additivé PSA Peugeot-Citroën fonctionne, la technologie est éprouvée et robuste, avec un million quatre cents véhicules en circulation, et le déploiement se poursuit ; on observe une surconsommation modérée (moins de 1 %) ; le piège à NOx est un principe validé, avec un rendement de conversion voisin de 50 %, et une durabilité insuffisante ; la charge en métaux précieux est sûrement très importante, et l'on observe surtout une surconsommation de 5 %. La réduction catalytique sélective est un dispositif qui a besoin d'être amélioré et validé pour trouver un fonctionnement satisfaisant dans les situations transitoires.

Je vous remercie de votre aimable attention.

- **M. Christian CABAL**

Merci, cette présentation était très importante. M. HERRIER va nous présenter les nouvelles techniques de combustion.

### **3. M. Dominique HERRIER, Directeur adjoint, IFP**

Messieurs les Députés, Mesdames, Messieurs, l'objectif de mon propos est assez complémentaire par rapport aux deux précédents, car il va

porter sur la dépollution à la source, la production même des dépolluants au sein de la chambre de combustion. Cet exposé va être plus spécialement focalisé vers les nouveaux concepts de combustion, ce qui ne veut pas dire qu'avec les concepts actuels il n'y ait pas d'amélioration permanente de la production et la maîtrise des polluants à la source. Mais comme vous allez le voir au cours de cet exposé, les nouveaux concepts de combustion permettent de franchir une étape conséquente et d'obtenir des niveaux d'émissions de polluants appréciables par rapport à ce qui a été présenté au sujet des systèmes de dépollution.

Pour faire le lien avec les deux présentations précédentes, l'objectif de cet exposé est focalisé sur la combustion. A partir du moment où l'on souhaite traiter les polluants, une façon assez logique de procéder est de les traiter à la source, au niveau de la production dans la chambre de combustion. Cela nous permettra d'obtenir une réduction substantielle de tous les systèmes de post-traitement qui pourront être utilisés ultérieurement. C'est une réduction en termes de complexité et de coûts, avec la possibilité d'effets induits sur la consommation globale du véhicule. A partir du moment où l'on met en place des systèmes de post-traitement, cette consommation est sensiblement affectée. Tout ceci va dans le sens d'une meilleure maîtrise de l'ensemble du système de dépollution.

En ce qui concerne le nouveau concept de combustion, les principes généraux reposent sur une combustion homogène à allumage par compression. Ce mode de combustion se distingue par rapport à la combustion traditionnelle par le fait que l'on essaie de préparer un mélange air/carburant le plus homogène possible au sein de la chambre de combustion. Ce mélange est réalisé avec une très forte dilution, soit obtenue avec de l'air en excès ou avec une grosse circulation de gaz brûlés, dans la mesure où l'on peut utiliser des gaz brûlés présents à l'échappement que l'on réinjecte dans le cylindre, ou des gaz brûlés que l'on conserve dans la chambre de combustion d'un cycle à l'autre. Le deuxième point important concernant ce concept de combustion se rapporte au contrôle de la combustion qui se fait par l'auto inflammation. C'est le paramètre clé qui va nous permettre de contrôler cette combustion, par opposition aux combustions traditionnelles qui reposent soit sur la propagation d'une flamme dans le cas d'un allumage commandé, soit sur la diffusion du carburant dans le cas du moteur diesel conventionnel. Cela nous permet d'avoir une action importante sur les sur-richesses locales, à savoir que l'on minimise au maximum les zones de sur-richesses locales en carburant, et l'on obtient du fait de cette forte dilution, soit avec l'air soit avec les gaz brûlés, une température de combustion très basse. Ces deux éléments nous permettent de réduire les mécanismes de formation des suies d'une part et des mécanismes de formation d'oxyde d'azote d'autre part. Pour ces modes de combustion particuliers, deux acronymes apparaissent très fréquemment : le HCCI pour ce qui concerne la combustion diesel, et le CAI pour l'essence.

Quel est l'effet de ces combustions particulières sur la consommation de carburant ? Vous avez une planche qui représente dans des valeurs normées les consommations des systèmes conventionnels d'une part, avec l'essence conventionnelle fonctionnant à la stéochiométrie, comme l'a rappelé M. BELOT, et la consommation du diesel conventionnel équipé des systèmes d'injection moderne, common rail en particulier. Enfin, les combustions de type HCCI ou CAI permettent d'obtenir des réductions réellement conséquentes de la consommation. Le CAI permet d'obtenir une réduction de l'ordre de 15 % par rapport à la combustion conventionnelle essence, et avec le diesel HCCI on peut atteindre environ 28 %. On conserve la consommation très favorable du moteur diesel. Ces modes de combustion apportent donc un gain substantiel sur ce plan.

Si l'on observe les gains en termes d'émission d'oxydes d'azote, puisque c'est l'un des problèmes clés de dépollution du moteur diesel, on obtient là encore une amélioration plus que conséquente liée à l'utilisation de ces nouveaux modes de combustion. Comme référence, on a choisi le diesel conventionnel avec une base 100, et pour l'essence conventionnelle richesse 1 qui paraît très élevée, on parle d'émissions brutes, à la sortie du moteur, avant tout post-traitement catalytique. Pour revenir sur les modes de combustion, on constate que les réductions sont drastiques puisqu'on atteint des diminutions de l'ordre de 50 à 100 % en termes d'émission de NOx pour l'ensemble de ces modes de combustion.

Si l'on étudie plus en détail ces modes de combustion HCCI et CAI, on peut voir ce qui se passe à l'intérieur de la chambre de combustion, dans la combustion traditionnelle et dans la combustion homogène. On a une visualisation directe de la combustion réalisée avec un endoscope installé sur un moteur capable de fonctionner suivant ces deux modes de combustion. On constate une partie très lumineuse de la combustion traditionnelle, qui traduit essentiellement la production de suie très intense, sachant que cette luminosité vive correspond à la combustion et à la réaction provenant de la combustion des suies. On distingue ensuite dans la combustion homogène les jets de carburant blanchâtre, mais aucune combustion apparente, car elle se produit dans des conditions très homogènes et elle est très peu lumineuse. Il n'y a quasiment pas de suie produite dans ce mode de combustion. On voit apparaître sur les dernières images quelques traces de combustion un peu plus vives, correspondant à une trace de suie provenant de la désorption du carburant qui est venu impacter sur les parois. Lorsqu'on observe directement la combustion homogène HCCI, on constate l'effet bénéfique en termes d'émission de suie.

Un autre résultat a été obtenu avec un procédé HCCI diesel, le procédé NADI, qui a été développé par l'IFP il y a quelques années. Ce procédé utilise un concept de « narrow angle direct injection », d'où sa dénomination. On observe un bénéfice par rapport au mode conventionnel du diesel, avec la diminution drastique des NOx que l'on a déjà évoqué, et la

diminution des particules dans un facteur 5 à 10 par rapport à une combustion traditionnelle. Ce mode de combustion HCCI, qu'il s'agisse de NADI ou d'un autre mode de combustion (plusieurs sont à disposition et en cours de développement), est un procédé très positif dans ce domaine.

De façon similaire, on peut examiner la combustion CAI essence. Des visualisations directes sont réalisées dans un moteur que l'on peut qualifier de transparent, qui est équipé de très larges accès optiques. Là encore, on voit apparaître les différentes étapes de la combustion CAI, avec sur une des premières photos, l'auto-inflammation, l'initiation de la combustion qui se produit par spots, ensuite une expansion très rapide de cette combustion, une combustion en masse, et une fin de combustion dite en paquet. C'est encore une fois une combustion très bleutée, qui traduit une fois de plus la non-existence de phénomène de production de suie, ce à quoi on pouvait s'attendre dans un mode de combustion essence, et qui repose essentiellement sur la nature homogène du mélange qui a été préparé, ainsi que sur la forte dilution comme précisé précédemment. Une des caractéristiques de cette combustion, ce qui peut apparaître comme un point faible, est qu'elle se produit très rapidement. L'échelle de temps correspond ici à quelques degrés de rotation de vilebrequin moteur, alors que dans une chambre de combustion essence traditionnelle, la durée de combustion serait de l'ordre de plusieurs dizaines de degrés. Cela signifie que cette combustion va se traduire par des gradients de pression supérieurs à ceux d'une combustion traditionnelle, ce qui va générer du bruit qu'il faudra traiter par des moyens technologiques appropriés.

Pour conclure sur cette présentation, il est clair que les combustions HCCI ou CAI présentent un potentiel qui est clairement démontré en termes d'émission d'oxyde azote et de particules, ainsi qu'en termes de gain de consommation qui permettent d'obtenir une situation nettement améliorée par rapport au moteur à essence traditionnel, et qui permet, au moins pour le HCCI, de conserver les performances d'un moteur diesel conventionnel.

Il reste des problèmes à résoudre. En matière de maîtrise de la combustion, il est essentiel d'améliorer cette maîtrise de combustion, et d'assurer le contrôle des fonctionnements transitoires. Comme l'a rappelé M. BELOT, un véhicule automobile subit fréquemment des variations des modes de fonctionnement, de sollicitation, et l'on doit donc gérer ces transitoires, de façon à être le plus efficace possible et que l'utilisateur ne perçoive pas le moindre incident. Un autre point important concerne les émissions de bruit, que j'ai mentionnées et qui sont caractéristiques de ces modes de combustion homogène, avec en outre la nécessité de réduire quelques émissions d'imbrûlés qui subsistent notamment pour le HCCI. On peut être raisonnablement optimistes concernant ces développements, puisque l'on dispose de développements technologiques qui ne cessent de proposer des solutions qui vont permettre probablement à moyen long terme de résoudre les problèmes signalés. En particulier, on dispose dès maintenant de stratégies avancées de contrôle moteur qui permettront de contrôler ces processus de

combustion de façon bouclée, garantissant une maîtrise totale de la combustion dans tous les cas de figure. On dispose dès à présent de systèmes d'injection de haute performance, qui seront beaucoup plus flexibles que ceux qui existent mais qui sont déjà très performants, et qui permettront de mieux maîtriser l'ensemble de ces paramètres.

Je vous remercie de votre attention.

- **M. Christian CABAL**

Merci. Je propose tout de suite à M. MORCHEOINE de nous présenter la problématique du renouvellement du parc et ses effets sur la pollution de l'air, liée au stock existant et la rapidité de remplacement.

#### **4. M. Alain MORCHEOINE, Directeur de l'Air, du bruit et de l'efficacité énergétique, ADEME**

On peut faire un premier état des lieux. Lorsqu'on parle de pollution des transports en ville, de quoi parle-t-on et en particulier qui fait quoi ? La part du transport des personnes et celle du transport des marchandises varient en fonction des polluants. Le transport des marchandises concerne également les achats des ménages. L'évolution des normes sur les véhicules a été évoquée, ainsi que sur les poids lourds, où les progrès sont importants. Sur les deux roues, on a le problème d'une croissance forte de l'utilisation des deux roues en ville en raison d'un certain nombre de problèmes de congestion de trafic urbain. Je me suis permis de comparer les émissions automobiles en 1981, date où l'on a commencé à se préoccuper de limiter les émissions des deux roues, et aujourd'hui en Euro 4. On constate que nous avons encore des progrès à faire sur la dépollution des deux roues, ce qui est normal car on s'y est intéressés avec beaucoup de retard par rapport aux véhicules particuliers.

Un des gros travaux de l'ADEME consiste à évaluer ce que réellement apportent les technologies ou les carburants en termes de dépollution en utilisation réelle et non plus selon les standards. D'abord, essayons de nous intéresser à quelque chose qui défraie régulièrement les chroniques, le gaz de pétrole liquéfié. Par rapport à Euro 3, soit la génération précédente des normes valables jusqu'à la fin de l'année dernière, le bilan est assez contrasté, lorsqu'on compare le GPL avec la motorisation diesel et le GPL avec la motorisation d'essence. Il y avait des points d'excellence, mais aussi des points de faiblesse, qui se sont encore accentués avec l'apparition des normes Euro 5. Le GPL, qui était considéré comme une motorisation propre, fait partie du passé.

On a beaucoup parlé des filtres à particules, et j'y reviendrai. Les professionnels de la santé nous ont posé plusieurs questions, à savoir si nos dispositifs arrêtaient les petites particules comme les grosses – car ce sont les petites qui inquiètent les professions de santé. Une autre question était que les particules sont une petite « éponge » qui absorbent de nombreuses choses, et il s'agit de savoir si ces composés sont bien éliminés. Une troisième question subsidiaire s'attache à étudier, dans le cas où l'on est obligé de mettre un additif, s'il ne disparaît pas dans la nature à l'échappement. Comme l'a indiqué Gérard BELOT, en termes de nombre de particules, on descend d'un facteur  $10^4$ . Ce qui est beaucoup plus intéressant, c'est que nous avons une diminution à peu près égale sur l'ensemble des classes granulométriques de particules. Cela veut dire que le dispositif de traitement, qui est un catalyseur d'oxydation suivi d'un filtre, élimine de manière à peu près équivalente toutes les tailles de particules, à travers des combinaisons de phénomènes sur lesquelles je ne m'étendrai pas, mais cela répond à la première question : le filtre à particules arrête aussi bien les petites que les grosses particules. La deuxième question était celle des espèces. Nous avons, à la sortie des filtres, la disparition de toutes les espèces à problème, cancérigènes, avérées ou probables. Sur la troisième question, on retrouve à l'intérieur du filtre l'ensemble de la masse de l'additif que l'on avait mis dans le carburant. Autrement dit, il ne sort pas.

Enfin, nous sommes toujours en cours d'évaluation sur la longévité des filtres. Nous sommes maintenant autour de 180 000 km. Nous constatons sur les voitures particulières que cela marche plutôt mieux au bout d'un certain temps qu'au début. Ne me demandez pas pourquoi, car c'est une question que nous n'avons pas réussi à élucider, mais les mesures nous le font constater. Il faut aussi faire très attention à la façon dont le véhicule est utilisé. En particulier, si cela marche bien sur des autobus, c'est moins le cas sur les bennes à ordures, qui fonctionnent comme un autobus qui s'arrête à toutes les portes.

En ce qui concerne les cyclomoteurs, nous observons avec l'apparition des deux temps catalysés et les quatre temps un progrès important pour ce qui est de la performance. Se pose le problème du renouvellement du parc, que j'évoquerai ensuite. Pour les autobus, mais aussi pour les voitures, lorsqu'on est confrontés à un trafic qui est moins « chahuté », on ira plus vite, et on polluera moins. Notamment, sur le polluant qui nous inquiète tous encore, qui est celui des oxydes d'azote. En effet, sur un couloir de bus, lorsqu'on gagne une vitesse commerciale de 5 km/h, on aura de l'ordre de 10 % de moins de consommation, mais aussi 15 % de moins d'oxyde d'azote. Cela est dû au fait que l'on diminue les phases d'accélération et décélération. Cela est vrai pour les autobus mais aussi pour les voitures.

Pour en revenir à la problématique principale, il faut faire attention à la lenteur de la vitesse à laquelle le parc se renouvelle. Les sept ans d'âge moyen du parc qui ont été évoqués sont probablement en dessous de la réalité.

Surtout, ce renouvellement se fait de moins en moins vite pour une raison simple. Les constructeurs (on ne leur en voudra pas pour cela) font des voitures de plus en plus solides. Ensuite, le développement de la multimotorisation retient la sortie du parc de véhicules âgés. La combinaison de ces deux effets fait que l'on a un parc qui est assez vieux. Lorsque vous avez une nouvelle technologie, en dehors de toute incitation sur le marché, à l'instant zéro, autrement dit sur la première voiture neuve équipée de cette technologie, on constate que cela percole à peu près sur l'ensemble des productions des constructeurs entre dix et quinze ans. On est à 95 % en quinze ans, en dehors de toute incitation. On n'achète pas une voiture neuve tous les ans, et le temps que cette technologie pénètre dans le parc il va se passer entre vingt-cinq et trente ans. Il existe donc une très forte inertie. Certains constructeurs anticipent, et la norme est appliquée dans un délai de cinq ans après qu'un constructeur a commencé à mettre une technologie sur le marché. Tout ce que l'on fait, c'est accélérer la pénétration de l'ordre de deux et demi à trois ans. On a donc une très forte inertie. C'est un véritable problème dans le domaine qui nous occupe aujourd'hui. Sur les poids lourds, c'est probablement un peu plus rapide, et pour ce qui concerne les deux roues, nous n'avons pas ce type d'étude.

En matière de technologie, je vais passer rapidement sur le sujet car beaucoup de choses ont été dites. On constate une courbe de chute vertigineuse concernant les émissions des particules en fonction des normes. La prochaine étape atteint environ une réduction d'un facteur 2. De quoi dispose-t-on pour faire cela rapidement ? Nous avons les post-traitements, mais ils sont coûteux, aussi bien en argent qu'en surconsommation. Cela signifie que la dépollution se paie en effet de serre et qu'il faut faire attention au fait que l'acharnement thérapeutique va se traduire par un fort surcoût en termes d'effet de serre, en dehors des problèmes d'acceptabilité financière. En ce qui concerne la combustion homogène, je ne pense pas qu'on l'ait avant 2010. La combustion à basse température a un très grand avantage, qui est qu'elle élimine une partie du coût de post-traitement, notamment sur les oxydes d'azote. En effet, il faut garder à l'esprit que l'augmentation d'un rendement moteur, c'est-à-dire ce qui va permettre de lutter contre l'effet de serre, se traduit, avec de la combustion classique, par une augmentation des oxydes d'azote. On constate un antagonisme, et il va falloir faire des compromis.

En matière d'évolution des consommations conventionnelles, on a beaucoup parlé de l'injection directe essence et de l'auto-inflammation contrôlée. Sur le downsizing, c'est-à-dire le remplacement d'un moteur par un petit moteur très suralimenté, il existe des enjeux importants en termes de CO<sub>2</sub>, qui sont déjà en grande partie engrangés. Sur les moteurs diesel, on a encore franchi un pas de plus dans la montée des pressions d'injection. La combustion homogène a été suffisamment évoquée, quant au post-traitement avancé quatre voies, Gérard BELOT nous a dit ce qu'il fallait en penser en termes de tenue dans le temps.

En ce qui concerne les alternatives, le moteur hybride est une espèce de glissement continu. Cela part de ce que l'on appelle l'hybridation douce, le stop/start de Citroën, Xsara Dynalto, cela passe par la Prius, et cela peut aller sur des hybrides encore plus avancés. L'intérêt des hybrides, c'est que dans la circulation urbaine, on profite des caractéristiques intéressantes de coupes du moteur électrique, c'est-à-dire que l'on va diminuer les consommations et les émissions de polluants en circulation urbaine. Cela intéresse donc la problématique qui nous occupe aujourd'hui. L'inconvénient est que l'on ajoute des kilos de moteurs électriques, des kilos des batteries, et que cela ne coûte pas le même prix, et l'on débouche sur des problèmes d'acceptabilité financière.

Je ne m'étendrai pas sur la pile à combustible, car c'est au plus tôt pour 2015 si ce n'est 2020, et le problème est de savoir comment on va fabriquer, distribuer et stocker l'hydrogène à bord des véhicules. Comme nous sommes en urbain, il faut s'intéresser à ce qui se passe sur la performance des batteries. Les véhicules électriques purs ont des caractéristiques de couple qui sont intéressantes du point de vue des profils d'émissions urbains, où l'on passe son temps à accélérer et décélérer. Par ailleurs, ils ne font pas de bruit, qui est la première nuisance urbaine citée. Le grand inconvénient est la peur de la panne électrique en raison de l'autonomie des batteries. De nouveaux couples apparaissent sur le marché, dont on pense qu'on pourra avoir des autonomies de 250 à 300 km sur un véhicule particulier, mais tout cela reste à vérifier sur le terrain. Je rappelle qu'il est exceptionnel qu'un individu fasse plus de 40 km par jour en urbain, mais il y a la peur de la panne électrique. On éloigne donc cette peur, et cela ouvre des marchés. Je passe rapidement sur le fait que les véhicules urbains de livraison de marchandises peuvent aussi voir leur spectre de solution s'élargir en faveur de l'hybride, du GNV électrique, pour venir plus à ce qui nous occupe.

Voilà comment se situent les responsabilités de l'émission des habitants en fonction de la densité de leur commune de résidence, en prenant l'exemple de l'Ile-de-France. Lorsqu'on est en périurbain, on est à l'origine de l'ordre de 2 à 4 fois plus d'émissions par jour pour les trajets que lorsqu'on est en centre-ville. Mais à partir du moment où cette contrainte d'autonomie du véhicule électrique se desserre, on peut envisager que même les périurbains aient accès dans la vie de tous les jours à des véhicules à motorisation électrique. Au fur et à mesure que l'on densifie, le spectre des véhicules électriques s'élargit.

