

Centre d'analyse stratégique

www.strategie.gouv.fr

Conseil général des mines

28 septembre 2008

Mission « Véhicule 2030 »

Jean SYROTA

Perspectives concernant

Le VÉHICULE « grand public »

d'ici 2030

Jean SYROTA

Coordinateur : **Philippe HIRTZMAN** (Conseil général des mines)

Rapporteurs :

Romain BEAUME (Ecole polytechnique)

Jean-Loup LOYER (Centre d'analyse stratégique)

Hervé POULIQUEN (Centre d'analyse stratégique)

Denise RAVET (Centre d'analyse stratégique)

Philippe ROSSINOT (Centre d'analyse stratégique)

lepoint.fr

lepoint.fr

SOMMAIRE

► LES GRANDES ORIENTATIONS DU RAPPORT	7
■ Le contexte inédit et durable qui caractérise l’avenir devrait engendrer une rupture dans les habitudes actuelles	7
■ Au niveau mondial, pour être supportable, l’inéluctable croissance du parc automobile devra être compensée par la réduction de la consommation unitaire des véhicules, des émissions polluantes et des rejets de gaz à effet de serre	7
■ Le carburant liquide est une source d’énergie bien adaptée à la propulsion des véhicules	9
■ Les informations économiques disponibles ne permettent pas à elles seules d’anticiper avec suffisamment de précision les évolutions à venir.....	10
■ Les véhicules thermiques actuels peuvent réduire de moitié leur consommation moyennant une optimisation de leurs performances et la réalisation, grâce à des techniques disponibles, de progrès en matière de rendement, de propreté et de flexibilité, ce qui est de nature à leur assurer encore un grand avenir.....	10
■ Le véhicule hybride rechargeable, qui cumule les avantages du thermique et de l’électricité sans en avoir les inconvénients les plus importants, a toutes les chances d’être le véhicule d’avenir.....	11
■ Pour diviser par 2 la consommation énergétique des véhicules « grand public » dans les dix ans à venir, une incitation forte des pouvoirs publics est nécessaire	12
 Présentation et cadrage de la mission	13
 ► LE CONTEXTE	15
1. Éléments historiques et situation actuelle	15
1.1. Depuis un siècle, la « saga » de l’automobile a consacré la suprématie du moteur à explosion	15
1.2. L’expérience du passé rend peu crédible l’apparition de ruptures technologiques soudaines.....	20
2. Les principaux éléments de contexte à l’horizon 2030	22
2.1. Les crises passées du pétrole n’ont pas significativement modifié le comportement des utilisateurs en matière de mobilité.....	22
2.2. La perspective de prix des hydrocarbures élevés va sans doute impacter durablement le comportement des usagers	23
2.3. Le réchauffement climatique domine désormais les politiques énergétiques sur le long terme.....	24
2.4. Le secteur des transports – en particulier l’automobile individuelle – constitue l’un des secteurs clefs conditionnant les évolutions énergétiques	24

3. Les stratégies à l'étranger sont diverses.....	28
3.1. Les grandes tendances de l'automobile sont orientées vers l'économie, la sécurité et l'intelligence embarquée	28
3.2. Différents gouvernements ont créé des consortiums nationaux pour préparer le véhicule du futur	30
3.3. Des stratégies ambitieuses ont été affichées dans quelques pays.....	32
3.4. Les principaux programmes publics étrangers de R&D ont en commun l'électricité et l'hybridation.....	37
4. Le stockage de l'énergie	45
4.1. Le stockage de l'énergie dans un véhicule doit respecter des conditions très contraignantes	45
4.2. Le carburant liquide aux conditions habituelles est de loin le plus apte au stockage dans un véhicule	46
5. Les contraintes environnementales sont de plus en plus rigoureuses dans l'Union européenne.....	50
5.1. Les normes « Euro » limitent les rejets polluants des véhicules particuliers ..	50
5.2. Les émissions de CO ₂ des véhicules particuliers sont traitées dans le cadre global de la lutte contre le changement climatique.....	52
5.3. Les propositions européennes de contrôle des émissions de CO ₂ des voitures particulières sont controversées.....	53
5.4. L'initiative française du bonus/malus s'est révélée efficace à court terme et serait une incitation permanente puissante si le malus devenait annuel	55
► LE VEHICULE DU FUTUR.....	57
6. Le moteur thermique à essence ou diesel, en constante évolution, a encore un bel avenir devant lui.....	57
6.1. Les progrès à attendre des motorisations conventionnelles, en matière de maîtrise de la combustion, sont très nombreux, avec une certaine convergence essence-diesel	57
6.1.1. Le « downsizing » est à même de réduire la consommation en conservant la même performance	58
6.1.2. Les technologies de combustion, améliorées par l'introduction de l'électronique, pourraient connaître des progrès importants.....	59
6.1.3. Les améliorations du groupe motopropulseur passent aussi par un meilleur pilotage des cycles de combustion, grâce notamment à l'électronique	61
6.2. Pour les véhicules thermiques, la gestion de l'électricité au sein du véhicule est une source de réduction de consommation significative.....	63
6.3. Les moteurs thermiques pourraient voir leur consommation réduite de 30 à 40 % par rapport à la situation actuelle	63

7. Le véhicule électrique, qui a l'avantage de ne pas émettre directement de gaz polluants, souffre de trop de handicaps pour pouvoir prétendre se substituer massivement au véhicule thermique	64
7.1. La voiture électrique est pénalisée par les performances insuffisantes des batteries.....	65
7.2. Une volonté politique forte est nécessaire pour que le véhicule électrique se développe	69
7.3. Les caractéristiques techniques des batteries disponibles actuellement appellent encore des développements importants.....	70
7.3.1. Les technologies dominantes actuelles devraient bientôt laisser la place aux technologies à base de lithium	70
7.3.2. Les enjeux du stockage de l'électricité dans les batteries résident essentiellement dans l'autonomie, le temps de recharge, la fiabilité et le coût	73
7.3.3. La batterie lithium-ion représente l'option d'avenir la plus probable pour le véhicule particulier.....	76
7.4. Le véhicule électrique pur nécessite la création préalable d'une infrastructure pour la recharge des batteries.....	78
8. L'hybridation thermique/électrique représente un compromis séduisant ; l'hybride rechargeable sur le réseau constitue sans doute la solution d'avenir.....	79
8.1. L'hybridation recouvre une grande variété de techniques	79
8.2. L'hybridation présente des avantages environnementaux et industriels	85
8.3. L'hybride rechargeable cumule les avantages du thermique et de l'électricité sans en supporter les inconvénients les plus pénalisants.....	86
9. Les véhicules à gaz (essentiellement GNV et hydrogène) ne paraissent pas offrir des perspectives pertinentes en France.....	87
9.1. L'air comprimé n'est vraisemblablement pas viable pour la propulsion de véhicules grand public	88
9.2. Le gaz naturel ne paraît pas bien adapté au cas de la France	89
9.2.1. Le marché européen du GNV est limité	89
9.2.2. Le bilan environnemental n'apporte pas d'avantage décisif.....	90
9.2.3. Le GNV bénéficie d'incitations fortes de la part des pouvoirs publics, sans grand effet jusqu'à présent.....	93
9.3. L'hydrogène, un carburant automobile utopique.....	93
9.3.1. Le véhicule à hydrogène n'a d'intérêt qu'avec une pile à combustible.....	94
9.3.2. La production et la distribution de l'hydrogène sont maîtrisées industriellement, mais sont très coûteux	96
9.3.3. Le stockage de l'hydrogène à bord du véhicule constitue un défi technologique majeur	97
9.3.4. Les verrous technologiques, les coûts considérables de l'ensemble de la filière et les problèmes de sécurité constituent des handicaps insurmontables à l'horizon 2030.....	98
10. Les perspectives de progrès communs à tous types de véhicules.....	99
10.1. Les évolutions conduisant au véhicule du futur résulteront autant de perfectionnements techniques que d'une modification des comportements et d'une meilleure organisation du secteur du transport individuel.....	99

10.2. La diminution des performances dynamiques deviendra incontournable	100
10.2.1. Une vitesse de pointe inutilement élevée coûte très cher en consommation	101
10.2.2. Une accélération inutilement élevée coûte très cher en consommation.....	103
10.2.3. Vouloir des performances inutilement élevées coûte particulièrement cher en ville	104
10.3. Des améliorations incrémentales, notamment sur les auxiliaires, peuvent être sources importantes de réduction de la consommation et des émissions.....	107
10.3.1. L'allègement des véhicules et l'utilisation de nouveaux matériaux.....	107
10.3.2. L'aérodynamisme.....	110
10.3.3. Les pneumatiques.....	111
10.3.4. La climatisation	112
10.3.5. Les transmissions et la direction.....	113
10.3.6. L'éclairage.....	114
10.3.7. Les autres équipements auxiliaires (sécurité, électronique, électricité...)	115
10.3.8. Le cas de la Logan ECO2 : illustration d'une stratégie de réduction de la consommation par une série d'optimisations	116
10.3.9. Bilan sur les auxiliaires de consommation	117
10.4. Les conducteurs pourront bénéficier d'outils intelligents d'aide à la conduite, pouvant réduire jusqu'à 20 % en moyenne la consommation.....	118
10.4.1. Les économies de carburant liées au bon comportement du conducteur.....	118
10.4.2. Les dispositifs d'aide à la conduite.....	119
► PRECONISATIONS	121
11. Préconisations	121
11.1. Caractéristiques des véhicules	121
11.2. Information relative à la consommation et aux émissions des véhicules	122
11.3. Achat et détention des véhicules	122
11.4. Utilisation des véhicules.....	122
11.5. Transports urbains	123
11.6. Recherche publique	123
► ANNEXE : liste des personnes auditionnées.....	125

lepoint.fr

► **LES GRANDES ORIENTATIONS DU RAPPORT**

■ **Le contexte inédit et durable qui caractérise l'avenir devrait engendrer une rupture dans les habitudes actuelles**

- **Il faut faire face simultanément à un choc pétrolier et au réchauffement climatique.**

Le monde doit faire face à un double défi : le renchérissement brutal des énergies fossiles et des matières premières intervenu depuis 2006 et le réchauffement climatique considéré comme une réalité à peu près dans le même temps.

- Les effets du *renchérissement brutal des énergies fossiles* sont connus, puisqu'ils ont pu être constatés de 1974, date du premier choc pétrolier, à 1985, date du contre-choc pétrolier : l'augmentation des prix des carburants induit une diminution globale de la consommation, d'une part grâce à de meilleurs rendements énergétiques des véhicules mis sur le marché, d'autre part du fait d'une utilisation plus raisonnable de ces véhicules. Mais sitôt les prix des carburants en baisse, le comportement des automobilistes se relâche et les constructeurs les poussent, à grands frais de publicité et de communication, à acheter des véhicules offrant des performances de vitesse et d'accélération plus importantes, c'est-à-dire des véhicules consommant davantage mais leur assurant des marges financières plus élevées.

- *Le réchauffement climatique* a cette particularité d'être, pour l'essentiel, combattu avec des moyens comparables à ceux qui sont utilisés en cas de choc pétrolier, mais de nécessiter une action bien plus déterminée et bien plus durable, puisqu'elle ne saurait se traduire par des résultats tangibles qu'après plusieurs décennies d'efforts.

- **Le contexte inédit et durable devrait être de nature à faire changer radicalement le comportement des constructeurs automobiles et des automobilistes.**

Pour peu que les politiques publiques soient déterminées à faire face au nouveau contexte, on peut espérer que les progrès s'accroissent dans les rendements énergétiques des véhicules comme dans les comportements des automobilistes, mais surtout qu'une rupture intervienne pour mettre fin à la recherche inconsidérée de vitesse maximale et d'accélération, laquelle alimente encore aujourd'hui les fantasmes et les rêves des automobilistes. Au prix de performances maximales proches des limites actuelles de vitesse en Europe (sauf en Allemagne), et dans le respect des règles de sécurité, *des diminutions considérables de consommation seront au rendez-vous pour les nouveaux modèles*. Mais il faudra une quinzaine d'années pour renouveler le parc automobile.

■ **Au niveau mondial, pour être supportable, l'inéluctable croissance du parc automobile devra être compensée par la réduction de la consommation unitaire des véhicules, des émissions polluantes et des rejets de gaz à effet de serre**

- **Les pays émergents sont de plus en plus les moteurs de la croissance du parc automobile mondial.**

On ne peut plus appréhender les grandes lignes d'évolution de l'automobile sans regarder ce qui se passe au-delà des frontières de la France et de l'Europe. Car, si les parcs de véhicules

auront tendance à stagner dans les pays développés, *les pays sous-équipés – notamment les pays émergents de l'Asie – vont connaître un fort développement* : le parc mondial de véhicules pourrait plus que doubler d'ici 2030, passant d'environ 650 millions aujourd'hui à près de 1,4 milliard d'unités. Les ventes annuelles de véhicules neufs sont aujourd'hui de plus de 35 millions dans les pays de l'OCDE et de 15 millions pour le reste du monde. En 2030, elles pourraient atteindre des niveaux respectivement de l'ordre de 45 M/an et 50 M/an. Cette évolution, caractérisée par l'inversion des parcs OCDE / pays émergents, est dominée d'une part par une inertie significative des parcs (rythme de renouvellement des véhicules, pénétration des innovations et des nouvelles technologies...), d'autre part par la saturation des infrastructures, notamment urbaines.

- **Le marché mondial reste segmenté.**

Certes, il n'y a pas, quoi qu'on en dise, de modèle automobile mondial ; les caractéristiques économiques et sociologiques des pays sont trop différentes. Les marchés sont disparates et les constructeurs restent très attentifs aux dominantes locales, en termes de besoin ou de mode. Ainsi en Inde, des modèles économiques se développent pour prendre le relais de petits véhicules « bas de gamme » issus de scooters. La Chine semble s'orienter vers l'adoption des normes européennes ; des parcs de véhicules « low cost » apparaissent. Dans les pays de l'OCDE, l'avenir est plutôt à des véhicules sûrs et confortables, de plus en plus sophistiqués. Tout au plus peut-on dire que l'on tend vers des modèles « régionaux » (au sens des régions géopolitiques) et suggérer que la voiture « mondiale » polyvalente et pour tous n'est pas encore pour demain. Toutefois, on ne peut nier que, d'une part, les innovations technologiques procèdent d'un brassage quasi planétaire d'initiatives, de partenariats, de sous-traitances, de concurrences voire de surenchères, d'autre part que les grands groupes assembleurs d'automobiles recherchent la dimension mondiale dans leurs stratégies d'entreprise ou d'actionnaire.

- **L'avenir sera dominé par deux enjeux majeurs :**

- *Renforcer la sécurité énergétique*

Le transport en général, routier en particulier, est très dépendant des produits pétroliers. En France, le volume de pétrole destiné au transport routier est 40 Mtep sur un total **importé** de 90 Mtep, ce qui représente près de 50% de la facture pétrolière qui atteint aujourd'hui 40 Mds€/an. Cette situation est économiquement préoccupante (déficit commercial) et fragile (risques géopolitiques sur les approvisionnements pétroliers).

- *Réduire les émissions de CO₂ des véhicules*

L'impact environnemental des transports est très élevé, particulièrement dans les pays développés, et en forte croissance. Les transports représentent 13 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans le monde, avec la plus forte croissance des émissions de CO₂ (progression de 120 % depuis 1970). En Europe, la part de ces dernières était de 22 % en 2005.

En France, parce que la production d'électricité engendre peu d'émissions de CO₂, cette part est encore supérieure (un peu plus du tiers), **ce qui fait du transport routier le secteur émetteur le plus important**. La route conduit à des émissions (2005) de 128,2 MtCO₂ sur un total du secteur transport de 136 MtCO₂, avec un accroissement de + 18 % entre 1990 et 2005. *Les véhicules particuliers émettent un peu plus de la moitié (55 %) des émissions de CO₂ du secteur du transport routier, les véhicules utilitaires légers 18 % et les poids lourds, incluant les autocars et autobus, 27 %.*

Ces deux impératifs conduisent à promouvoir ou dissuader (fiscalité), à inciter (bonus-malus) et à imposer (réglementation) d'une part la **réduction des consommations des véhicules**, d'autre part la **diversification des sources d'énergie**, indépendamment des actions visant spécifiquement, à performances données, la **limitation des émissions atmosphériques**, pour des raisons soit climatiques (CO₂), soit locales (santé publique dans l'hyper-centre des agglomérations urbaines).

■ Le carburant liquide est une source d'énergie bien adaptée à la propulsion des véhicules

La particularité d'un véhicule automobile est d'embarquer une certaine quantité d'énergie permettant d'assurer une autonomie suffisante. Ce stock doit présenter un poids et un encombrement réduits et, lorsqu'il est épuisé, il doit pouvoir être renouvelé facilement dans de bonnes conditions de sécurité et dans un temps très bref.

- **Le carburant liquide à pression atmosphérique et à température ambiante bénéficie d'un avantage considérable.** Il pourra être d'origine pétrolière, mais aussi issu de la biomasse (agro-carburants, transformation de déchets organiques...), du charbon ou du gaz. Il bénéficie également du fait que le parc de stations-service et, de façon plus générale, *les infrastructures nécessaires pour le produire et le distribuer existent*, alors qu'il faudrait investir des centaines de millions d'euros – voire des milliards d'euros en prenant en compte, en amont, la production et le stockage industriels – pour mettre à disposition de l'automobiliste les énergies alternatives. Il permet enfin, dans de bonnes conditions, la fluidité du marché d'occasion des véhicules.

- **Le gaz naturel** pose des problèmes géopolitiques de même nature que ceux posés par le pétrole ; son prix est lié à celui du pétrole. L'avantage que ses promoteurs lui donnent pour compenser une partie de ses handicaps est un meilleur rendement de combustion, ce qui est vrai pour des installations aussi bien fixes que mobiles. Mais *le stockage de gaz à haute pression* dans le véhicule pose des problèmes de sécurité et il faudrait créer des *infrastructures coûteuses* pour alimenter les véhicules. C'est pourquoi le gaz sera utilisé plus avantageusement à poste fixe (pour se substituer à du fioul domestique pour le chauffage des locaux – et libérer ainsi du gazole pour l'automobile –, voire pour produire des combustibles liquides). Il pose davantage de problèmes sur un véhicule que le gaz de pétrole liquéfié (GPL), lequel reste limité à quelques niches. Le gaz naturel peut raisonnablement se développer dans des pays disposant de ressources en gaz importantes et d'outils de raffinage de pétrole insuffisants, ce qui n'est pas le cas de la France.

- **L'air comprimé et l'hydrogène** n'ont vraisemblablement pas d'avenir comme sources d'énergie des automobiles. Par rapport à l'électricité, leur stockage à bord du véhicule ne présente aucun avantage et l'énergie nécessaire pour en disposer serait mieux utilisée directement sous forme d'électricité. *L'hydrogène bénéficie actuellement d'un engouement médiatique qui ne repose sur aucune perspective réaliste d'avenir* : dans le cas d'une utilisation avec pile à combustible – seul mode raisonnablement envisageable – et compte tenu de l'électricité nécessaire pour obtenir l'hydrogène – lequel sera transformé en électricité par la pile à combustible –, le bilan énergétique sur toute la chaîne n'apparaît guère convaincant ; *en outre l'utilisation « grand public » de l'hydrogène soulèverait des problèmes de sécurité insurmontables* ; enfin la fabrication de piles à combustible utilisera toujours des matériaux nobles, rares et donc coûteux, venant inévitablement grever des perspectives économiques sans doute peu favorables.

- **L'électricité** a l'avantage de fournir l'énergie nécessaire à un véhicule *sans engendrer de pollution vis-à-vis de son environnement local ni de bruit à faible vitesse* ; elle présente donc un avantage sérieux en centre ville encombré. Mais l'électricité est produite, pour une part plus ou moins grande, à partir de combustibles fossiles, ce qui entraîne des émissions de gaz à effet de serre et un bilan global pas forcément favorable de ce point de vue. En outre, même si des progrès interviendront, le véhicule tout électrique reste coûteux, ses performances de vitesse sont très médiocres, son autonomie est limitée (elle peut être en outre amputée jusqu'à 50 % par le fonctionnement des auxiliaires comme le chauffage et le conditionnement d'air...), le temps de rechargement ou de substitution des batteries peut être très long, la fiabilité et la longévité de ces dernières sont insuffisantes. Cependant, commence à être prise au sérieux l'idée que, pour faire face à la pollution atmosphérique des centres des grandes villes, seule la propulsion électrique pourrait y être autorisée.

■ Les informations économiques disponibles ne permettent pas à elles seules d'anticiper avec suffisamment de précision les évolutions à venir

Les études et données économiques dont on dispose pour comparer les différentes options envisageables sont illusoire. En effet, si les coûts de l'utilisation des hydrocarbures comme carburant et les émissions correspondantes de gaz à effet de serre sont bien connus, il n'en est pas de même pour les solutions alternatives, et il s'en faut de beaucoup :

- il n'y a de convergence ni sur les coûts et les rendements d'utilisation des sources d'énergie alternatives, ni sur le montant des investissements à réaliser en stations-service ou en bornes d'alimentation ; dans le cas où il s'agit de projets, l'expérience passée dans d'autres domaines montre que les promoteurs ont généralement une vue largement trop optimiste de l'économie de leur projet ;
- les bilans CO₂ des solutions alternatives sont contestés ;
- les coûts à venir, les performances et la fiabilité de différents composants (batteries notamment) sont entachés de beaucoup d'incertitudes ;
- les chiffres qui sont avancés utilisent les prix de l'essence ou du gazole incluant la TIPP et ceux des sources d'énergie alternatives sans taxe équivalente ; or il est prévisible que, si les carburants actuels venaient à être remplacés massivement par d'autres, les pouvoirs publics leur feraient supporter un équivalent de la TIPP, sans que l'on puisse aujourd'hui en prévoir le montant.

■ Les véhicules thermiques actuels peuvent réduire de moitié leur consommation moyennant une optimisation de leurs performances et la réalisation, grâce à des techniques disponibles, de progrès en matière de rendement, de propreté et de flexibilité, ce qui est de nature à leur assurer encore un grand avenir

- En matière de **motorisation** et de **dépollution**, aux techniques performantes largement utilisées (injection directe, turbo-compression,...) viendront s'ajouter celles qui commencent à équiper des modèles sur le marché et celles qui sont d'ores et déjà dans les cartons ou en voie de mise au point, notamment chez les équipementiers :
 - distribution variable, commande électromagnétique des soupapes, variation du taux de compression en ce qui concerne le moteur à essence ;
 - systèmes de combustion à basses émissions d'oxydes d'azote (NO_x), filtres à particules et à oxydes d'azote (système DéNO_x) pour le moteur diesel ;
 - réduction de la cylindrée (« downsizing »), catalyse avancée, micro-hybridation (« stop & start ») pour toutes motorisations.