Je voudrais insister sur le fait que s'il y a percée du véhicule électrique, elle se fera d'abord avec des flottes propres, d'entreprise, autrement dit grâce à ceux qui savent ce qu'est un compte d'exploitation de véhicule et qui savent faire un calcul, en payant plus cher un véhicule au départ, mais dont le coût d'utilisation sera beaucoup plus faible. Le moins que l'on puisse dire, c'est que nos compatriotes ne maîtrisent pas ce type de

raisonnement, car dans le cas contraire, ils achèteraient beaucoup moins de voitures, mais c'est un autre débat.

En conclusion, la technologie va pouvoir apporter son écho au problème de diminution de la pollution urbaine ; il pourra être significatif sous certaines conditions, mais cela ne suffira probablement pas. Nous aurons à nous pencher sur la réorganisation du système de déplacement, notamment l'utilisation des modes de transport là où est leur génie ou leur excellence. En effet, prendre sa voiture en ville pour faire 500 m, ce n'est pas raisonnable, surtout s'il faut trouver une place. On peut aller à pied. Si l'on va un peu plus loin, on peut avoir un vélo, voire un vélo électrique. Dans certaines circonstances, lorsque l'offre de transport public est attractive, c'est aussi une solution. Ensuite, lorsqu'on n'a plus autre chose, il reste la voiture. On a peut-être à faire bouger les limites entre ces différents types de solutions, de façon à obtenir un bilan global plus favorable. D'autres modes d'action à plus long terme sont possibles. Un mode d'action à très long terme est celui de l'urbanisme, qui consiste à faire que les gens puissent accéder aux fonctionnalités de la ville avec des distances moindres à parcourir, mais on parle en termes de générations. Par ailleurs, il existe les outils réglementaires, fiscaux et politiques. Cela permet de faire la transition avec M. Rémy PRUDHOMME.

- **M. Christian CABAL**

Merci de cette présentation, que l'on peut qualifier de très complète, car elle a envisagé l'ensemble des problèmes. Je propose au professeur PRUDHOMME de nous faire part de l'expérience londonienne avant d'ouvrir la discussion sur cette deuxième partie de la matinée.

**5. M. Rémy PRUDHOMME, Professeur d'université,  
Paris XII**

Merci, Monsieur le Président. J'ai l'impression d'être un peu à contretemps car le thème du péage fiscal de Londres, sur lequel on m'a demandé d'intervenir, est assez distinct du thème sur lequel vous travaillez. Il existe cependant une intersection entre les deux, et c'est sans doute la raison pour laquelle on m'a demandé de venir.

Je voudrais présenter une recherche que j'ai conduite avec un étudiant, pour le compte du PREDIT, qui a donné lieu à des publications sur le cas de Londres. Comme vous le savez, Londres a depuis deux ans un péage dans une petite partie de la ville. Le système est relativement bien connu. La

zone concernée est petite, elle comporte peu d'habitants (400 000), et beaucoup d'emplois. Depuis janvier 2003, pour avoir le droit de circuler dans cette zone, entre 7 heures et 18 heures 30, il faut payer une taxe qui était de 5 £ (7 €), et qui vient d'être augmentée. Les taxis, les deux roues, les bus en sont exemptés. Les résidents ne paient que le dixième de la somme demandée. J'insiste sur les limites de l'expérience, car encore beaucoup de gens font comme si on avait introduit un péage dans tout Londres. Si on la rapporte à la municipalité de Londres (7 millions d'habitants), la zone considérée concerne un peu plus de 1 %, 5 % de la population. En termes de circulation, cela fait moins de 2 %. Si on la rapporte à l'ensemble de l'agglomération londonienne, qui est comparable à celle parisienne, les chiffres sont encore plus réduits. En ce qui concerne la circulation, cela représente environ 1 %. Il existe donc un problème de langage, lorsqu'on dit qu'il y a maintenant un péage à Londres. C'est à la fois vrai, mais aussi faux, car cela ne concerne qu'une toute petite partie très spécifique de la ville.

On peut dire de cette expérience, qui est très intéressante, est un succès technique et politique. Le système fonctionne convenablement. Quelques petits problèmes au départ ont été surmontés. Les objectifs de mobilité qui étaient prévus et recherchés ont été atteints. Ainsi, la circulation dans la zone considérée a diminué d'environ 15 %, la vitesse des véhicules a augmenté d'environ 20 %, ainsi que celle des autobus, de 7 % (elle a augmenté beaucoup moins car, comme ailleurs, les autobus ont la fâcheuse habitude de s'arrêter tous les deux cents mètres). Par ailleurs, on constate une augmentation des déplacements en transports en commun. D'un point de vue politique, le péage a été un grand succès. Il a été bien accueilli, comme le montrent tous les sondages. Toutes les oppositions politiques qui avaient été formulées ont pratiquement été abandonnées, et le maire, qui avait mis toute son autorité dans cette affaire, a été réélu, peut-être pas uniquement à cause du péage, mais en partie. La question est de savoir si l'on a bien un succès économique. Beaucoup de gens s'arrêtent au constat de la diminution des véhicules. Mais ce n'est pas le point de vue d'un économiste, qui cherche à savoir quel est le prix payé pour obtenir ce résultat.

Je ne vais pas prendre le temps de vous infliger le détour théorique que j'avais prévu, mais je vous signalerai quelques-unes des conclusions auxquelles cette analyse théorique conduit, qui sont très connues. Une taxe ou un péage permet, pour une route ou pour une zone, de conduire à un optimum, c'est-à-dire qu'il y a une quantité optimale d'utilisation de la route, avec un niveau optimal de congestion, qui n'est pas la congestion zéro qui serait obtenue si personne ne circulait. On peut définir et calculer le coût économique de la congestion qui est ce que nous perdons à ne pas être à l'optimum, ou le gain qu'il existe à réduire la congestion à son niveau optimal. Si elle est correctement calculée, une taxe est le moyen d'arriver à cet optimum. La théorie, mais aussi la pratique, montre que le produit du péage est beaucoup plus important que le gain économique du péage, trois ou quatre fois plus important. Mais le produit du péage n'est pas un gain économique.

Certains pensent que l'un des avantages du péage est qu'il rapporte beaucoup d'argent. Mais ce n'est pas une façon convenable de raisonner, car c'est un impôt et il est payé par les usagers. On peut faire des choses utiles avec cet argent, mais il existe un coût, qui est le fait que les gens l'ont payé, comme n'importe quel impôt.

On peut définir trois bénéfices et deux coûts. Le premier est le coût de la réduction de la congestion, ou le fait que les voitures roulent un peu plus vite dans le cas de Londres. Ce coût de réduction de la congestion n'est pas très élevé. Je vous épargne les moyens techniques de le calculer, mais il est relativement faible. On est d'après les calculs du côté de 70 M€ par an, ce qui n'est pas grand-chose par rapport à l'ensemble des coûts de déplacement dans l'agglomération londonienne. Un deuxième bénéfice est dû à l'augmentation de la vitesse des autobus, qui est elle-même due au fait que l'on a mis sur le marché plusieurs centaines d'autobus. Cela se fait à un coût sur lequel on pourra revenir. Le fait que les autobus circulent un peu plus vite fait que chaque passager gagne en moyenne une minute trente, gain évalué à 31 M€ par an, ce qui n'est pas négligeable. C'est presque la moitié du gain lié à la réduction de la congestion pour les seuls véhicules. Un troisième gain nous ramène peut-être davantage au thème de cette matinée. Il concerne la réduction de la pollution engendrée par l'évolution constatée à Londres du fait de la diminution de véhicules/kilomètre. Si les véhicules polluaient autant qu'en l'absence du péage, cela représenterait déjà une diminution de 15 % des rejets polluants, mais il y a plus que cela.

Comme le montrait un schéma intéressant de M. MORCHEOINE, une augmentation de la vitesse entraîne une diminution forte de la pollution. J'ai eu beaucoup de mal à trouver des chiffres à ce sujet. J'ai vainement cherché sur le site de l'ADEME ou le site de l'IFP. Tout ce que j'ai trouvé, ce sont des données un peu anciennes de l'UTAC, qui est l'organisme d'homologation des rejets polluants, que je vous présente. D'après les mesures de l'UTAC, le passage d'une vitesse urbaine de 19 km à une vitesse de 11,5 km engendrerait une augmentation de la pollution de 400 % pour le CO, de 200 % pour les HC, de 100 % pour les oxydes de carbone et de 120 % pour les particules. Cela fait des élasticités qui varient de -2 à -9. Lorsque vous augmentez la vitesse de 10 %, vous réduisez les rejets polluants de 20, 30 ou 40 %. J'ai appliqué ces chiffres pour estimer ce qu'était le gain en termes de pollution, aussi bien en ce qui concerne le CO<sub>2</sub> que les autres polluants. Je me suis appuyé sur les chiffres du rapport BOITEUX pour avoir une idée de ce qu'étaient les coûts, car ce rapport, qui a à la fois un caractère officiel et raisonnable, nous dit ce que sont les coûts en euros, engendrés en termes de pollution de l'air et en termes de CO<sub>2</sub> par un véhicule/kilomètre. J'ai donc pris ces chiffres en appliquant les pourcentages de réduction de la pollution que l'on peut estimer sur le cas de Londres. Sur le CO<sub>2</sub>, les chiffres du rapport BOITEUX sont sans doute très généreux, car ils auraient été calculés avec une valeur de 100 € la tonne, et l'on sait maintenant, puisqu'il y a un marché du CO<sub>2</sub>, que l'on est à des chiffres considérablement inférieurs, à près de 25 €. J'ai été surpris du fait

que dans le cas de Londres, on obtient des bénéfices qui sont très faibles, de l'ordre de 5 M€ par an, c'est-à-dire que l'on est à moins de 5 % des bénéfices engendrés par le temps gagné. Les enjeux, en termes de coûts économiques, si tant est que l'on puisse comparer les coûts de la pollution calculés par M. BOITEUX avec les coûts liés aux gains de temps, ne sont finalement pas très élevés.

A côté de ces bénéfices, on observe deux coûts. Le premier est celui de la mise en œuvre du système à Londres. On a eu une surprise générale, car ce système coûte terriblement cher, aux environs de 70 M€ par an. Ce coût provient à la fois des investissements qui ont été faits, que l'on a amortis, et du paiement annuel à une société privée qui gère le péage. Un autre petit coût économique est lié au fait que les autobus sont très largement subventionnés, et que les subventions ont un coût économique, qui revient à peu près au quart de la subvention, mais qui n'est pas négligeable.

Ainsi, lorsque l'on compare l'ensemble des bénéfices du péage de Londres avec les coûts, on trouve que ces derniers sont plus importants que les bénéfices. L'économiste qui compare le 177 de coûts avec le 104 de gains, conclut que ce n'est pas une bonne affaire, et que Londres se trouve plus pauvre du fait du péage. Ceci provient de la valeur du temps qui est utilisée pour apprécier les gains de temps. La valeur du temps à Londres est beaucoup plus élevée que celle qui est utilisée à Paris. Certains pensent que dans le cas de Londres, il faudrait prendre des valeurs encore plus élevées, car il s'agit du temps des financiers de haut vol de la cité, dont le temps est extrêmement précieux, et que les 15 € par heure ne sont pas suffisants, ce qui est peut-être le cas, mais ce qui limiterait considérablement l'intérêt du péage. En effet, s'il ne vaut que dans les zones où ne circulent que des gens qui gagnent 200 000 € par an, cela limite beaucoup l'intérêt du système. On peut dire quelques mots des effets redistributifs, qui sont plutôt mauvais. Ce sont plutôt les riches qui gagnent au péage de Londres, mais ce n'est pas quelque chose de nouveau car les économistes le savent depuis longtemps.

Pour conclure, je note trois points. Un premier point concerne le fait qu'un péage peut réduire la circulation à un niveau optimal. On peut montrer que le péage n'a pas été trop mal choisi, et qu'il a effectivement réduit la circulation à un niveau qui n'est pas très loin de l'optimum. La théorie se trouve donc tout à fait confirmée, et les économistes sont partisans du péage urbain. Cette première conclusion n'est donc pas du tout une surprise. La deuxième conclusion l'est, en revanche, car le gain économique de cette réduction est faible, contrairement à l'opinion commune. Ainsi, les coûts de la congestion, même dans le cas de Londres, qui passe pour l'un des endroits les plus congestionnés du globe, ne sont pas très élevés. De la même façon, les gains environnementaux apparaissent comme relativement faibles. On ne savait pas vraiment cela avant de faire le travail. La troisième conclusion, beaucoup plus surprenante encore, est que le coût de la mise en œuvre est particulièrement élevé dans le cas de Londres. Personne ne peut être sûr que

Londres n'a pas « essuyé les plâtres », et il est possible que d'autres systèmes technologiques puissent fonctionner à des coûts moindres. Cela a été le cas longtemps à Singapour, où l'on se contentait d'afficher un ticket lorsqu'on avait payé son péage pour entrer dans le centre. Si vous étiez pris à circuler dans Singapour sans avoir votre péage sur votre vitre, la police s'en occupait, et tout cela se faisait à un coût très faible. On peut dire que tout le monde n'a pas une police singapourienne sous la main, ce qui n'est peut-être pas plus mal, mais le fait est que la technologie qui a été utilisée à Londres, qui n'est sans doute pas le dernier cri, encore que Londres n'est pas très sous-développé en matière de technologie, coûte très cher.

Voilà en quelques mots ce que je voulais dire à cette assemblée, dans le temps qui m'a été laissé. Merci.

- **M. Christian CABAL**

Merci, Monsieur PRUD'HOMME. Vous avez pu donner des informations très intéressantes. Nous avons un peu de temps pour la discussion sur cette deuxième partie de la matinée. Quelqu'un souhaite-t-il poser des questions complémentaires à nos intervenants ?

## 6. Débat avec la salle

- **M. Joël PEDESSAC, Directeur général, Comité français du butane et du propane**

J'ai entendu ce matin un discours sur les problèmes de pollution et les principaux polluants. Je ne veux pas avoir de discours partisan, et j'essaie de comprendre. Les principaux polluants les plus toxiques sont le CO<sub>2</sub>, les oxydes d'azote et les particules. J'ai entendu des démonstrations très intéressantes sur le plan scientifique sur la manière de traiter les oxydes d'azote et les particules. Des solutions sont plus ou moins faciles à mettre en œuvre. M. MORCHEOINE a présenté l'analyse de l'ADEME sur ces moyens. Je regrette que le seul moment où il a été question du gaz GPL, c'est en montrant un tableau de microgrammes par kilomètre, alors qu'on parlait de PPM, et l'on est soudain passé en binaire, avec de petits bonhommes verts ou rouges qui montrent que le GPL n'est pas une si bonne chose. Si l'on examine l'étude en détail, avec l'IFP, le TUV et un certain nombre de laboratoires européens qui l'ont conduite, on indique que sur les oxydes d'azote, avec un réseau de distribution (on a investi 200 M€ en France pour construire des stations-service), les oxydes d'azote, avec le GPL cela fait 96 % de réduction par rapport au diesel, et 40 % par rapport à l'essence. Au niveau des particules, c'est sans particules, sans filtre, grâce à un produit qui existe sur le marché. Quelle est la place du GPL ou des carburants gazeux, dont on n'a pas beaucoup parlé, quelle est la place des carburants alternatifs, qui sont mis en avant au niveau européen dans les différents programmes des solutions alternatives, même s'il n'y a pas de solutions, mais des objectifs fixés ? Enfin, quelle peut être la conclusion du législateur, lorsqu'on entend la position de l'ADEME suivant laquelle le GPL n'est pas une si bonne chose ?

- **M. Christian CABAL**

Pour ce rapport, nous procédons aujourd'hui à une audition publique qui fait la synthèse des travaux qui ont été engagés. Mais vos représentants de l'utilisation de moyens énergétiques tels que le GPL ont été longuement et largement entendus. On ne peut pas, à travers une présentation limitée à dix minutes par intervenant, avec l'ensemble des thématiques à aborder, reprendre en détail chacun des carburants potentiels. Notre rapport ne va pas être uniquement fondé sur les interventions de ce matin. Il va prendre en compte l'ensemble des investigations que nous avons engagées ces derniers mois.

- **M. Alain MORCCHOINE**

Dans cet exercice un peu « compacté », les présentations sont un peu simplificatrices. Néanmoins, nous constatons qu'on a, en particulier à partir d'Euro 4, des sauts qualitatifs en termes de dépollution des motorisations classiques, essence et diesel, qui sont importants. Concomitamment, on a l'impression que les constructeurs automobiles ne sont pas pressés de mettre des véhicules GPL Euro 5 sur le marché. Par conséquent, lorsqu'on n'a pas beaucoup d'offre et que l'on sait par ailleurs que le GPL est un produit des champs pétroliers d'une part et des champs gaziers d'autre part, mais que ses ressources ne sont pas très importantes, et que, de plus, elles risquent de diminuer, car les pétroliers les utiliseraient dans leur process de raffinage, je ne suis pas très optimiste sur l'avenir d'une filière dans laquelle l'offre est faible et dans laquelle les ressources sont probablement un peu limitées. Je ne dirais pas la même chose sur le gaz naturel, pour lequel les ressources sont plus importantes, mais sur lequel on est encore sur une offre que l'on peut qualifier de confidentielle. Si l'on se projette, le gaz naturel a sa place dans une configuration un peu intermédiaire, ou en faisant du GTL. Je ne peux pas dire la même chose du GPL.

- **M. Joël PEDESSAC**

Je voudrais apporter un complément sur les ressources, car c'est un point important. 60 % de nos ressources mondiales proviennent du gaz naturel et sont en croissance chaque année. Le pétrolier, dans sa ressource, fait toujours l'optimisation économique par rapport à ce qu'il doit utiliser comme matière première dans sa raffinerie pour en abaisser le coût de production. Le GPL est une alternative au Nafta et, en fonction du cours, il va utiliser l'un ou l'autre. Ce que vous avez dit est exact, mais on vient beaucoup plus du gaz naturel que du pétrole, et cela va en s'améliorant chaque année, puisque l'on gagne quelques pour-cent par an sur les ressources provenant du gaz naturel du pétrole.

- **M. André DOUAUD**

En ce qui concerne la courbe montrée par M. MORCCHOINE sur l'effet de la réduction de vitesse qui entraîne une augmentation des émissions, je me pose une question. Lorsqu'on constate des pics de pollution, à Paris ou ailleurs, il existe un règlement qui demande de baisser la vitesse de 20 ou 30 km/h. On a l'impression que cela va exactement dans la mauvaise direction. Ne serait-il pas souhaitable, justement en cas de pic de pollution, de recommander d'accélérer ou de fluidifier la circulation ? Je ne comprends pas cette mesure.

- **M. Alain MORCHEOINE**

Je pense que mon ami André DOUAUD a mal lu la courbe. Lorsqu'on a une augmentation de la vitesse commerciale des autobus, cela veut tout simplement dire que la partie de voirie dans laquelle ils se trouvent est plus fluide qu'avant. Cela signifie que l'on a diminué les phases d'accélération/décélération autour de la vitesse moyenne. C'est cela qui produit les gains en carburant, en CO<sub>2</sub> et en oxydes d'azote. Il faut faire très attention lorsqu'on dit que la vitesse diminue, car on fait l'hypothèse qu'elle diminue parce que la congestion augmente et que le trafic devient de plus en plus chahuté. Ne mêlons pas tout.

- **M. Rémy PRUDHOMME**

Une autre réponse est possible. La courbe qui décrit les rejets polluants en fonction de la vitesse descend d'abord, puis elle est stable et remonte ensuite. Autant on diminue la pollution lorsqu'on passe de 100 km/h à 80 km/h, autant on l'augmente lorsqu'on passe de 20 km/h à 10 km/h. Les deux propositions ne sont pas contradictoires, et il suffit de visualiser une courbe en V pour comprendre qu'il n'y a pas de contradiction entre le fait de limiter la vitesse sur les autoroutes de la Région parisienne et de réduire la pollution.

- **M. Christian CABAL**

Cela passe par un optimum.

- **M. Alain MARCHEOINE**

Ce sont des travaux que nous avons largement subventionnés et que nous suivons beaucoup. Pour ces courbes, on considère la vitesse moyenne. Plus elle est basse, plus les points qui servent à calculer la consommation et les émissions de polluants sont des points de trafic congestionné. Autrement dit, actuellement, en ville, nous n'avons pas les outils (nous les aurons très bientôt) qui permettent d'affirmer, lorsqu'on passe sur une zone de circulation en zone 30, si l'on gagne ou non en pollution. On passe à un trafic normal, avec une onde verte à vitesse modérante de l'ordre de 30 km/h, alors que le trafic est à 40 km/h, et l'on ne sait pas calculer cela. Nous le saurons dans un ou deux ans.

- **M. Claude GATIGNOL**

Nous avons entendu plusieurs intervenants nous parler d'améliorations fondées sur l'innovation de différents systèmes, qu'ils soient avant le moteur, dans le moteur ou après le moteur. Une étude économique a-t-elle été portée sur ces améliorations techniques, qui soit compatible avec le coût du véhicule, devenu un produit commercial ?

- **M. Gérard BELOT**

Je vais tenter d'apporter un éclairage sur votre question. Je prends la précaution de dire que je n'ai pas à ma portée les données convaincantes sur les coûts, mais seulement une partie. Il est certain que le constructeur automobile que nous sommes, et nos concurrents ont sans doute la même vision, travaille énormément à la source. Les émissions des moteurs sont considérées comme pouvant être maîtrisées de deux manières. D'une part, à la source, ce que nous faisons de manière continue et efficace. Un système de post-traitement demeure nécessaire, pour des raisons physico-chimiques. Il est clair qu'aujourd'hui, et c'est peut-être une réflexion que nous devons avoir sur ces questions, le coût de la dépollution s'envole. En effet, il fait appel à des technologies innovantes qui sont de plus en plus complexes, qui nécessitent des métaux précieux en quantité croissante. C'est un sujet sur lequel on n'a pas suffisamment insisté. Les métaux précieux sont un facteur de dépendance sur des pays politiquement instables. Je pense qu'il faut avoir vis-à-vis de cette situation un regard affûté.

Ceci étant, le coût de la dépollution croît. Le coût qu'il faut investir en recherche, comme en est témoin M. HERRIER, pour s'orienter vers de nouveaux modes de combustion, est également un investissement lourd que nous supportons, et sur lequel nous faisons des paris. La combustion homogène diesel est une perspective sur laquelle on établit des espoirs forts. En effet, pour contrebalancer la complexité de satisfaire le post-traitement à des coûts raisonnables, le diesel étant grevé de ces coûts potentiellement, et compte tenu de sa qualité en termes de consommation, il faut avoir à cœur de le considérer comme une voie potentielle. Je n'ai pas répondu à la question, j'en suis bien conscient, mais le message est qu'il y a un équilibre à trouver et l'avenir n'est pas à la dépollution uniquement, car cela ne sera pas soutenable.

- **M. Patrick OLIVA**

Nous avons eu dans plusieurs exposés des précisions sur les évolutions techniques des différents systèmes. A l'horizon Euro 5, quel est le différentiel de consommation entre moteur essence et moteur diesel, lorsqu'on

intègre a priori l'ensemble des systèmes de dépollution ? Peut-on miser sur ce qui est encore dit aujourd'hui, soit une vingtaine de pour-cent, ou voyez-vous ce différentiel réduit vers Euro 5 ? Vers 2015, prévoyez-vous une évolution contrastée entre diesel et essence ?

- **M. Gérard BELOT**

Je ne souhaite pas parler d'Euro 5, car je ne sais pas ce que c'est, et personne autour de cette table ne le sait. En revanche, on a une perspective qui contraint de plus en plus clairement le diesel. En tant que constructeur automobile on a également le souci de faire en sorte que le moteur à essence progresse, et je crois que c'est le cas. Je prends pour exemple la collaboration que nous avons avec BMW. Nous avons mis en place un nouveau moteur cœur de gamme, qui en termes de consommation affiche 15 % de mieux que le moteur remplacé. Les deux, essence comme diesel, progressent. A terme (c'est ma conviction, et je m'exprime non pas au nom de PSA mais en tant que motoriste), l'essence aura des gains, le diesel continuera à avoir des gains également (on les estime aujourd'hui à 15 % environ), et l'écart va peu à peu s'amortir. C'est la vision à moyen terme d'un rééquilibrage entre l'essence et le diesel en termes de consommation.

- **M. PierPaolo CAZZOLA**

Je voudrais poser une question au Pr. PRUDHOMME. Dans le calcul des bénéfices de la réduction de la pollution à Londres, y a-t-il un moyen d'inclure les coûts sanitaires ?

- **M. Rémy PRUDHOMME**

Ils sont déjà compris. Les bénéfices que je mesure sont une réduction des coûts, qui sont principalement des coûts sanitaires. Je prends le chiffre de l'estimation des coûts dans le rapport BOITEUX, mais au-delà de ce chiffre, il y a une estimation des coûts sanitaires. Celle-ci peut vous plaire ou non, on peut la discuter, mais on a fait de son mieux, c'est ce qui existe de plus sérieux et de plus crédible, ou de moins douteux. J'ajoute que, curieusement, les Anglais, et en particulier Transport for London, l'organisme qui est responsable de la mise en œuvre, qui dépend de la mairie, n'a pas compté du tout dans ses estimations des gains et des pertes du péage, ces gains liés à une réduction liée à la pollution. Cela s'explique par le fait que ces gains sont très faibles en valeur relative. En effet, la réduction de la circulation concerne 1 ou 2 % du total de la circulation. On a donc des variations infimes, et qui ne sont pas mesurables. Les mesures qui sont faites de la qualité de l'air à Londres ne

font pas apparaître de gains. C'est simplement le raisonnement logique qui nous dit qu'il doit y en avoir, si l'on croit les courbes de l'ADEME, ou plutôt de l'UTAC, dont j'ai donné quelques chiffres.

- **Conclusion de M. Christian CABAL**

Merci. Je ne vois pas d'autres questions à ce stade des interventions. La matinée a permis d'aboutir à un consensus sur l'évaluation des éléments de la pollution urbaine liée aux émissions des véhicules moteur à combustion. Les différents participants ont présenté des évaluations précises et des perspectives sanitaires, dont on vient de parler. Dans la deuxième partie de cette matinée, nous avons pu prendre connaissance des différentes technologies utilisées et mises au point pour pallier ces paramètres de pollution atmosphérique. Là aussi, un certain nombre de points ont pu être avancés et discutés, même si comme je l'ai indiqué, nous ne faisons qu'un aperçu rapide dans cette audition publique aujourd'hui par rapport aux auditions beaucoup plus complètes et détaillées qui ont été réalisées. En terminant sur l'exemple du péage urbain, on est au cœur de la problématique pour voir quelles solutions le législateur ou le chargé de la réglementation publique peut apporter par le biais, soit de la fiscalité, soit du péage, pour être incitateur ou non dans telle ou telle autre direction. Nous retombons là sur le rôle des élus ou de ceux qui sont chargés de faire des propositions pour la réglementation publique. Nous aurons l'occasion d'en reparler dans la deuxième partie de cette présentation.

*La séance est suspendue à 13h00.*

## II. THÈME DE L'APRÈS-MIDI : COMMENT RÉDUIRE L'IMPACT DE L'AUTOMOBILE SUR L'EFFET DE SERRE ?

Première table ronde :  
QUELLE EST LA CONTRIBUTION DE L'AUTOMOBILE À L'EFFET DE SERRE ?

Interventions de :

- \* M. Jean-Pierre FONTELLE, Directeur du CITEPA
- \* M. Jean-Claude GAZEAU, Président de la MIES
- \* M. Pierre BEUZIT, Directeur de l'ingénierie, Renault
- \* M. André DOUAUD, Directeur technique, CCFA

Deuxième table ronde :  
QUELLES SOLUTIONS POUR L'AVENIR ?

Interventions de :

- \* M. Philippe PINCHON, Directeur du centre de résultats Moteurs-Énergie, IFP
- \* M. François BADIN, Directeur de recherche, INRETS
- \* M. PierPaolo CAZZOLA, Analyste, Division des politiques de technologie de l'énergie, AIE
- \* M. Thomas GUERET, Analyste, Division environnement et efficacité énergétique, AIE

**A. PREMIÈRE TABLE RONDE :**

***QUELLE EST LA CONTRIBUTION DE L'AUTOMOBILE À L'EFFET DE SERRE ?***

**1. Introduction par M. Claude Gatignol, député de la Manche**

Mesdames et Messieurs, nous allons pouvoir reprendre nos travaux, sur le second thème de la journée, qui sera plus précisément orienté vers l'impact de l'automobile sur l'effet de serre. Nous savons que cette question est devenue fondamentale pour le secteur automobile, même si, comme on l'a vu ce matin, ce secteur a fait des progrès spectaculaires en matière de rejet d'émissions. En ce qui concerne l'émission de gaz à effet de serre, et plus particulièrement le gaz carbonique, les choses semblent plus difficiles à maîtriser, puisque la courbe d'émission est totalement parallèle à la courbe de consommation du carburant. Pour aborder cette question, nous nous souviendrons que les recherches scientifiques, et tout particulièrement à travers les conclusions du groupe international d'étude sur le climat et d'autres commissions s'intéressant aux variations climatiques, ont montré qu'il y avait bien un lien direct entre l'activité humaine et cette variation de concentration dans l'atmosphère de gaz à effet de serre, ayant pour conséquence la hausse de la température. Nous avons également à l'esprit les obligations du Traité de Kyoto, ainsi que les déclarations faites par les autorités politiques de la France, qui vis-à-vis de l'année 2050 évoquent le facteur 4 de division des émissions de gaz à effet de serre. Je voudrais dire d'emblée que je ne suis pas prêt à l'autoflagellation. Au contraire, je voudrais insister pour dire que la France est sans doute sinon le plus vertueux, parmi les plus vertueux, en matière de rejet de gaz à effet de serre, ceci étant essentiellement dû à la production d'électricité du nucléaire et de l'hydraulique, avec une électricité à près de 95 % sans émissions de CO<sub>2</sub>, mais également, il faut le souligner, à une politique constante en termes d'économie d'énergie. Nous avons bien vu que vis-à-vis de cette économie d'énergie, les constructeurs automobiles et les acheteurs d'automobiles en France participent à cette vision des choses.

Ceci étant, il faut au moins stabiliser nos émissions, en évitant de les augmenter. Dans ce domaine, l'automobile a un rôle à jouer, et nous pouvons mesurer la performance en litres de carburants nécessaires pour faire 100 km, ou plus particulièrement en mesurant les grammes de gaz carbonique rejetés par kilomètre parcouru. Ces deux paramètres peuvent revenir dans nos évaluations.

Nous écouterons cet après-midi des intervenants en deux parties : d'une part, une approche d'un diagnostic de la contribution de l'automobile à l'augmentation de l'effet de serre, puis la recherche des solutions disponibles à

moyen terme. Nous nous inscrivons donc bien dans la préoccupation de Christian CABAL et de moi-même dans le sujet qui nous a été confié pour l'écriture de ce rapport sur la voiture de demain. Ainsi, une première intervention sera faite par **M. Jean-Pierre FONTELLE**, Directeur du **Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique**, qui nous fera le bilan de ces gaz à effet de serre. Ensuite, **M. Jean-Claude GAZEAU**, Président de la **mission interministérielle sur l'effet de serre**, interviendra sur la dynamique des émissions du secteur automobile et nous entretiendra des challenges qu'il faudrait un jour réussir. **M. Pierre BEUZIT** est Directeur de l'ingénierie de **Renault**. Nous en profitons pour saluer que dans un autre domaine qui n'est pas spécialement celui des économies d'énergie, mais celui de l'efficacité énergétique, Renault a été champion du monde dans un secteur particulier. M. BEUZIT interviendra sur la difficile question de l'équilibre entre la réduction de la consommation et l'émission de gaz à effet de serre. Enfin, **M. André DOUAUD**, Directeur technique du **Comité des constructeurs français**, s'interrogera sur la dynamique du marché et la demande des consommateurs, avec toutes les déclinaisons de ces attentes des consommateurs et de la perception de la nécessité d'être éco compatibles.

Dans la seconde partie, après la pause, nous verrons plus précisément ce qui est du domaine technologique, avec **M. Philippe PINCHON**, de l'**Institut français du pétrole**, que j'ai l'habitude d'appeler par une nouvelle dénomination, très personnelle : l'Institut français de la propulsion... Nous vous écouterons au sujet du moteur hybride ou de l'hydrogène, une molécule qui m'est chère. Puis, **M. Patrick OLIVA**, responsable notamment d'un autre challenge important, le challenge Bibendum chez **Michelin**, a cette position d'observateur et nous parlera de différents thèmes, dont celui de la propulsion électrique, sachant que vous pourrez nous dire un mot de cette pièce importante entre le sol et le véhicule, et de l'enjeu de consommation, que représente ce que l'on a coutume d'appeler un pneumatique. **M. François BADIN**, chercheur à l'**INRETS**, spécialisé dans l'hybridation, nous donnera son regard d'expert indépendant sur la voiture hybride, et les véhicules qui font l'objet de toutes les attentions des laboratoires dans tous les domaines. Ensuite, nous aurons deux interventions qui nous replacent dans un domaine particulier, celui de l'**Agence internationale de l'énergie**. **M. Pier Paolo CAZZOLA** nous fera l'amabilité de s'exprimer en français. Vous nous avez montré ce matin que vous maîtrisez bien notre langue, et nous vous écouterons sur les conclusions de l'AIE en matière de carburant. En particulier, comment peut-on aborder ce domaine d'alternative et quelle peut être sa place ? Enfin, **M. Thomas GUERET**, expert analyste à l'AIE, nous parlera de tout ce qui peut être source de meilleure gestion de l'usage du pétrole. Maîtrise, économie de ce produit assez extraordinaire qu'est le pétrole, dont on parle ici sous l'usage de la propulsion de la motorisation, mais qui a beaucoup d'autres possibilités, en particulier dans le domaine de la chimie et du médical, qui nous est proche. On sait combien il est important de

disposer aussi de ces molécules. Tout ceci passe par des solutions techniques, par des analyses, mais aussi par des propositions à faire aux consommateurs pour aller vers son comportement lorsqu'il est au volant d'une voiture. Faut-il envisager des mesures plus percutantes, plus limitatives à l'usage de ce véhicule ? Nous n'en sommes pas encore là, et nous vous écouterons tous avec beaucoup d'intérêt, Christian CABAL et moi-même. Je donne la parole à M. Jean-Pierre FONTELLE, en nous rappelant que nous avons l'obligation d'être le plus concis possible, tout en ayant aussi l'obligation de dire tout ce que nous avons à entendre.

Merci pour cet après-midi. Monsieur FONTELLE, vous avez la parole.

## **2. M. Jean-Pierre FONTELLE, Directeur du CITEPA**

Merci. Messieurs les Députés, Mesdames et Messieurs. Je voudrais tout d'abord remercier les organisateurs pour nous donner l'occasion de présenter ces quelques informations qui je l'espère seront utiles au débat. En préambule, je voudrais préciser que les données qui vont être présentées sont essentiellement issues de ce que l'on appelle le Système national d'inventaires des émissions polluantes, qui a été développé par le CITEPA, en tant que centre national de référence dans ce domaine, à la demande du Ministère de l'Ecologie et du développement durable, qui assure l'essentiel du financement de ce système. Pour mémoire, je précise que ce système est l'élément générateur des données qui sont utilisées par la France et remises aux Nations unies et à la Commission européenne en application des conventions, protocoles et directives que la France a souscrits. Si vous souhaitez avoir plus d'informations sur la multitude de résultats qui existent à ce sujet, vous pouvez consulter le site du CITEPA ([www.citepa.org](http://www.citepa.org)) et télécharger tous ces rapports qui sont dans le domaine public. Egalement à titre de préambule, pour ceux qui seraient plutôt néophytes avec ce genre d'informations, je tiens à préciser que les données d'émissions que je vais vous présenter se réfèrent à des émissions directes. En ce qui concerne les véhicules, il s'agit des émissions liées à l'usage des véhicules et en aucun cas à sa construction ou à la construction des infrastructures, ou encore à l'élaboration des carburants qui sont nécessaires au fonctionnement dudit véhicule. Ces autres sources d'émission sont comptabilisées mais inscrites dans les secteurs industriels, manufacturiers ou de transformation d'énergie.

Pour commencer, je vous donnerai un aperçu global par grands secteurs, et je focaliserai progressivement sur des éléments de plus en plus détaillés concernant les transports automobiles. Sur ce premier graphique, les barres orange indiquent la contribution des différents secteurs principaux

mentionnés ici dans l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre en France métropolitaine, sachant que le périmètre est celui des six gaz couverts par le protocole de Kyoto. Le transport, tous modes confondus, représente 27 % des émissions en France ; l'industrie manufacturière un peu moins de 20 % ; le résidentiel, tertiaire, institutionnel et commercial environ 17 % ; l'agriculture et la sylviculture environ 19 % ; l'industrie de l'énergie aux alentours de 12 % ; le traitement des déchets près de 2 %.

On peut voir les évolutions depuis 1990, cette année servant de référence aux engagements de stabilisation, de réduction ou d'augmentation, selon les pays couverts par la convention climat et le protocole de Kyoto, voire par les engagements européens. Ceci signifie que le transport routier et le résidentiel tertiaire apparaissent clairement en France comme les deux secteurs qui ont augmenté leurs émissions depuis l'année 1990, respectivement de 22 et de 14 %, alors que les autres secteurs, comme l'industrie manufacturière, l'agriculture ou l'industrie d'énergie et les traitements des déchets, ont réduit leurs rejets depuis 1990 dans des proportions qui vont d'environ 9 à 23 %. L'UTCF concerne l'utilisation des terres, leur changement et la forêt, ou en d'autres termes plus conventionnels, les puits de carbone, essentiellement liés à la photosynthèse dans la forêt. On a 73 % d'évolution du puits, ce qui est favorable dans ce cas précis.

Si l'on examine maintenant ces contributions en distinguant la contribution des six gaz couverts par Kyoto, on s'aperçoit que pour la plupart des secteurs, excepté l'agriculture et le traitement des déchets, le CO<sub>2</sub> est très prépondérant, particulièrement dans le cas des transports, où l'on voit un peu de N<sub>2</sub>O apparaître et un peu de HFC, notamment liés à la climatisation accrue des véhicules.

On peut maintenant examiner plus précisément le transport routier, avec un historique depuis pratiquement un demi-siècle. On voit la croissance au fil des années. Le transport routier représentait 5 % des émissions de CO<sub>2</sub> en 1960, pour augmenter progressivement à 14 % en 1980, à 22 % en 1990, et atteindre 25 % aujourd'hui. Les petites différences d'écart que l'on peut constater avec les chiffres précédents tiennent au fait que l'on parle ici en CO<sub>2</sub> et non pas en gaz à effet de serre globaux, auxquels il faut ajouter d'autres gaz.

Si l'on regarde d'un peu plus près ce qui se passe, plusieurs indicateurs sont assez intéressants si l'on veut pousser les analyses plus loin. On a l'évolution du parc roulant en France, avec des milliards de véhicules/kilomètre parcouru. On s'aperçoit que sur le même intervalle de temps, on fait à peu près sept fois plus de véhicules/kilomètre qu'il y a trente ans. Vous avez la décomposition par catégorie de véhicules. On constate clairement la diminution des voitures particulières à essence et la montée des véhicules particuliers diesel, ainsi que la montée des véhicules utilitaires et des poids lourds dans une certaine mesure. On a également l'évolution des

émissions de CO<sub>2</sub>, toujours du transport routier et la France métropolitaine pour à peu près les mêmes catégories de véhicules. On voit là encore la part relativement importante comparée notamment à la part occupée dans le nombre de véhicules/kilomètre, notamment des poids lourds.

Pourquoi ai-je fait apparaître les particules, puis sur la figure suivante d'autres polluants dont on a parlé ce matin (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, COV) ? On peut constater que sur ces autres polluants, les contributions du transport routier diminuent fortement pour la plupart, alors que dans le cas du CO<sub>2</sub>, c'est encore le challenge qui est demandé aux transports automobiles d'arriver à infléchir ces courbes pour diminuer les émissions. Si l'on observe d'un peu plus près ce qui se passe, on a des indicateurs qui vont illustrer les émissions de CO<sub>2</sub> par PIB, par exemple. On s'aperçoit que ramenées à ce paramètre, les émissions de CO<sub>2</sub> sont de mieux en mieux situées. A l'inverse, si l'on examine le CO<sub>2</sub> du transport routier par rapport au nombre d'habitants, on s'aperçoit qu'il y a eu une dégradation au fil du temps, avec une stabilisation depuis un certain nombre d'années, pratiquement depuis le début de l'an 2000. Ceci traduit l'évolution de la nature du parc, des véhicules plus importants, des usages plus développés du transport automobile au cours des décennies écoulées.