- La propulsion par moteur thermique alimenté par des carburants liquides dans les conditions usuelles restera donc largement majoritaire d'ici 2030, d'autant plus que leurs substituts ne présentent pas, à performances comparables, d'avantages significatifs en termes de coût, de bilan énergétique et d'émission globale de gaz à effet de serre, ni actuellement, ni à terme, les véhicules actuels disposant d'une marge de progrès considérable, *une réduction de consommation de moitié étant largement envisageable*. En particulier, des véhicules thermiques de petite taille, ayant une puissance faible (c'est-à-dire des performances routières comparables à celles des véhicules électriques) et donc de consommation très réduite, peuvent prendre une part de marché.

■ Le véhicule hybride rechargeable, qui cumule les avantages du thermique et de l'électricité sans en avoir les inconvénients les plus importants, a toutes les chances d'être le véhicule d'avenir

- L'électricité constitue la seule source d'énergie qui permet d'éviter les émissions polluantes *locales*, mais les difficultés inhérentes à son stockage limiteront vraisemblablement encore longtemps le véhicule entièrement électrique à des flottes captives ou à un usage urbain.

- L'électricité sera progressivement introduite dans la motorisation, de plus en plus hybridée (« stop & start », récupération d'énergie de freinage, contribution à la motricité), avec comme avantage de ne requérir aucune infrastructure nouvelle. Cette évolution en cours s'inscrit dans la perspective de l'hybridation rechargeable (« plug-in »), laquelle requiert encore beaucoup de recherches avant sa généralisation. Le **véhicule hybride rechargeable sur le réseau électrique**, qui peut s'assimiler à un véhicule électrique à complément thermique, combine les avantages des véhicules électriques en ville (faibles nuisances locales) et des véhicules thermiques à combustible liquide sur route (autonomie ; performances sur route). Il doit intégrer les progrès à réaliser, autant sur les véhicules thermiques que sur le stockage d'énergie et la motorisation électriques, pour améliorer les performances et diminuer les coûts, ce qui en fait un incontestable produit d'avenir. Il ne nécessite pas, à l'inverse du véhicule tout électrique, une infrastructure d'alimentation électrique dense et maillée sur l'ensemble du territoire pour prendre progressivement une part de marché : d'ores et déjà, de nombreux emplacements de parking privés disposent ou peuvent facilement disposer d'un raccordement électrique ; là où il fait défaut, l'autonomie sera assurée par le carburant liquide. Le véhicule hybride rechargeable présente un intérêt tout particulier si le carburant utilisé par le moteur thermique est à bas CO₂ (biocarburant de deuxième génération notamment).

En attendant l'avènement sur le marché du véhicule hybride rechargeable, le **véhicule hybride**, qui peut s'assimiler à un véhicule thermique à complément électrique, représente une étape intermédiaire intéressante ; l'absence de possibilité de rechargement direct sur le réseau électrique diminue certes la proportion des parcours effectués à l'électricité seule et ne permet pas de bénéficier du prix relativement bas de l'électricité (tant qu'elle ne supporte pas de taxe de même nature que celle portant sur les produits pétroliers [TIPP]).

Les dispositifs qui arrêtent le moteur lorsque le véhicule est immobile (« stop & start ») permettent de réduire de 20 à 40 % la pollution locale de l'air dans les centres-villes congestionnés. Ils équipent déjà certains modèles et doivent être généralisés à court terme.

■ **Pour diviser par 2 la consommation énergétique des véhicules « grand public » dans les dix ans à venir, une incitation forte des pouvoirs publics est nécessaire**

- **Les progrès généraux de conception et de construction** bénéficieront au véhicule thermique comme à tout autre type de véhicule : aérodynamisme, allègement des structures, utilisation de matériaux innovants, roulements à très faible friction, pneumatiques à faible coefficient de frottement...
- **L'assistance électronique à l'éco-conduite** devrait jouer un rôle de plus en plus important car, si elle est relayée par une évolution sensible du comportement des conducteurs, elle peut être porteuse de réductions de consommation tout à fait significatives (environ 20 %), bien plus importantes et moins coûteuses que celles apportées par les autres postes.
- Il faut préparer **la flexibilité du parc de véhicules** à motorisation thermique conventionnelle dans l'attente de la clarification des enjeux énergétiques et agricoles propres aux agro-carburants de première génération (éthanol et biodiesel) et de deuxième génération (huiles végétales hydro-traitées, biocarburants « plante entière », gazoles de synthèse).
- Pour que soient réalisées les améliorations permettant de diviser par deux la consommation d'énergie du parc automobile dans les pays développés et mettre sur le marché la génération suivante de véhicules, il est indispensable que soient mises en œuvre des **incitations fortes par les pouvoirs publics** : diminution des émissions limite de CO₂, généralisation et uniformisation des limitations de vitesse, taxation des carburants, « bonus-malus » *annuels* sur les véhicules...

Sinon les progrès continueront d'apparaître lentement, au rythme constaté dans le passé.



lepoint.fr

Présentation et cadrage de la mission

La présente mission trouve son origine dans une demande de la ministre de l'Enseignement supérieur et de la recherche concernant les transports et la mobilité. Le directeur général du Centre d'analyse stratégique, organisme placé sous l'autorité du secrétaire d'État chargé, auprès du Premier ministre, de la prospective, de l'évaluation des politiques publiques et du développement de l'économie numérique, a chargé, le 14 mars 2008, Jean SYROTA de conduire une réflexion spécifique sur le véhicule du futur.

Cette réflexion vise d'une part à envisager les technologies possibles des différents véhicules du futur, d'autre part à proposer des recommandations de politique publique afin de préparer l'avenir du secteur automobile.

Compte tenu des proportions respectives des différentes catégories de véhicules commercialisés chaque année, le champ d'investigation est volontairement ciblé sur le **véhicule particulier « grand public »**, à l'exclusion des véhicules utilitaires – lourds ou légers –, des véhicules de transport en commun et des flottes captives à usage professionnel. La mission prend cependant en compte les éventuelles sous-catégories de véhicules urbains (transport individuel, livraison légère et distribution) susceptibles de connaître les mêmes évolutions que celles des véhicules « grand public ».

Les perspectives retenues pour le cadre de réflexion couvrent la période allant jusqu'à environ **2030**, échéance correspondant sensiblement à celle de renouvellement total des flottes actuelles de véhicules. Il a paru hasardeux de se projeter sur un terme plus lointain, en se mettant sur le terrain de la prospective, compte tenu des incertitudes attachées aux grandes évolutions technologiques et sociétales.

La mission s'est intéressée aux problèmes d'infrastructures et de logistique associés, dans la mesure où, par nature, la généralisation d'un type de véhicule ne peut s'envisager qu'accompagné d'un réseau de distribution de l'énergie correspondante (approvisionnement, sécurité...).

La dimension européenne des problématiques, les politiques publiques et les expériences industrielles étrangères sont largement évoquées dans les analyses qui suivent.

Le présent rapport, élaboré sous la responsabilité de Jean SYROTA, a été réalisé grâce au concours d'un chercheur (doctorant) de l'Ecole polytechnique, de quatre chargés de mission du Centre d'analyse stratégique (secrétariat d'Etat auprès du Premier ministre, chargé de la prospective, de l'évaluation des politiques publiques et du développement de l'économie numérique), ainsi qu'au soutien (intégration du rapport) d'un membre du Conseil général des mines (ministère de l'Economie, de l'Industrie et de l'emploi).

lepoint.fr

► LE CONTEXTE

1. Éléments historiques et situation actuelle

1.1. Depuis un siècle, la « saga » de l'automobile a consacré la suprématie du moteur à explosion

Remarque : la rédaction de ce chapitre s'inspire notamment de l'ouvrage « L'odyssée du transport électrique - Pascal GRISET, Dominique LARROQUE - Edition Cliomédia (avec la collaboration de EdF, direction Transports et véhicules électriques) ; décembre 2006.

Comme pour l'industrie, c'est la vapeur qui a été à l'origine de la grande mutation des modes de transports au XIX^e siècle : la navigation, le « chemin de fer » ont profondément structuré les modes de vie et les paysages européens. La route, dominée par la traction animale, est restée longtemps à l'écart de ces révolutions en dépit du processus d'innovation initié par le « fardier » de CUGNOT en 1769.

► **Les premières rivalités entre l'électricité et le pétrole**

On oublie aujourd'hui que, dans un climat de recherche frénétique et désordonné, le véritable concurrent de la vapeur pour les transports durant la période 1840-1870 a été **l'électricité bien avant le moteur thermique**. Ce dernier ne verra véritablement le jour que vers 1860 avec un moteur à deux temps utilisant un mélange d'air et de gaz d'éclairage. La rivalité entre véhicule électrique et voiture à pétrole se poursuivra jusqu'au début des années 1890, jusqu'à ce que G. DAIMLER, K. BENZ et W. MAYBACH réussissent progressivement l'intégration d'un moteur à explosion à un véhicule routier et à mettre en place les bases de l'automobile moderne à essence (carburateur, allumage électrique...). Mais dès 1895 (raid Paris-Bordeaux-Paris) apparaît clairement **le décrochage de la voiture électrique par rapport à la voiture à essence** (Panhard & Levassor, Peugeot, Michelin & Cie), laquelle enterre définitivement le véhicule à vapeur (Serpellet et Léon Bollet). L'engouement de l'aristocratie pour la voiture à essence, entretenu par l'effet de mode qui s'impose à partir de 1897, provoque un fort accroissement de la demande et les manufacturiers peinent à la suivre tout en conduisant les investigations de nature à faire évoluer un engin source de beaucoup d'ennuis pour l'utilisateur, mais aussi d'espoirs pour les industriels : en 1898, 400 voitures sont produites en France dont près de la moitié par Panhard & Levassor, en avance sur Peugeot et De Dion Bouton ; la production française atteint 1500 véhicules en 1899, 7600 en 1901, plus de 14 000 en 1903, dont la moitié pour l'exportation.

Face à ce succès, le véhicule électrique particulier, handicapé par une autonomie incertaine et prisonnier de contraintes d'infrastructures insurmontables, ne peut assumer une concurrence crédible, en dépit de records de vitesse inédits : le 1^{er} mai 1899, le belge Camille JENATZY franchit à Achères **le seuil symbolique des 100 kilomètres/heure** à bord de la « Jamais contente », véhicule équipé de pneus Michelin, caréné en forme d'obus et doté d'une batterie de 80 éléments dont le poids représente sensiblement la moitié de celui du véhicule (1,5 tonne). Le seuil des 100 miles/heure (167 km/h) est franchi aux Etats-Unis dès 1904. Dès cette époque, le véhicule électrique, mal adapté à un réseau routier peu accueillant, apparaît ciblé vers le rail, pourtant bien monopolisé par la traction vapeur. Mais déjà se fait jour l'idée que, pour le domaine routier, ce mode de traction électrique peut trouver **une place privilégiée dans le cœur des villes**, notamment pour des usages collectifs et de service.

► **Bénéficiant de progrès constants, la voiture à essence laisse progressivement de moins en moins de place aux autres modes de propulsion**

Il faut avoir présent à l'esprit que les deux décennies qui encadrent le passage du XIX^e au XX^e siècle sont marquées par trois phénomènes conjoints :

- d'une part **une période de progrès constant pour le véhicule à essence** ; en particulier les lacunes du moteur à combustion interne sont progressivement comblées, notamment grâce aux travaux de Rudolf DIESEL qui permettent de pallier le manque de puissance des premiers moteurs à essence ;
- d'autre part **l'âge d'or de la traction électrique dans le domaine du transport collectif** disposant d'infrastructures fixes, qui voit dès 1890 le triomphe du tramway en Amérique et, de manière plus contrastée, en Europe (Allemagne notamment) ;
- enfin **le succès, éphémère, du véhicule électrique autonome** (à batteries au plomb) dans des usages professionnels bien précis : fiacres et taxis électriques, véhicules de lutte contre l'incendie, véhicules de livraison de proximité, notamment dans l'alimentation, véhicules de collecte des ordures ménagères... Le véhicule électrique est en effet lourdement handicapé par les batteries, dont les performances progressent beaucoup moins vite que celles des véhicules à essence.

Dans les années qui précèdent la première guerre mondiale, la concurrence inéluctable de la voiture à essence affaiblit progressivement les manufacturiers de véhicules électriques autonomes jusqu'à provoquer leur disparition quasi-totale en Europe, ainsi que celle des entreprises exploitantes de flottes de fiacres ou taxis électriques. La Grande-Bretagne devient le premier pays utilisateur de voitures à essence (64 000 véhicules en service en 1907), loin devant la France (34 000) et, paradoxalement compte tenu de la qualité de ses ingénieurs, devant l'Allemagne (11 000 seulement). **Par contre, la production française, avec 45 000 unités en 1913, est la première d'Europe**, alors même que la production britannique triple entre 1909 (11 000) et 1913 (34 000).

Curieusement, les Etats-Unis se sont approprié le véhicule à essence avec un certain décalage lié sans doute d'une part à la vigueur de la promotion de l'option électrique, d'autre part à leur retard relatif dans le domaine du moteur à explosion. Ce n'est que vers 1900 que commence pour eux la période pionnière, avec les initiatives de E. HAYNES, R. OLDS, H. FORD... La production de véhicules électriques se poursuit encore pendant une quinzaine d'années (1912 : production de 10 000 véhicules pour un parc de 30 000), mais le déclin est inexorable, le dynamisme des investisseurs américains compensant largement le manque d'inventivité des ingénieurs. Il est intéressant de noter que :

- durant toute cette période, *l'offre de véhicules électriques* comprenait autant de véhicules à conception spécifique que de véhicules « banalisés » reprenant intégralement les codes esthétiques du véhicule à essence alors en pleine **émergence** ;
- *les performances des véhicules électriques* en termes d'autonomie étaient tout à fait appréciables pour l'époque (tournées de plus de 60 km pour des camionnettes de livraison en ville, trajets sur route de plus de 150 km, voire 200 km à titre expérimental) ; naturellement ces performances d'usage n'étaient obtenues qu'au prix d'un rapport poids/puissance très défavorable, de contraintes d'exploitation fortement pénalisantes et d'un confort limité (chauffage sommaire de l'habitacle).

Parallèlement, des entrepreneurs astucieux, en Belgique, en Allemagne (Porsche) et aux Etats-Unis, mettent au point des véhicules électriques à essence, *hybrides avant l'heure*, mais la commercialisation à quelques milliers d'exemplaires n'aura pas de lendemain.

Enfin, il faut signaler l'existence, sur quelques niches d'activités professionnelles, de *véhicules à air comprimé* : automotrices de transport en commun exploitées par la compagnie

CGO à Paris, véhicules de petite livraison à Paris (aux halles) et dans des grandes villes américaines, sans parler des véhicules spécialisés dans des activités industrielles (entreposage, mines...).

A partir des années 1920, le paysage de la mobilité est assez marqué :

- la voiture électrique individuelle a pratiquement disparu ;
- le véhicule à essence, qui domine le marché, fait l'objet de progrès constants centré sur l'augmentation de puissance, la fiabilité et le confort ;
- l'électricité offre un espace de développement limité mais d'innovations intéressantes aux camions et véhicules à utilisation spécifique (voitures postales, livraisons, bennes à ordures...) ;
- l'hégémonie du tramway électrique en matière de transport collectif urbain est générale, jusqu'à la disgrâce des années 1930-40, sauf pour quelques pays en Europe (Belgique, Allemagne, Suisse, Europe de l'Est...) ; l'hécatombe fut même brutale en France, en 1937-1938 et les initiatives de l'après-guerre en matière de trolleybus, à l'exploitation plus souple, ne parviendront pas à renverser la tendance.

► ***Fort de sa suprématie incontestée, le véhicule à essence, toujours plus sophistiqué, commence à voir poindre ses limites dans le dernier tiers du XX^e siècle***

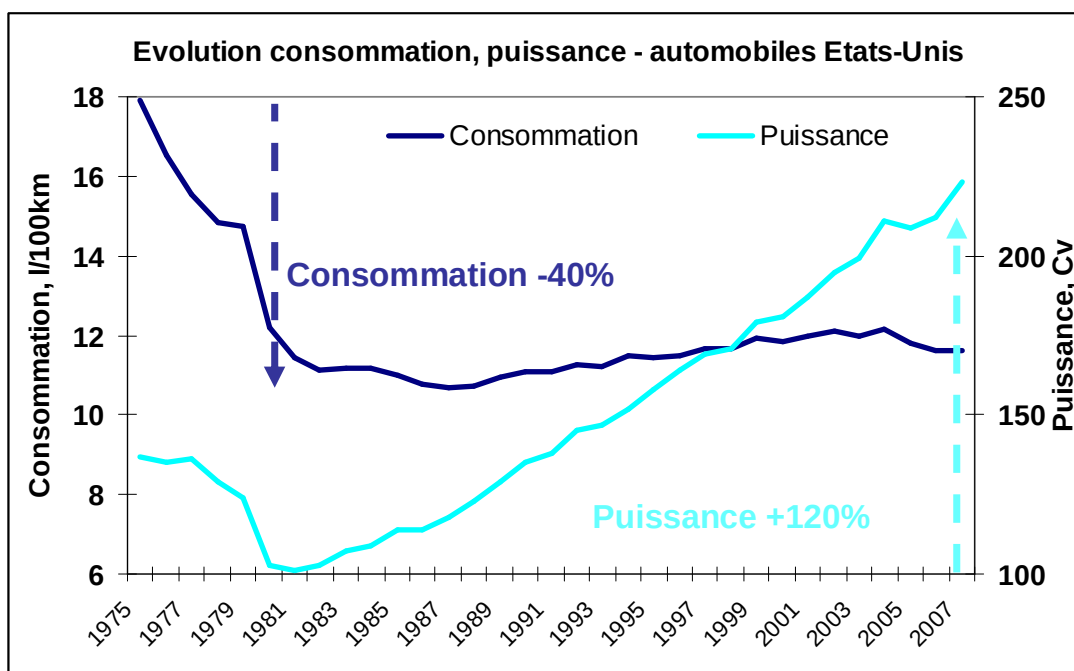
Déjà évoqué après la première guerre mondiale, le problème des *économies d'hydrocarbures* revient d'actualité lors de la crise économique des années 1930. Mais aucune évolution significative dans la conception des véhicules électriques ou autres ne vient modifier la donne. Il en va de même de la période de restrictions des années 1940. **Les années d'après-guerre**, en dépit des difficultés économiques et d'approvisionnement en matériaux, confirment **l'effacement presque total de la voiture électrique et la suprématie du véhicule à essence**. Il est intéressant de noter qu'en marge du programme spatial américain ont été développées, surtout dans les années 1960, des recherches sur les applications civiles de *la pile à combustible*, sans qu'aucun résultat exploitable ne soit obtenu.

Au cours des années 1980, l'image de l'automobile et la symbolique qui s'est progressivement construite autour commencent à évoluer dans les représentations collectives : longtemps associée aux notions de liberté, de vitesse et de puissance, la voiture individuelle prend des connotations de danger, de pollution, voire de violence. L'urbanisation souvent sauvage et la multiplication des initiatives volontaristes, audacieuses – voire malencontreuses – en matière de voies routières, donnent du crédit aux premières contestations environnementales. Les deux chocs pétroliers de 1974 et de 1979 confirment cette tendance et font apparaître *les premières recommandations d'économie d'énergie*, du moins en Europe.

- Pendant que la frilosité des industriels, du moins au niveau des grands constructeurs, en matière de développement de véhicules électriques ou autres, se perpétue malgré le volontarisme apparent des Pouvoirs publics (Groupe interministériel véhicules électriques en France), *l'offre technique de véhicules à moteur thermique commence à évoluer* sous les coups conjugués du prix des carburants et de réglementations renforcées (aérodynamisme, allègement des structures, promotion du diesel, apparition du gaz de pétrole liquéfié et, dans certains pays, du gaz naturel...). Les constructeurs mondiaux ont ainsi fait des progrès considérables, mais très diversifiés selon leur origine.

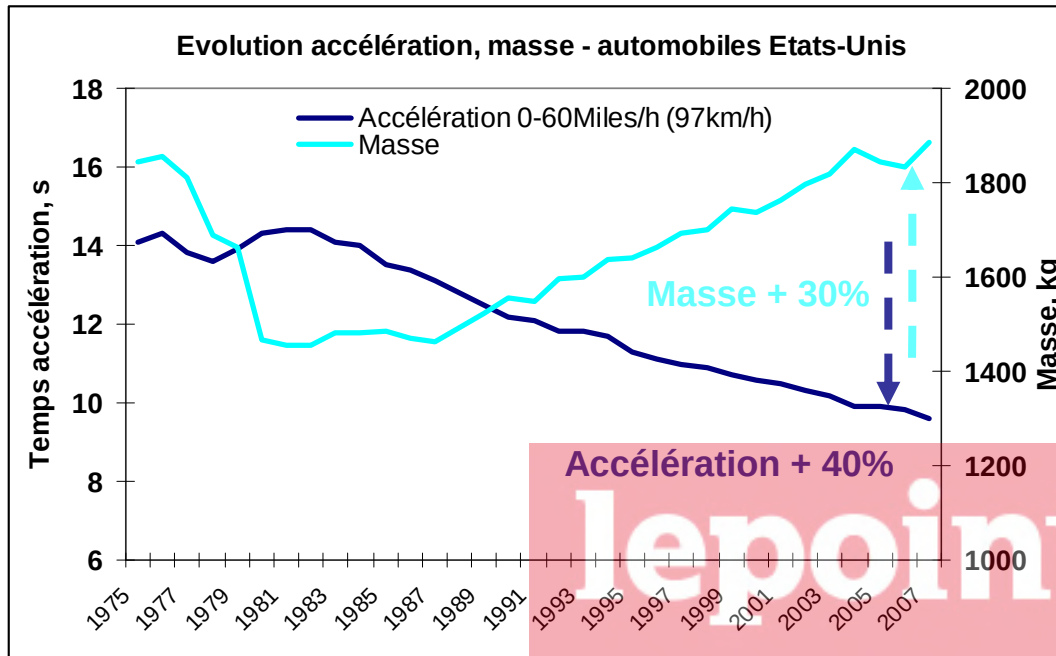
L'exemple des Etats-Unis est particulièrement significatif : en moins de 10 ans, l'autonomie par unité de carburant (en miles parcourus par gallon d'essence) a bondi de 60 %. Mais la tendance s'est brutalement inversée dans les années 1980 au profit de la puissance des véhicules, inaugurant une période de relâchement de près de 25 ans. Le graphique ci-dessous

présente l'évolution sur 30 ans de la consommation moyenne et de la puissance moyenne des voitures vendues aux Etats-Unis.