On retrouve une courbe qui par l'effet de l'échelle semblait horizontale, mais qui ne l'est pas, et qui montre que globalement sur la période, plutôt depuis 1970, il y a un progrès d'à peu près 15 % sur les émissions que l'on qualifiera d'unitaires, tous véhicules confondus. On peut approfondir l'analyse, en dissociant les poids lourds et les véhicules légers. On constate que pour ces derniers les progrès ont été beaucoup plus importants et ils continuent de progresser, puisque les constructeurs automobiles se sont engagés sur des efforts de limitation de la consommation unitaire. On a ici l'image du passé, et donc toute l'inertie du parc qui pèse dans les résultats. Pour les poids lourds, on s'aperçoit qu'il y a eu jusque dans les années 1990 une montée assez forte des émissions unitaires, pour être suivie maintenant d'une stabilisation voire d'une diminution rapportée aux émissions de CO<sub>2</sub> par véhicule/kilomètre. Sur la contribution des différents combustibles, cela ne surprendra personne de voir le diesel s'octroyer une part de plus en plus importante dans les émissions de CO<sub>2</sub>, au détriment du carburant essence. On notera également que les biocarburants et le GPL restent marginaux, puisqu'ils ne représentent environ que 1 % des émissions totales.

Pour terminer, puisqu'il fallait essayer d'avoir un œil européen, voire mondial, je vous présente un tableau qui contient beaucoup de chiffres, ce dont je m'excuse. On a le total national de tonnes d'émissions de CO<sub>2</sub>, avec pour la France 408 M de tonnes, comparé à l'Allemagne, avec 865 M. En valeur absolue, on note que la France, comparée à des pays analogues, voire d'autres assez différents, est un émetteur relativement petit. En ce qui concerne les évolutions, pour le CO<sub>2</sub>, on a 3 % en France entre 1990 et 2003, et c'est négatif lorsqu'on considère l'ensemble des gaz à effet de serre, comme on l'a vu. On s'aperçoit que ce résultat est mitigé. Certains pays étant très positifs et

d'autres très négatifs. Mais il s'agit des émissions totales. De la même façon, je confirme le caractère vertueux de la France au niveau du CO<sub>2</sub> par habitant, avec 6,6, soit le meilleur score affiché par rapport à l'ensemble des autres pays, parfois de très loin. On peut multiplier les indicateurs, et regarder par exemple par rapport à la superficie d'un pays, ou d'autres paramètres. Pour le transport routier, la part de ce dernier en France est la plus forte de tous les pays présentés. Cela tient à la structure nationale, puisque l'on a de l'énergie nucléaire et ceci s'explique logiquement, mais cela permet peut-être de comprendre pourquoi on attend beaucoup du transport routier, puisqu'il représente un gisement plus important que pour d'autres.

Par ailleurs, en ce qui concerne l'évolution des émissions du trafic routier en France, on se trouve dans une situation médiane, moins bons que certains pays comme l'Allemagne ou le Royaume Uni, mais mieux placés que certains pays comme l'Espagne, et pas plus mal que l'Union européenne à quinze, voire le Japon. Comparer des résultats au niveau européen, cela peut se justifier, mais au niveau mondial, c'est un exercice périlleux. En effet, peut-on réellement comparer en termes de gaz à effet de serre des émissions de pays qui ont des conditions climatiques, économiques très différentes ? Il est évident que si l'on habite en Sibérie, on aura plus de besoins en énergie que si l'on est proche de l'équateur ou si le pays est très étendu, où les besoins en transport peuvent être accrus, ou de nature complètement différente.

Je vous remercie pour votre attention.

- **M. Claude GATIGNOL**

Merci, Monsieur FONTELLE. Le dernier graphe que vous nous avez montré faisait un état comparatif tout à fait intéressant pour la réflexion ultérieure et dans l'approche que l'on peut faire de la place relative du transport dans les émissions de gaz à effet de serre. Je donne la parole à M. GAZEAU, qui va nous parler de ses conclusions à travers la mission interministérielle sur l'effet de serre.

### **3. M. Jean-Claude GAZEAU, Président de la MIES**

Merci, Monsieur le Président. Sur l'intitulé de cette journée, on a parlé ce matin des polluants locaux, et nous parlons maintenant de l'effet de serre. Je souhaiterais mettre en perspective deux choses. S'agissant des polluants locaux, on est en face d'une problématique, même si l'on parle des mêmes émetteurs, avec des effets sanitaires avérés. S'agissant des gaz à effet de serre, on se trouve devant une autre problématique, avec d'autres horizons,

avec un risque du changement climatique, qui est avéré, et une problématique mondiale. Cela veut dire qu'en termes de sensibilisation, de comportement et autres, même si l'on traite les mêmes objets, les réponses ne sont pas forcément similaires.

Jean-Pierre FONTELLE a évoqué une particularité du secteur des transports, à savoir premièrement que c'est le premier émetteur de gaz à effet de serre, tant par l'intensité (27 % du total national, sans compter l'aérien international), que par la croissance de ses émissions. Il faut garder à l'esprit le chiffre de 27 % du total national jusqu'en 2003, puisque la tendance s'est infléchie ou atténuée, avec 2 % de croissance par an au niveau des transports, mais +23 % entre 1990 et 2003. Je mettrai en regard, puisque l'on parle d'un horizon plus lointain, 2050, avec un facteur 4, c'est-à-dire +2 %, même si ces dernières années c'est plutôt +1 %. Le fait de diviser par quatre nos émissions, cela signifie en moyenne -3 % par an.

A partir de là, quel constat peut-on faire, sans diaboliser ? Ce secteur est de nature à fragiliser d'une part l'objectif de stabilisation fixée à la France dans le cadre du protocole de Kyoto des émissions, et d'autre part à moyen terme, en ce qui concerne les concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, avec l'objectif de division par quatre. On peut faire plusieurs remarques sur ce sujet. Nous allons parler beaucoup de technologie cet après-midi. Nous exprimons des sentiments, et il apparaît que la technologie ne devrait pas permettre à elle seule de contenir l'irréversible croissance des émissions de transport. Cela veut dire qu'il ne serait peut-être pas pertinent de laisser penser aux donneurs d'ordre privés et publics que les chercheurs et ingénieurs pourront dans les délais, une fois encore (même si de grands efforts ont été faits) résoudre le problème à leur place, sauf percée technologique majeure. Je ne doute pas qu'on va nous en présenter cet après-midi, à travers des véhicules propres et économes. Malgré les progrès techniques indéniables, depuis 1990 et avant, et malgré les efforts importants qui ont été consentis en matière de recherche, cela ne devrait pas permettre une maîtrise des émissions du secteur des transports. Un état des lieux a été élaboré avec le Plan climat en 2004. Cette même année, une remarque forte qui reste toujours d'actualité est que les émissions des gaz à effet de serre des transports ne pourront être maîtrisées et réduites massivement (vous savez l'effort qui reste à consentir) que par une baisse significative de la demande de transport. Dans la demande, on se concentre aujourd'hui sur les véhicules individuels, mais il s'agit aussi bien des déplacements routiers individuels que du transport de marchandises, qui n'est pas traité aujourd'hui, et d'autres composantes comme l'aérien.

On remarque d'abord qu'il faut donc agir sur la demande, mais tout reste sujet à débat. On peut imaginer que la baisse de la demande ne se fera pas de manière spontanée. Une autre remarque est que pour modifier cette perception, tout ne peut pas reposer uniquement sur les actions de sensibilisation. Voilà quelques éléments qui sont de nature à interroger sur la façon de faire en sorte d'agir sur ce désir de mobilité fort qui est ancré

profondément au sein de la société, aussi bien pour préserver le niveau économique que par le désir de mobilité.

Avons-nous dressé un constat négatif des mesures qui ont été prises et mises en œuvre depuis le Plan climat et ceux antérieurs, en matière de lutte contre le changement climatique ? Nous ferons d'abord un constat rassurant, mais en temporisant, et en signalant qu'il y a la politique contre le changement climatique, mais aussi d'autres politiques qui ont joué un rôle positif en matière des baisses des émissions de transport. Je pense notamment aux efforts réalisés en matière de sécurité routière. La généralisation des dispositifs de contrôle de vitesse fixes ou mobiles, l'intégration au nouveau permis de conduire des questions relatives à la conduite souple, la formation des conducteurs de poids lourds ou d'autobus aux économies de carburant, déjà en cours dans plusieurs entreprises, tout cela concourt à la fois à la réduction de la facture pétrolière et, comme vous le disiez, Monsieur le Président, c'est lié aux émissions de gaz à effet de serre.

Ainsi, ces émissions en matière de transport ont marqué un palier en 2003. En 2004, la tendance semble se confirmer, et l'on peut considérer que c'est la conjugaison de plusieurs politiques mises en œuvre qui sont cohérentes et qui vont toutes dans le même sens.

A défaut de s'attaquer au désir de mobilité, peut-on considérer que les progrès technologiques, dont j'ai signalé qu'ils ne résoudraient pas tout, et les autres politiques, en matière de sécurité routière, suffisent pour réduire les émissions ? Je temporiserai la réponse en disant qu'au-delà de ce qui peut être porté par la réglementation, il y a un autre désir qu'il faut mettre en avant, qui est le souci de confort dans la mobilité. Je prendrai deux exemples. D'abord, le développement spectaculaire de la climatisation dans les véhicules. N'oublions pas que la climatisation peut, dans certaines conditions, augmenter de 30 % les émissions de gaz à effet de serre, ce qui peut être de nature à anéantir tous les efforts qui ont été faits par les ingénieurs présents dans cette salle. Ainsi que l'engouement pour les véhicules assez lourds, même s'il semble que la tendance s'infléchisse, M. MORCHEOINE a largement développé ce sujet ce matin. Les chiffres sont inquiétants. L'augmentation en quelques décennies de près de 40 kg de la charge embarquée laisse à réfléchir quant aux consommations nécessaires pour déplacer une ou plusieurs personnes dans un véhicule particulier.

Au final, pour agir sur les comportements, quelles sont les pistes qui ont été mises en avant par le Plan climat ? Nous allons faire un bilan prochainement, mais on peut signaler quelques pistes. D'abord, pour agir sur les comportements, on peut dire : « Fais toi-même ce que tu veux demander aux autres ». L'Etat s'engage personnellement. Désormais, les véhicules particuliers neufs acquis par l'Etat ne devront pas émettre, sauf dérogation pour des utilisations spécifiques, plus de 140 g/km. On peut saluer le caractère pragmatique de cette approche, dont on pourra assurer facilement le suivi.

D'autre part, on peut signaler l'information étiquetage aux acheteurs potentiels de véhicules neufs sur la consommation des carburants et les émissions de CO<sub>2</sub>. C'est une obligation qui découle d'une directive européenne de 1999, déjà appliquée en France, et qui sera grandement améliorée par l'étiquette CO<sub>2</sub> à sept classes de couleur, semblable à celle, déjà obligatoire en Europe pour certains appareils, et même pour certains véhicules. Cela fait aujourd'hui trois mois que la Commission européenne a été saisie de la demande de validation de l'étiquette qui est entrevue par la France. C'est le délai qui est normalement alloué pour avoir une réponse de Bruxelles. Espérons donc que début 2006, nous pourrons dans les différentes concessions voire fleurir ces étiquettes de A à G.

En complément des accords de l'Union européenne constructeurs, de l'information sur l'étiquetage, la fiscalité des véhicules à l'achat, la taxe d'immatriculation à l'usage, la taxe annuelle de circulation constitue le troisième et nécessaire pilier de la politique européenne de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. En matière de fiscalité, au niveau des outils, le crédit d'impôt à l'achat de véhicules propres, au sens de la loi sur l'air du 30 décembre 1996, vient d'être récemment renforcé, fin août, passant de 1 525 à 2 000 €. N'oublions pas que cette mesure est essentiellement dictée par une recherche de diversification énergétique, qui ne devrait pas avoir un impact énorme, mais il y a l'exemplarité et toute la pédagogie qui va autour. En termes de réduction des émissions, cela ne devrait pas avoir un impact énorme. On peut par ailleurs rappeler, puisque l'on parle du Plan climat, qu'il y a eu un signal au niveau du CO<sub>2</sub> qui est significatif chez l'acheteur, prévu avec le projet d'instauration d'un système de malus/bonus CO<sub>2</sub> fiscalement neutre, à l'achat de véhicules propres neufs. Cette mesure équitable, élaborée avec la participation des constructeurs automobiles français, a été ajournée du fait de l'accueil réservé dont elle a fait l'objet. Ceci a une conséquence. Après la suppression en 2001 de la vignette pour les particuliers, dont le montant était calculé en partie sur les émissions de CO<sub>2</sub>, la France, grande productrice d'automobiles, devient un des rares, sinon le seul pays de l'Union européenne à ne disposer ni d'une taxe à l'immatriculation ni d'une taxe à la circulation. Le prix de certificat d'immatriculation, la carte grise, étant suffisamment faible pour ne pas être considéré par Bruxelles comme une taxe.

Je terminerai par les autres pistes qui figurent dans le Plan climat, et qui vont être développées ensuite, au-delà du comportement de la technologie. Il s'agit d'agir sur le combustible, sur les carburants utilisés. Vous avez tous noté le fait qu'a été avancé l'objectif d'incorporation à 5,75 % de biocarburant dans les carburants, ce qui était initialement prévu pour 2008. Cette action due au carburant va faire prochainement l'objet d'une communication dont nous parlera André DOUAUD. Enfin, il me paraissait important, dans l'état des lieux, d'évoquer les pistes qui existent, laissant à la deuxième table ronde le soin de voir les pistes du futur. Je termine en signalant que nous avons les 14 et 15 novembre prochains ce que nous avons appelé le Rendez-vous climat, où nous opérerons un bilan, à un an du Plan climat, avec l'objectif non pas de se

faire plaisir et de montrer tout ce qui a été fait de bien, mais de porter un regard lucide sur l'état d'avancement des différentes mesures de ce plan, avec la volonté de préparer ce qui figure dans la loi de programmation et d'orientation sur les politiques énergétiques et une actualisation du Plan climat en 2006. Nous espérons que ce rendez-vous sera l'occasion de mettre en avant des idées force qui pourront être utilisées dans l'élaboration de ce plan 2006.

Je vous remercie.

- **M. Claude GATIGNOL**

Merci, Monsieur GAZEAU, de nous avoir fait part de vos conclusions sur les moyens et l'approche, à la fois des comportements qui pouvaient être sollicités ou plus fortement dirigés par la réponse à la mobilité par l'usage de la voiture individuelle, en rappelant que le Plan climat avait aussi un certain nombre de facettes.

Monsieur BEUZIT, votre domaine est l'ingénierie des voitures. La conception des voitures nouvelles est-elle compatible avec cette réduction des émissions de gaz à effet de serre, alors que l'on demande à une voiture, comme l'a rappelé M. GAZEAU, d'être toujours plus confortable à travers certains systèmes dont on les équipe, mais également de proposer plus de sécurité, avec quelquefois certains matériaux ou certaines formes ou éléments qui constituent l'ensemble de la voiture d'aujourd'hui, en pensant à celle de demain ?

#### **4. M. Pierre BEUZIT, Directeur de l'ingénierie, Renault**

Merci, Monsieur le Président. Mes chiffres ne sont pas exactement ceux qui ont été présentés tout à l'heure, mais nous sommes tout à fait conscients que particulièrement en France, le transport routier représente une partie significative des émissions de gaz à effet de serre, essentiellement du CO<sub>2</sub>.

On peut faire un constat sur ce qui s'est fait et va se faire. J'ai étudié les statistiques moyennes des constructeurs européens. J'ai indiqué les chiffres concernant Renault, puisque j'appartiens à cette noble entreprise, pour dire qu'il est aujourd'hui un leader mondial en matière d'émissions. Si l'on prend l'ensemble de la production Renault, on est à 148 g à la fin de l'année. On voit donc que des efforts importants ont été faits.

Je voudrais faire remarquer deux choses. D'une part, il y a eu un effet réglementation (nous avons pris 2003, avant l'application de la norme Euro 4), et il y a un effet marché. Je détaillerai ensuite sur deux exemples. Les deux effets ne vont pas dans le même sens, et le gain a été d'autant plus important qu'il a fallu absorber ces dérives. Je note que la prochaine vague, qui inclut Euro 4 en particulier, dans laquelle nous sommes actuellement, génère des dérives en matière de gaz à effet de serre. Toutes choses égales par ailleurs, le fait d'éditer des normes nous pénalise. Je prends deux exemples d'évolution dans notre gamme, l'évolution Mégane 1, Mégane 2, et Clio 2 et 3, dont une des caractéristiques est l'augmentation de la masse. J'ai « dispatché » l'effet de la masse en kilos, sachant que 10 kg, c'est en moyenne 0,9 g de CO<sub>2</sub>/km. La sécurité coûte cher, à la fois en performance, car il faut absorber les kilos, et en émissions. Par ailleurs, le client est fort demandeur d'augmentation de performance. On constate des effets liés au marché, qui sont dimensionnels, le confort, acoustique notamment, et les prestations au client. Tout cela ne va pas dans le bon sens.

J'ai listé les effets liés à la réglementation, ce que je considère être comme une quasi-réglementation (c'est le cas d'EuroNcap en matière de sécurité). Cela a un impact, ce qui est normal, beaucoup par le poids, mais pas seulement. Ainsi, le filtre à particules est un impact simplement d'incitation. Lorsqu'on appliquera complètement les filtres à particules, l'effet sera beaucoup plus élevé, à peu près à 2,5 g sur l'ensemble de la gamme, seulement pour faire face d'ici 2008 aux incitations fiscales. C'est une contre-pression derrière le moteur, et donc une dégradation du rendement du système de moteur. Avec Euro 5 et une réglementation sur les NOx, tout cela viendra... Nous avons bien conscience de tout cela, et le problème pour nous, c'est de comprendre comment on va faire face à l'avenir, car on a bien compris le facteur 4 et, contrairement à ce que certains disent, nous nous engageons.

Sur le passé, qu'avons-nous fait ? En schématisant, on peut dire que nous avons réalisé des améliorations de rendement. La plus forte augmentation de rendement est le diesel à injection directe. Cela s'est traduit par deux choses. D'abord l'introduction du moteur diesel à injection directe, mais surtout le mix diesel, qui a fortement évolué. Aujourd'hui, on est à un mix diesel très élevé, à 60 %. L'année dernière c'était 70 % me semble-t-il sur la production nationale. On arrive aux limites de l'épuration, et la France ne produit pas assez de gazole pour satisfaire ses besoins, puisqu'elle est obligée d'en importer. En ce qui concerne la réduction des frottements, on a constaté là aussi une très forte amélioration. Cela ne se dit pas, mais c'est réel. Il était question ce matin avec Michelin de réduction de l'énergie perdue au roulement du pneu sur la chaussée et des gains considérables ont été faits dans ce domaine. On a divisé quasiment par deux les pertes, ce qui est énorme.

Une démarche qui est en cours, et qui va se poursuivre, concerne la réduction de cylindrée avec des turbos. Cela a été fortement favorisé dans le cadre du diesel. Aujourd'hui, avec les progrès dans le domaine du turbo, on

peut mettre des cylindrées plus faibles, et l'on peut dire qu'en première approximation, très grossièrement, la consommation est plus ou moins proportionnelle à la cylindrée. Le mix diesel et l'aérodynamique comptent également parmi les facteurs d'amélioration.

Tout cela comporte des limites. Sur quoi travaille-t-on aujourd'hui pour tenir nos objectifs dans les dix, quinze ans, voire plus ? D'abord, sur la masse. Entre 1995 et 2004, la masse des voitures a fortement augmenté, en moyenne de 16 kg par an en Europe. On fait des économies de masse par ailleurs, mais elles ne compensent malheureusement pas les augmentations. On peut estimer que l'on va vers une stabilisation avant d'arriver à une rupture technologique avec les nanostructures, pour cette fois réduire la masse. On est toujours dans des conditions économiques viables, et l'on ne parle pas de voitures de laboratoire. L'aérodynamique active est assez prometteuse et l'on peut en attendre des gains significatifs. Les biocarburants sont une solution facile à mettre en œuvre, rapidement, limitée dans son effet, en raison de nombreux problèmes de ressources et de coûts notamment, mais cela peut nous permettre de faire quelque chose dans un délai à 2005-2010. On attend beaucoup des carburants issus de la biomasse, avec des rendements plus forts, des coûts nettement plus bas qui sont susceptibles d'être un réel substitut aux produits pétroliers. Enfin, les carburants de synthèse associés à une combustion homogène en particulier ou une autre combustion adaptée. On attend des gains très importants, mais le délai n'est pas avant l'année 2015 car beaucoup de recherche reste à faire, à la fois dans le carburant et dans le moteur. Mais c'est une solution à développer tout de suite. En ce qui concerne l'hybride essence, on demande pourquoi les constructeurs français n'y sont pas. Economiquement, ce n'est pas viable. Il faut être extrêmement riche pour s'autoriser à le faire, et sur le marché européen, vis-à-vis du diesel, ce n'est pas vraiment compétitif. On y travaille, comme tous les constructeurs, mais sur un hybride économique. Dans ce domaine, des progrès technologiques restent à faire, à commencer par les batteries, mais pas seulement, avec toute la machinerie électronique qu'il faut intégrer. L'hybride diesel est quelque chose qui paraît intéressant sur le papier, car le diesel a tout de même de 20 à 25 % de rendement, toutes choses égales par ailleurs, supérieur à celui de l'essence, mais il est un peu plus difficile d'hybrider un moteur diesel qu'un moteur essence. Il est donc plus décalé dans le temps. C'est un sujet sur lequel nous travaillons. Nous avons revendiqué dans le cadre de l'Agence pour l'innovation industrielle (AVI) un programme national sur le sujet, qui nous paraît justifié, et qui pourrait être associé aux carburants de synthèse, avec une combustion homogène, pour ne pas polluer et consommer nettement moins.