Source : CAS à partir de données E.P.A., « Technology and fuel economy trends », 2006

Une autre manière de visualiser l'arbitrage fonctionnel qui a été fait durant cette période par l'industrie automobile est de suivre l'évolution comparée du poids et de la performance (temps d'accélération pour passer de 0 à 60 miles par heure) des véhicules vendus aux Etats-Unis.



Cette évolution est, sur le plan fonctionnel, largement corrélée à l'arrivée en masse sur le marché des gros 4*4 (ou « Sport utility vehicles » / SUV) et au regain de mode pour les « pick-up's », deux catégories de véhicules dont l'évolution technique est bien différente de celle des véhicules standard ou breaks : augmentations de 8 % et de 25 % (!) du poids des véhicules dans ces catégories, alors que pour les berlines et les breaks, le poids moyen en 2005 est inférieur de

10 % au pic de 1975 et supérieur de 10 % au creux de 1985. Et l'augmentation des exigences en matière de sécurité ne fournit qu'une partie de l'explication...

<i>Evolution de la répartition des ventes d'automobiles aux Etats-Unis par type de véhicule</i>			
	1975	1988	2007
Voitures	71 %	66 %	45 %
Pick-ups	13 %	16 %	14 %
SUV (véhicules utilitaires de sport, tels 4*4 ou breaks surélevés)	2 %	6 %	29 %
Autres	14 %	11 %	12 %

Source : CAS à partir de données E.P.A., « Technology and fuel economy trends », 2006

Ces évolutions, très caricaturales, masquent en fait des progrès réels accomplis par l'industrie américaine, mais ces progrès ont été presque exclusivement dédiés à l'enrichissement fonctionnel des véhicules, très peu à l'optimisation du couple performances / consommation.

- D'autres éléments de contexte apparaissent dans les pays industrialisés, montrant un début de ralentissement de l'augmentation irrépressible du trafic automobile ; *l'urbanisation croissante* imprime en effet, au cours des trois dernières décennies du XX^e siècle, de nouvelles marques profondes dans le panorama de la mobilité individuelle : d'une part **l'engorgement progressif des cœurs de ville**, jusqu'à saturation totale dans certains cas, conduit au développement des transports en commun électriques souterrains (extension des réseaux de métro existants ; équipement de villes moyennes en lignes nouvelles de métro) et de surface (tramways et même trolleybus). D'autre part **l'augmentation des niveaux de pollution urbaine** entraîne des décisions drastiques (mise en place des premières normes européennes ; instauration en 1990 par l'Etat de Californie du Mandat Zero Emission Vehicle ZEV...).

- Enfin *la conception des véhicules automobiles* à essence bénéficie de deux mutations majeures : **la place de plus en plus importante accordée à l'énergie électrique** (commande moteur et auxiliaires) dès les années 1970, puis l'introduction à partir des années 1980, hasardeuse au début puis massive dès 1990, de **l'électronique embarquée**. Les possibilités offertes par ces deux composantes, dans un contexte de pression croissante des réglementations publiques, expliquent, d'une part, le relatif mais décevant renouveau commercial du véhicule électrique (en France : apparition en 1995 des premières bornes de recharge sur voie publique et offres commerciales de PSA et de Renault), d'autre part l'apparition de nouveaux modèles marquant une évolution technologique significative (véhicule hybride : Toyota Prius en 2001).

► **La voiture du XXI^e siècle devra être économe et propre**

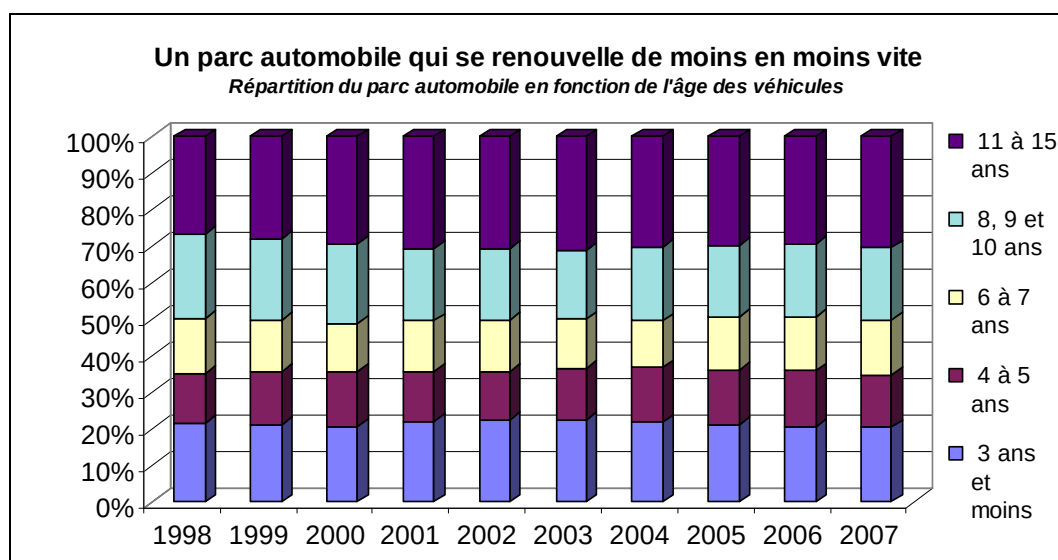
A partir du changement de siècle, les deux préoccupations d'économie d'énergie et de limitation des émissions polluantes, lesquelles d'ailleurs influent souvent de manière contradictoire, sont présentes en permanence dans les programmes de recherche et développement (cf. programmes PREDIT en France) et dans la définition des projets de nouveaux véhicules, peut-être un peu moins dans les actes de promotion commerciale encore solidement ciblés sur les performances des véhicules. Il faut cependant s'attendre à ce que l'augmentation, brutale et sans doute durable, des prix des produits pétroliers enregistrée depuis 2006 provoque une reconfiguration sensible des tendances techniques déjà perturbées par les effets de la mondialisation et l'apparition de gammes à bas coût (« low cost ») produites en Europe de l'Est et en Asie.

1.2. L'expérience du passé rend peu crédible l'apparition de ruptures technologiques soudaines

Cet historique sommaire permet de tirer deux enseignements majeurs :

- Même si les contextes géopolitiques, énergétiques et sociologiques étaient historiquement d'un autre ordre que celui que nous connaissons actuellement, **les solutions techniques** susceptibles de répondre aux défis successifs de la mobilité individuelle **ne se sont mises en place et diffusées qu'à un rythme lent**, plus que décennal, et les résultats se sont fait souvent attendre. **Le secteur du transport individuel présente en effet des inerties énormes** :

- *Inertie de renouvellement* : les taux de renouvellement des parcs automobiles baissent et l'âge moyen des véhicules a tendance à augmenter légèrement (le diagramme suivant montre le cas de la France).



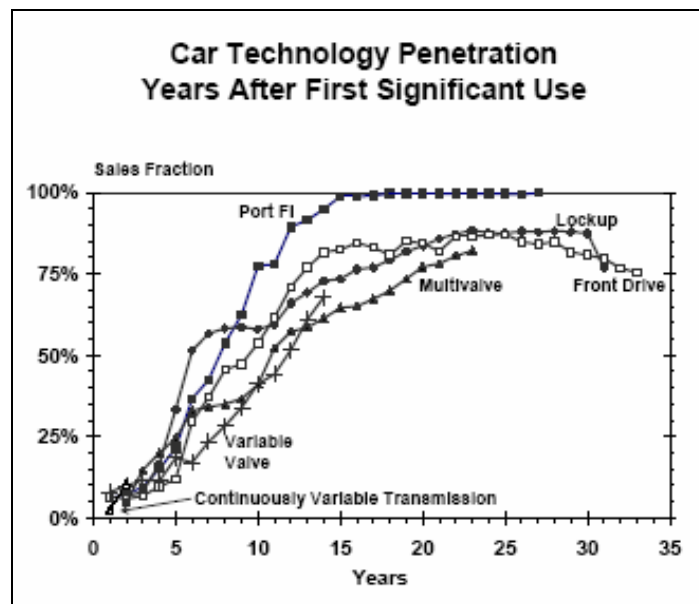
Source : ADEME

- *Inertie de modernisation* : la diffusion des innovations est lente, supérieure à 10 ans, et s'est globalement ralentie depuis 30 ans.

Le diagramme ci-dessous compare les taux de pénétration (mesurés en pourcentage sur les ventes) de six technologies automobiles, sur le marché américain :

- « Port FI » : injection (en remplacement des carburateurs) ;
- « Front drive » : traction avant (remplacement de propulsion) ;
- « Multivalve » : moteur équipé de plus de 2 soupapes par cylindre ;
- « Lockup » : transmission automatique ;
- « Variable valve » : contrôle électronique progressif de temporisation et d'ouverture des soupapes ;
- « CVT » : transmission variable continue.

lepoint.fr



Source : U.S. Environmental Protection Agency (E.P.A) ; « Technology and fuel economy trends », 2006

- *Inertie d'usage* : les performances de tout véhicule se dégradent en fonction de l'usure et conduisent à la dégradation des caractéristiques en termes de consommation et d'émissions atmosphériques. *Quand on évoque les améliorations technologiques, on pense trop exclusivement aux véhicules neufs alors qu'il faudrait inclure dans les analyses les modalités et le coût de l'entretien du parc automobile.*

Sans nier la capacité de nos sociétés industrialisées à s'adapter au fur et à mesure de l'apparition des contraintes, voire de gérer tant bien que mal les crises, la persistance des paradigmes de notre société – avec ses codes, ses effets de mode et ses symboles bien ancrés –, la mise au point de nouvelles formes de stockage d'énergie fiables et propres, le renouvellement de l'appareil industriel et surtout la reconfiguration de nos modes d'habitat et d'emploi, très énergétivores, vont nécessiter beaucoup de temps sans pouvoir nous épargner les dégâts issus de l'imprévoyance, du manque d'anticipation et de la vision à court terme. On reconnaîtra volontiers que deux guerres mondiales et deux chocs pétroliers – dont l'un majeur – n'ont pas réussi au XX^e siècle à renverser les grandes tendances technologiques, que la suprématie du véhicule à essence s'est perpétuée inéluctablement en dépit des rationnements, restrictions et renchérissements de toutes natures, que le véhicule électrique, handicapé par des contraintes lourdes d'autonomie et d'infrastructure, n'a toujours pas trouvé ses lettres de noblesse commerciales et que *tout ce qui paraît nouveau aujourd'hui a déjà été, d'une manière ou d'une autre, inventé et testé avec bien sûr les moyens de l'époque (électricité, air comprimé, hydrogène et pile à combustible, gaz de pétrole ou gaz naturel).*

• Le deuxième enseignement touche aussi aux fondamentaux de l'évolution automobile : d'un point de vue très sommaire, on peut considérer que toute la voiture a été conçue dès l'origine au début du siècle dernier, d'emblée avec tous ses composants (moteur thermique à cylindres, embrayage, boîte de vitesses, différentiel, stockage de l'énergie de démarrage par batterie, suspension et amortissement, pneumatiques gonflés à l'air...). Bien sûr, à côté des mesures prises pour améliorer la sécurité et de l'introduction de nombreux accessoires – voire de gadgets – dans les domaines du confort et du style, les progrès technologiques ont été constants, des innovations ont été apportées au fil du temps sur bien des composants et ont conduit à des améliorations majeures. **Mais peu de ruptures technologiques sont venues bouleverser la conception des véhicules.** On peut avancer d'ailleurs que les ruptures

technologiques ont aussi été rares dans d'autres domaines, à l'exception notable de l'électronique.

On peut sans doute discuter le fait de savoir si la boîte de vitesses automatique par convertisseur, la suspension hydraulique, la traction avant, le pneumatique radial, l'injection, le turbocompresseur... sont à mettre au rang des ruptures technologiques ; sans doute les promesses non tenues du moteur rotatif (Wenkel) laissaient-elles entrevoir une véritable révolution technique, non validée (celle de s'abstraire du mouvement alternatif des pistons). Force est de constater que les techniques de stockage d'électricité, qui sont arrivées à maturité pour les petits appareils (mobiles, portables...), n'ont pas trouvé de solution définitivement fiables et performantes en ce qui concerne la propulsion automobile.

Aujourd'hui, on peut escompter *d'importants progrès* issus de la place croissante prise par l'électronique et l'électricité dans les véhicules thermiques (récupération d'énergie, assistance dynamique au démarrage, réalisation de très courts trajets en mode électrique), mais *la véritable mutation* ne viendra que lorsque l'on maîtrisera la double propulsion thermique/électrique dans des conditions opérationnelles et économiques acceptables (véhicule hybride rechargeable dit « plug-in »).

2. Les principaux éléments de contexte à l'horizon 2030

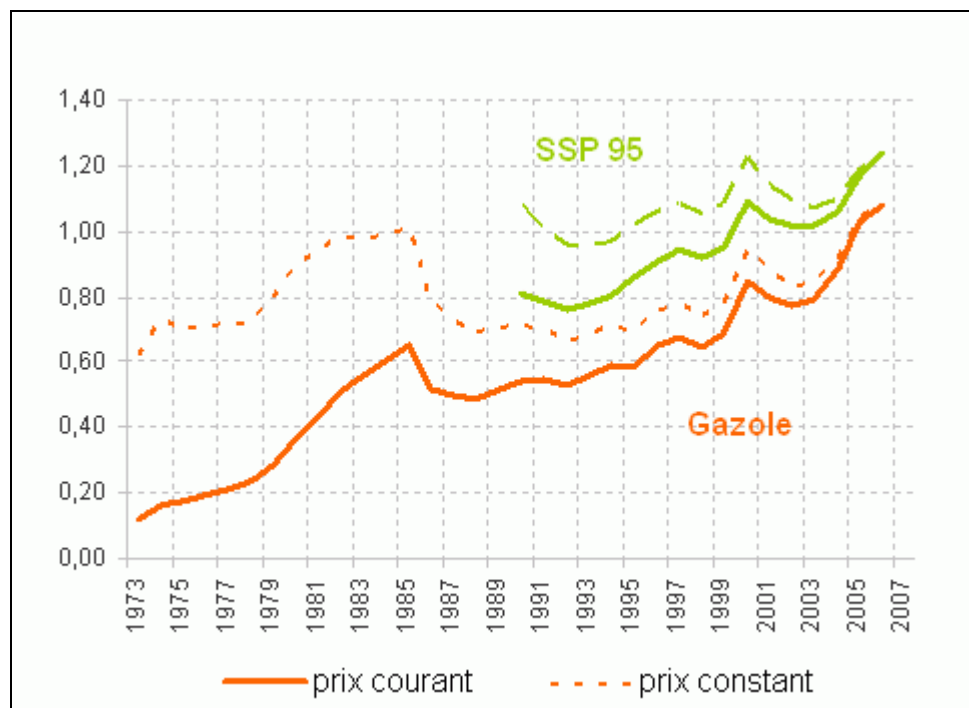
2.1. Les crises passées du pétrole n'ont pas significativement modifié le comportement des utilisateurs en matière de mobilité

- **La politique énergétique a été, par le passé, dominée par le prix des hydrocarbures**, soit à la hausse en raison de tensions sur le marché et de crises géostratégiques (comme en 1973), soit à la baisse du fait du déséquilibre du marché (comme en 1985). La brutale tension sur les prix résultant de réductions de l'offre due à des événements ou à des spéculations révélait la vulnérabilité croissante des économies occidentales et, depuis lors, mondiales à un tarissement, même passager, des ressources énergétiques. Des solutions immédiates étaient demandées : à visée économique, pour ne pas compromettre la croissance, ou sociale, pour ne pas ponctionner le pouvoir d'achat. Des politiques structurelles nombreuses ont été engagées, dont le succès est, pour certaines, exemplaire et aujourd'hui encore bénéfique à tous égards (maîtrise de l'énergie, développement du nucléaire en France).

- **Mais beaucoup de chantiers ouverts ont perdu leur priorité** quand, au catastrophisme des experts amplifié par les médias, a succédé une période de détente des prix, rendant à nouveau l'énergie peu chère, décrédibilisant les appels à l'économie ou à l'efficacité et délégitimant les actions les plus douloureuses, ~~qu'elles touchent au pouvoir d'achat, au mode de vie, à la propriété ou surtout à la mobilité.~~ Ainsi, si les entreprises ont, pour une large part, réussi à s'adapter à une contrainte énergétique qu'elles ont estimée pérenne, les ménages – qui se déplacent et se logent en consommant beaucoup et de façon peu efficace des hydrocarbures et de l'électricité – n'ont pas infléchi durablement leur comportement. Et si les mesures nécessaires sont connues et expérimentées avec succès ou entreprises de façon volontariste ici ou là, les politiques de fond et de longue haleine nécessaires ont perdu de leur évidence, devant une opinion désabusée par des appels réitérés à des mobilisations pour prévenir des drames qui, quelques mois après, paraissaient des craintes chimériques. Il y a trente ans, les réserves de pétrole étaient estimées à trente ans de consommation. Aujourd'hui, elles sont évaluées à quarante ans environ... : seul le degré de certitude n'a pas changé. Le prix du baril n'a dépassé que récemment les sommets du début des années 80. C'est pourquoi, mobiliser à nouveau en arguant du prix élevé risque de conduire uniquement à une succession

de mesures choc d'effet limité dans le temps et de démobilisations durables à quoi l'on a fini par réduire, dans bien des cas, la politique énergétique.

Evolution du prix des carburants (en euros)



Source : Union française des industries du pétrole (UFIP)

2.2. La perspective de prix des hydrocarbures élevés va sans doute impacter durablement le comportement des usagers

La situation nouvellement créée par l'envolée actuelle du cours du baril, au-delà de ce qui était à peine envisageable il y a quelques mois, **risque cependant de déplacer les lignes de la perception par le grand public** : l'idée que les pics extrêmes observés sont imputables pour partie à des effets spéculatifs, donc non pérennes, commence à laisser place à la conviction que nous sommes entrés dans **une période durable de pétrole** – et d'hydrocarbures en général – **cher**, plus du fait de l'explosion de la demande des pays « émergents » (Chine, Inde...) que du fait de la raréfaction physique de l'offre, qui apparaît toujours plus lointaine au fur et à mesure que le renchérissement autorise de nouvelles recherches et découvertes. Des premiers signes de ralentissement sont apparus, tant dans l'évolution de la consommation de carburant que dans les ventes des véhicules à forte consommation (en particulier les « SUV », gros 4x4, aux Etats-Unis).

Les hydrocarbures n'ont naturellement pas cessé d'être de plus en plus rares, puisque disponibles par nature en quantités finies, soumis aux aléas géostratégiques comme, du reste, les autres matières premières. Encore que les phénomènes s'accroissent et que les horizons de danger paraissent se rapprocher : la croissance de la population mondiale et celle des économies émergentes (en premier lieu de la Chine et de l'Inde) vont accroître de façon rapide la demande mondiale d'énergie, conduisant à s'interroger sur la possibilité de repousser durablement les limites de ces ressources. Pour autant, la date du « *peak oil* » (moment où l'offre de pétrole va commencer à décliner) demeure incertaine et il est possible qu'il survienne du fait du déclin de la demande et non pas à cause de l'insuffisance de la ressource.

2.3. Le réchauffement climatique domine désormais les politiques énergétiques sur le long terme

L'opinion publique demeure, semble-il, toujours peu sensible aux effets de **l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES)** dont elle ne voit trop souvent les enjeux qu'au travers d'engagements politiques incantatoires de très long terme ou de décisions internationales bien lointaines de leurs préoccupations quotidiennes. Les publicités actuelles visibles sur les médias français en matière de promotion des derniers modèles automobiles reflètent bien cet état d'esprit.

Force est de constater pourtant que le paradigme a changé, avec la conviction, désormais établie, du réchauffement climatique. À la crise possible, évitable, survenue puis surmontée, récurrente et finalement pas si grave jusqu'à la prochaine, a succédé **un nouvel horizon mental, conceptuel, et donc politique.** Les initiatives médiatiques du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), celle du président Al GORE et, en France, la démarche du « Grenelle de l'environnement » ont sans aucun doute contribué à diffuser cette conviction.

En effet, le réchauffement climatique est devenu le fondement principal de la réflexion, de l'analyse et de l'action. Depuis le dernier rapport du GIEC de printemps 2007, il fait l'objet d'un consensus, du moins sur quelques points : il y a indiscutablement augmentation de la teneur en gaz carbonique (CO₂) dans l'atmosphère et réchauffement climatique ; les conséquences des variations possibles de température sont potentiellement catastrophiques pour l'humanité, même sans se fonder sur les pires scénarios ; la contribution humaine à ce réchauffement (« cause anthropique ») est indéniable, même si d'autres phénomènes interviennent concurremment. Certes, il n'est pas sûr que le pire arrive mais, pour ne pas courir le risque de se trouver confrontée à terme à des situations ingérables, la communauté mondiale doit aujourd'hui relever un nouveau défi auquel elle ne peut envisager de se soustraire : **freiner, puis réduire, et vite, les émissions de gaz à effet de serre (GES) parmi lesquelles la contribution du gaz carbonique est majoritaire (73 %).**

Même si les réserves prévues d'hydrocarbures étaient une nouvelle fois significativement réévaluées, même si la sécurité internationale garantissait les flux et leur sécurité, même si les autres matières premières énergétiques devenaient exploitables sans limites, il faudrait réduire fortement leur utilisation. **Les prix élevés du pétrole associés à la crainte du réchauffement climatique vont changer du tout au tout le comportement des consommateurs et de ceux qui les gouvernent.** On peut compter sur cet électrochoc pour mettre fin aux comportements irrationnels des automobilistes en matière de puissance, de vitesse et d'accélération, compte tenu du prix à payer désormais pour satisfaire leurs fantasmes.