On a également la pile à combustible, avec deux voies : avec reformeur et à hydrogène, la première étant plus facile à mettre en œuvre, puisqu'elle ne nécessite pas d'avoir un approvisionnement en hydrogène. C'est la voie sur laquelle notre entreprise travaille ardemment, et nous voyons cela à l'horizon 2012-2015. On rentre à la fois dans des domaines de coût et de durabilité qui soient acceptables par le marché. On peut commencer à

envisager de rentrer dans le marché avec des « flottes » par exemple. En ce qui concerne la pile à combustible à hydrogène, il faut tout un système de production et de distribution d'hydrogène, et c'est donc un peu plus à long terme.

Voilà ce que je voulais dire très rapidement sur le sujet. Je vous remercie.

- **M. Claude GATIGNOL**

Merci, Monsieur BEUZIT, de cet exposé qui nous a fait passer en revue tous les éléments qui pouvaient concourir à donner une nouvelle approche de la voiture, dans sa sécurité, dans son confort, dans ses nouvelles motorisations, avec la question de la compatibilité avec la réduction des émissions.

Nous allons aborder, avec M. DOUAUD, Directeur technique du Comité des constructeurs français d'automobile, le sujet de la dynamique du marché. On peut concevoir d'excellentes voitures, plus petites, ou plus grosses, mais quelle que soit leur présentation, elles doivent avoir un acheteur et répondre au marché.

### **5. M. André DOUAUD, Directeur technique, CCFA**

Messieurs les Parlementaires, Mesdames, Messieurs. Je voudrais vous parler sur le thème de la contribution de l'automobile à l'effet de serre, et plus particulièrement des questions relatives au marché. En préalable, en m'excusant pour les redites, je vous rappelle que le diesel occupe presque les trois quarts (plus de 30 millions de tonnes de gazole) du CO<sub>2</sub> du transport routier, contre 11-12 millions de tonnes pour l'essence.

Par rapport à la présentation de M. FONTELLE, nous regardons au CCFA de très près le temps réel. Que s'est-il passé ces dernières années en matière de CO<sub>2</sub> ? Entre 2003 et 2004, on constate une stabilisation de la consommation d'énergie qui est pratiquement identique au CO<sub>2</sub>, puisque la part des biocarburants est très modeste en France aujourd'hui. On a donc une stabilisation avec une croissance inférieure à 1 %. Mais si l'on regarde d'un peu plus près, les voitures particulières sont en réduction de 1 % d'émissions de CO<sub>2</sub>, c'est-à-dire de consommation, alors que le domaine des petits utilitaires et des poids lourds, qui correspondent à un volume important de CO<sub>2</sub>, est en croissance. Ce sont donc des chiffres qu'il faut avoir à l'esprit.

Il a été cité les chiffres de croissance à partir de 1990, puisque c'est la référence en particulier pour Kyoto, avec une croissance de 22 % des émissions de CO<sub>2</sub> du transport de la route en France. Si l'on intègre l'année 2004 et ce que l'on sait de l'année 2005, on constate deux rythmes. Entre 1990 et 2000, une croissance très forte et quasiment linéaire de tous les indicateurs de la route, c'est-à-dire les milliards de kilomètres par an, le nombre de véhicules et le CO<sub>2</sub>. On constate à partir de 2000 une certaine stabilisation avec des oscillations. On ne peut pas se prononcer sur les consommations entre aujourd'hui et la fin de l'année, mais compte tenu de facteurs décorrélés entre eux, des questions de sécurité routière, de radar, la diminution de vitesse, les coûts très élevés des carburants depuis le second semestre 2005, nous pouvons prévoir les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la consommation de carburant. Avoir une stabilisation, voire une régression, des émissions de CO<sub>2</sub> entre 2000 et 2005, sur six ans, constitue un facteur significatif de changement de rythme, qui s'explique par les différents facteurs que j'ai évoqués. Je n'en dirai pas plus sur le CO<sub>2</sub>, puisque les présentations précédentes en ont abondamment parlé.

Il est bon d'avoir présent à l'esprit ce qu'est le parc routier français. Tous les chiffres peuvent être consultés dans le Rapport statistique de l'automobile française, que le CCFA édite une fois par an, et qui se trouve sur le site du CCFA. Le parc automobile des voitures particulières en France est de 30 millions de véhicules ; l'âge moyen, de 7,6, est en croissance. Un autre chiffre dont on parle moins, mais qui est aussi significatif, grâce à la robustesse des véhicules, est le kilométrage moyen au compteur, qui est de 99 530 km. Il est intéressant d'étudier cela par puissance administrative, ou par gamme. On constate que le parc automobile français se caractérise d'abord par beaucoup de petits véhicules, soit 44 % du total. Les hauts de gamme sont tout à fait marginaux, avec 6 et 1 %.

En ce qui concerne les carburants, l'essence et le gazole se partagent pour moitié le marché. Il ne faut pas confondre le marché du diesel, qui représente entre 65 et 70 %, avec le parc et la consommation de carburant pour les voitures particulières. En ce qui concerne le parc utilitaire, je ne ferai pas de commentaires car ce n'est pas à l'ordre du jour de cette réflexion. Si l'on examine le marché, il est relativement stable depuis un certain nombre d'années, avec 2 millions de véhicules. Ce n'est pas la production des constructeurs automobiles français qui est plus du double, avec plus que 5,6 millions de véhicules, mais c'est le marché des voitures particulières neuves en France. Le marché des voitures d'occasion est plus que deux fois plus important que celui des voitures neuves. Les immatriculations des véhicules utilitaires se chiffrent en centaines de milliers, voire en milliers pour les cars et bus, et donc beaucoup plus faibles que les voitures particulières. Il est important d'avoir à l'esprit ces chiffres, car l'automobile, soit par le nombre de véhicules, soit par la consommation d'énergie, c'est quelque chose de massif. Dès lors que l'on parle de CO<sub>2</sub>, de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>,

des effets massifs sont nécessaires en termes de mesures prises pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.

On observe la lenteur avec laquelle le parc automobile français se renouvelle, mais cela est vrai de tous les parcs automobiles européens. Pour le pré-Euro, vers les années 1990, on constate l'arrivée des pots catalytiques sur le marché européen. Il reste encore plus de 20 % de véhicules aujourd'hui encore en pré-Euro, sans pot catalytique, avec des niveaux d'émissions presque dix fois supérieurs à ce que sont les niveaux d'émission Euro 4. Toute progression liée à la technologie est limitée par la vitesse du renouvellement du parc. Les constructeurs automobiles indiquent qu'accélérer le renouvellement du parc est un paramètre très important, par exemple devant les progrès incrémentaux de certaines technologies courantes. Ce n'est pas seulement pour les véhicules neufs, car on a vu que pour un véhicule neuf vendu, il y a deux véhicules d'occasion et le véhicule neuf tire aussi le marché d'occasion vers des véhicules plus récents, donc moins polluants et plus économes en énergie.

On m'avait demandé d'essayer d'évaluer l'équation « plus gros, plus polluant ». La dynamique du marché est-elle écocpatible, ou éco-CO<sub>2</sub>-compatible ? Quatre voies d'actions complémentaires sont liées au marché :

- la baisse de la consommation des véhicules,
- les carburants alternatifs, bas CO<sub>2</sub> fossile ou sans CO<sub>2</sub> fossile pour les biocarburants, gaz naturels,
- la gestion basse consommation du trafic,
- les bonnes pratiques pour l'utilisateur.

Je répète, après M. BEUZIT, que les constructeurs français sont champions en basse consommation et basses émissions de CO<sub>2</sub>, avec une moyenne de 148 g, alors que la moyenne pour les ventes françaises est de 153 à l'heure actuelle, avec un décalage entre les ventes des constructeurs français et la totalité du marché français. La moyenne européenne est aux environs de 162. Les pays nordiques, qui se prétendent plus écologiques que le reste du monde ont des émissions de CO<sub>2</sub> très élevées, autour de 170-180 g car ils achètent de très grosses voitures. L'objectif des 140 g en 2008 n'est significatif que grâce à la contribution des diesel. On note une différence considérable de 20 à 30 % de CO<sub>2</sub>, entre une motorisation diesel et une motorisation à allumage commandé classique, sans penser au moteur à injection directe d'essence qui, comme le disait Gérard BELOT ce matin, va apporter un progrès significatif.

Périodiquement, lorsque l'ADEME fait son bilan CO<sub>2</sub> du marché français, les médias se répandent sur la question des 4X4. Lorsqu'on a son bureau près des Champs-Élysées, ce que l'on voit le plus ce sont les 4X4. Le

marché de l'automobile français est-il vertueux ou vicieux ? Ce diagramme montre que les choses vont beaucoup mieux que l'image des 4X4 que les Parisiens peuvent avoir. J'ai présenté ici les ventes de véhicules par classes de CO<sub>2</sub> sur les cinq dernières années, entre 2000 et 2004. On voit que dans la frange 100 à 120 g, le marché a été en très forte croissance, puisque le nombre de véhicules vendus a crû de 270 000. En 2000, il n'y avait pratiquement pas d'offre de véhicules dans la classe de 100 à 120 g. Dans la classe des 120 à 140 g, le marché a crû de 168 000 sur la période, et dans la tranche des véhicules au-dessus de 140 g, puisque la limite fixée par les constructeurs européens est à ce niveau pour 2008, on constate que le marché français est plutôt en diminution : -272 000 entre 140 et 160 g. Dans la tranche des véhicules au-dessus de 200 g où doivent se trouver les 4X4, le marché est en diminution. Ceci montre que globalement, ce rythme a un effet significatif sur les millions de tonnes de CO<sub>2</sub> émises par le transport. Le marché français est dans ce sens vertueux, à l'inverse de ce que l'on peut imaginer lorsqu'on voit les 4X4 parisiens.

Je ne peux pas m'empêcher de mentionner la part des constructeurs français dans ce marché français. On constate que du côté des véhicules bas CO<sub>2</sub>, inférieurs à 120 g, ou compris entre 120 et 140 g, c'est dans ces tranches que les constructeurs ont les plus grosses parts de marché, alors que sur les véhicules gros émetteurs de CO<sub>2</sub>, la part des constructeurs français est beaucoup plus faible. Ce sont les constructeurs français qui historiquement ont été les « champions » des véhicules à haut rendement, basse consommation. Cette tradition, qui tombe à point nommé sur les questions de CO<sub>2</sub>, se perpétue.

Je voudrais insister sur la question de la masse pour avoir un effet sur le CO<sub>2</sub>. En France, certains se lamentent de la trop grande quantité de diesel. Il faut reconnaître qu'aujourd'hui, le diesel est la meilleure réponse à la régulation des émissions de CO<sub>2</sub>. Je l'ai montré sur le CO<sub>2</sub> spécifique, en grammes par kilomètre, mais on le retrouve ici. Vous pouvez comme moi faire un petit calcul : la dieselisation des voitures particulières en Europe fait gagner environ 50 millions de tonnes d'émissions de CO<sub>2</sub>, si l'on prend comme référence un parc américain, qui a 0 % de voitures particulières diesel. Un autre calcul peut être fait : si l'on fait l'hypothèse que 30 % du parc des voitures particulières américaines était en diesel, le gain d'émissions de CO<sub>2</sub> serait de 125 millions de tonnes, soit approximativement l'émission de CO<sub>2</sub> des transports routiers de la France. Ce n'est pas négligeable. L'efficacité CO<sub>2</sub> à l'évidence requiert une application massive d'une technologie à la fois moteur et carburant, et la dieselisation répond à ce critère d'efficacité spécifique et de massif. Si c'est massif, c'est parce que l'offre économique de véhicules diesel en Europe est tout à fait compétitive. Si elle ne l'était pas, il n'y aurait pas un marché aux environs de 70 % de diesel.

Je vous présente des éléments de gains de CO<sub>2</sub> par type d'énergie. On a le nombre de véhicules vendus en France en 2004, le CO<sub>2</sub> moyen pour la

catégorie considérée, et un calcul en prenant le nombre de véhicules vendus en calculant le gain de CO<sub>2</sub> par rapport à la valeur moyenne de CO<sub>2</sub> des véhicules neufs en Europe, qui est de 163 g par kilomètre, et l'on suppose 15 000 km/an, ou 7 500 km pour un véhicule électrique. Il s'est vendu 2 millions de véhicules en France en 2004. 300 000 tonnes de CO<sub>2</sub> ont été évitées. Pour les gains de CO<sub>2</sub> de l'essence, leur moyenne en France est de 162, contre 163 pour la moyenne européenne. Le diesel est en moyenne à 149 g, avec 1,4 million de véhicules, le gain étant chiffré en centaines de milliers de tonnes. Les véhicules à moins de 120 g se sont vendus à un peu plus de 287 000 en 2004. Là encore, le gain pour un CO<sub>2</sub> moyen de l'ordre de 114 g, ce qui fait 211 000 tonnes. Pour le GPL, il se vend de l'ordre de 5 000 véhicules GPL. Le CO<sub>2</sub> moyen des véhicules immatriculés est de 181 g. La très grande majorité de ces véhicules sont des Lada Niva, dont le CO<sub>2</sub> moyen est inavouable, ce qui « plombe » le CO<sub>2</sub> moyen entre les très bons véhicules français en matière de GPL, qui ont de très bas niveaux d'émission, mais avec un très grand nombre de véhicules russes qui sont catastrophiques du point de vue du CO<sub>2</sub>.

On parle beaucoup en France de l'hybride essence. Il s'est vendu en France 669 véhicules hybrides en 2004, avec un CO<sub>2</sub> moyen de 105 g. On voit que sans effet de masse, on n'a pas des centaines de milliers de tonnes, mais 582 tonnes. Pour les véhicules électriques, c'est similaire. Il s'est vendu en France 460 véhicules électriques, avec des gains tout à fait négligeables. Le marché de véhicules bas CO<sub>2</sub> n'a d'impact sur le CO<sub>2</sub> que si ce marché est massif. S'il ne l'est pas ou n'a aucune chance de le devenir, pour des raisons économiques en particulier, ce n'est pas une bonne solution pour maîtriser les émissions de CO<sub>2</sub>. Sur les biocarburants, ce n'est pas tout à fait le client qui choisit, sauf avec la folie de ceux qui mettent de l'huile de salade dans leur réservoir à l'heure actuelle. Le plan biocarburants français, qui utilise les voies classiques éthanol ou esters huile végétale, permettra d'éviter de l'ordre de 8,2 millions de CO<sub>2</sub>, ce qui est relativement modeste. La Commission interministérielle véhicules propres et économes sortira à la fin de ce mois un rapport sur cette question.

On peut dire que les biocarburants actuels sont presque des biocarburants de transition. Comme le signalait Pierre BEUZIT, si l'on veut avoir un effet massif, il faut se poser la question de savoir si 20 % de carburant alternatif au pétrole en 2020 et 30 % en 2030 sont un enjeu raisonnable ou utopique. Si l'on réussit à faire des inventaires des ressources de biomasse à finalité énergétique, ce n'est pas de la biomasse alimentaire mais de la biomasse à finalité énergétique. Si l'on sait faire cet inventaire, et si l'on sait utiliser toute l'énergie de cette biomasse dédiée énergétique pour produire des carburants de synthèse, il a semblé au groupe de travail que j'ai eu l'honneur de présider, qu'il était possible et qu'il n'était pas utopique d'envisager des taux de substitution de 20 à 30 % à l'échelon de quelques dizaines d'années.

Sur les questions de congestion, j'ai pris un exemple sur les poids lourds. On prend un poids lourd que l'on utilise sur dix kilomètres (40 tonnes) et l'on prend une circulation fluide, sans arrêts, à 75 km/h constants. La consommation sur 10 km va être de 3,4 litres. Supposons une congestion moyenne, avec un arrêt tous les quatre cents mètres, et quinze remises en vitesse de 0 à 30 km/h, dix remises de 0 à 90 km/h et vingt-cinq minutes de ralenti. La consommation passe à 16 litres. Si l'on est dans une congestion forte, avec un arrêt tous les cent mètres, la consommation passe à 36 litres. C'est donc l'effet de masse du véhicule sur les arrêts et les remises en roulage. C'est caricatural car il s'agit de poids lourds, et ce n'est pas l'objet de ce qui nous intéresse aujourd'hui, mais il me semble que toute la gestion de la circulation a été prioritairement faite sur des questions de sécurité routière, et je crois qu'il serait temps de se pencher sur les questions de gestion de circulation, pour minimiser la consommation et les émissions de CO<sub>2</sub>.

Enfin, j'aborderai en dernier point le comportement des usagers. Il faudrait les convaincre autrement que par des radars et des amendes qu'il y a de bonnes façons d'utiliser une voiture, dans l'intérêt de leur porte-monnaie (moins d'émission de CO<sub>2</sub>, c'est moins de consommation et moins de coût d'usage). Au cours de cet hiver, avec l'ADEME, les professions automobiles, l'industrie pétrolière, les services automobiles, nous avons fait une plaquette avec dix conseils pour chasser le gaspi. Je regrette vivement qu'il n'y ait pas plus de diffusion de ce type de messages par voie de télévision. Je sais que cela coûte très cher. On retrouve cela dans les stations-service d'autoroute, mais pas au-delà. Tous ces conseils sont très bons. Le gonflage des pneus, qui est gratuit, est tout à fait significatif (on gagne de 1 à 2 % de consommation). Tous ces conseils permettraient de contribuer à la baisse des émissions de CO<sub>2</sub>.

Voilà tout ce que je voulais dire du point de vue de l'utilisateur.

- **M. Claude GATIGNOL**

Merci, Monsieur DOUAUD. Nous ouvrons maintenant le débat. Y a-t-il des questions particulières sur les intervenants qui se sont investis cet après-midi ?

## **6. Débat avec la salle**

- **M. Daniel LE BRETON**

A défaut de question, je ferai un commentaire sur le diesel. Si l'on peut se féliciter d'être les moins émetteurs de CO2 en Europe, il ne faut pas oublier que l'essence, qui n'est pas consommée en Europe est consommée aux Etats-Unis, et l'on n'a fait que déplacer le problème. Les Russes, non plus, ne consomment pas de gazole mais nous l'envoient et ils roulent à l'essence. Aux bornes de la planète, il n'est pas si évident que le diesel soit la panacée. Par ailleurs, il faut reconnaître que les Américains sont trop calés sur l'essence, les Européens le sont peut-être trop sur le diesel. Si vous me permettez cette image, « il y en a un qui a la tête dans le frigo et l'autre la tête dans le four » et je ne sais pas si la température moyenne est bonne...

- **M. André DOUAUD**

Je voudrais répondre à cela. Je ne suis pas en contradiction avec ce que dit M. LE BRETON. L'intérêt du diesel, ce n'est pas que l'un s'appelle gazole et l'autre essence, c'est que cette filière a un rendement énergétique du point de vue du véhicule qui est bien meilleur. Si l'on savait faire un véhicule à essence avec le même rendement que le diesel, le bénéfice de l'essence serait évident.

- **M. Daniel LE BRETON**

Je voudrais faire une dernière remarque, si vous le permettez. Dans le pétrole, la nature ne nous a pas donné tout ce que l'on souhaite. Il y a de l'essence et il faut arriver à l'utiliser. La lime à épaissir n'existe pas, du côté des molécules, ou alors elle coûte cher, et il existe une limite. Si l'on pouvait ne faire que du diesel, ce serait raisonnable de n'utiliser que des moteurs diesel, mais malheureusement on ne peut pas faire uniquement cela. Du côté des biocarburants, la plupart des biocarburants de synthèse sont plutôt des distillats, et donc plutôt pour le pool diesel. Mais il y a un grand concurrent de l'essence, qui est l'éthanol, et qui concerne les véhicules à essence, et non diesel.

- **M. Patrick OLIVA**

Je voudrais poser une question en rapport avec les propos de M. LE BRETON. Y a-t-il un optimum dans le processus de raffinage, dans la proportion respective de l'essence et du diesel ? J'ai entendu des choses très diverses sur ce sujet, et j'ai du mal à me faire une opinion personnelle.

- **M. Daniel LE BRETON**

Pour vous donner une image, il se vend aujourd'hui presque trois tonnes de gazole pour une tonne d'essence. Pour une raffinerie la plus convertissante, c'est-à-dire une raffinerie qui est dédiée gazole, ce ratio est de 2,5. Pour passer à 3, il faut détruire de l'essence, et c'est ce que l'on a commencé à faire. En France, nous avons dépassé le stade de la meilleure raffinerie orientée diesel. Cela vous montre qu'il y a une limite quelque part. Est-ce que le bon ratio, c'est 50 % de véhicules particuliers diesel et 50 % essence ? Je ne sais pas. Mais ce n'est sûrement pas 75 % diesel et 25 % essence.

- **M. André DOUAUD**

Je crois que mon ami LE BRETON « a les pieds dans le four » de la France. Les chiffres qu'il donne concernent la France, mais il faut savoir qu'au niveau mondial, le carburant qui est le plus demandé en particulier à cause des Etats-Unis, c'est l'essence.

- **M. Joël PEDESSAC**

Au sujet des propos de M. LE BRETON, on parle du bilan du « puits à la roue » sur les différents carburants. Vous avez présenté les émissions du système énergétique. Les dernières tonnes de gazole que l'on va aller chercher dans la conversion de l'essence éventuellement, ne sont-elles pas plus émissives de gaz à effet de serre ? Finalement, est-ce que l'on ne dégrade pas le bilan du « puits à la roue » ?

- **M. Daniel LE BRETON**

Je vais rebondir sur les propos de M. DOUAUD. Il est sûr que le marché mondial est à l'essence car il est piloté par les Américains, qui consomment environ 500 millions de mètres cubes. On peut dire qu'ils ont fait la « bêtise » de faire trop d'essence. Ils ne sont pas non plus à l'optimum du raffinage. Leurs systèmes de raffinage sont complexes et s'ils commencent à dieseliser, ils vont rencontrer des problèmes de raffinage aussi. Sur le problème du « puits à la roue », si l'on fait une tonne d'essence en plus, cela baisse les émissions de CO<sub>2</sub> d'une raffinerie. Cela veut dire que l'on touche les limites. Le marché est en gazole et la dernière tonne de gazole qui peut se vendre va coûter plus cher en CO<sub>2</sub>. Le bilan du « puits à la roue » de la dernière voiture diesel n'est pas aussi bon que celui de la première.

- **M. Patrick OLIVA**

J'aurais encore une question pour M. LE BRETON. Vous avez parlé ce matin de cette expérience très intéressante de l'usine NExBTL. Quel est globalement le bilan CO<sub>2</sub> que vous faites sur l'ensemble de la chaîne ?

- **M. Daniel LE BRETON**

C'est assez comparable à la filière ester. Ensuite, il y a des raffinements, car c'est un produit du biogaz. Si l'on imagine que l'on utilise le biogaz pour générer l'hydrogène, on peut imaginer qu'on a des crédits. Mais globalement, c'est le même ordre de grandeur que la filière ester.

- **M. Claude GATIGNOL**

Y a-t-il d'autres questions ?

- **Un auditeur**

Je voudrais juste rebondir sur le dernier commentaire et la dernière information de M. LE BRETON. Lorsqu'il dit que les bilans Well to Wheel de la filière NExBTL sont à peu près du même niveau que ceux pouvant être obtenus par les filières bio-diesel conventionnelles actuellement, c'est sans doute vrai, mais je voudrais donner une valeur chiffrée. Ce bilan reste très favorable, puisque les bilans Well to Wheel des bio-diesel conventionnels permettent une division pratiquement par deux des émissions de CO<sub>2</sub> globales

sur la chaîne Well to Wheel par rapport à un gazole issu d'une filière pétrole fossile. Cette filière NExBTL, même si elle n'est pas aussi performante vis-à-vis des émissions globales de CO<sub>2</sub> que les filières BTL, reste très intéressante car elle permet de diviser au moins par deux, au lieu de diviser par dix.

- **M. Claude GATIGNOL**

C'est une précision intéressante dans le cadre des carburants de transition dont parlait M. BEUZIT.

***B. DEUXIÈME TABLE RONDE :  
QUELLES SOLUTIONS DANS L'AVENIR ?***

**1. Introduction par M. Christian CABAL**

Monsieur PINCHON, je vous propose de commencer sur les progrès envisageables quant à la production d'un moteur à combustion interne satisfaisant, lequel à l'heure actuelle, s'avère encore le meilleur moyen de faire fonctionner les automobiles.

**2. M. Philippe PINCHON, Directeur du centre de résultats  
Moteurs-Energies, IFP**

Je vous remercie de me donner l'opportunité de présenter notre vision de l'évolution technologique du moteur à combustion interne. La plupart des experts prévoient que, encore dans plusieurs décennies, c'est ce type de moteurs qui sera en vigueur.

Cela s'explique par les sources d'énergies nécessaires pour alimenter nos véhicules. Il existe différentes sources primaires : le pétrole, les gaz naturels, ainsi que des sources d'énergies renouvelables, telles que la biomasse ou les énergies hydraulique, éolienne, solaire ou géothermique. A partir de ces sources primaires, des vecteurs énergétiques sont utilisés pour la propulsion. Le diagramme que je vous présente montre comment nous allons vers une diversification importante des sources d'énergies. Il faut en tenir compte. 98 % de la filière utilisent le pétrole, l'essence, le gazole ou le GPL. Les autres sources d'énergies se développeront.

Il est intéressant de constater que l'ensemble des vecteurs (carburants de synthèse, biocarburants, gaz naturels et carburants issus de gaz naturels, voire hydrogène) pourra être utilisé dans un moteur à combustion interne, excepté l'électricité qui ne peut être utilisée que dans un moteur électrique. La combustion interne apparaît donc comme le convertisseur qui peut s'accommoder de la plupart des énergies du futur. La figure que je vous présente met en scène l'évolution des normes antipollution, appliquées à l'industrie des véhicules automobiles en Europe, avec un focus sur 2000 et 2005. J'insiste sur le fait que le respect des normes antipollution retenues n'est pas sans conséquences sur l'effet de serre : pour réduire la pollution des

véhicules il faut une consommation supérieure entraînant une émission plus importante de CO<sub>2</sub>.

Il est donc primordial de poser la question de l'évolution des normes antipollution. Je vais donc m'arrêter sur le texte proposé sur ce sujet par la Commission européenne. Il élabore un plan effectif à horizon 2010. Après discussion, ce texte sera adopté, sauf objection majeure du Parlement ou de l'opinion publique.

Pour le moteur diesel il est prévu une division par cinq des émissions de particules. Cela peut entraîner une certaine surconsommation, même si M. BELOT est optimiste quant aux performances de la technologie de PSA.

Il y a également un écart entre les moteurs à essence et diesel du point de vue de l'émission de NOx. Il y a un rapport de un à trois, entre l'émission maximale autorisée pour le diesel et l'essence. Le texte affirme que cette situation ne pourra pas durer, cependant, à l'heure actuelle, il est admis que les technologies du type DeNOx ne seront pas encore au point techniquement en 2010. En ce qui concerne le moteur diesel, en complément de l'exposé précédent de M. André DOUAUD, nous pouvons constater un bon comportement en matière d'émissions de CO<sub>2</sub>, mais en revanche, il reste un effort à faire sur le plan des émissions de polluants.

Si nous revenons à la figure qu'a également présentée André DOUAUD, sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> en Europe, nous constatons une forte réduction en moyenne de ces émissions provenant des véhicules vendus en Europe depuis les années 1990, qu'il s'agisse de véhicules à essence ou diesel. Ces résultats ont été obtenus par une diésélisation des véhicules les plus lourds et une affectation des moteurs à essence aux véhicules les plus légers. Cela se traduit par une baisse moyenne des émissions de CO<sub>2</sub>, à peu près en phase avec les objectifs de la CEA. Le problème est que l'écart entre les moteurs à essence et diesel augmente, et que cela n'est pas acceptable pour le futur. La tendance lourde des prochaines années est donc la convergence des deux types de moteurs sur le plan des émissions de CO<sub>2</sub> et de polluants atmosphériques.

Pour parvenir à relever ce défi, il faudra réduire les émissions de polluants des moteurs diesel et les émissions de CO<sub>2</sub> des moteurs à essence. Dès lors, comment peut-on combiner les technologies pour parvenir à la réalisation de ces deux objectifs contradictoires en apparence ?

En ce qui concerne le moteur diesel, les améliorations proviendront des progrès technologiques, sur le système d'injection notamment. Une augmentation des pressions d'injection est escomptée ; actuellement nous atteignons des pressions de 1600 bars, des systèmes permettant une pression de 1 800 bars sont en phase de réalisation et des pressions de 2 000 bars sont déjà envisagées.

Un contrôle précis du taux d'introduction est également envisagé, c'est le rate-shaping, c'est-à-dire que la quantité injectée va suivre une loi optimale pour contrôler la combustion pendant l'injection. Gérard BELOT parlait de trois injections pour piloter le FAP, le chiffre de cinq, voire sept injections, est d'ores et déjà avancé. La diminution de l'écart de temps entre chaque injection en raison de l'augmentation du nombre d'injections, passera probablement par l'utilisation des systèmes piezo-électriques, qui sont plus précis sur le plan de la commande, et par l'optimisation de la taille des orifices d'injection qui ont un rôle énorme en termes de pollution. Il s'agit de « systèmes à orifices variables » : en fonction de la charge, des diamètres différents sont obtenus.

Il faut en outre travailler sur les systèmes d'alimentation en air. Ici, le dispositif présenté est un turbo à géométrie variable, allant de pair avec un système de recirculation des gaz brûlés ou EGR. Tout cela donne lieu à une augmentation de la pression de suralimentation, on parle alors de suralimentation à double étage. En Allemagne, un véhicule a déjà été équipé d'un tel système. Ces pressions de suralimentation peuvent atteindre 3,5 bars, soit un niveau très élevé. Afin d'accompagner le downsizing du moteur, déjà engagé et qui va se poursuivre, la recirculation des gaz brûlés va augmenter. Il est notamment prévu de travailler sur les émissions d'oxyde d'azote, ce qui peut supposer des niveaux posant problème en termes d'encrassement des systèmes. La problématique que nous étudions est donc complexe.

Une autre évolution envisagée est l'augmentation de la pression des cylindres, pour atteindre 180 bars de pression à l'intérieur des cylindres. Aujourd'hui, nous en sommes à 150 bars. Cela s'accompagnerait d'une diminution du taux de compression du moteur et enfin, de la production de soupapes à calage et levée variables ; la soupape sera commandée par un système électronique.

L'électronique est une autre technologie fondamentale dans l'évolution des moteurs à combustion interne. Concernant le moteur diesel, une réflexion est engagée sur la possibilité de modèles physiques embarqués à bord du calculateur, dans le but d'optimiser en temps réel le fonctionnement du moteur. La possibilité d'effectuer un contrôle bouclé de la combustion est également étudiée : un capteur permet d'estimer la qualité de la combustion, il est alors possible d'agir en boucle fermée sur la qualité de l'injection et sur le système d'alimentation en air, de manière à optimiser en permanence la combustion. Cela peut même aller jusqu'à une optimisation cycle à cycle. Ces technologies permettraient une meilleure maîtrise, que ce soit de la combustion conventionnelle – qui peut faire de gros progrès notamment par augmentation du taux d'EGR – ou de la combustion homogène, dont Dominique Herrier vous a parlé ce matin.

Cela ne serait pas suffisant sans un bon système de post-traitement, comme un filtre à particules, considéré comme efficace à 99 % mais entraînant

une légère surconsommation. Pour le post-traitement des NOx, les technologies du piège à NOx ou le SCR sont citées. Toutefois, le potentiel de ces technologies n'est pas encore tout à fait certain parce qu'elles impliquent l'utilisation d'un carburant sans soufre et que les systèmes envisagés sont très complexes et coûteux, entraînant une surconsommation de 3 à 5 % de carburant, sans considérer les risques de dégradation possible des réglages, ou l'encrassement imprévu des systèmes de post-traitement.

S'agissant du moteur à essence, ses handicaps proviennent de son niveau élevé d'émissions de CO<sub>2</sub> et de sa forte consommation de carburants : l'écart constaté avec le moteur diesel est de 20 à 25 %. Que faire pour le réduire ? Sont envisagés : la distribution variable, le pilotage des soupapes d'admission de manière totalement flexible, la combustion fondée sur l'injection directe et la combustion stratifiée, la combustion CAI et le downsizing. Le potentiel de réduction de la consommation grâce au downsizing du moteur à essence, entraînant une sorte d'alignement sur le moteur diesel, est de l'ordre de 20 %. C'est-à-dire qu'avec un moteur à essence downsizé et turbo suralimenté avec une réduction de cylindrée de l'ordre de 50 %, il serait possible d'atteindre les niveaux d'émissions de CO<sub>2</sub> d'un diesel. Cette technologie est en route.

La technologie suivante est l'hybride, qui tente de répondre à la question « comment combiner la réduction des émissions de polluants et celle des émissions de CO<sub>2</sub> ? ». En ce qui concerne le moteur diesel, il serait possible de réduire la cylindrée des moteurs, mais une augmentation de la charge en utilisation courante en découlerait, donc une augmentation de l'émission de polluants. Ce compromis est alors insatisfaisant. Afin de contrebalancer ces effets néfastes, un système de post-traitement, le filtre à particules, est utilisé. Par un compromis adéquat, il est possible de réduire les émissions de NOx en même temps que les émissions de particules. Une partie importante du chemin serait réalisée grâce à cette technologie. Ensuite, il faudrait obtenir des systèmes de post-traitement plus performants :

- le NOx trap qui accuse des difficultés de durabilité et de sensibilité au soufre ;

- le HCCI associé au filtre à particules, théoriquement plus intéressant car reposant sur une réduction à la source des émissions de NOx, et impliquant moins de problèmes de tenue du système de post-traitement ;

- le filtre à particules avec SCR.

Tous obtiennent à peu près les mêmes résultats en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> et de polluants, comme il apparaît sur le graphique. L'hybride est coûteux et complexe, l'opinion publique l'acceptera peut-être difficilement, mais sur le strict plan de l'efficacité, cette technologie est prometteuse.

Le moteur à essence peut emprunter deux voies :

- la Stéochiométrie (Gérard BELOT l'a expliquée ce matin), qui permet, en utilisant un système de distribution variable, de réduire en même temps les émissions de CO<sub>2</sub> et de polluants. Cela suppose le DISI turbo, qui est en fait l'injection directe associée à la suralimentation, qui permet un downsizing poussé du moteur (le rendant proche d'un moteur diesel dépollué) ;

- la combustion de mélanges pauvres, qui suppose une émission plus importante de polluants, puis la mise en œuvre de systèmes de post-traitement du type NOx trap, plus coûteux et plus sensible, et donc, plutôt à éviter a priori.

Le gain du passage du moteur à essence downsizé vers le véhicule hybride est plus intéressant que dans le cas d'un moteur diesel, ce qui explique que, in fine, nous nous retrouvons avec un moteur à essence ou diesel dans un véhicule hybride avec à peu près les mêmes émissions de CO<sub>2</sub> (une différence subsistant en matière d'émissions de polluants). L'explication est que la dépollution du moteur diesel est très coûteuse et contrebalance le gain en consommation attendu.

Nous considérons quant à nous, que cette solution intermédiaire – à savoir la combustion HCCI et le filtre à particules pour le moteur diesel, et le downsizing du moteur à essence associé à l'injection directe plus la suralimentation – devrait être la plus attractive, car elle semble à la fois efficace en termes de coûts et d'efficacité.

- **M. Claude GATIGNOL**

Merci Monsieur PINCHON. Après ce survol des prochains procédés, M. OLIVA va maintenant aborder la propulsion électrique.

### **3. M. Patrick OLIVA, Vice-président de Michelin**

Je le ferai avec plaisir. La motorisation électrique est mentionnée dans les différents projets de véhicule hybride, mais ma présentation sera plus générale, en abordant la notion de véhicule complètement électrique, avec batterie ou pile à combustible.

Pour commencer, il faut analyser les problèmes de nuisances urbaines en tenant compte de cinq éléments :

- le problème des émissions locales ;
- les émissions de CO<sub>2</sub> ;
- les intérêts économiques ;
- la sécurisation des approvisionnements énergétiques, qui devient fondamentale, en raison du risque de terrorisme notamment ;
- la sécurité du transport.

Il faut ajouter à cela d'autres aspects, tels que l'attrait du consommateur, l'analyse du cycle de vie complet, etc.

Je présenterai ma vision des véhicules à motorisation électrique, en ce qui concerne la période 2002-2030, après avoir organisé un certain nombre d'événements en Europe, aux Etats-Unis, au Japon et en Chine, qui sont autant d'observatoires mondiaux des solutions disponibles, c'est-à-dire, d'ores et déjà capables de circuler sur une centaine de kilomètres.

L'essentiel de la demande de pétrole sera le fait du transport, dans l'OCDE comme en dehors. Son coût ne devrait pas baisser et les émissions de CO<sub>2</sub> connaîtront une forte hausse en raison de l'augmentation du trafic escomptée, qui sera vraisemblablement supérieure aux réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> que nous venons d'évoquer.

Pour rappel, si nous parlons de consommation d'énergie d'un véhicule, c'est dans l'optique de vaincre quatre types de résistance, afin qu'un véhicule fonctionne, soit :

- les forces d'aérodynamisme, dépendant de la forme du véhicule, en moyenne, à cent kilomètres, elles représentent 50 % des forces à vaincre ;
- les pneus, pour 20 %, soit tout ce qui tient de la résistance aux roulements – représentant 40 % du total dans le cas d'un poids lourd ;
- les forces d'inertie, la masse surtout ;
- les forces et flexions internes.

En ville, les forces aérodynamiques offrent une résistance faible, ce qui prime ce sont l'inertie et les éléments de résistance aux roulements ; la masse est terriblement importante.

L'énergie consommée par un véhicule est trois fois supérieure au besoin nécessaire pour vaincre ces quatre forces, puisque l'on considère que le rendement moyen des moteurs thermiques est inférieur à 30 %. Il y a un potentiel de gains d'efficacité très important, alors, relever le défi énergétique, c'est diminuer ces forces de résistance, améliorer le rendement énergétique de la motorisation, diversifier les sources primaires d'énergie et construire des véhicules adaptés aux affectations et aux lieux d'usage.

A propos des véhicules à motorisation électrique, il faut retenir quatre messages :

- le rendement de la voiture électrique est supérieur à 90 % (bien plus que pour les véhicules à moteurs thermiques), c'est avéré aujourd'hui, et la motorisation, les chaînes de production comme l'électronique de commande, sont maîtrisés ;

- le lithium change complètement le paysage auquel nous avons été habitués. Ainsi, les limitations d'autonomie que nous avons connues au temps du nickel-cadmium (autonomie de 60 à 80 km), ne sont plus les mêmes ; l'autonomie actuelle serait supérieure à 200 km ;

- la Chine a annoncé qu'elle ferait le choix de l'électrique et souhaiterait que la moitié des nouveaux véhicules sur son territoire en 2020 soit à motorisation électrique (en sera-t-elle capable ?) – qu'il s'agisse d'hybride, d'électrique reposant sur une batterie d'énergie ou une pile à combustible. L'Inde pourrait également suivre ce choix, d'autres aussi, peut-être. Nous avons été habitués à trois entités productrices de véhicules : les Etats-Unis, l'Europe et le Japon ; il faudra désormais ajouter la Chine, qui ne cache pas ses prétentions de devenir un de ces grands constructeurs ;

- pour contribuer à la « mobilité durable », le développement des véhicules électriques doit s'accompagner d'une conception adaptée à l'usage et aux services de maintenance, d'une comparaison bilan du puits au pneu, car il existe des usines fortement émettrices de CO<sub>2</sub>, comme en Chine où des mesures de 900 grammes de CO<sub>2</sub> par KW/h peuvent être relevées. Enfin, il faudra envisager un minimum de réflexion sur des évolutions d'infrastructures si nous voulons que le véhicule à motorisation électrique se développe.

Je vais maintenant revenir sur la maturité de certaines technologies. Lorsque nous évoquons une alimentation d'électricité à bord du véhicule, elle peut être effectuée par une batterie d'énergie et de puissance (au lithium), des super-condensateurs dans l'hypothèse d'appoints de puissance, et dans le cas des hybrides, par un générateur alimenté grâce à un moteur technique en fonctionnement optimisé ; plus tard seulement, il sera possible d'envisager les piles à combustible.

En ce qui concerne la charge des batteries sur le réseau, le réseau domestique est capable d'avoir une charge normale complète sur réseau standard de trois à sept heures, pour une prise de 16 à 32 ampères (comme pour des réfrigérateurs). Sur des installations spécifiques, il est possible de fonctionner avec des charges partielles pendant trente minutes.