2.4. Le secteur des transports – en particulier l'automobile individuelle – constitue l'un des secteurs clefs conditionnant les évolutions énergétiques

- **Au niveau mondial,** quelques chiffres donnent l'ampleur du problème ; ces informations constituent des éléments de contexte sans doute éloignés de la problématique du présent rapport, mais il apparaît important de mettre en perspective la position des constructeurs européens face à l'émergence de marchés continentaux colossaux et face à la mondialisation des techniques et des échanges industriels.

* La population mondiale, qui était de 2,5 milliards en 1950, a été multipliée par plus de 2,5 jusqu'à aujourd'hui : 6,5 milliards en 2008 ; elle dépassera probablement 9 milliards d'individus en 2050.

* Les presque 3 milliards d'individus nouveaux, majoritairement localisés dans des pays émergents ou déjà actuellement en forte croissance, auront accès, dans des conditions totalement inédites pour l'humanité, aux communications de masse (télévision, internet). Rien ne permet de penser que ces nouveaux habitants ne revendiqueront pas des modes de vie inspirés de ceux qu'ils verront quotidiennement dans ces médias : urbanisme, confort, mobilité, loisirs...

* La majorité de ces habitants vivra dans des villes ; avec les tendances actuelles, outre les problèmes majeurs de pollution urbaine ou locale, se posera le défi général de l'émission des gaz à effet de serre, et donc de l'impact sur le réchauffement climatique. En 1950, moins de 10 % du pétrole était utilisé dans les transports et moins de 5 % des émissions de CO₂ provenaient de ce secteur ; **aujourd'hui 24 % des émissions de CO₂ proviennent des transports, 18 % et bientôt 20 % (1/5) pour le seul secteur routier** ; en 2050, de 70 à 80 % du pétrole devraient être dédiés aux transports qui seraient alors à l'origine de plus de 30 % des émissions de CO₂ !

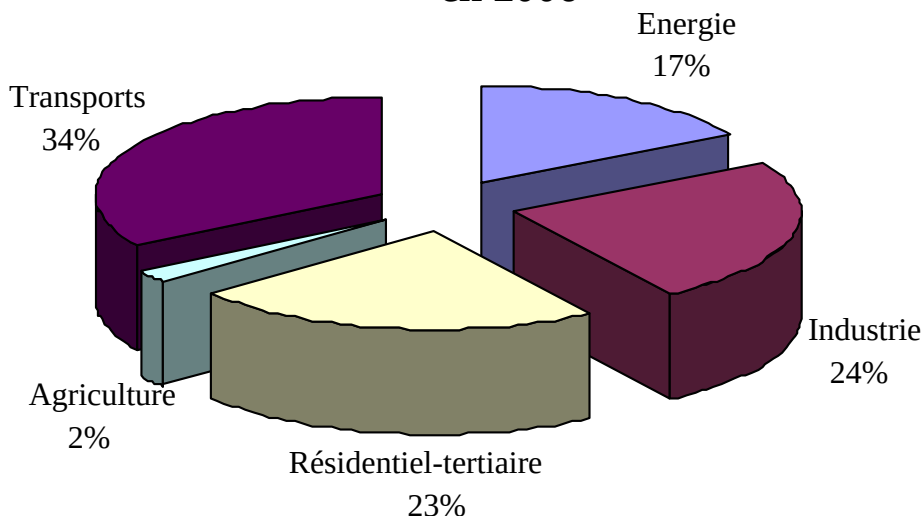
Il est donc impossible que les scénarios du futur se bornent à prolonger les tendances actuelles. Les progrès se font à un rythme insuffisant dans le secteur automobile comme dans beaucoup d'autres : au rythme actuel d'évolution des technologies, la division par 2 des émissions mondiales de GES – voire par 4 pour les pays industrialisés – paraît hors de portée. A côté de marchés matures (Japon, Europe) qui verront sans doute la baisse des kilométrages et donc des ventes de véhicules, coexistent des marchés en pleine expansion lesquels, à défaut de décisions malthusiennes toujours possibles mais à la généralisation improbable, connaîtront vraisemblablement des évolutions brutales et décisives sauf à observer des catastrophes inédites ; ces évolutions peuvent d'ailleurs trouver d'autres causes convergentes, liées par exemple à la lutte contre l'insécurité routière, fléau qui se développe dans les pays émergents de façon dramatique (1 % de leur population serait actuellement blessée chaque année dans des accidents de la circulation automobile !).

Dans les décennies à venir, le principal problème sera urbain et asiatique.

Cette vision, pour l'instant peu applicable au contexte européen, aura cependant une influence significative sur les initiatives techniques et économiques des constructeurs européens, à l'actionnariat, aux réseaux de sous-traitance et aux marchés de plus en plus complexes, mais aussi sur les décisions publiques, ne serait-ce que parce que les négociations attendues pour déterminer la période post-2012 (Kyoto) devront bien intégrer ces aspects du problème et prendre en compte le phénomène citadin asiatique.

• **En ce qui concerne spécifiquement la France**, le rapport de la commission « Énergie » du Centre d'analyse stratégique (octobre 2007) a montré que toute politique énergétique nationale devait porter une attention particulière à deux secteurs critiques dont l'évolution a été et est toujours préoccupante : le résidentiel-tertiaire et les transports. **Le secteur des transports**, pour lequel les produits pétroliers y sont très difficilement substituables, est le principal contributeur en termes d'émissions de gaz carbonique (34 %), lesquelles ont légèrement fléchi depuis 2000 après une décennie de constante augmentation (+ 14 % entre 1990 et 2000). Les émissions totales de CO₂ en France s'élevaient en 2006 à environ 400 millions de tonnes.

Poids des différents secteurs dans les émissions de CO₂ en 2006

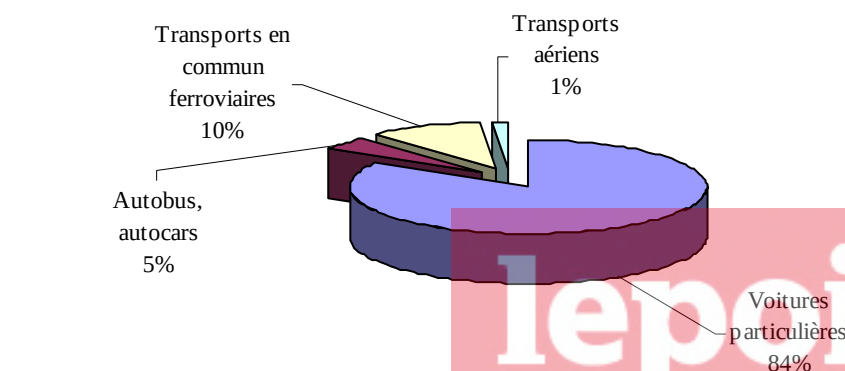


Source : CITEPA

Remarque : Les éléments d'information concernant le secteur des transports ne prennent en compte que les *transports intérieurs tant de voyageurs que de marchandises*, et donc que les consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre qu'ils entraînent. Nonobstant l'importance croissante qu'ils prennent au plan mondial, *ne sont pas pris en compte les transports aériens et maritimes internationaux* dont la maîtrise du volume et des émissions relève d'une logique particulière. Les *transports terrestres internationaux* sont, quant à eux, pris en compte en volume (voyageurs-kilomètres ou tonnes-kilomètres) sur la base de leurs parcours sur le territoire national et en consommations énergétiques et émissions de GES sur la base de leur approvisionnement énergétique réalisé sur le territoire national.

► *En termes de trafic et s'agissant des transports de voyageurs*, le graphique ci-après montre la part extrêmement dominante des déplacements en voitures particulières dans le trafic total.

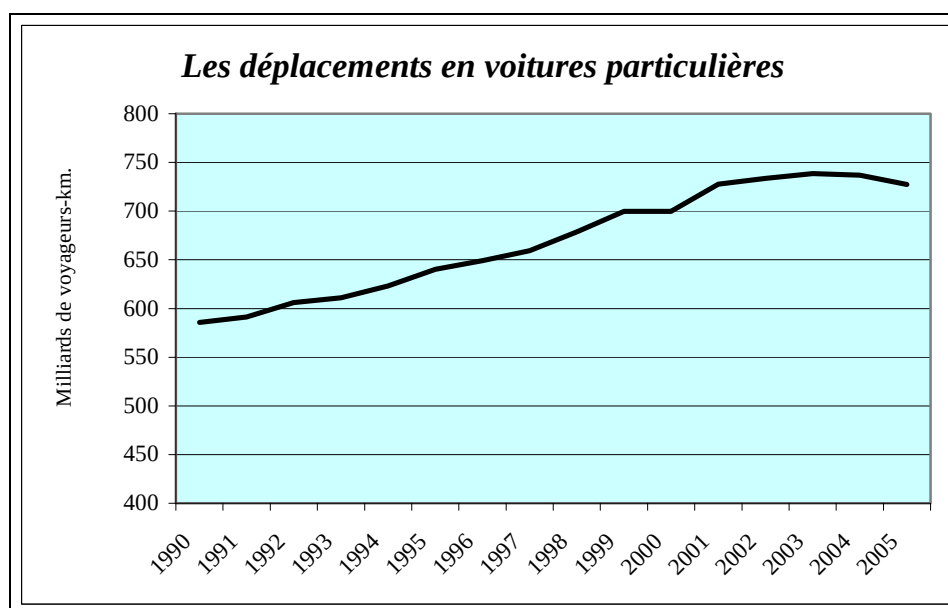
Transports intérieurs de voyageurs (2005)



Les pourcentages sont rapportés aux trafics exprimés en voyageurs-km
Source : DAEI

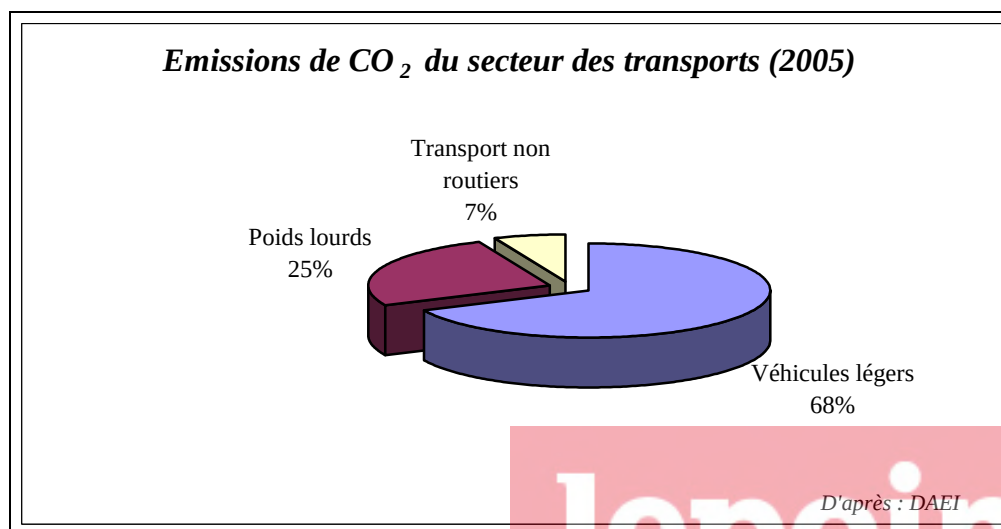
On constate cependant un ralentissement très net de la croissance des déplacements en voitures particulières à partir de 2002 et même une baisse significative à partir de 2005. Le parc de voitures immatriculées en France ayant continué d'augmenter, la baisse de 2005 s'explique par une diminution des kilomètres parcourus par véhicule dont l'évolution des prix

des carburants est sans doute un facteur explicatif important, à côté d'autres facteurs (extension du réseau TGV par exemple).



D'après ministère chargé des transports
Direction des affaires économiques et internationales - DAEI
(La demande de transport en 2025 : projection des tendances)

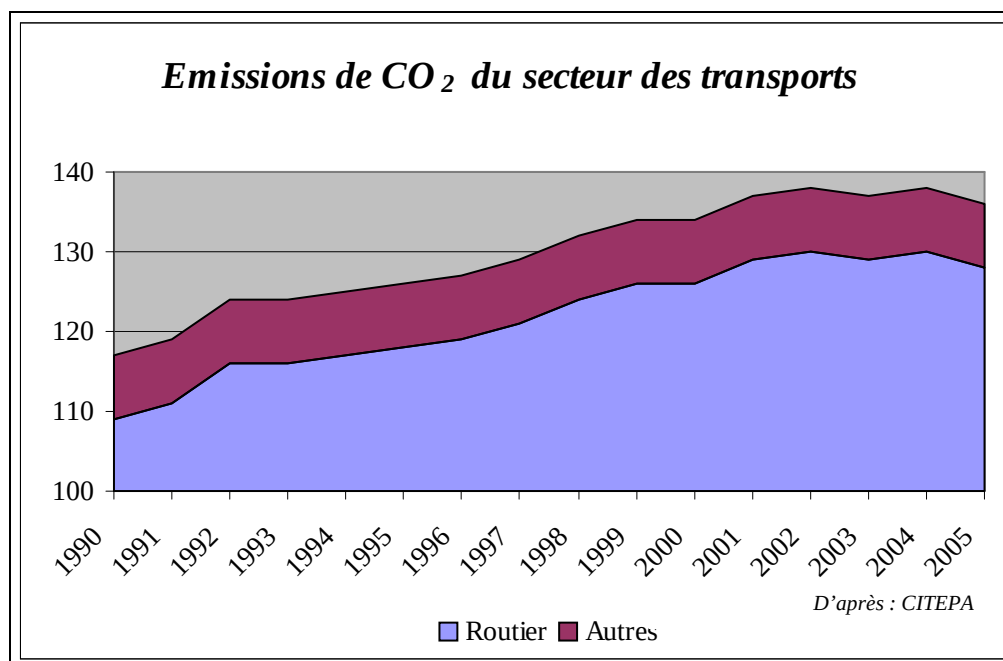
► En termes d'émission de gaz carbonique, les transports ont émis, en 2005, 136 millions de tonnes de CO₂, se décomposant en 93 Mt pour les véhicules légers (68 %), 34 Mt pour les poids lourds et 9 Mt pour les transports non routiers.



Remarque : les véhicules légers comprennent les voitures particulières - VP (52 % des émissions totales du secteur des transports) et les véhicules utilitaires légers - VUL (16 % des émissions totales du secteur des transports).

Étant observé que les émissions des transports non routiers restent faibles et à peu près stables sur la période 1990-2005, l'évolution des émissions du secteur reflète celle des émissions du transport routier et principalement celle des émissions des véhicules particuliers. Une analyse plus précise montrerait que les émissions de CO₂ ont augmenté moins vite que le trafic sur la période de forte croissance et que le tassement du début des années 2000 et la baisse de l'année 2005 sont plus accentués. L'explication doit en être recherchée dans la *diésélisation du parc*, dans la réduction des consommations unitaires permises par le renouvellement du parc

de véhicules et, ces dernières années, dans l'effet du meilleur respect des limitations de vitesse dans le cadre de la lutte en faveur de la sécurité routière.



Ces indications légitiment le ciblage du présent rapport sur le véhicule de transport individuel « grand public ».

Les études sur la demande de transport en 2025 réalisées ces dernières années par le ministère des transports et de l'équipement (DAEI) montrent que l'on peut, dans un cadre déjà relativement contraignant, stabiliser les émissions à horizon 2020 par rapport à leur niveau actuel.

D'après ces projections, les émissions de CO₂ du secteur du transport routier individuel seraient donc en légère décroissance entre 2002 et 2025 mais s'établiraient encore à un niveau nettement supérieur (+ 23 Mt) à celui de 1990. Pour tenter d'appréhender les composantes d'une telle perspective – en particulier du point de vue de l'évolution du véhicule du futur –, il convient de la replacer au sein d'**un ensemble beaucoup plus vaste d'actions normatives, réglementaires ou incitatives** visant à concrétiser les progrès en matière d'économies d'énergie et d'émissions atmosphériques. Ces éléments de contexte sont en effet de nature à influencer plus ou moins fortement sur la recherche et l'innovation, sur les modes d'usage, sur les performances des véhicules, éventuellement sur des segmentations de marché susceptibles de faire évoluer le cahier des charges de certains modèles de véhicules...

3. Les stratégies à l'étranger sont diverses

3.1. Les grandes tendances de l'automobile sont orientées vers l'économie, la sécurité et l'intelligence embarquée

Il est nécessaire en préalable de bien distinguer les rôles respectifs des États et des constructeurs, en rappelant qu'il n'existe pas de marché unique de l'automobile, mais bien plusieurs marchés « régionaux » (Etats-Unis, Europe, Chine, Inde, Japon...).

- *Le rôle des Etats* est de gérer, d'une part, la réglementation (sécurité, vitesse, protection de l'environnement et du consommateur...), d'autre part la fiscalité (encourageante ou pénalisante), enfin les incitations (subventions R & D, bonus-malus...).

- *L'objectif fondamental des constructeurs* est d'optimiser leur production pour satisfaire les consommateurs dans le cadre des contraintes présentes et envisagées ; ce sont en général de très gros employeurs et ils constituent des lobbies très puissants.

L'interaction entre Etats et constructeurs est de ce fait complexe ; les concertations sont permanentes mais le poids – et donc l'influence – des grandes entreprises est d'autant plus lourd dans la définition des politiques nationales de l'automobile que, précisément, les aides publiques à la R & D ne représentent qu'une faible fraction des crédits mobilisés par les entreprises (en France, moins de 3 % des crédits privés). On peut donc dire que les grands constructeurs gardent largement la main sur les innovations, sur l'introduction de nouvelles technologies et sur les modalités commerciales de leur diffusion. Ils déclarent que leur priorité est de satisfaire les demandes de leurs clients, mais, dans le même temps, ils orientent ces demandes à coups de publicité et avec l'aide souvent bienveillante de la presse spécialisée. L'un des buts des pouvoirs publics est de faire travailler ensemble les constructeurs, les équipementiers et leurs sous-traitants – en général des PME – ainsi que les collectivités locales ; mais leur intervention, financière et politique, ne peut conduire à créer et produire des véhicules dont les constructeurs ne veulent pas. C'est là que la réglementation imposée prend tout son sens.

L'analyse des politiques et des mesures mises en œuvre dans différents pays permet de donner une idée des trois principaux axes selon lesquels se structurent les stratégies et les actions concrètes :

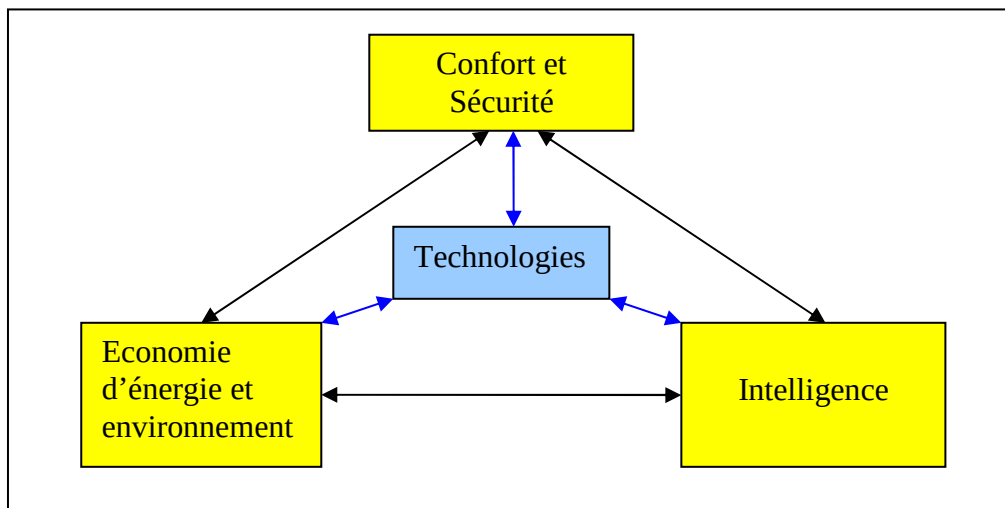
- *Sécurité et confort* : les progrès importants dont ont bénéficié les véhicules particuliers dans les dernières décennies ne pourront guère être remis en cause. Ils participent de l'intérêt que portent les clients à l'automobile. Ils ont d'ailleurs sensiblement contribué à l'alourdissement des véhicules. Les nouveaux concepts ou technologies – qu'il s'agisse de la forme des véhicules (design), des composants (batteries...), de l'utilisation de nouveaux carburants (gaz, hydrogène...) – doivent respecter des exigences de plus en plus élevées en matière de sécurité et de confort dans les pays développés.

- *Economie d'énergie et environnement* : les véhicules présents sur le marché ont été conçus dans une période de prix modérés de l'énergie (1985-2000), ce qui n'a guère incité aux progrès en la matière (les progrès ont été multiples, mais ont été masqués ou compensés par l'augmentation constante des puissances des véhicules). La montée rapide du prix du pétrole depuis 2000 et l'occurrence possible d'un troisième et durable choc pétrolier depuis quelques mois ont ravivé les exigences en matière de consommation des véhicules. L'impact des émissions de GES sur le climat se concrétise et la pollution locale des voitures atteint désormais des niveaux reconnus de désagrément et de dangers pour la santé. L'ensemble de ces facteurs appelle dans la majorité des pays des efforts significatifs en matière de réduction des consommations de carburants pétroliers et de réduction des différents polluants émis par les voitures (CO₂, NOx, particules...).

- *Intelligence embarquée* : On constate un net développement ces dernières années des calculateurs et des navigateurs dans les voitures. Si le domaine couvert n'est encore globalement que partiel, il y a potentiellement quantité d'applications des technologies de l'information et de la communication susceptibles de connecter le véhicule à son

environnement et d'optimiser son usage : informations routières, paiements automatisés, conduite assistée...

La technologie apparaît au cœur des problématiques et c'est bien une course technologique et industrielle qui est engagée pour concevoir des véhicules du futur qui devront répondre à ces trois exigences.



Bien sûr, l'impact de ces technologies dépendra des modes d'appropriation par les « consommateurs », en fonction de leur comportement en conduite, des actions de publicité, des incitations publiques...

3.2. Différents gouvernements ont créé des consortiums nationaux pour préparer le véhicule du futur

Remarque : Les informations concernant les pays évoqués ont été collectées auprès des missions économiques des ambassades concernées par la direction générale du trésor et de la politique économique (DGTPE) du ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi.

Cette démarche a pour objectif affiché de mobiliser et de rapprocher les différents acteurs en vue de maximiser le potentiel du pays soit pour construire ou améliorer la stratégie nationale, soit pour progresser sur un domaine particulier, un sujet critique de recherche par exemple.

On trouvera ci-dessous, à titre d'exemple, un panorama des initiatives mises en place dans 4 pays : Royaume-Uni, Japon, Allemagne et Suède.

lepoint.fr

Démarches collectives dans différents pays

Pays	Consortiums	Caractéristiques
Royaume-Uni	« Low carbon vehicle partnership »	Lancé en 2003, « LowCVP » est constitué de représentants issus de l'automobile, du pétrole et de différents autres secteurs. Le consortium anime plusieurs groupes de travail : • Réglementation européenne : accords CO₂ post 2008 pour définir un cadre à 10ans, • Consommateurs : labels des véhicules propres, • Collectivités locales : politiques relatives à la promotion des véhicules propres • R&D : plans d'action • Carburants : études des émissions de CO₂ du puits à la roue, stratégie biocarburants.
Japon	Plan d'action interministériel	En juillet 2001, trois ministères (ministère de l'aménagement du territoire, des infrastructures et des transports, ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie, ministère de l'environnement) ont lancé un plan d'action à 2010 pour la promotion des véhicules à faibles émissions.
	« PHEV Town Concept »	Pour accélérer la promotion des véhicules électriques dans les zones urbaines, une collaboration se met en place entre le gouvernement, les collectivités locales, les constructeurs automobiles, les distributeurs d'énergie et les tissus industriels locaux. Les axes de travail portent sur : - les infrastructures de recharge normale (parking, centre commerciaux, hôtels...) et rapide (distributeurs d'électricité, loueur de voitures, bureaux...); - les incitations à l'usage des VE et au développement des infrastructures et des services.
	"SmartWay Project"	En juillet 2005, le MLIT a lancé un projet pour entrer dans la seconde phase du Smartway Project. Il consiste en la mise en application des technologies « Intelligent transportation system » (ITS) pour créer une société dans laquelle les déplacements seraient facilités, ceci dans le but de créer un meilleur cadre de vie pour la population. Il s'agit donc de développer l'information dans les transports en commun, d'équiper tous les véhicules de systèmes de navigation, de mettre en place des services diversifiés pour les usagers et d'installer des diffuseurs équipés de télépéage électronique... - Quatre ministères sont concernés par le développement des ITS : ▪ la Police nationale (NPA), ▪ le ministère de l'aménagement du territoire, des infrastructures et des transports (MLIT), ▪ le ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie (METI), ▪ le ministère des affaires publiques, de la poste et des télécommunications (SOMU). - IT Strategy Headquarters : structure de coordination et de promotion des ITS ; - ITS Japan, organisation où collaborent universitaires et industriels pour promouvoir les ITS (elle organise le 11^{ème} congrès mondial sur les ITS à Nagoya) ; - Comité national ISO/TC 204, chargé de promouvoir, à l'échelle internationale, la normalisation des ITS ; - Les organismes publics : NILIM (centre technique du MLIT), JICE (Japan Institute of Construction Engineering) et VICS Center (Vehicle Information and Communication System Center) qui est une organisation gouvernementale pour la transmission d'informations sur le trafic. .../...

		- Les constructeurs automobiles et les équipementiers : Toyota, Nissan, Honda, Daihatsu, Fuji Heavy Industries Ltd (Subaru), Hino Motors Ltd, Mazda, Isuzu, MMC, Suzuki, Yamaha (tous font de la recherche en relation avec les ministères). - Les fournisseurs (Denso, Aisin Seiki, Matsushita, Mitsubishi...) sont fortement impliqués dans le développement des technologies liées à l'ITS. - Des sociétés des secteurs de l'électronique, de l'informatique et des télécommunications sont partenaires (NTT DoCoMo, NEC, Hitachi, Panasonic, Toshiba..).
Allemagne	Partenariat Transport Energy Strategy (VES) ¹	Fondé en 1998, cette association volontaire regroupe des représentants du gouvernement fédéral allemand², des constructeurs automobiles allemands, européens et des pétroliers et des distributeurs d'énergie : BMW, Daimler, Ford, GM/Opel, MAN, Volkswagen ; BP/Aral, Shell, Total ; RWE, Vattenfall. Les travaux identifient la nécessité de se concentrer sur le potentiel des énergies renouvelables et de l'hydrogène. Au travers du « Clean Energy Partnership », le consortium met en place une démonstration de station à hydrogène à Berlin.
Suède	SAFER (Vehicle and Traffic Safety Centre)	SAFER (Vehicle and Traffic Safety Centre,) inauguré en 2006, est une unité de recherche conjointe aux mondes académique, industriel et institutionnel, gérée par la prestigieuse École d'Ingénieurs de Chalmers. L'objectif du centre est de devenir un hub d'excellence international en matière de sécurité automobile. Vinnova (Agence de l'Innovation) est le financier principal de ce centre. Les autres partenaires sont Autoliv, Chalmers, Epsilon, Folksam, Fordonskomponentgruppen, l'université de Göteborgs, Imego, Lindholmen Science Park, Saab Automobile, Saab, Microwave Systems, Scania, Sicomp, SP, Telia Sonera, Volvo AB, Volvo Personvagnar, VTI, la Direction des Routes et la région de Västra Götaland. Ensemble, ils disposent de 30 millions de couronnes suédoises par an (3,2 M€) pendant dix ans pour financer ce centre.
	SHC, Centre suédois des véhicules hybrides	Le but de cette institution est de développer et d'optimiser les technologies existantes et à venir dans les domaines des systèmes de propulsion et de l'économie d'énergie afin de trouver le véhicule hybride le plus efficace tant au niveau du carburant que du coût. Les différents partenaires de ce centre sont les autorités suédoises de l'énergie, les universités technologiques de Chalmers, de Stockholm (KTH) et de Lund (LTH), ainsi que les entreprises Volvo AB, Volvo Car Corporation, Saab Automobile AB, Scania, BAE Systems Hägglunds AB.

Source : CAS selon informations fournies par les missions économiques (DGTPE)

3.3. Des stratégies ambitieuses ont été affichées dans quelques pays

Certains constructeurs visent le « leadership » sur certains axes avec l'ambition d'y détenir une avance technologique mondiale.

► **Au Japon, le concept de la « société de l'automobile la plus agréable du monde » s'organise autour de la protection de l'environnement et du développement de la télématique.**

Depuis 20 ans, la politique japonaise s'est tournée de façon significative vers la protection de l'environnement (correspondant aux caractéristiques urbaines particulières du Japon), puis

¹ Verkehrswirtschaftliche Energie Strategie.

² Ministère des transports, des bâtiments et de la ville (BMVBS)

vers les économies d'énergie. Dans le domaine des véhicules, le gouvernement a mis en place un système de réglementation très sévère sur la motorisation diesel (spécialement sur les oxydes d'azote NO_x). Mais c'est depuis la fin des années 1990, lorsque s'est répandue la prise de conscience des risques liés au réchauffement de la planète causés par les émissions de gaz à effets de serre, que le mouvement s'est accéléré.

Depuis la ratification des accords de Kyoto, les pouvoirs publics japonais ont mis en place, aux niveaux national et régional, des politiques très strictes pour pallier la pollution créée par le transport ; le secteur automobile japonais a développé et industrialisé des technologies très innovantes pour faire face aux problèmes environnementaux causés par les véhicules. Grâce à certaines technologies comme l'hybride, avec le succès de la Toyota Prius ou encore les véhicules prototypes à pile à combustible, les constructeurs japonais gagnent un rôle prééminent dans le secteur du véhicule propre.

Le Japon a mis en place en mai 2007 l'« Initiative pour la Nouvelle Génération de Combustibles et de Véhicules Automobiles ». Coordonnée par le ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie (METI), la stratégie japonaise à l'horizon 2030 se fonde sur trois critères fondamentaux :

- augmentation de la sécurisation des approvisionnements du pays en combustibles ;
- prise en compte toujours croissante de l'environnement et des répercussions de l'activité automobile sur celui-ci ;
- soutien de la compétitivité des entreprises japonaises du secteur à l'échelle internationale, notamment en favorisant les politiques actives de brevets et de licences.

Pour y arriver, le Japon concentre des efforts très importants d'une part en matière de développement technologique des nouvelles générations de véhicules (en particulier dans le domaine du stockage de l'électricité), d'autre part dans l'utilisation des technologies de l'information et de la communication (systèmes de transport intelligent).

► ***Les Etats-Unis affichent depuis peu la volonté de réduire la dépendance aux produits pétroliers, notamment par le développement des biocarburants.***

Le parc automobile américain est caractérisé par une consommation unitaire très importante, en relation avec une taxation très réduite des carburants.

La dépendance des Etats-Unis vis-à-vis des énergies fossiles a fait l'objet, du temps du président Jimmy CARTER, d'un plan d'indépendance énergétique qui a fait long feu. Elle est de nouveau d'actualité. Les risques liés à l'augmentation des émissions polluantes et des gaz à effet de serre et, plus récemment, à l'augmentation du prix de l'essence, sont autant de raisons supplémentaires qui poussent depuis peu le gouvernement fédéral, les Etats, les constructeurs automobiles américains et leurs équipementiers à chercher des solutions pour diminuer la consommation des véhicules et leurs émissions, tout en maintenant le développement de l'industrie automobile. Aujourd'hui, la majorité des experts automobiles aux Etats-Unis s'accordent à penser que toutes les technologies disponibles : hybride, électrique, diesel propre, injection essence directe, piles à combustible, biocarburants, réduction du poids des véhicules, aérodynamisme devront être développées en parallèle, dans les années à venir, pour répondre aux besoins créés par l'accroissement du parc automobile américain et régler les problèmes d'émissions.

La prise en compte des dimensions énergétiques et environnementales dans les transports est un phénomène récent aux Etats-Unis, qui a émergé avec les questions touchant à l'indépendance énergétique. Les débats sur l'indépendance énergétique et le réchauffement

climatique ont débouché sur la reconnaissance du lien entre l'activité anthropique et le réchauffement climatique ainsi que sur une nouvelle loi relative à « l'indépendance et la sécurité énergétique » (*Energy Independence and Security Act*, dit *HR6*), signée par le Président George W. BUSH le 18 décembre 2007.

La loi *HR6* fixe des normes plus strictes en matière d'efficacité énergétique. Le texte instaure également un programme très ambitieux pour le développement des biocarburants, ainsi qu'un projet de révision, pour la première fois en 32 ans, des normes de consommation automobiles (CAFE), qui peuvent être légitimement présentées comme des avancées significatives. De nouveaux projets en matière de recherche sont également lancés, notamment sur la séquestration du carbone. Si la loi *HR6* reste en deçà des ambitions initialement affichées par la majorité démocrate au Sénat et à la Chambre des représentants du Congrès fédéral, elle constitue cependant une avancée pour les défenseurs de l'environnement aux Etats-Unis.

Ce texte volontariste, voté par le Congrès après des mois de négociation, est toutefois difficile à mettre en œuvre sur certains points, compte tenu du retrait des mesures financières incitatives de la version finalement adoptée. Le lobby pétrolier et automobile, largement relayé par la Maison blanche et les républicains conservateurs, ont manifestement les moyens de freiner les changements engagés en matière de politique énergétique et environnementale.

A. SCHWARZENEGGER et l'hydrogène en Californie

Le gouverneur de la Californie a pris récemment l'initiative de développer les infrastructures de distribution d'hydrogène, mais leur nombre est encore très limité. Le projet, lancé en 2004 par Arnold SCHWARZENEGGER et nommé *California's Hydrogen Highway Network*, prévoit la construction de 150 à 200 stations à l'horizon 2010, ce qui rendrait accessible au plus grand nombre de Californiens l'approvisionnement de leurs véhicules en hydrogène. La plus grande partie du financement du réseau initial californien, dont le coût est estimé entre 75 et 200 millions de dollars, devrait venir de partenariats privés, avec des soutiens des gouvernements fédéral, étatique et local. Un des principaux acteurs est le *California Fuel Cell Partnership*, une coalition d'intérêts publics et privés qui vise à faire progresser les nouveaux véhicules équipés de piles à combustible et les infrastructures liées aux technologies de l'hydrogène.

Des Etats comme la Floride, New York, le Michigan ont démarré des projets similaires. Cependant, cet essai demande à l'évidence à être confirmé dans sa faisabilité technico-économique ; ainsi le constructeur General Motors a récemment annoncé qu'il avait atteint une étape où il ne pourrait probablement plus faire de progrès significatifs dans le développement des véhicules à pile à combustible sans nouvelles implantations de stations d'hydrogène aux Etats-Unis...

Tout récemment, les candidats à l'élection présidentielle, prenant publiquement position sur la politique énergétique à mettre en œuvre, ont plébiscité la généralisation à court terme du véhicule hybride rechargeable, associé, surtout pour le candidat démocrate, à une gamme étendue de carburants de substitution (biocarburants).

► *En Allemagne se développe une stratégie multi-technologies*

L'industrie allemande est leader mondial sur le marché dans la construction de moteurs et de transmissions, les propulsions alternatives, la communication véhicule-véhicule et véhicule-infrastructure, la reconnaissance de l'environnement du véhicule, les technologies de management du trafic, les carburants biogènes (biodiesel, bioéthanol, biocarburants de 2^{ème} génération). De plus, l'Allemagne est leader sur le marché européen des biocarburants, avec un quota déjà atteint de 6,3 % de mélange.

Les trois principaux constructeurs allemands (Mercedes-Benz, BMW et Volkswagen/Audi) se sont fait une spécialité, mondialement reconnue, de modèles très puissants, aux fortes motorisations et s'affichant comme intégrant un fort contenu de haute technologie. Ces modèles « haut de gamme », fortement producteurs de marges et exportés à plus des deux tiers, notamment vers les pays riches ou en pleine expansion du Moyen-Orient ou de l'Asie (pays où le prix du carburant n'est pas très discriminant et où les limitations de vitesse sont embryonnaires...), participent à l'image brillante et sans concurrence de la technologie allemande et surtout à la balance commerciale avantageuse de l'Allemagne. Cette situation, inédite en Europe voire dans le monde entier, explique sans doute l'acharnement du gouvernement allemand à s'opposer à la limitation de vitesse sur ses autoroutes parce que la segmentation des marchés intérieur et à l'exportation ne serait pas viable en termes de marketing à l'international.

Cela étant, on ne peut nier la prise en compte autant par les autorités publiques que par les constructeurs des nouveaux éléments de contexte énergétiques et environnementaux, pas plus que les progrès existants ou prévisibles en matière de conception et de construction automobile, chaque constructeur développant ses recherches selon ses propres identité et stratégie. BMW s'est illustré récemment dans les médias en mettant en démonstration un modèle de très haut de gamme (Série 7) à hydrogène liquide utilisé directement dans un moteur d'une cylindrée impressionnante (6 litres).

En ce qui concerne les politiques publiques allemandes en la matière, elles sont, à court et moyen termes, désormais regroupées dans le plan intégré « énergie-climat », adopté par le gouvernement fédéral, lors de sa réunion de clôture à Meseberg le 23 août 2007. Ce plan comprend 29 mesures concrètes, proposées par les ministères de l'Economie (BMW) et de l'Environnement (BMU), destinées à favoriser la consommation de produits et services durables, en particulier dans le domaine des transports (mais aussi des bâtiments, des appareils électroménagers et des services) et qui doivent permettre d'atteindre un objectif national de réduction des émissions de CO₂ de près de 40 % d'ici 2020, par rapport aux niveaux de 1990. Ce plan vient compléter et renforcer des mesures déjà existantes, l'Allemagne jouant dans ce domaine un rôle de leader européen.

► ***En Suède, a été adoptée une stratégie tournée vers l'excellence internationale en matière de sécurité et d'environnement***

La sécurité, la protection de l'environnement et la télématique dans l'industrie automobile sont trois domaines dans lesquels la Suède est en avance par rapport aux autres pays.

- *Le domaine de la sécurité a toujours été d'une très grande importance pour les constructeurs automobiles suédois. La sécurité est une priorité pour Volvo depuis 1932. C'est une des raisons pour laquelle leurs voitures sont parmi les plus sûres sur le marché international, mais aussi les plus lourdes et les moins économes. Pour pouvoir garder une telle position dans un monde de plus en plus concurrentiel, il est primordial de miser grandement sur la recherche et le développement. Les universités, l'industrie et le secteur public ont tenté ensemble de fonder des centres d'excellence, dans le sud-ouest de la Suède, orientés sur les questions de sécurité (par exemple : SAFER, inauguré en 2006 ; IVSS, programme de recherche et de développement courant sur 2004-2008).*

- Depuis quelques années, les Suédois se sont attachés à trouver des solutions pour remplacer les carburants fossiles. Parmi ces solutions, on trouve l'E-85, l'électricité ou le biogaz. La Suède a une position éminente dans le *développement de nouveaux carburants*

pour remplacer les carburants fossiles avec, comme objectif, la sauvegarde de l'environnement.

Le nombre des voitures fonctionnant au bioéthanol en Suède, encore faible, croît régulièrement. Leur nombre atteint actuellement environ 100 000 sur un parc automobile de 4,3 millions. Cette augmentation a été freinée car le bioéthanol est au centre d'un nouveau débat qui accuse les utilisateurs de voitures au bioéthanol de participer à la forte hausse des prix des denrées alimentaires sur les marchés mondiaux. Leurs opposants assurent que la production des biocarburants va permettre à ces pays de sortir de la pauvreté. Un autre problème avec les voitures utilisant du bioéthanol vient de la surconsommation volumique de carburant si l'on compare avec les voitures utilisant de l'essence.

La Suède est aussi très active dans la recherche pour le *développement de la production de bioéthanol* à partir d'autres matières premières que les céréales. Le pôle de compétitivité « BioFuel Region » a été créé pour développer la production de bioéthanol à partir de celluloses forestières. Les solutions cherchées par les suédois s'adaptent aussi bien aux matières premières suédoises qu'aux matières premières étrangères. Les celluloses, qui constituent le composant principal des membranes cellulaires de toutes les plantes, sont disponibles en quantités inexploitées dans le monde et ne font pas concurrence à la production agro-alimentaire.

Les deux constructeurs automobiles suédois, désormais filiales de groupes étrangers, sont impliqués dans les *nouveaux concepts d'hybridation* incluant les moteurs « bio-fuel » et les technologies hybrides « plug in ». Les recherches ont commencé en 2000 avec le programme de partenariat privé/public « Green Car ».

- Enfin, la *télématique* dans les transports est initié au sein du cluster « Telematics Valley ». L'objectif est de créer un pôle leader dans ce domaine. Ils travaillent avec les universités et investissent beaucoup dans la recherche et développement.

► ***La Chine, outre son souhait de rejoindre le niveau des normes européennes, mise sur l'hybridation thermique/électrique en comptant sur son expérience dans les véhicules électriques très légers***

Le parc automobile chinois s'élève aujourd'hui à environ 40 millions de véhicules et devrait atteindre près de 150 millions d'automobiles en 2020 (dont 75 millions de véhicules particuliers) et 200 millions en 2030. La Chine passerait ainsi d'un taux de motorisation proche de 30 pour mille en 2007 à 150 pour mille en 2030 (chiffre restant néanmoins 3 fois inférieur à la moyenne européenne actuelle). Cette augmentation du parc automobile chinois fera passer la dépendance pétrolière de 40 % en 2007 à 60 % en 2020. En 2020, selon certaines prévisions, l'essence représenterait environ 60 % des énergies utilisées, le diesel 19 %, l'hybridation électrique 10 %, l'électricité 2 %, le GNV 5 %, les biocarburants 2 % et l'hydrogène 0,5 %.

Le diagramme suivant montre la volonté des autorités chinoises de s'aligner progressivement sur les standards européens pour les polluants :

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Chine	Euro 2			Euro 3			Euro 4			Euro 5
Pékin	Euro 2		Euro 3		Euro 4			Euro 5		
Europe	Euro 3	Euro 4				Euro 5				

La mise en place de nouvelles normes d'émission au-delà de 2015 n'est pas encore fixée par la Chine. On peut d'ores et déjà déterminer qu'à partir de 2020, environ 95 % des voitures respecteront au moins la norme Euro 4 (en 2005, environ 20 % de voitures étaient non réglementaires, 35 % à la norme Euro 1 et 45 % à la norme Euro 2).

Le développement des énergies alternatives, et en particulier des véhicules hybrides électriques, est devenu une des principales priorités pour les constructeurs en Chine, poussés en cela par les programmes publics de R&D chinois. Cette tendance s'est d'ailleurs largement illustrée lors de la dixième biennale du salon international de l'automobile China Auto qui s'est déroulé à Pékin du 20 au 28 avril 2008. Parmi les 892 modèles présentés, la majorité des constructeurs ont exposé un ou plusieurs modèles utilisant des énergies alternatives.

La phase de recherche dans le domaine des voitures électriques est déjà bien avancée en Chine, et la commercialisation devrait suivre de près celle des voitures hybrides. La Chine a produit, en 2006, environ 20 millions de *vélos électriques* et 8 000 véhicules utilitaires électriques, qui ont notamment permis à sa recherche de progresser vers des batteries de plus en plus puissantes et de les tester à grande échelle, expérience que n'ont pas la plupart des pays industrialisés. Un des aspects importants que semble vouloir mettre en avant le gouvernement chinois est le développement des *mini-voitures électriques*. Ainsi, l'Université de Tsinghua, à Pékin, développe des mini-voitures électriques (3 places maximum) d'une autonomie de 50-60 km. En 2020, le ministère chinois des sciences et des technologies (MOST) prévoit que la moitié des véhicules neufs commercialisés utilise une motorisation électrique (hybride électrique ou électrique pur).

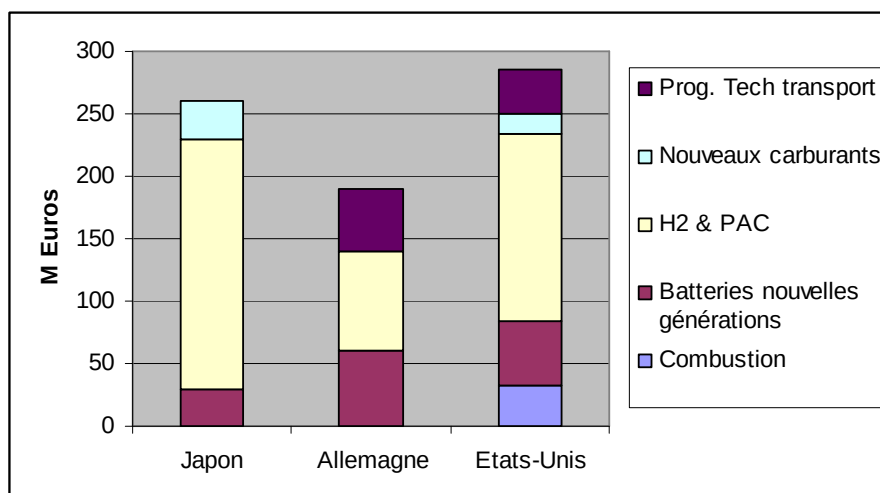
La commercialisation des véhicules hybrides démarrerait autour de 2010 en Chine. Toyota, Honda et le chinois Chang'an Automobile ont déjà lancé la production de véhicules hybrides électriques, avec respectivement la Prius, la Civic et la Jiexun-HEV. Les voitures hybrides devraient ainsi représenter près de 1 % des parts de marché en 2010 et 10 % en 2020.