L'utilisation du lithium se développe, pour les portables, les deux roues et demain, les véhicules légers et les bus. L'énergie massique en est multipliée par 2,5 à 3, et l'on peut, dans le cas d'un véhicule léger, obtenir une énergie de 30 à 50 kW/h grâce à des batteries qui feraient de 200 à 300 kg, avec une autonomie un peu supérieure à 200 kilomètres. Cela existe déjà, mais le problème est économique : cela coûte plus de 4 000 euros, soit l'objectif que les professionnels souhaitent atteindre. Nous pouvons alors l'envisager pour une fabrication en très grande série. C'est coûteux mais il faut rapporter ce coût au prix d'une charge qui est de 4 euros, soit 2 euros aux 100 kilomètres.

Pourquoi cela intéresse la Chine ? Pour le comprendre, il faut en revenir aux trois raisons que j'ai évoquées. Le « projet 863 » chinois de développement des voitures électriques est l'un des douze projets nationaux, et témoigne d'une triple volonté de réduire la dépendance énergétique, de lutter contre la pollution (la Chine considère que moderniser ses raffineries représenterait un coût prohibitif), et enfin, de devenir une grande nation de l'automobile, en développant de nouvelles technologies. Il s'agit d'une déclaration d'objectifs effectuée par le pouvoir chinois, que je ne cautionne pas. Quoi qu'il en soit, les véhicules testés sont remarquables, notamment par leurs capacités d'autonomie supérieures à 200 kilomètres, qui ont été constatées au dernier challenge Bibendum.

Dans des conditions optimales, il faut une électricité propre pour mener à bien de tels projets, c'est le cas en France, au Canada, en Suède..., par exemple. Il faut également procéder à une adaptation du véhicule en fonction des lieux et des missions et construire de nouveaux services et infrastructures. Puis, il faudra sans doute développer des technologies par câbles, pour passer du mécanique à l'électromécanique, tel est le contenu du « projet 863 ».

En bref, les véhicules à motorisation électrique vont se développer. Ils n'ont pas été tellement présents dans les perspectives exposées aujourd'hui, sauf dans leurs versions hybrides et celles comportant une pile à combustible. La décision de la Chine de développer ce type de véhicules doit nous faire réfléchir, et signifie qu'il faut prendre en compte des éléments nouveaux. En effet, ces véhicules représentent l'une des voies permettant de sortir de la dépendance au pétrole, de réduire les nuisances urbaines, et dans certains pays, de baisser les émissions de CO<sub>2</sub>.

Sur ce plan, la France a des atouts à faire valoir :

- un savoir technologique acquis sur une première génération de plus de 10 000 véhicules, avec PSA en acteur majeur ;
- un secteur recherche et développement performant : la plupart des brevets sur le lithium sont français ;
- un approvisionnement en électricité faiblement émetteur de CO<sub>2</sub> (en raison du choix de l'hydroélectricité et du nucléaire) ;
- de nombreux partenaires industriels de premier plan (pour les batteries, les pneus, les commandes électriques ou électroniques) ;
- des expériences déjà réalisées avec des villes pionnières et des réglementations déjà adaptées.

Je rappelle que nous organisons le prochain challenge Bibendum du 9 au 12 juin 2006 à Paris, qui se veut un observatoire des technologies disponibles dans le monde, et crédibles en termes de performances et de bilan écologique. Merci de votre attention.

- **M. Claude GATIGNOL**

Je donne la parole à François BADIN qui va nous parler de l'hybridation.

#### **4. M. François BADIN, Directeur de recherches, INRETS**

Merci Monsieur le Président. Je vais faire un tour d'horizon des véhicules hybrides et présenter les problèmes et les perspectives du secteur. Tout d'abord, je préciserai que les différents types de véhicules hybrides sont variés.

La solution la plus simple est l'alternateur-démarrateur, il s'agit d'une petite machine électrique qui n'est pas intégrée au moteur, mais seulement reliée à lui par une courroie. La batterie est alors peu modifiée et les perspectives de gains de consommation en milieu urbain restent modestes car la technologie utilisée est somme toute assez simple. Toyota produit depuis 2001 des véhicules de ce type en faible quantité. En France, depuis le début de l'année, Valeo et PSA en fabriquent également. Aux Etats-Unis, des projets

fleurissent avec une machine non intégrée et une prise 110 V pour alimenter des auxiliaires.

En augmentant la complexité de la machine, il lui sera demandé d'effectuer du « boost ». C'est-à-dire, qu'une machine plus puissante (10 à 15 kW) est requise, afin de conférer de la souplesse et de l'accélération au véhicule et de réaliser une récupération d'énergie au freinage. Des gains importants sont réalisables sur des véhicules de 1200 à 1600 kg. La batterie a alors une taille plus importante et le fonctionnement du moteur thermique est optimisé. Honda est le plus en avance en ce qui concerne cette technologie. Un moteur thermique est utilisé, ainsi qu'une machine électrique ayant la forme d'un disque très plat. L'implantation dans le moteur est donc discrète. Honda commercialise trois types de véhicules. Le moteur électrique est lié au moteur thermique, et il n'y a pas de mode tout électrique, quant à la récupération au freinage, elle est plus compliquée en raison des pertes du moteur thermique, liées aux frottements notamment (même s'il est possible de les limiter par la gestion des soupapes). Cette transmission ne permet donc pas de réaliser toutes les potentialités de l'hybride.

En continuant sur l'échelle de complexité, il est possible d'ajouter un mode électrique, c'est-à-dire la possibilité de déconnecter le moteur thermique et le moteur électrique, et donc de faire rouler le véhicule avec le moteur thermique arrêté. La décision est prise par le calculateur, selon les informations reçues concernant les désirs du conducteur à propos de l'état de charge de la batterie.

Il s'agit de machines électriques de plus grande taille sous des tensions plus élevées et des niveaux d'énergie encore modestes : 1 à 2 KW/h. Or, comme sont rajoutées des fonctions à l'hybride, des possibilités de réduction de la consommation d'énergie en mode urbain de l'ordre de 30 à 40 % sont obtenues. Le véhicule de ce type le plus connu est la Prius. Sa transmission est complexe, car elle associe des branchements en série et en parallèle, mais elle peut effectuer du stop start, du boost et de l'alternodémarrreur. Plus de 300 000 véhicules ont été vendus depuis décembre 1997. La chaîne de traction est aussi complexe, mais tient entre les fourches avant du compartiment moteur, et la batterie prend place dans le coffre arrière. Sur le cycle normalisé européen, tel qu'il est représenté sur le graphique, le diesel est mieux placé en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>. Il existe quelques modèles capables de produire de faibles émissions, autour de 90 g pour la Smart et la Lupo, mais ce sont des véhicules spécifiques – la Smart est une deux places – à usage urbain uniquement.

Les autres véhicules de ce type obtiennent des résultats de 110 g au minimum, voire 130 à 150 g pour des motorisations de 80 KW environ. Si nous considérons les véhicules hybrides mesurés en cycle normalisé, la Prius, qui a connu trois versions, est de mieux en mieux motorisée et consomme de

moins en moins, l'optimisation technologique est donc réussie et permet la mise en place d'un cercle vertueux.

Il existe deux modèles Honda à essence, dont l'Insight, un peu particulier puisqu'il s'agit d'un deux places de 800 kg, avec une caisse en aluminium. Ce véhicule obtient des résultats en dessous de 90 g de CO<sub>2</sub> par kilomètre. Nous nous trouvons entre 20 et 30 % d'écart sur ce type de cycle, suivant que nous effectuons une comparaison avec une motorisation essence ou diesel.

Le moteur diesel produit en outre des émissions d'oxyde d'azote et de particules, ce qui n'est pas le cas du moteur à essence. Si nous regardons ce qui est réalisé en Europe, Renault, Peugeot et Volkswagen ont des projets d'hybrides reposant sur des moteurs diesel, avec une motorisation de 80 KW. Alors des niveaux de pollution inférieurs à la barre des 90 g de CO<sub>2</sub> sont atteints, soit mieux qu'une Prius, puisque l'on ajoute aux gains de l'hybridation, ceux réalisés par le passage d'un moteur essence au moteur diesel. Le problème est le prix. Des prototypes existent mais ils sont chers.

Considérons maintenant l'usage du véhicule, au travers des résultats d'une étude de l'ADEME synthétisés dans un diagramme représentant quatre cycles : le MVEG (ou cycle normalisé européen), le cycle typique urbain, le cycle routier et le cycle autoroutier, tous classés par vitesse moyenne croissante. Nous constatons que plus le cycle est dense – avec des perturbations dans la circulation, comme en milieu urbain – plus le potentiel de gains liés à l'hybride est important : 30 à 40 % pour le cycle typique urbain, 20 à 25 % pour le cycle normalisé, puis 15 %, et enfin, sur autoroute, les gains réalisables sont plus liés à l'aérodynamisme et au moteur thermique lui-même, voire aux roulements des pneumatiques. Donc, l'extrapolation des performances des hybrides doit tenir compte des usages des véhicules. Si l'utilisation du véhicule à moteur hybride comprend une forte proportion d'usage urbain, son potentiel n'est alors pas pleinement exploité.

Ensuite, il existe un certain nombre d'hybrides assez peu répandus, utilisant des fonctions supplémentaires. Aujourd'hui la Prius permet des économies de carburant et est équipée d'une boîte de vitesses automatique, rien d'autre n'indique qu'il s'agit d'un véhicule hybride.

En revanche, les hybrides fonctionnels exploitent d'autres fonctions au bénéfice du conducteur ou de la collectivité :

- le mode tout électrique avec autonomie : le conducteur contrôle le mode électrique (ce qui n'est pas possible dans le cas de la Prius), et peut le programmer sur une distance donnée, par exemple par le biais d'un GPS placé sur le bord de la route ;

- la possibilité de recharger sa batterie sur le réseau : les véhicules hybrides vendus à l'heure actuelle sont équipés d'une batterie qui se recharge elle-même, par le moteur thermique utilisé en mode flottant. Il est alors possible d'imaginer un hybride se déchargeant progressivement, un peu comme un véhicule électrique qu'il serait possible de recharger fréquemment sur le réseau ;

- de manière plus anecdotique, la motorisation répartie ou comment obtenir un véhicule 4x4 en l'équipant de différentes machines ;

- l'alimentation électrique de bord par une prise électrique de 220 V, permettant d'alimenter des auxiliaires.

L'autonomie électrique suppose l'utilisation d'une batterie assez grosse, afin de pouvoir la recharger sur le réseau et des machines électriques de 30 à 50 KW pour des batteries atteignant des niveaux d'énergie allant de 5 à 10 KW/h pour 20 à 40 km, sans émissions locales de polluants atmosphériques. Un véhicule hybride en série est fabriqué par Gruau en France, dans lequel la batterie se recharge pendant la journée. Il existe également un projet de SVE (Dassault et Heuliez) et un projet allemand et américain de véhicule urbain de livraison, avec une batterie qu'il est possible de recharger sur le réseau.

En ce qui concerne les 4x4, les gains en émissions par l'hybridation sont très importants, en raison des faibles performances de départ de ces véhicules en la matière, mais je ne pense pas que l'hybridation de ces véhicules soit une piste tellement intéressante.

En ce qui concerne les prix, j'observerai le rapport entre le surcoût de fabrication du véhicule et les gains en émissions de CO<sub>2</sub> espérés, en fondant mon analyse sur un article allemand publié par FEV. Les gains en émission sont très rapides au départ (on atteint vite moins 15 à 20 %), puis les nouvelles fonctions ajoutées renchérissent le prix des véhicules pour des gains mineurs en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>. Ainsi une hybridation reposant sur une batterie de 2 KW/h, une machine électrique d'une puissance de 50 KW et un calculateur entraînent un surcoût de 2 500 à 3 000 euros, qu'il faudra être en mesure de vendre au consommateur.

Pour conclure sur le dispositif des véhicules hybrides : ils permettent d'atteindre de faibles niveaux de consommation ; de faibles émissions de CO<sub>2</sub> en sont également attendues, ainsi que de faibles émissions de polluants (selon les critères d'émissions euro 4). Par ailleurs, ils conservent de bonnes performances en matière de dynamique et d'autonomie. Les problèmes sont que ces technologies sont complexes, que le gain dépend de l'usage du véhicule, et surtout, que le prix des véhicules (à cause de la batterie et de l'électronique de puissance essentiellement) n'est pas encore un élément maîtrisé. Enfin, il ne faut pas oublier la concurrence des véhicules classiques

qui font eux aussi des progrès, tout comme les carburants. Ainsi le véhicule hybride se doit de progresser sans cesse pour garder une longueur d'avance.

- **M. Claude GATIGNOL**

Merci, Monsieur BADIN, pour votre excellent exposé sur la place que peut prendre le véhicule hybride dans le panorama des véhicules mis à disposition des consommateurs.

Monsieur CAZZOLA, nous allons maintenant vous écouter sur le thème des biocarburants, de la transition d'une agriculture tournée vers l'alimentation à une agriculture tournée vers les industries. Vous êtes analyste à l'Agence Internationale de l'énergie (AIE).

**5. M. PierPaolo CAZZOLA, Analyste, Division des politiques de technologie de l'énergie, AIE**

Je vous présenterai la vision de l'AIE concernant les biocarburants, à partir d'estimations mises à jour d'après le document intitulé Biofuels for transport et publié en 2004.

Tout d'abord, je vous présenterai l'AIE, créée en 1974 dans le cadre de l'OCDE. En 1993, la France y adhère. Depuis le début, les missions historiques de l'AIE regroupent les tentatives de faire partager par les Etats-membres de meilleures pratiques de politique énergétique, c'est-à-dire, intégrant des impératifs de sécurité d'approvisionnement, d'efficacité énergétique et de protection de l'environnement. L'un des dossiers majeurs actuellement est celui de la question des stocks stratégiques, mis en relief par l'ouragan Katrina il y a peu, ainsi que les actions en faveur de la promotion de la diversification énergétique. Nous menons d'autres activités, telles que l'analyse du marché pétrolier, avec la publication mensuelle du Oil market report, l'élaboration de plusieurs statistiques et indicateurs, l'analyse des perspectives avec la publication du World energy act outlook, cité par Monsieur OLIVA. Par ailleurs, une division de l'agence se charge de la veille technologique et permet une coordination entre les recherches nationales. Le Secrétariat effectue des expertises spécifiques, comme celle sur les biocombustibles. Nous menons aussi des études sur les effets des politiques énergétiques, par exemple sur l'éclairage. Enfin, nous éditons des revues périodiques sur les différentes politiques nationales en coopération continue avec les pays membres.

Je vais maintenant vous présenter la situation des biocarburants dans le monde, en termes de coûts, bénéfices et filières de fabrication des biocarburants. J'aborderai également le potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre selon les différentes filières, la compétitivité selon les véhicules et quelques estimations des coûts de production. Je poursuivrai par des estimations des coûts des réductions d'émissions de gaz à effet de serre, et examinerai la demande de terres en fonction de la technologie de production utilisée, et les potentiels disponibles (la disponibilité à long terme est très débattue). Je citerai aussi des politiques courantes, tout en vous donnant la vision de l'agence pour le moyen terme.

Les biocarburants contribuent à hauteur de 1 % environ à la consommation mondiale. Il existe principalement deux types de biocarburants : l'éthanol (produit au Brésil, aux Etats-Unis et un peu en Europe) et le biodiesel (produit en Europe).

Les biocarburants deviennent intéressants en raison de la hausse des prix du pétrole et des changements climatiques. Il faut d'ailleurs souligner que les coûts sont plus facilement quantifiables que les bénéfices, qu'ils soient liés à la sécurité énergétique, à la réduction des niveaux de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques, à la contribution au développement rural, ou aux effets sur la balance commerciale. Ceci étant, certains coûts sont également difficiles à évaluer, notamment les coûts liés à l'augmentation des NOx, aux effets sur les prix des produits concurrents et aux impacts environnementaux.

La transformation des huiles végétales en gazole et la transformation des cultures de betteraves, de cannes à sucre et de céréales en éthanol pouvant être mélangés avec de l'essence constituent les procédés des filières traditionnelles. Les nouvelles filières utilisent deux grandes méthodes : la thermochimique, plus développée en Europe, illustrée par exemple, par les systèmes de Total présentés ce matin, et enfin, le système biochimique en première position au Canada et aux Etats-Unis.

L'utilisation d'engrais et la production de gaz à effet de serre liés à l'azote soulèvent des incertitudes. Les estimations les plus positives concernent à ce sujet l'éthanol produit à base de canne à sucre. L'éthanol conçu à partir du maïs obtient des résultats moins satisfaisants, en revanche, l'éthanol constitué à partir de cellulose s'avère très intéressant.

Si l'on compare les coûts de production des biocarburants avec les prix de l'essence et du diesel, vous voyez que l'éthanol à base de canne à sucre devient compétitif quand le pétrole s'échange entre 30 et 60 dollars le baril, celui à base de maïs lorsque le pétrole coûte 60 dollars. Concernant les autres technologies et les nouvelles filières, une réduction sensible des coûts est attendue avec la fin de la phase démonstrative. Le taux de change actuel est de 1,2 dollar pour un euro et l'énergie est évaluée en dollars, donc l'Europe est

défavorisée. Par ailleurs, il ne faut pas oublier tous les problèmes liés aux subventions agricoles.

Le principal message concernant la compétitivité des différents véhicules est que l'éthanol et le biodiesel peuvent être mélangés dès lors que l'éthanol est en teneur de 5 à 10 %. Il n'y a pas les mêmes restrictions pour le biodiesel.

Les biocombustibles ont des effets positifs en matière d'émissions de polluants, sauf en ce qui concerne les NOx. En ce qui concerne l'évaluation des coûts de la réduction des émissions de gaz à effets de serre, l'éthanol à base de canne à sucre semble le meilleur choix, car il a un grand potentiel de réduction des niveaux de CO<sub>2</sub> et un coût bas. Dans le long terme, celui produit à partir de cellulose, que ce soit par la méthode biochimique ou thermochimique, serait aussi intéressant.

Un autre aspect qu'il faut aborder lorsque l'on se penche sur la production de biocombustibles est le problème de la demande de terres. Le besoin est de deux à trois fois supérieur pour produire du biodiesel que pour produire de l'éthanol. En ce qui concerne les nouvelles filières, il existe plusieurs estimations, mais quelles qu'elles soient, leur potentiel est intéressant car il est possible d'utiliser des déchets de la biomasse et les OGM aussi peuvent avoir un rôle, concernant notamment la culture de peupliers et de switchgrass, ou autres matériaux (les études ont surtout été menées aux Etats-Unis et au Canada) avec une forte croissance potentielle. Des études prenant en compte l'horizon 2050-2100 laissent place à de grandes incertitudes et une grande variabilité entre les différentes estimations. Beaucoup de facteurs rentrent en compte : le taux de croissance de la productivité agricole, la croissance de la population, etc. Une étude optimiste de Jonhson estime que la quantité d'éthanol qui peut être produite de façon économiquement viable, à partir de la canne à sucre, est de 6 hexajoules pour 2 kg. Cela satisferait les objectifs des différents programmes gouvernementaux mis en place. La loi américaine impose d'ores et déjà une production de 8 milliards de gallons d'éthanol pour 2012 et 1 milliard additionnel pour 2016 d'éthanol produit à partir de dérivés de la cellulose. L'objectif du Japon, devra quant à lui être atteint avec des biocarburants importés en raison de la pénurie de terres que connaît le Japon.

Nous pouvons déjà constater une émergence des biocarburants. Pour atteindre les objectifs fixés, il faudrait une croissance au moins égale à celle des dernières années et des investissements importants. L'objectif de faire progresser les biocarburants semble possible. Les coûts sont inférieurs en dehors de l'OCDE, notamment en Afrique, en Amérique latine et en Asie, où des pays ont un fort potentiel. Le meilleur biocarburant semble être l'éthanol à base de canne à sucre du Brésil. Enfin, il faut souligner la forte nécessité de développement d'un marché international des biocombustibles, afin de faire coïncider les intérêts des importateurs et des exportateurs. A moyen terme, le

développement des nouvelles technologies est également intéressant, notamment l'éthanol à partir de cellulose et la biomasse.

- **M. Claude GATIGNOL**

Merci, Monsieur CAZZOLA, de nous avoir brossé ce paysage mondial de la production de biocarburants et indiqué la place qu'ils pourraient occuper, soit jusqu'à 10 % de remplacement des carburants fossiles.

Monsieur Thomas GUERET, vous êtes aussi de l'AIE et vous allez aborder le thème de l'usage des hydrocarbures avec une question : incitation ou obligation ?

**6. M. Thomas GUERET, Analyste, Division environnement et efficacité énergétique, AIE**

Merci Monsieur le Président, ma présentation s'organisera autour de la problématique de la demande de pétrole dans les transports, en s'inspirant du document Saving oil in a hurry dont je vous dirai deux mots, et qui ne couvre que partiellement ma problématique.