3.4. Les principaux programmes publics étrangers de R&D ont en commun l'électricité et l'hybridation

Le diagramme suivant présente les ordres de grandeur des trois principaux budgets publics en recherche et développement : Etats-Unis, Japon et Allemagne.

lepoint.fr

Ordres de grandeur des principaux budgets publics annuels dans le domaine de R&D des véhicules



Source : CAS

L'encadré ci-dessous indique quelques éléments de référence en ce qui concerne la France.

Les budgets R & D publics et privés en France

En prenant pour référence, par souci de cohérence, la période de 5 ans 2002-2006, les crédits incitatifs publics disponibles pour la recherche sur les transports terrestres proviennent, pour partie, du PREDIT 3 (300 M€ sur la période de référence) et, pour partie, de la part « revenant » vers la recherche française du 6ème programme cadre européen de recherche et développement (environ 120 M€ sur la période de référence, sur la base de 15 % des 800 M€ affectés directement ou indirectement par le PCRD aux transports). Ces crédits incitatifs, qui totalisent donc un montant de l'ordre de 85 M€/an, financent des recherches de laboratoires publics ou privés autres que ceux des constructeurs automobiles.

Sur la base du produit du nombre de chercheurs (1500 chercheurs et 900 thésards) par un montant financier unitaire, l'estimation des moyens de la R&D des laboratoires publics sur les transports est de 300 M€/an, soit 3,2 % du total de la R&D publique.

Environ 200 entreprises du secteur des transports ont par ailleurs un budget cumulé de R&D de l'ordre de 3,3 Mds€/an. L'industrie automobile proprement dite représente environ 90 % de ce total.

► Japon

Les programmes de R&D actuellement en cours au Japon ont été synthétisés au sein de l'« Initiative pour la Nouvelle Génération de Combustibles et de Véhicules Automobiles ». Ce document, publié par le METI³, constitue la première mise en commun de l'ensemble des grandes lignes directrices des feuilles de route et des projets de recherche thématique liés aux prochaines générations de véhicules de tourisme grand public ainsi qu'à leurs infrastructures d'accueil. Les parties prenantes sont issues d'horizons variés ; outre les ministères (METI, MLIT⁴, MoE⁵, MAFF⁶) et les centres et instituts de recherche des universités, des constructeurs automobiles (au premier rang desquels Toyota, Nissan et Honda), des électroniciens (pour les technologies ITS), des compagnies électriques (notamment TEPCO), des pétroliers et des producteurs agricoles (problématique des biocarburants) ont été intégrés à cette vaste réflexion.

³ METI : Ministry of Economy, Trade & Industry

⁴ MLIT : Ministry of Land, Infrastructures & Transportation

⁵ MoE : Ministry of Environment

⁶ MAFF : Ministry of Agriculture, Fisheries and Forestry

La grande majorité des programmes issus de ce plan se situent à horizon 2030, avec 2010 comme étape à court terme, et 2020 à moyen terme.

La feuille de route des produits est la suivante :

2010 : véhicule électrique (VE) compact citadin (autonomie de 130 km, coût 18 000 €) et berline hybride (VH) de haute technologie (émissions de CO₂ réduites de moitié) ;
2015 : biocarburants entre 0,25 €/l et 0,65 €/l incluant de fortes innovations technologiques ; véhicules hybrides rechargeables (VHR) simples (émissions de CO₂ réduites des 2/3) ;
2020 : VE compact de haute technologie (autonomie de 200 km, coût 12 000 €) ;
2030 : VE nouvelle génération (autonomie de 500 km, coût 18 000 €) ; modèles de véhicules à hydrogène aux prix alignés sur les véhicules essence traditionnels.

“Study group on next-generation vehicle batteries”

Lancé mi-2006 par le METI, dans l’optique d’un développement de l’électricité dans le véhicule du futur, le groupe a établi une stratégie jusqu’en 2030 pour le développement des batteries de nouvelles générations. Deux axes composent le plan d’action correspondant :

- R&D batteries : amélioration des batteries existantes pour les VE et VH (2010), batteries avancées pour les VE, VH et VHR (2015), batteries innovantes pour un marché de masse des VE (2030) ;
- Infrastructures : tests et normalisation, marché international des batteries Li-on, sécurité d’approvisionnement des matériaux, valorisation/promotion des nouveaux systèmes (batteries et infrastructures de recharge).

Ces programmes coopératifs mettent tous l’accent sur **les technologies de l’information et de la communication** (« Intelligent transportation systems »/ITS, logiciels, applications de navigation...).

Par ailleurs, en octobre 2006, le Gouvernement japonais a défini de nouvelles orientations pour les politiques publiques de recherche et développement. L’essor des technologies ITS a été désigné comme l’un des principaux objectifs à atteindre à horizon 2025.

A terme (horizon 2030), le Japon vise la multiplication par 2 de la vitesse moyenne au sein des agglomérations d’Osaka, de Nagoya et du Grand Tokyo (actuellement : 18 km/h contre 26 km/h à Paris et 30 km/h à Londres), aboutissant ainsi à une réduction de moitié des émissions de CO₂.

L’intégration croissante des nouvelles technologies vise en priorité quatre lieux d’applications :

- *péages* : intégration des systèmes ETC (télépéage) ;
- *tunnels, voies en descente* : intégration des systèmes de lecture et de prévision des ralentissements du trafic des automobiles précédant le véhicule de l’usager ; introduction de plus grandes flexibilité et réactivité dans la conduite et la gestion des embouteillages ;
- *conduite assistée* : réduction au maximum des dépassements, de la décélération et des changements de voies grâce à un système de conduite « automatique » ;
- *gestion des intersections* : vers une gestion intelligente et automatique des feux de signalisation en fonction du trafic réel.

► Etats-Unis

Le programme de recherche du Département de l’énergie (DoE) sur les véhicules du futur est directement connecté au programme des technologies énergétiques du DoE.

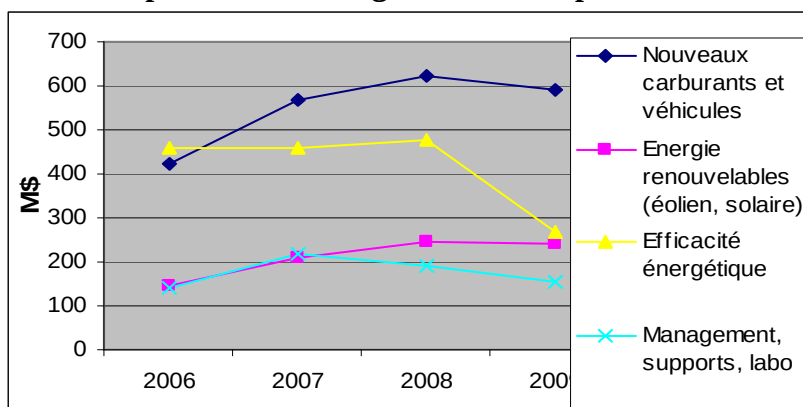
L’EERE (Office de l’efficacité énergétique et de l’énergie renouvelable) du DoE est chargé des programmes de RD&D⁷ dans l’énergie et ses usages ; il constitue une interface entre les activités de recherche amont de l’« Office of science » et celles de l’industrie qu’il entend

⁷ Recherche, développement et déploiement

stimuler sur les objectifs fédéraux de baisse de la consommation d'énergie et des émissions. Le programme de l'EERE constitue un élément principal du programme présidentiel « Advanced Energy Initiative » destiné à modifier les modes de consommation de l'énergie dans les secteurs du bâtiment, de l'industrie et des transports. Il suit notamment l'objectif fédéral de réduire de 20 % d'ici 2017 la consommation de carburants fossiles (« *Twenty in Ten* ») et conjointement de réduire les émissions de GES. Enfin les programmes s'inscrivent dans le cadre de l'Energie Policy Act'2005 et de l'Independance and Security Act'2007⁸, qui traduisent dans la loi les différentes initiatives.

Le budget prévisionnel 2009 s'élève à 1,25 Mds\$. La répartition des crédits figurée ci-dessous met en évidence la part nettement majoritaire consacrée aux nouveaux carburants et aux véhicules.

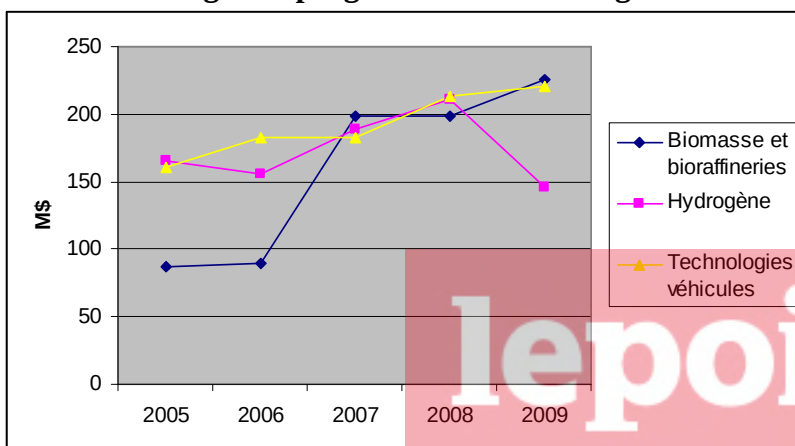
Répartition du budget de l'EERE par thème



Source CAS d'après données DoE

Le diagramme suivant donne l'évolution des trois principaux sous-programmes relatifs aux transports. On observe un très fort renforcement de la R&D sur les biocarburants depuis 2007 et une nette baisse du budget prévisionnel sur l'hydrogène pour 2009.

Répartition du budget du programme « Technologies de véhicules »⁹



Source CAS d'après données DoE

De nombreux programmes de recherche liés à l'automobile ont été mis en place au sein des différentes agences gouvernementales : Département de l'énergie (DoE), Département des

⁸ Ces initiatives veulent amplifier les premiers résultats obtenus par les Etats-Unis depuis dix ans : augmentation de 50 % des énergies renouvelables, 1^{ère} production mondiale de biocarburants avec 6 Mgallons/an, réduction de l'intensité énergétique de 13 % depuis 2000. Les objectifs visés par l'EERE sont les suivants d'ici 2030 : 600 Mds\$ d'économies d'énergie, - 6 GtC, - 5Mb/j.

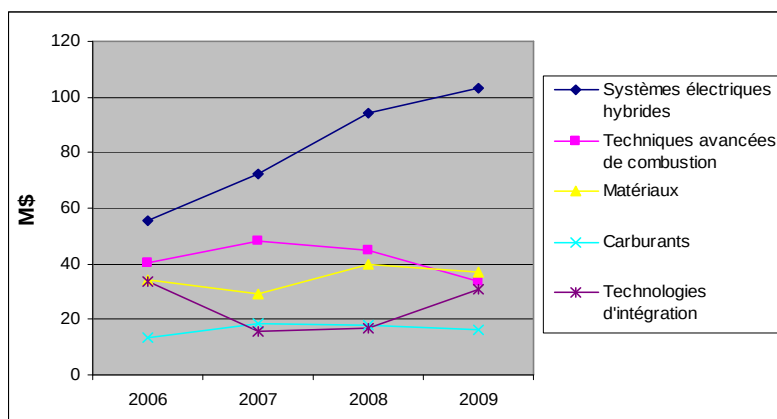
⁹ Le programme reprendra en 2009 pour 31 M\$ d'activités du programme Hydrogène dans le but de créer des synergies entre les deux sujets.

transports (DoT), Département du commerce (DoC/NIST ; programme pour l'organisation de la production et de ses standards), Département de la défense (DoD/DARPA, Advanced Research Project Agency, HEV program – Driverless Program).

Aujourd'hui, les principaux programmes de R&D fédéraux dans le domaine automobile concernent essentiellement la recherche dans le domaine de l'hydrogène (piles à combustible, stockage et distribution de l'hydrogène), des biocarburants et des batteries avancées pour véhicules hybrides et hybrides rechargeables.

Le budget consolidé du programme « Technologies de véhicules » du DoE est en augmentation de 30 % entre 2006 et 2009 (prévisionnel) ; il montre une nette augmentation du budget sur le véhicule hybride avec, sur ce thème, une forte croissance de l'effort consacré aux batteries.

Répartition du budget du programme « Technologies de véhicules »¹⁰



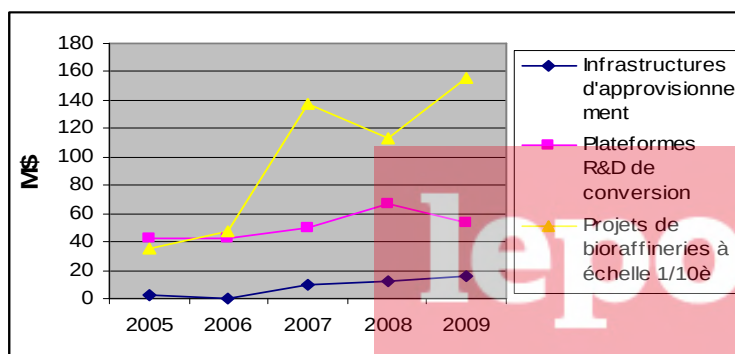
Source CAS d'après données DOE

Deux sous-programmes méritent une mention particulière :

- Le sous-programme « Biomasse et bio-raffineries » a pour objectif de transformer la ressource naturelle en biocarburants, bioproduits et bioénergie. Il contribue à la « Biofuel Initiative » lancée en 2006 dans le cadre de la démarche « Advance energy initiative » qui vise à obtenir en 2012 un carburant éthanol de 2^{ème} génération compétitif.

Les budgets par sujets montrent l'accent porté aux démonstrateurs préindustriels de raffineries.

Répartition du budget du sous-programme « Biomasse et bio-raffineries »

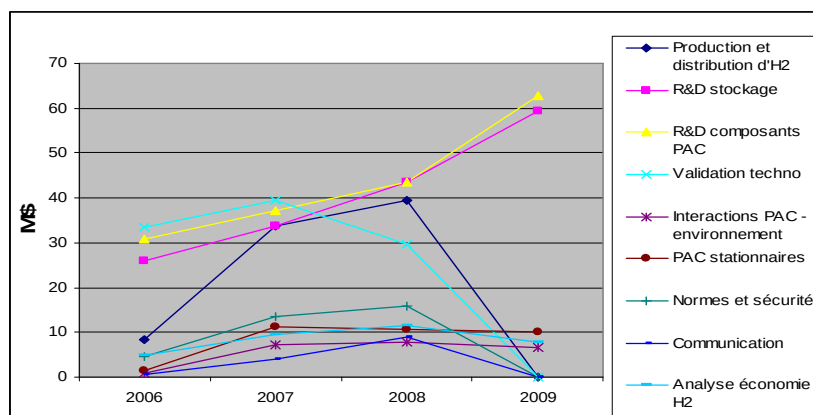


Source CAS d'après données DOE

- Le sous-programme « Hydrogène » fait l'objet d'un réalignement en 2008 sur les éléments critiques pour atteindre les objectifs de 2015. En particulier, les recherches sur le stockage doivent permettre de dépasser l'autonomie de 300 miles et des progrès sont nécessaires sur la réduction du coût des PAC grâce à des composants polymères.

¹⁰ Le programme reprendra en 2009 pour 31 M\$ d'activités du programme Hydrogène dans le but de créer des synergies entre les deux sujets.

Répartition du budget du sous-programme "Hydrogène"



Source CAS d'après données DOE

► Allemagne

La stratégie « High-Tech » du gouvernement fédéral est dotée d'un budget total de 15 milliards d'euros pour la période 2006-2009 pour le soutien de 17 champs thématiques. Le champ thématique « automobile et transport » reçoit dans ce cadre un total de 770 millions d'euros (5,1 % du budget), en 5^{ème} position en termes d'importance de budget.

Le gouvernement fédéral soutient l'introduction de carburants alternatifs et renouvelables et de technologies innovantes sur le marché. La mise en œuvre est prévue par étapes :

- à court terme : augmentation de l'efficacité des moteurs diesel et essence (mélange essence/diesel avec biocarburant selon quotas, quotas imposés et objectifs de mélange) ;
- à moyen terme : développement de propulsions combinées (technologies hybrides) ;
- à long terme : prépondérance de technologie hydrogène et piles à combustible.

C'est le programme « Mobilité et transport » (*Mobilität und Verkehr*) qui regroupe les différentes activités.

Cinq ministères y contribuent et complètent leurs actions :

- ministère fédéral de l'économie et de la technologie (BMW_i) : technologie et système ;
- ministère fédéral des transports, de la construction et du développement urbain (BMVBS), recherche sectorielle préparant les décisions politiques : transport en ville, logistique, infrastructures, plan vélo, politique intégrée ;
- ministère fédéral de l'enseignement et de la recherche (BMBF) : recherche fondamentale énergie et transports, matériaux, plantes ;
- ministère fédéral de l'environnement, de la protection de la nature et de la sécurité des réacteurs (BMU) : recherche environnementale ;
- ministère fédéral de la protection des consommateurs, de l'alimentation et de l'agriculture (BMELV) : matières premières renouvelables, carburants et matériaux biogènes, problématique des territoires agricoles.

Le 3^{ème} Programme « Mobilité et transport » (2008-2011, chef de file BMW_i) reprend les fondamentaux du champ thématique « automobile et transport » de la stratégie « High-Tech ». Il fait suite au 2^{ème} programme « Mobilité et transport » du BMW_i (budget : 380 millions d'euros pour la période 2000-2007). Dans le cadre du 3^{ème} programme, le BMW_i compte mettre à disposition plus de 50 millions d'euros par an (environ 220 millions d'euros entre 2008 et 2011).

Les trois piliers du programme sont :

- *logistique intelligente* : développement et mise à disposition de la mise sur le marché d'innovations conceptuelles et techniques pour la branche « logistique et transport » ;

- *mobilité de personnes au XXI^{ème} siècle* : problématiques de changement et protection du climat, prix des carburants, démographie, carburants alternatifs ;
- *infrastructure intelligente* : embouteillages, transport ferroviaire, sécurité du transport.

Depuis 2006, le gouvernement fédéral finance le développement des technologies de l'hydrogène dans le cadre du programme d'innovation nationale NIP à hauteur de 500 millions d'euros. Une somme au moins égale provient d'investissements privés, soit un total prévu de 1,4 milliard d'euros pour une période de 10 ans. C'est un programme-cadre pour nombre de projets de recherche, établi sur un modèle de partenariat de recherche public-privé (PPP).

Pour porter ce programme, a été créée en février 2008 l'organisation nationale de technologie hydrogène et piles à combustible NOW (*Nationale Organisation Wasserstoff*) en vue de prendre en main le pilotage complet du programme d'innovation de technologie hydrogène et PACs NIP (*H2&BZ-Innovationsprogramm*). Ce programme développe ces technologies pour des applications stationnaires, mobiles et portables.

Ce programme met en œuvre et développe la *Kraftstoffstrategie* (stratégie énergétique) du gouvernement.

La feuille de route technologique est la suivante :

2012 : réduction de 30 % de la consommation de carburant par le management de l'énergie des moteurs et l'hybridation ;
 2010 – 2015 : véhicules hybrides ;
 2015 : validation des systèmes PAC à hydrogène compétitifs, élargissement de la flotte automobile et des bus dans plusieurs régions et agrandissement du réseau de stations-service d'hydrogène pour ces flottes ;
 2020 : industrie allemande compétitive dans le domaine de l'hydrogène et des piles à combustibles ;
 2020 – 2030 : hydrogène et biocarburants de 2^{ème} génération.

Alliance pour l'innovation batterie Li-ion (LIB 2015)

Le 5 novembre 2007, l'« alliance pour l'innovation » des entreprises BASF, Bosch, Evonik, LiTec et Volkswagen s'est engagée à investir 360 millions d'euros dans la R&D sur la batterie lithium-ion pour les prochaines années. Les champs d'application sont le mobile et le stationnaire. Cette alliance met en réseau les compétences clés en Allemagne. Elle s'inscrit dans la stratégie « High-Tech » et sera complétée par des initiatives dans le domaine de la recherche fondamentale (Agence de moyens pour la recherche, DFG) et de la recherche institutionnelle (HGF).

► Chine

Les autorités chinoises, à travers principalement le ministère des sciences et des technologies (MOST) et la Commission nationale pour la réforme et le développement, mettent en place de nombreux programmes de recherche et plans de développement de l'industrie automobile chinoise en vue de répondre aux problèmes environnementaux et à la dépendance pétrolière, mais également pour contrôler cette industrie qui se veut être un des piliers de l'industrie chinoise.

- Le « *National medium to long term planning for scientific and technological development (2006-2020)* », publié en février 2006, inclut des sujets de recherche en lien avec l'automobile selon deux stratégies :

- La première, dite d'« évolution », consiste à mettre en œuvre des motorisations thermiques plus propres, essence et diesel (objectif : 30 % d'économie par véhicule d'ici 2020).
- La deuxième stratégie, dite de « révolution », consiste à développer les énergies alternatives, notamment le gaz naturel liquéfié (LNG) ou comprimé (CNG), les véhicules électriques, hybrides et, peut-être à plus long terme, à pile à combustible. Différents

programmes ont déjà obtenus des résultats notables. Ainsi, dans le cadre du « *National Clear Fuel Vehicle program* », plus de 200 000 véhicules au gaz ont été produits et 629 stations de distribution construites. Pékin dispose par exemple d'une flotte de près de 3000 bus CNG et de 32 stations-service au gaz. Dans le cadre du « *National Electric Vehicle Program* », des véhicules électriques à batterie sont en phase de production, des bus hybrides électriques en cours de démonstration (notamment à Pékin, Shanghai et Wuhan) et des véhicules à pile à combustible en cours de développement, pour être testés durant les jeux olympiques de Pékin en 2008.