Il faut réduire la consommation des véhicules routiers par des actions de court, ou plus long terme, dans un contexte économique plus stable, avec une gestion plus claire de la demande de pétrole. La gestion à plus long terme est potentiellement très profitable (10 à 20 % en 10 ans, 30 à 40 % d'ici 2030 selon nos calculs), et repose sur trois axes :

- la réduction des distances parcourues ;
- les changements de modes, soit ce que nous appelons la maîtrise de la demande en mobilité, Alain MORCHEOINE l'a évoquée tout à l'heure ;
- l'amélioration de l'efficacité des véhicules dont nous avons beaucoup parlé aujourd'hui, ce ne sera pas l'objet principal de ma présentation même si ces questions sont suivies de près par l'AIE, mais je détaillerai un point spécifique : l'amélioration des composants.

Commençons par la gestion dans l'urgence, le livre Saving oil in a hurry a été fortement couvert par les medias au début de l'année, mais son titre mal traduit (ce livre n'existe toujours pas en français), par exemple dans Le Monde : « il est urgent d'économiser le pétrole ». Cette économie est urgente, certes, mais « économiser le pétrole dans l'urgence » eût été préférable, car ce

livre fait en réalité le tour d'horizon des techniques disponibles pour agir dans ce sens.

Certaines mesures d'économie de pétrole se retrouvent dans la gestion à court et à long terme. Dans quels cas pouvons-nous être amenés à agir dans l'urgence ? Il peut, par exemple, se produire une rupture de l'approvisionnement en raison de facteurs géostratégiques, ou bien, les coûts peuvent menacer l'économie du pays, comme c'est le cas pour certains pays d'Asie du Sud-Est, presque au bord de la faillite. Il faut alors prendre des mesures drastiques, parfois pénibles, mais nécessaires compte tenu des enjeux. Le livre présente pour ce faire une panoplie de mesures ainsi que les coûts liés, mais traite uniquement du transport routier, le secteur qui consomme le plus de pétrole, tirant la demande mondiale à la hausse. Une autre publication traite de l'électricité, je pourrais vous la montrer après la réunion si cela vous intéresse. Etre efficace dans l'urgence, c'est prendre des mesures réduisant la demande sans délais. Ces mesures requièrent une importante préparation en amont, pour une plus grande efficacité. Il faut également des moyens d'information du public. Ce sont des mesures plus prégnantes que celles évoquées jusqu'à présent, par exemple, des restrictions de circulation dans le cadre d'une action dans l'urgence. Les mesures sont ici classées selon leurs coûts de mise en œuvre et selon le pétrole qu'elles permettent d'économiser. Commençons par des mesures dont la mise en œuvre coûte moins de 1 dollar par baril : par exemple, le covoiturage, (il en existe différents niveaux de mise en oeuvre, de la mise en place d'incitations à des pistes réservées exclusivement au covoiturage sur les autoroutes), le développement du télétravail, ou d'autres modifications concernant l'organisation de la vie sociale. Suivent des mesures à la mise en œuvre plus coûteuse : les limitations de vitesse (15 dollars par baril), les mesures liées aux transports en commun (réserver des pistes pour la circulation des autobus), la gratuité des transports publics, qui est une mesure très coûteuse, comme l'augmentation de la fréquence du service, ou par exemple payer un ordinateur à des personnes afin qu'elles exercent une activité en télétravail.

Pour conclure, sur cette question de l'urgence, il existe des mesures permettant d'obtenir des résultats quasi immédiats, d'autant plus qu'elles seront préparées en amont afin de pouvoir alerter les différents secteurs publics concernés. Si plusieurs pays de l'AIE prennent des mesures importantes en même temps, il est possible d'obtenir une baisse de 1 million de barils par jour ou plus. A titre de comparaison, les mesures prises par l'AIE dans le cadre de la gestion de crise de l'ouragan Katrina ont occasionné des économies de l'ordre de 2 millions de barils par jour, provoquant une détente sur le marché mondial saluée par les différents acteurs.

L'angle d'attaque de l'action en urgence permet de considérer les différentes mesures existantes, y compris les mesures impopulaires ou n'étant pas économiques stricto sensu. Abordons maintenant la gestion à plus long terme. Une possibilité est de réduire les distances parcourues. Sur mon

graphique, figurent à droite les villes des pays développés et à gauche celles des pays en voie de développement. En mauve vous voyez la distance moyenne parcourue pour chaque déplacement et en bleu le nombre de trajets quotidiens par personne. C'est sur ces facteurs qu'il faudra jouer pour réduire les distances parcourues. Ce n'est plus une gestion de crise mais une question d'organisation de la vie sociale quotidienne. Dès lors, comment opérer cette réduction de déplacements sans tomber dans la répression, en organisant différemment l'action publique ? L'urbanisme et les formes urbaines ont un rôle à jouer pour réduire ces distances car elles ont un impact majeur sur la demande. Les effets s'en font sentir sur plusieurs décennies, d'où la complexité de ce type de mesures. Plusieurs facteurs rentrent en effet en ligne de compte, par exemple : l'on peut chercher à éviter l'étalement urbain anarchique et favoriser plutôt l'étalement au long de voies de transports en commun, favoriser la densité urbaine, etc. Il faut aussi jouer sur les questions d'organisation relatives au télétravail, à la logistique, les plans de déplacements d'entreprises, les décisions des collectivités locales afin de réduire et rationaliser les distances parcourues. Par ailleurs, l'importance des comportements, des facteurs économiques (la différence entre les Etats-Unis et l'Europe en termes de mobilité est aussi liée aux différents niveaux de taxation du carburant et pas seulement à la densité des villes, je ne fais d'ailleurs pas de jugement de valeur à ce sujet) ne doit pas être négligée.

Il sera possible aussi d'agir sur les changements de mode, entre le non motorisé, les transports publics et les déplacements en véhicules particuliers. Il existe une grande variété de situations. Il faut alors favoriser les transports publics. Les systèmes de bus rapides rencontrent, par exemple, un franc succès à l'AIE. Ces systèmes sont expérimentés par de grandes villes d'Amérique du Sud, le débit de passager sur quatre voies réservées aux autobus équivaut à trois fois celui des six voies affectées aux voitures qui l'entourent. L'efficacité du trafic est importante. Les retombées de ce type d'infrastructures bénéficient aussi aux automobilistes. Le potentiel de cette mesure est important, mais les coûts paraissent élevés en première analyse. Pourtant s'ils sont rapportés à la logique de fonctionnement urbain ou comparés à d'autres services rendus par ailleurs (sociaux, environnementaux,...), cette mesure vaut alors la peine d'être appliquée.

A propos des modes non motorisés, en fonction de l'urbanisme et des équipements, il est possible de favoriser l'usage de la bicyclette et la marche à pied, par le partage de la voirie par exemple, et l'on fera absorber par des modes utilisant moins les surfaces publiques, ce qui est pris à la voiture. Le tableau présenté détaille les mesures douces et dures, à court et à long terme, (l'échelle est arbitraire) et permet de comprendre que certaines mesures peuvent être mises en œuvre rapidement, une fois un cadre légal établi ; en témoigne l'exemple de la mise en place d'une circulation alternée selon le numéro de plaque minéralogique en cas de pics de pollution atmosphérique. D'autres sont plus longues à mettre en place : les réalisations en termes de transports publics ou d'infrastructures souterraines ; certaines sont plus

simples, car moins coûteuses ou moins compliquées politiquement, par exemple, le développement du télétravail ou du covoiturage.

Concernant l'efficacité énergétique des nouveaux véhicules, je dirai deux mots même si cela a été largement abordé : je rappelle que l'efficacité énergétique repose sur un ensemble de facteurs, ainsi, il est possible de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du véhicule sans réduire l'émission globale : si l'on prend l'exemple des biocarburants, certains nécessitent du pétrole en quantité – que ce soit pour les engrais utilisés, le transport ou l'utilisation du sol – avec un rendement final négatif ; d'autres biocarburants sont plus efficaces, nous l'avons vu dans la présentation de PierPaolo, c'est également vrai de l'hydrogène, il faudra donc s'assurer des techniques développées.

J'effectue par ailleurs une distinction entre la meilleure efficacité testée (c'est-à-dire prise en compte par des tests de consommation normalisée) et l'amélioration de l'efficacité sur la route, soit l'utilisation réelle. En tests normalisés, des technologies sont déjà disponibles. Selon nos estimations, 25 % seraient possibles d'ici 2020 pour les voitures neuves, avec des coûts maîtrisés. Quant à l'amélioration de l'efficacité sur route il faut faire intervenir une « approche composants ». Il est possible d'améliorer des composants qui ne sont pas pris en compte par les tests normalisés. Nous pouvons évoquer aussi la conduite, qui n'est pas mesurée par ces tests. Des appareils aident le conducteur à optimiser sa conduite. Les potentiels sont très élevés, soit 5 % d'amélioration des consommations globales des véhicules en ce qui concerne les pneus (jusqu'à 10 % dans les pays en voie de développement) idem pour la climatisation, 2 % pour l'éclairage (en passant aux diodes électroluminescentes, au xénon, etc.). Citons également la possibilité d'huiles moins visqueuses, les procédés start and stop, etc., dont le potentiel n'est pas entièrement pris en compte par les tests normalisés. Dans ce domaine, à l'AIE, nous organisons les 15 et 16 novembre, un premier séminaire sur cette approche composants. Nous parlerons essentiellement de pneus et nous balayerons d'autres techniques, un intervenant de l'Ecole des mines effectuera un exposé sur l'air conditionné. C'est un exemple typique de nos actions : faire se rencontrer industriels, chercheurs, experts du monde entier et « régulateurs », c'est-à-dire des délégués des pays membres qui viennent enrichir leurs connaissances sur un sujet, en faisant un tour d'horizon des techniques et politiques disponibles pour favoriser ensuite une émulation.

Quel est le véhicule propre, le véhicule de l'avenir ? Si le véhicule est pris dans un embouteillage, il ne sera pas efficace, c'est pour cela qu'il faut une conception globale de la propreté du véhicule incluant le fonctionnement de l'ensemble des transports urbains.

## **7. Débat avec la salle**

- **M. Claude GATIGNOL**

Merci, Monsieur GUERET, de cet exposé nous rappelant les conclusions de l'AIE dans une situation d'urgence où l'efficacité et l'application sont nécessaires. Nous arrivons à la fin des interventions, y a-t-il des questions pour nos intervenants ?

- **M. Pierre BEUZIT**

Plutôt une remarque : l'efficacité de la Toyota Prius n'est due qu'à moitié à la motorisation hybride, le reste vient d'autres éléments comme son poids, ses pneus, son aérodynamique, etc. Mais ce chemin peut être – et est déjà – suivi sur n'importe quel autre véhicule.

- **M. Claude GATIGNOL**

Vous nous dites que l'hybridation a conduit à apporter d'autres innovations permettant des économies sur le fonctionnement du véhicule ?

- **M. Pierre BEUZIT**

Pas du tout. Je dis que Toyota caricaturait son message en voulant forcer le trait, afin de vendre son véhicule. La voiture est en fait optimisée pour le cycle MVEG, non pas pour une utilisation normale. Des utilisateurs se sont d'ailleurs plaints car en utilisation normale, la voiture consomme sensiblement plus que ce que la communication de Toyota laissait penser.

- **M. Claude GATIGNOL**

Monsieur PINCHON ?

- **M. Philippe PINCHON**

Je voudrais faire un commentaire à propos de la dernière planche présentée par François BADIN opposant le véhicule hybride et les biocarburants, le gaz naturel comprimé, le GPL, etc. A mon sens, ces différents avantages procurés par la motorisation et les carburants sont parfaitement compatibles.

- **M. François BADIN**

Certes, mais du point de vue du coût et du volume – si l'on veut adapter du gaz naturel – il n'est pas possible de tout mettre sur un même véhicule. Les avancées réalisées sur le moteur thermique peuvent bénéficier aux véhicules hybrides, en revanche, adapter le gaz naturel sur un hybride est en projet, mais il faudrait pour ce faire, loger une batterie et un système de stockage sur le véhicule, ce qui ne simplifie pas le problème.

- **M. Philippe PINCHON**

Selon les dernières études, c'est pourtant la solution dans des délais assez courts afin d'obtenir de meilleurs résultats en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>.

- **Un intervenant de la salle**

S'agissant des petites piles à combustible de 3 à 10 KW, leurs potentialités ne s'appliquent pas seulement aux transports. Ces piles seront de toute façon produites, sans que cela soit lié aux transports. En Chine, au Japon et aux Etats-Unis, le procédé CHP, pour Combined heat and power, est destiné à l'alimentation industrielle sans interruptions, par exemple.

- **M. Claude GATIGNOL**

Merci de cette précision sur la pile à combustible.

- **M. Joël PEDESSAC**

Je voudrais rebondir sur ce qu'a dit M. PINCHON. Ils ont en effet participé à un programme que nous avons financé. Sur la Prius, l'association du GPL avec la technologie hybride a permis d'abaisser les niveaux de 104 g d'émissions du kilomètre à 92, grâce à un investissement de 20 000 euros. Nous avons remplacé de l'essence par du GPL, et ce véhicule fait en ce moment même le tour d'Europe pour être présenté aux médias. Il lui faut à peine un plein pour effectuer la distance de Paris à Lyon. Il n'y a en tout état de cause pas de solution unique.

- **M. Jean-Claude GAZEAU**

Les exposés nous ont expliqué les technologies permettant de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Il sera possible de diminuer de 30 à 40 % les rejets d'ici vingt ans, or, le transport automobile représente 30 % environ du total. Cela fait donc une diminution de 10 à 15 % des émissions de gaz à effet de serre, alors que certains gouvernements se sont engagés sur une division par quatre, soit 75 %. Par ailleurs, il en découlera des impacts sur d'autres secteurs, pour produire de l'électricité et de la biomasse, qui ne seront pas neutres en termes d'émissions. Il n'y a pas que l'automobile qui doive faire des efforts. Quelles sont les pistes en dehors du secteur automobile ?

- **M. Claude GATIGNOL**

Il faut quelquefois se méfier des effets d'annonce.

- **M. Thomas GUERET**

Le World energy outlook anticipe dans son scénario de référence, une augmentation de 150 % du volume des déplacements par voiture particulière, d'ici 2030. Il y a une telle marge de progression pour atteindre ce chiffre, tellement d'infrastructures et d'investissements à réaliser, que si nous nous posons dès maintenant toutes les questions pour organiser les activités, la vie urbaine, les modes de déplacement non motorisé et les transports en commun, il existe des possibilités de gains très importantes, pas suffisantes pour diminuer le chiffre par quatre, mais cela reste un potentiel important. Par ailleurs, les améliorations technologiques apporteront des réponses.

- **M. Pierre BEUZIT**

Pour vous répondre, le facteur quatre que vous mentionnez est pour 2050. En 2050, la voiture fonctionnera avec une pile à combustible dont l'hydrogène sera produit par thermochimie - l'énergie thermique venant du solaire et du nucléaire - le tout pour une émission zéro de CO<sub>2</sub>.

- **M. Claude GATIGNOL**

Monsieur GAZEAU ?

- **M. Jean-Claude GAZEAU**

L'objectif de division par quatre inclut les véhicules particuliers plus le transport de marchandises et le transport aérien.

- **M. Claude GATIGNOL**

Il est vrai que nous n'avons pas évoqué ces modes de transport, en particulier l'aérien. Or, certaines équivalences entre la production de kilomètres en voiture par passager, et de kilomètres aériens, ne seront pas rappelées ici, tant la comparaison serait désagréable !

- **Un auditeur**

Je voudrais effectuer une clarification quant à la capacité de substitution des biocarburants. La présentation de l'AIE, évoquait une valeur, que vous avez relevée également, de 10 %, elle a été évaluée en considérant uniquement les biocarburants actuels, dits de première génération. Pour aller au-delà de ces 10 %, il faut passer à d'autres procédés technologiques et à l'utilisation d'une ressource biomasse différente. 10 % n'est pas un potentiel maximal.

- **M. Claude GATIGNOL**

Nous avons bien noté qu'il s'agissait de ce que nous avons coutume d'appeler des biocarburants, soit les alcools, et les huiles végétales. Vous avez raison de souligner que ce que l'on appelle le BTL représente pour l'avenir une grande possibilité d'alternatives aux produits fossiles.

- **M. PierPaolo CAZZOLA**

Il s'agit de 10 % dans le cadre des objectifs actuels pour 2010, en ce qui concerne l'éthanol à base de cellulose. Nous pouvons arriver à d'autres objectifs.

- **Conclusion de M. Claude GATIGNOL**

Je voudrais en quelques mots dire que cette journée studieuse et suivie représente un des moyens pour le Parlement de recueillir auprès de personnes compétentes – professionnels, chercheurs, chargés de missions – tous les éléments sur un sujet particulier, aujourd'hui la voiture de demain, sujet économique et technique, qui cadre bien avec les missions de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques. Sur d'autres sujets, comme l'énergie, j'ai lu certaines déclarations jugeant inexistante l'information des parlementaires. Les parlementaires sont capables de s'informer de diverses façons, comme aujourd'hui. Au nom de Christian CABAL et moi-même, je vous remercie, vous qui avez partagé vos connaissances avec clarté et enthousiasme, sans refuser le débat. 150 % d'usage de la voiture en plus sont attendus, c'est qu'elle représente une réponse extraordinaire à la question de la mobilité individuelle. Un rapport récent du CNRS nous avait confortés dans l'idée que quelles que soient les propositions de changement effectuées, l'usage actuel ne varierait qu'à la marge.

La voiture a une place importante dans la totalité des émissions de gaz à effet de serre. La régulation de l'espace urbain pose un certain problème, en raison de la vitesse de circulation propice aux ralentissements. Il faut donc favoriser la fluidité en milieu urbain pour réduire la pollution. Une approche diversifiée sur le plan technologique est nécessaire dans le but d'obtenir des évolutions. Les changements souhaités par le consommateur ne sont pas toujours compatibles avec les écobilans. Il faut donc trouver un équilibre. La Commission européenne nous a rappelé que les normes européennes s'étaient imposées aux constructeurs, même si nous n'en sommes qu'à l'étape euro 4. Il y en a sûrement d'autres à franchir, mais avec sagesse, le représentant de la Commission européenne nous a déclaré qu'il ne faut pas aller à l'opposé de ce que peut nous fournir la technologie.

Les émissions dangereuses pour la santé ou le climat appellent une recherche d'efficacité énergétique. C'est une préoccupation présente à l'esprit de tous, il faut baisser la consommation globale. Par ailleurs, l'usage de dispositifs antipollution avant, pendant et après la combustion reste intéressant, tout comme l'usage de carburants plus élaborés – essence ou gazole -. Nous avons bien vu que parfois, il y a un hiatus entre ce que prévoient ces dispositifs et la consommation réelle.

Il faut tenir compte de la grande inertie entravant le renouvellement du parc automobile. Deux millions de voitures neuves par an sont vendues en France, cela n'est pas assez rapide. J'ai apprécié le terme de M./ DOUAUD d'« éco CO<sub>2</sub> compatibilité » en raison de l'usage du mot CO<sub>2</sub> dans l'expression. Les chiffres des émissions sont éloquentes, il faut les avoir à l'esprit. Les incitations à l'usage de dispositifs propres sont naturelles pour l'utilisateur français. Quant au choix de la motorisation, en France et en Europe, le diesel a une longueur d'avance. D'autres évolutions et possibilités d'évolution existent, dans tous les domaines. Il faut donc rester curieux des développements futurs. Les voitures hybrides peuvent être abordées de différentes façons et les voitures électriques sont toujours plus développées : j'ai eu la chance de conduire un véhicule de 800 CV, huit moteurs, huit roues, qui atteint les 320 km/h, et accomplit l'accélération de 0 à 100 km/h en 4,2 secondes. C'est intéressant, s'agissant d'un véhicule électrique, mais ce n'est qu'un prototype et non pas un modèle commercial !

M. BEUZIT a décrit dans sa synthèse le rêve de tout conducteur d'avoir un jour une voiture à émission zéro. L'hydrogène permettrait de relever ce défi, mais en attendant, il faudra aller vers le respect de certaines normes. Aujourd'hui, 140 g par kilomètre parcouru paraît une bonne norme.

Il existe une forte attente pour des apports multiples venant de la recherche en termes de matériaux, de systèmes divers, d'électronique, de progrès mécaniques et chimiques. J'ajouterai que « la chasse au gaspi » doit nous préoccuper constamment. J'espère que les pouvoirs publics apporteront par leurs décisions raisonnables, un accompagnement juste à la place de la voiture dans la société de demain, et je vous remercie encore pour votre participation.

*La séance est levée à 19h00.*