- La NDRC (Commission nationale pour la réforme et le développement) a décidé d'encourager le développement et l'utilisation de sources d'énergies alternatives, à travers le « *Guidance Directory of the Industry Structure Adjustment* », publié en décembre 2007. Une des principales différences par rapport à la version 2004 du guide est l'absence du diesel parmi les énergies mises en avant par le gouvernement chinois. Sur le moyen terme, celui-ci a mis l'accent sur le développement des véhicules au gaz, qui permet d'atteindre les normes Euro 4 et 5 en termes d'émissions de polluants. On compte plusieurs milliers de bus au gaz (LNG et CNG) sur les routes chinoises. La solution au gaz devrait être remplacée, à plus long terme, par la solution hybride-électrique. D'autres énergies alternatives telles que les bioéthanol, les piles à combustible, attirent également l'attention du gouvernement chinois.

Biocarburants et éthanol

La Chine devrait produire 2 millions de tonnes de carburant éthanol d'ici 2010, selon le programme pour les énergies renouvelables mis en place par la NDRC au cours du XI^{ème} plan quinquennal (2006-2010), représentant ainsi 10 % des énergies utilisées (contre 7,5 % en 2005). La production devrait atteindre 10 millions de tonnes en 2020.

Dans un contexte d'inflation des prix agricoles, la fabrication des carburants éthanol à partir du maïs a rapidement engendré des difficultés d'approvisionnement et devrait être stoppée par le gouvernement chinois courant 2008. Le gouvernement recommande l'utilisation de pailles, de rafles de maïs, de pelures de pommes de terre pour produire de l'éthanol, ainsi que des graines de jatropha curcas, de pistache de Chine (*Pistacia chinensis* Bunge) et de coton pour produire des biodiesels. A ce jour, la production d'éthanol n'est pas rentable en Chine. La production de biodiesels pourrait atteindre 2 millions de tonnes en 2020.

Gaz naturel pour véhicules (GNV)

La solution au gaz est déjà utilisée, mais semble se limiter à une application publique (pour les bus et les flottes de taxis), notamment en raison de la difficulté de mettre en place un réseau de distribution et de fourniture du gaz. Les industriels chinois ne semblent pas non plus disposés à mettre en avant le développement des voitures au gaz.

Par ailleurs, les ressources de gaz naturel en Chine sont peu abondantes et ne permettront pas de remplacer le pétrole sur le long terme, puisqu'elles engendreraient une nouvelle dépendance énergétique. En effet, selon les prévisions, la demande de gaz naturel devrait atteindre entre 145 et 165 milliards de m³ en 2020, nécessitant un volume d'importation de gaz de plus de 30 %.

- Le ministère chinois des sciences et des technologies (MOST) a lancé le programme « 863 » (nommé suivant sa date de lancement, en mars 1986). Il s'agit d'un programme national de R&D dans le domaine des hautes technologies ayant pour objectif de créer une plate-forme de coopération entre les industriels, les universités et les instituts de recherche. La recherche concernant les véhicules hybrides, électriques et à pile à combustible fait l'objet de l'une des 7 priorités du programme 863 et a bénéficié d'une subvention de 800 millions RMB (environ 74 millions d'euros) du gouvernement central sur la période 2001-2005.

Le programme couvre 4 domaines :

- la définition de la politique, des réglementations et standards ;
- la construction de centres de test des véhicules électriques et à hydrogène ;
- la mise en place de chaînes d'assemblage pour les bus et voitures à pile à combustible ;
- la recherche dans les convertisseurs DC/DC, les moteurs électriques et à pile à combustible...

• En ce qui concerne la coopération internationale, la Chine est membre de l'International Partnership for an Hydrogen Economy. Elle bénéficie de l'aide du Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) et du Fonds pour l'environnement mondial (FEM) de la Banque mondiale, pour un projet lancé en novembre 2007 visant à développer les piles à combustible dans les transports. Les résultats de ce projet, évoqués lors des Jeux Olympiques de 2008 à Pékin, seront présentés lors de l'Exposition universelle de 2010 à Shanghai. De même, le FEM a sélectionné Pékin et Shanghai pour le « Bus Fuel Cell Demonstration Project ». Dans le cadre de ce projet, le FEM a parrainé le déploiement de six autobus à piles à combustible à hydrogène et d'une station de remplissage à Pékin et Shanghai. Le projet est financé à 18 M US\$ par le FEM, 15 M US\$ par le gouvernement chinois, 7,5 M US\$ par chacune des villes et 6 M US\$ par des entreprises privées.

Sur le plan bilatéral, la Chine coopère avec les États-Unis, l'Union européenne, le Canada, l'Italie, la France et l'Allemagne.

Concernant la coopération Chine-Union Européenne, un « partenariat » sur le changement climatique a été instauré lors du sommet UE-Chine de septembre 2005, avec un engagement des deux parties à renforcer leur collaboration dans le domaine des sciences et de la technologie, notamment sur le plan de l'hydrogène et des piles à combustible.

La coopération franco-chinoise dans le domaine des voitures propres concerne plus particulièrement les véhicules électriques. Les objectifs sont de mettre en place les conditions réglementaires, technologiques, industrielles et d'utilisation des véhicules à motorisation électrique, de définir les nouveaux services de déplacement des personnes et de livraison, de créer un réseau scientifique commun sous l'égide du CNRS et de l'Académie des Sciences chinoise et des deux ministères en charge de la recherche et, enfin, d'identifier, stimuler et renforcer les partenariats des coopérations industrielles franco-chinoises afin de répondre au besoin des marchés français et chinois.

4. Le stockage de l'énergie

4.1. Le stockage de l'énergie dans un véhicule doit respecter des conditions très contraignantes

Le stockage de l'énergie est l'un des principaux facteurs à considérer pour évaluer les différentes évolutions possibles des motorisations automobiles. En effet, le réservoir d'énergie d'une automobile doit répondre à de multiples contraintes pour satisfaire au besoin de mobilité. Parmi ces contraintes, les principales sont :

- *l'autonomie que ce réservoir d'énergie doit fournir au véhicule* : à l'heure actuelle, la plupart des automobiles dispose d'une autonomie supérieure à 500 km, ce qui les rend complètement polyvalentes (usages urbains/périurbains, mais aussi longs trajets sur autoroutes) ; néanmoins, des autonomies comprises entre 100 et 200 km seraient suffisantes pour des personnes qui utilisent leur automobile sur des courtes distances ;
- *le temps de remplissage de ce réservoir d'énergie* : les automobilistes ont l'habitude de recharger rapidement (moins de 5 minutes) leur réservoir de carburant liquide ; une durée beaucoup plus longue serait considérée comme une régression insupportable ;

- la sûreté du stockage d'énergie, aussi bien lors de la recharge que de l'utilisation : des paramètres tels que la pression de stockage à l'intérieur du réservoir, la température, le risque d'explosion influent sur le niveau de sûreté de telle ou telle technologie ;
- les critères de masse, d'encombrement, de coût des différents modes de stockage : en effet, l'essence et le diesel constituent aujourd'hui une solution de référence, avec un réservoir de volume et de masse peu contraignants (approximativement une cinquantaine de litres pour une cinquantaine de kilos) ;
- le coût de l'énergie : aujourd'hui, avec l'essence et le gazole, l'automobiliste peut remplir un réservoir de 50 litres pour environ 75 euros (en France et, à peu de choses près, dans les autres pays européens) ; avec un véhicule consommant 7 l/100 km, l'automobiliste dépense donc environ 10 € de carburant tous les 100 km.

4.2. Le carburant liquide aux conditions habituelles est de loin le plus apte au stockage dans un véhicule

La plupart des technologies de stockage comparées ci-dessous ont été explorées dans le passé par l'industrie automobile et continuent de faire l'objet d'améliorations ou de travaux de recherche à des degrés divers.

Les différents modes de stockage examinés sont les suivants :

- carburants liquides à température et pression ambiantes tels que l'essence, le gazole ou d'autres carburants liquides obtenus à partir de charbon, de gaz, de biomasse (voir encadré ci-dessous)...
- carburant liquide à température ordinaire et sous faible pression tel le gaz de pétrole liquéfié (GPL),
- carburant liquide à basse température tel que l'hydrogène liquéfié à -253°C (H_2 liquide),
- gaz comprimés à haute pression tels que le gaz naturel pour véhicule (GNV) et l'hydrogène gazeux (H_2 gaz),
- stockage électrochimique (accumulateurs).

Les biocarburants : le vent en poupe, mais un débat à éclaircir et une rationalisation à opérer

Le développement des biocarburants – le terme le plus approprié serait *agro-carburants* – est soumis à des tensions très contradictoires. La situation actuelle résulte de choix techniques, économiques et politiques faits à une période donnée, période qui ne représente qu'une étape, en particulier sur le plan du développement technologique. *Il n'y a pas de « solution » claire et surtout « définitive ».*

Le bilan concernant les émissions de gaz à effet de serre est mitigé, en particulier pour les filières utilisant une des ressources énergétiques fossiles dans les usines de transformation de la matière première agricole en carburant. Si leur développement s'opère aux dépens de prairies ou de jachères, cela pourrait alourdir ce bilan pour plusieurs années (diminution du stock de carbone du sol). Du point de vue de l'environnement général, les impacts des activités agricoles sont pour l'instant insuffisamment maîtrisés ; ils ne sauraient être actuellement négligés dans les choix. À l'étranger, la conduite de ces activités peut se faire aux dépens d'écosystèmes à préserver. Enfin, les engagements physiques d'incorporation peuvent être tenus à des niveaux assez élevés dans l'état actuel des connaissances et des caractéristiques des filières techniques choisies, mais il faut admettre que le bilan mitigé et les disponibilités en surface ne permettent pas de satisfaire les enjeux sur le long terme en leur état actuel.

Du point de vue de la réglementation et de la montée en puissance de la filière, les situations actuelles observées sur les marchés et sur les soutiens aux filières de première génération sont forcément transitoires : les équilibres de marché et les maturités techniques ne sont pas atteints, des gains économiques de productivité de 30 % de l'étape de transformation sont envisagés par la profession. C'est pourquoi une grande vigilance doit être apportée aux dérives des outils d'incitation (destinés à dépasser les obstacles dus aux défaillances de marché, voire mis en place pour susciter une impulsion au démarrage de cette production) et à leur obsolescence. **Une pause dans les investissements de production paraît nécessaire, jusqu'à l'émergence de biocarburants de deuxième génération, c'est-à-dire utilisant la plante tout entière, développement qui devrait mobiliser en outre de façon plus souple les surfaces agricoles ou forestières.**

L'expérience actuelle et le perfectionnement des outils d'écobilan doivent être mis à profit pour déterminer des critères d'incitation plus sélectifs sur les performances d'émission en CO_2 et environnementales de la filière complète.

L'évolution technologique de la capacité française de production doit donc être favorisée à travers des outils ad hoc :

- *Le soutien à la recherche et au développement de biocarburants transformant la composante ligno-cellulosique des végétaux* (que ce soit pour des plantes alimentaires ou non alimentaires) est à privilégier. C'est important par rapport à la réalité de la biomasse qui sera disponible à l'avenir, dans laquelle la production forestière pourrait être mieux associée. Certes, les écobilans actuels sur cette deuxième génération restent très spéculatifs ; la catalyse et le génie enzymatique, entre autres pistes, devraient toutefois permettre d'envisager des procédés de transformation plus sobres en énergie.
- *Les perspectives d'augmentation du rendement énergétique* – ou des performances en termes de CO₂ évité – à l'hectare sont importantes ; ce sont des critères intéressants de choix des filières, mais les impacts d'une intensification doivent être parallèlement maîtrisés.
- C'est plus par *le choix judicieux de la production* (nouvelles espèces de préférence pluriannuelles pour éviter les impacts des intrants agricoles par exemple) que par une ré-intensification forte des pratiques que l'on doit progresser. Les analyses doivent anticiper les conséquences environnementales du regain d'intérêt pour les pratiques agricoles intensives et en monoculture, et de leurs conséquences (eau, sols, utilisation de produits phytosanitaires...). Naturellement, ce regain intensif, implicitement accentué par la hausse du débouché bioénergétique – mais aussi par les perspectives mondiales en alimentation –, doit amener à maîtriser de façon accrue les impacts de l'agriculture sur l'environnement en général, et pas seulement sur les productions énergétiques.
- **Le soutien fiscal** (par le contribuable), qui coexiste avec l'obligation réglementaire existante d'incorporation (aux frais du consommateur) doit être supprimé.

Enfin, en l'état des filières, *le principal facteur de limitation de la production de biocarburants est la surface cultivable disponible*. Ces productions énergétiques peuvent venir en concurrence de productions alimentaires. Défrichements et changements de production sont largement observables dans le monde, induisant de grandes instabilités sur les marchés agricoles. Il ne faut certes pas revenir à des méthodes obsolètes d'orientation des productions agricoles, mais la question de la régulation des affectations des surfaces se pose à grande échelle.

Les comparaisons portent sur les caractéristiques des différents modes de stockage de l'énergie : leur état physique, leur pression de stockage, la densité d'énergie associée (par unité de masse et par unité de volume), leur durée approximative de remplissage et, enfin, le rendement « du réservoir à la roue »¹¹ associé (rendement calculé hors énergie de remplissage du réservoir, c'est à dire, le cas échéant, hors énergie de compression ou de charge/décharge des batteries), qui va déterminer l'autonomie procurée à la voiture. Les moteurs utilisés sont des moteurs thermiques, sauf pour l'électricité et l'hydrogène gazeux lorsqu'il est associé à une pile à combustible et donc à un moteur électrique.

lepoint.fr

¹¹ Rendement correspondant à l'énergie prélevée dans le stock embarqué

	Essence	Diesel	Electricité	GNV	GPL	H ₂ gaz	H ₂ liquide
Etat	Liquide	Liquide	Electro-chimique	Gaz	Liquide	Gaz	Liquide
Température (°C)	Ambiante	Ambiante	de ambiante à 300°C	Ambiante	Ambiante	Ambiante	- 253°C
Pression de stockage	Ambiante	Ambiante	Ambiante	> 200 bars	5 à 25 bars	700 bars ¹	5 bars
Energie massique en Wh / Kg²	11 900	11 800	30 - 200	2 200	7 080	1200	500-1000
Energie volumique en Wh / litre	8 900	9 900	70-300	2 500	4 300	450	1 800
Durée de remplissage	5 mn	5 mn	4-6 h ³ 25-40 mn ⁴ < 10 mn ⁵	5 mn	5 mn	5 mn ⁶	5 mn
Rendement du réservoir à la roue⁷	30-35 %	40-42 %	80-85 %	20-38 % ⁸	30-35 %	~50 % ⁹	30-35 % ¹⁰

¹ les valeurs de 200 à 350 bars, un temps considérées, ne sont plus d'actualité ; pour le futur, des pressions pouvant aller jusqu'à 1200 bars peuvent être envisageables

² masse du réservoir incluse

³ charge sur prise électrique standard : puissance 3,7 kW, tension 230V et ampérage 16A (source : EDF)

⁴ charge sur prise électrique de forte puissance, 35 kW (source : EDF)

⁵ cas d'un échange batterie en station (sources : EDF, exploitation de bus électriques, et Project Better Place)

⁶ remplissage ou échange du réservoir d'hydrogène

⁷ à l'optimum du fonctionnement du moteur

⁸ selon le type de motorisation

⁹ 40 % en cas de combustion directe de l'hydrogène

¹⁰ combustion directe de l'hydrogène

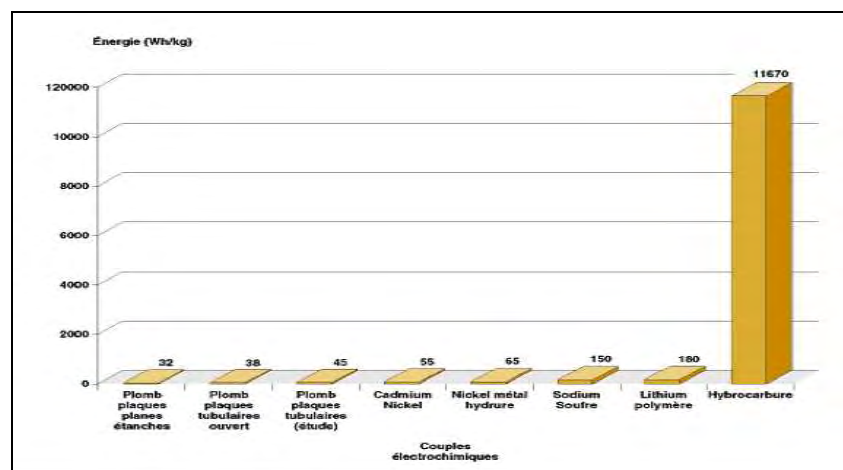
Sachant que la compacité est une contrainte clé dans l'industrie automobile, on peut comparer ces différents modes de stockage de l'énergie en prenant pour référence un « réservoir » d'énergie de 60 litres et en comparant les masses, durées de recharge et autonomies d'un tel réservoir en fonction du mode de stockage :

Comparaison des différents modes de stockage de l'énergie – cas d'un « réservoir » de 60 litres							
	Essence	Diesel	Electricité	GNV	GPL	H ₂ gaz	H ₂ liquide
Poids de stockage (kg)	45	50	90-150	70	36	90-100	100-200
Durée de recharge	5 mn	5 mn	6 h ¹	5mn	5 mn	5 mn	5mn
Autonomie fournie	~ 900 km	~1000 km	30 à 120 km	160 km	430 km	200 à 300 km	~180 km

¹ Cinq minutes dans le cas où la recharge s'opère par changement de batterie

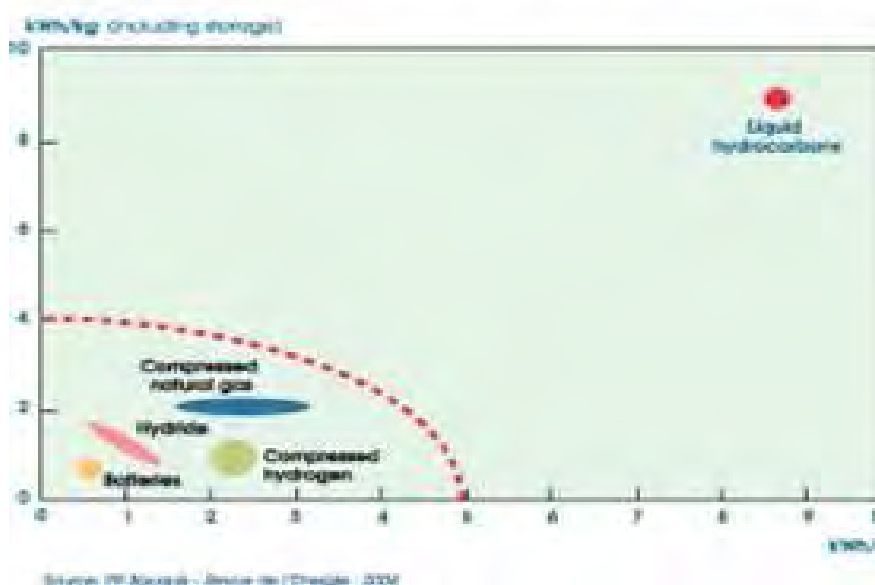
Ces comparaisons illustrent le bon compromis qu'ont toujours représenté les carburants liquides à température et pression ambiantes (essence, diesel) : ils ne posent pas de problème de stockage, ont une forte densité d'énergie aussi bien par unité de volume que par unité de masse, même s'ils offrent un rendement « du réservoir à la roue » limité.

Comparaison des énergies massiques des couples électrochimiques et de l'essence



Source : CEA

Densité énergétique des hydrocarbures liquides par rapport aux autres sources d'énergie Liquid hydrocarbons: unequalled energy compactness



Source : IFP

Un carburant alternatif liquide serait l'hydrogène sous forme liquide. Celui-ci souffre néanmoins de nombreux handicaps : il doit être stocké à -253°C , la liquéfaction de l'hydrogène est une opération à très faible rendement (environ 40 % d'énergie est perdue lors de cette opération), il subit des pertes par évaporation de 3 % par jour¹², ce qui peut constituer une source d'explosion si l'hydrogène qui s'évapore (« boil off ») est simplement rejeté à l'extérieur du véhicule, notamment dans une enceinte close ou confinée (garage). C'est pourquoi cette technologie n'a pas aujourd'hui dépassé le stade de prototype, et aucun constructeur n'a jusqu'à présent annoncé une commercialisation future à grande échelle.

D'autres alternatives sont représentées par les carburants gazeux : GPL, GNV et $\text{H}_{2\text{gaz}}$. Les deux premiers ont atteint le stade de la production de masse (150 000 véhicules roulaient au GPL en France en 2006, 750 000 véhicules roulaient au GNV en Europe en 2007). Aucun des trois ne constitue une alternative pour résoudre les problèmes géopolitiques que posent les hydrocarbures, car ils sont issus du gaz et du pétrole. Enfin, l' $\text{H}_{2\text{gaz}}$ ne serait un carburant gazeux alternatif que s'il était produit à partir de centrales nucléaires directement ou par

¹² Source : « hydrogène, énergie de demain ? », ECRIN

électrolyse ; il nécessite des pressions de stockage énormes (de l'ordre de 700 bars) qui rendent problématique son usage dans des véhicules destinés au grand public, ne serait-ce que pour des raisons de sécurité.

A ces carburants gazeux et liquides, l'électricité offre une alternative ou, plus précisément, compte tenu des technologies disponibles, un ensemble d'alternatives pour les trajets automobiles de courtes distances, dans la mesure où cette électricité n'est pas produite à partir d'hydrocarbures.

Les différentes technologies de stockage d'énergie par voie électrochimique sont décrites plus loin dans le rapport ainsi que les évolutions récentes ayant un impact sur les stratégies des entreprises automobiles.

Les contraintes liées au stockage des différentes sources d'énergie conduisent à privilégier :

- le stockage sous forme liquide à pression et température ambiantes (diesel, essence ou autre carburant liquide provenant du charbon, du gaz ou de la biomasse)
- le stockage électrochimique dans des batteries.

5. Les contraintes environnementales sont de plus en plus rigoureuses dans l'Union européenne

Les contraintes environnementales dans l'Union européenne relèvent de deux types de réglementations : les normes d'émission « Euro » qui fixent les limites maximales des rejets dans l'atmosphère pour les véhicules roulants et des normes concernant les émissions de CO₂ prises dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique (le CO₂ n'est pas considéré comme un gaz polluant direct pour l'homme et les animaux car il n'est pas toxique dans l'atmosphère).

5.1. Les normes « Euro » limitent les rejets polluants des véhicules particuliers

Les normes d'émission « Euro » fixent les limites maximales de rejets polluants pour les véhicules roulants neufs. L'objectif est de réduire la pollution atmosphérique directement due au transport routier.

La législation européenne est de plus en plus sévère en particulier sur les rejets des moteurs diesel. Les normes d'émissions « Euro » se succèdent depuis la fin des années 1980. La mise en œuvre se fait à des échéances légèrement décalées pour les moteurs diesel et à essence :

- Euro 0 : véhicules mis en service après 1988 ;
- Euro 1 : véhicules mis en service après 1993 ;
- Euro 2 : véhicules mis en service après 1996 ;
- Euro 3 : véhicules mis en service après 2000 ;
- Euro 4 : véhicules mis en service après 2005 ;
- Euro 5 : applicable à partir de septembre 2009 en ce qui concerne la réception (véhicule tout type) et de janvier 2011 en ce qui concerne l'immatriculation et la vente des nouveaux types de véhicules ;

- Euro 6 : applicable à partir de septembre 2014 en ce qui concerne la réception (véhicule tout type) et de septembre 2015 en ce qui concerne l'immatriculation et la vente des nouveaux types de véhicules.

Les deux tableaux suivants indiquent de façon schématique la masse limite tolérée des émissions en mg/km, selon le type de motorisation :

Véhicules à moteur diesel :

Norme	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5
Oxydes d'azote (NO _x)	-	700	500	250	180
Monoxyde de carbone (CO)	2720	1000	640	500	500
Hydrocarbures (HC) + NO _x	970	900	560	300	230
Particules (PM)	140	100	50	25	5

Véhicules à moteur essence ou fonctionnant au GPL ou au GNV :

Norme	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5
Oxydes d'azote (NO _x)	1000	500	150	80	60
Monoxyde de carbone (CO)	2800	2200	2200	1000	1000
Hydrocarbures (HC)	1000	500	200	100	100
Particules (PM)	-	-	-	-	5 ^(*)

^(*) Uniquement pour les voitures à essence à injection directe fonctionnant en mélange pauvre

Les consommations mesurées suivant les normes Euro ne sont pas celles qu'un automobiliste va constater :

- Les normes Euro reposent sur des mesures théoriques faites sur des véhicules parcourant des cycles normalisés ; ces véhicules sont soigneusement préparés, ils sont optimisés pour les tests, les moteurs sont réglés pour respecter la norme dans le cadre légal.
- Les consommations des équipements qui ne concourent pas à la propulsion du véhicule ne sont pas prises en compte : il s'agit des consommations relatives au chauffage, à la climatisation ou à tous autres accessoires électriques (essuie-glaces, éclairage, dégivrage, sonorisation...), lesquelles sont loin d'être négligeables.
- Les vitesses du véhicule sur le cycle normalisé peuvent être très différentes de celles que choisit l'automobiliste dans la vie courante. Or la consommation augmente très rapidement quand la vitesse augmente, spécialement au-delà de 100 km/h.
- Le mode de conduite du conducteur peut engendrer des surconsommations notables, pouvant atteindre 40 % par rapport à une conduite économe.
- Les essais normalisés ne prennent pas en compte la variation de charge des batteries qui résulte de la propulsion électrique pendant les essais (les véhicules sont présentés avec une batterie pleinement chargée), ce qui diminue artificiellement la consommation normalisée des véhicules hybrides.

Il n'en demeure pas moins que ces normes permettent de comparer les émissions des différents modèles de véhicule et de contraindre les constructeurs à réduire les émissions de leurs véhicules au fil du temps. Elles forcent parfois les constructeurs à modifier les technologies employées ; aussi contestent-ils les valeurs limites ou demandent-ils des délais complémentaires pour leur mise en œuvre.

Il faut cependant comparer les modèles comparables ; ainsi la comparaison entre la consommation normalisée d'un véhicule thermique et celle d'un véhicule électrique ne tient pas compte de ce que l'énergie de chauffage de l'habitacle du premier est « gratuite » – car obtenue à partir de l'énergie calorifique des gaz d'échappement – alors qu'elle est prélevée sur la batterie pour le second, et représente donc une consommation supplémentaire.

Les moteurs diesel produisent des particules, quasiment absentes des émissions des voitures à essence. Or, il est maintenant de plus en plus prouvé que les particules les plus fines – et aussi les moins massives – sont les plus toxiques. La norme ne fixant que la masse maximale autorisée des particules par kilomètre, elle favorise en priorité l'élimination des particules les plus grosses, qui sont les moins toxiques. Une évolution de la norme est cependant prévue pour l'intégrer dans le cadre d'Euro 5+.

Enfin il faut avoir présent à l'esprit que la lutte pour la réduction de certains polluants (NO_x, CO) va à l'encontre des actions visant par ailleurs à limiter les émissions de CO₂ et que les compromis vont être de ce fait de plus en plus difficiles à obtenir entre les différentes réglementations.

5.2. Les émissions de CO₂ des véhicules particuliers sont traitées dans le cadre global de la lutte contre le changement climatique

Remarque : les orientations des trois chapitres suivants et les évaluations qui sont proposées sont partiellement inspirées de la brochure publiée par le Sénat : « Comment limiter les émissions de CO₂ des voitures ? » – Les rapports du Sénat ; Fabienne KELLER, sénateur ; mai 2008

Depuis une dizaine d'années, devant le renforcement des certitudes scientifiques sur la menace d'un changement climatique, l'Union européenne a multiplié ses engagements en vue de réduire ses émissions de gaz à effet de serre, en particulier de celles de gaz carbonique (CO₂) qui contribuent à elles-seules pour plus de 80 % du réchauffement de la planète.

Le protocole de Kyoto, adopté en 1997, avait constitué, au niveau mondial, un tournant symbolique en engageant les signataires à réduire les émissions de CO₂ de 5,2 % d'ici 2012 par rapport à 1990 ; l'Union européenne se fixait même un objectif plus contraignant de 8 %. L'évolution à mi-parcours a montré que cet engagement ne sera pas tenu, malgré les présentations rassurantes de la Commission. Il est avéré que les émissions de CO₂ de l'Europe des quinze ont augmenté de 6,5 % entre 1990 et 2004, avec une contribution de près de la moitié des émissions actuelles de l'ensemble constitué par l'Allemagne, le Royaume-Uni et l'Italie.

Face à cette évolution très préoccupante aux plans environnemental et politique, l'Union européenne a adopté, au cours des derniers mois, une série de mesures sectorielles plus restrictives :

- Lors de sa réunion du 9 mars 2007, le Conseil européen prenait l'engagement de diminuer de 20 % les émissions totales de gaz à effet de serre d'ici 2020 par rapport à celles de 1990.
- Fin 2007, la Commission a adopté une série de propositions de règlements sur l'utilisation des véhicules : normes concernant la qualité des carburants ; normes d'émissions polluantes des véhicules utilitaires (Euro 6). Mais ces normes portent essentiellement sur les émissions d'oxyde d'azote (NO_x) et de particules pour les poids lourds et non sur les émissions de CO₂. Une proposition de règlement portant sur les émissions de CO₂ des voitures particulières neuves était cependant soumise à discussion.

- En janvier 2008 a été adopté le « paquet énergie-climat » initié par le Conseil européen du 9 mars 2007, lequel rappelle l'engagement de réduire globalement de 20 % d'ici 2020 les émissions de gaz à effet de serre sur la base de la référence 1990.

5.3. Les propositions européennes de contrôle des émissions de CO₂ des voitures particulières sont controversées

Le contrôle des émissions de CO₂ des voitures particulières est au cœur de l'engagement européen contre le changement climatique. Le secteur du transport routier consomme, en effet, presque exclusivement des produits pétroliers et les voitures particulières représentent en Europe 16 % des émissions totales de CO₂ (en France près de 18 %).

Outre cette raison technique évidente, la mobilisation européenne s'explique aussi par la faible efficacité des engagements volontaires. Aussi dès 1995 puis en 1999, la Commission avait adopté une stratégie, puis une recommandation visant à réduire les émissions de CO₂ des voitures particulières neuves à une époque où le niveau moyen de leurs émissions se situait au niveau de 186 gCO₂/km. L'objectif fixé à l'horizon 2005 (ou au plus tard 2010) était de 120 g/km. Cette stratégie a été complétée en 2000 par une décision du Parlement européen et du Conseil établissant un programme de surveillance des émissions de CO₂ des voitures particulières. De leur côté, les constructeurs, par la voie d'un engagement volontaire de l'association des constructeurs européens d'automobiles, avaient repoussé cette limite jusqu'en 2012, mais s'étaient fixé comme objectif intermédiaire de parvenir à 140 gCO₂/km d'ici 2008.

Les objectifs pour 2005 et 2008 n'ont pas été tenus et ceux pour 2010 ne le seront pas plus. Une diminution moyenne a bien été constatée, mais bien en deçà des objectifs affichés : le niveau moyen en Europe a été réduit de 186 g/km en 1995 à 160 g/km en 2006. Le mouvement de baisse, très net dans les années 1990, s'est progressivement ralenti ces dernières années.

En fait, cette diminution des émissions individuelles des véhicules a été plus que compensée, globalement, par les augmentations du parc automobile et du trafic en relation directe avec l'évolution du niveau de vie, notamment dans les nouveaux Etats membres. *La réduction des émissions individuelles, calculée en moyenne au niveau européen, a été beaucoup plus faible que prévu : les émissions dues au transport individuel routier ont augmenté de plus d'un quart entre 1990 et 2004 alors même que l'Union européenne parvenait à stabiliser ses émissions globales de CO₂.*

Face à ce constat décevant, la Commission a mis en discussion une proposition de règlement fixant une norme d'émission pour les voitures particulières : l'objectif moyen valable pour l'ensemble de l'Union européenne est fixé à 120 grammes d'émission de CO₂ par kilomètre à l'horizon 2012. Ce seuil, qui s'applique aux véhicules neufs vendus et immatriculés en Europe (productions européennes et importations), inclut une limitation principale des émissions directes (130 g/km) et une réduction supplémentaire de 10 g/km liée aux mesures d'accompagnement (pneumatiques, climatisation...). Il correspond à une moyenne calculée sur l'ensemble des émissions de CO₂ des véhicules vendus en Europe, et non pas à une norme unique par véhicule. Chaque constructeur se voit fixer une cible propre en fonction des caractéristiques liées aux types de véhicules qu'il fabrique. Cette proposition de règlement, qui assortit le dispositif de pénalités financières croissant avec le temps à partir de 2012, induira donc des regroupements et des alliances, souvent artificielles, pour éviter les imputations par type de modèle ou entreprise par entreprise. Les décisions industrielles de ces dernières années illustrent déjà sans doute des stratégies anticipatrices de mise progressive en

conformité des gammes de véhicules (Classe « A » pour Mercedes, rachat de Mini Cooper par BMW...).

Cette proposition de règlement est actuellement très controversée :

- ***En premier lieu, la proposition européenne risque d'induire des distorsions de concurrence majeures entre constructeurs.***

En apparence, elle semble favoriser les constructeurs mettant sur le marché des véhicules compacts de petite et moyenne gammes, pour lesquels la France est bien placée : d'une part, le marché français est plutôt orienté vers des voitures moyennes peu consommatrices et donc peu émettrices de CO₂ ; d'autre part, les constructeurs français ont consenti de gros efforts pour réduire les émissions de leurs véhicules. Ainsi le niveau moyen d'émission de CO₂ des voitures mises en circulation en France en 2007 est de 149 g/km pour une moyenne européenne de 160 g/km ; les deux constructeurs Peugeot PSA et Renault enregistrent de bons résultats avec respectivement 140 et 143 g/km.

A titre de comparaison, un monospace consomme et rejette environ 20 g de plus qu'une berline classique, un modèle de voiture haut de gamme allemand à vocation sportive dégage 300 g/km et un gros « 4*4 » jusqu'à près de 350 g/km !

Le problème naît du fait que, pour éviter la contrainte absurde d'une norme d'émission unique pour tous les modèles (donc systématiquement dépassée pour les gros modèles), la proposition de règlement prévoit des cibles différentes en fonction des caractéristiques des gammes offertes par les constructeurs, notamment en fonction de la masse des véhicules. Ainsi la norme applicable aux véhicules de la gamme Peugeot serait de 126 g/km, de 127/128 g/km pour Renault, mais jusqu'à 145 g/km pour certains constructeurs allemands, voire au-delà. Un débat très technique s'est donc engagé sur *les conditions d'équité économique de la proportionnalité de la contrainte* (« pente de droits d'émission ») qui paraissent aujourd'hui favoriser les véhicules lourds et puissants ; les bénéficiaires sont les intérêts industriels d'un pays particulier très attaché à un certain mode de mobilité et, surtout, à l'exportation de puissants véhicules de luxe particulièrement prisés dans des pays très solvables et peu soumis à des contraintes de circulation et d'environnement (les ventes à l'exportation des trois grands constructeurs allemands Volkswagen/Audi, BMW et Mercedes contribuent pour une part significative à l'excédent de la balance commerciale allemande).

Au final les constructeurs français, mais aussi italiens, risquent de se retrouver plutôt en situation difficile :

- Les seuils de rejet autorisés, plus bas pour les petits véhicules, se situent dans une zone où *les progrès marginaux* en termes de consommation et d'émission *sont beaucoup plus difficiles et coûteux à obtenir* (il est plus facile d'améliorer un véhicule polluant qu'un véhicule bénéficiant déjà de bonnes performances).
- *Les possibilités de répercussion des coûts de réduction des émissions* (typiquement 1000 euros pour un véhicule) *sont bien moindres* sur des véhicules de petite cylindrée que sur des modèles de luxe qui bénéficient de marges supérieures *compte tenu du prix de vente*.
- *Les pénalités, qui intègrent dans leur calcul le nombre de véhicules produits, seront d'autant plus lourdes* que le groupe concerné a une production importante, ce qui n'est pas le cas des constructeurs spécialisés dans les niches de voitures puissantes.
- Enfin, la capacité d'un groupe ciblant sa production majoritaire sur les véhicules de moyenne gamme aura plus de difficultés qu'un spécialiste de la voiture de luxe à *trouver des opportunités d'alliance* avec d'autres constructeurs généralistes de véhicules peu émetteurs pour constituer des « pools » équilibrés vis-à-vis des contraintes réglementaires européennes.

Il y a lieu de ce fait de craindre *de sérieuses distorsions de concurrence*, quoique s'en défende la Commission européenne, d'autant plus que d'autres clauses incluses dans la proposition communautaire (notamment l'exonération des micro-producteurs produisant moins de 10 000 véhicules par an) peuvent apporter d'autres perturbations du côté de l'importation de voitures neuves étrangères ; **les enjeux industriels peuvent être à l'avenir considérables.**

- ***Ensuite, la proposition européenne ne touche pas au parc existant et risque même d'avoir des effets retardateurs sur le renouvellement des flottes.***

Toute réglementation visant les constructeurs n'encadre que la production de véhicules neufs et ne touche pas l'ensemble du parc automobile. Or tant l'obsolescence des modèles anciens que la dégradation des performances de tout véhicule du fait de l'usure créent un écart parfois considérable entre les derniers modèles mis sur le marché et les flottes anciennes, bien plus importantes en nombre mais aussi les plus polluantes : en France le parc global se situe autour de 175 gCO₂/km alors que le marché du neuf est passé en dessous de 150 g/km.

La proposition de règlement européen, en s'attaquant exclusivement au marché du neuf et à l'échelle du constructeur, qui verra ses coûts inévitablement se renchérir, *n'incite guère au renouvellement du parc*, voire peut même le retarder dans un contexte de pouvoir d'achat du consommateur en baisse. Le principe du *bonus/malus*, qui respecte davantage la liberté sous contrainte des constructeurs, mais qui oriente directement les choix de l'acheteur, est, de ce point de vue, d'autant plus efficace qu'il peut également influencer sur le très important marché d'occasion, dès lors que les pénalités seraient imposées annuellement et pas seulement au moment de la première acquisition du véhicule neuf.

- ***Enfin la proposition de réglementation européenne repose sur une approche partielle.***

Son champ d'application ne concerne que les véhicules particuliers (en France : 52 % des émissions globales de CO₂ du secteur des transports), à l'exclusion des véhicules utilitaires légers (16 %) et des poids lourds (25 %). Or la réglementation des pollutions émanant des poids lourds, des autobus et autocars ainsi que des véhicules utilitaires légers (VUL) est beaucoup moins avancée.

L'absence de réglementation des véhicules utilitaires légers, dont les caractéristiques, notamment de motorisation, se rapprochent de celles des voitures particulières, est la plus surprenante alors même que, en France, le volume des émissions de CO₂ émanant des VUL a plus que doublé en vingt ans (de 9,6 à 20 millions de tonnes entre 1985 et 2005) ! Une proposition a cependant été déposée par la Commission européenne en début 2007.

En définitive un plan d'ensemble de lutte contre les émissions de CO₂ du secteur routier dans sa globalité aurait donné plus de sens à l'action européenne et permettrait, par souci de cohérence et d'équité, en dépit des implications sociales et économiques propres au secteur du fret, de mieux faire accepter les nouvelles contraintes fortes soit sur les constructeurs, soit sur l'acheteur qui, au final, doit dans tous les cas assumer les surcoûts de l'innovation.

5.4. L'initiative française du bonus/malus s'est révélée efficace à court terme et serait une incitation permanente puissante si le malus devenait annuel

Contrairement à l'approche européenne, *la logique française du bonus/malus*, récemment mis en place à la suite du Grenelle de l'environnement, est, du point de vue de la cohérence et de l'efficacité, bien plus performante, car elle associe, au niveau de l'acheteur, les possibilités

d'une aide ou d'une pénalité, surtout dans la version en projet en 2008 qui prévoit un malus **annuel** (« vignette » ou « éco-taxe ») pour certains des véhicules les plus polluants. Les constructeurs sont bien évidemment impliqués indirectement dans le dispositif puisqu'ils seront bien obligés de faire évoluer leurs gammes et les caractéristiques de leurs modèles en fonction des orientations d'achat.

Le dispositif est le suivant : les voitures neuves émettant entre 131 et 160 gCO₂/km sont payées au prix nominal ; les voitures offrant des émissions inférieures bénéficient d'une prime versée par l'Etat, d'autant plus importante que les émissions sont faibles : 200 € pour les véhicules émettant entre 121 et 130 g, 700 € pour la plage 101 à 120 g... Par contre les voitures fortement émettrices sont pénalisées par une taxe augmentant avec les émissions : 200 € pour la plage d'émission 161-165 g, 750 € pour la plage 166-200 g, jusqu'à 2500 € pour les véhicules émettant plus de 250 g...

L'expérience d'une année montre – d'ailleurs au détriment des finances de l'Etat... – que le dispositif a été efficace à *court terme* puisque le marché français a été modifié de façon sensible en faveur des petits véhicules les moins polluants : gain de dix points de marché des ventes de véhicules d'émissions inférieures à 130 g/km (de 30 % en 2007 à 40 %) et perte de dix points des ventes de véhicules émettant plus de 160 g (de 24 à 14 %). Il faut cependant être prudent sur le plus long terme car ce type de dispositif – comme l'avait montré il y a quelques années l'instauration de la « prime à la casse » – crée des effets d'aubaine importants qui déplacent, de façon fortement conjoncturelle, les décisions d'achat (report d'acquisition, équilibre marché neuf/marché d'occasion...) et peuvent conduire à des « rebonds » contreproductifs.

Il est certain que la proposition énoncée courant 2008 par le gouvernement d'étendre, du moins pour la fraction des véhicules fortement polluants, le dispositif à une taxe annuelle (« éco-vignette ») irait dans le bon sens en stabilisant sur le long terme les choix des acheteurs.

lepoint.fr

► LE VEHICULE DU FUTUR

6. Le moteur thermique à essence ou diesel, en constante évolution, a encore un bel avenir devant lui

La consommation de carburant d'une automobile dépend d'un grand nombre de facteurs : poids, résistance de l'air, résistance au roulement des pneumatiques, rendement du moteur et gestion de la plupart des équipements consommateurs d'énergie.

6.1. Les progrès à attendre des motorisations conventionnelles, en matière de maîtrise de la combustion, sont très nombreux, avec une certaine convergence essence-diesel

A l'heure actuelle, la quasi-totalité des automobiles fonctionne avec des motorisations conventionnelles, à essence ou diesel. Si, en Europe, les moteurs diesel dominent de plus en plus le marché automobile (on parle de « diésélisation » du parc automobile), ceci n'est pas vrai dans le monde entier. En effet, les véhicules à essence sont aujourd'hui dominants aux Etats-Unis et en Asie, avec des parts de marchés d'environ 94 % en Amérique du Nord et de 75 % en Asie (hors Japon). A l'inverse, sur le marché européen, la part de marché des motorisations essence n'était plus, en 2007, que de 26 % en France et de 44 % à l'échelle européenne.

Cette situation provient principalement, en dehors des effets des multiples taxations des carburants, des différences de caractéristiques entre moteurs diesel et moteurs à essence. Les moteurs à essence ont comme avantages sur les moteurs diesel de coûter moins cher à la fabrication et de permettre une meilleure maîtrise des gaz d'échappement. La contrepartie est que les moteurs à essence entraînent une surconsommation de carburant par rapport aux moteurs diesel, surconsommation qui est partiellement inhérente à leur principe de fonctionnement. Ainsi la moyenne des consommations aux 100 km peut être estimée, pour le gazole, à environ 20 % en dessous de celle relative au super, malgré un parc de véhicules plus puissants (en puissance réelle), cet écart étant ramené à 10 % si l'on tient compte de la différence de densité des carburants.

Les quantités de chaleur que peuvent fournir un kilogramme d'essence (super 98) et un kilogramme de gazole pendant la combustion sont sensiblement identiques : 42 700 kJ/kg pour l'essence, 42 600 kJ/kg pour le gazole. Si l'on exprime ces grandeurs rapportées au litre de carburant – unité de base des transactions commerciales et des performances en termes de consommation aux 100 kilomètres –, il faut tenir compte de la *différence de densité* des deux liquides : en moyenne 0,75 kg/litre [0,72 – 0,78] pour l'essence, en moyenne 0,84 kg/litre [0,82 – 0,85] pour le gazole. Cette considération conduit à diminuer d'environ 10 points les surconsommations apparentes observées par le consommateur (notamment les consommations conventionnelles indiquées par les documents commerciaux des constructeurs).

A l'avenir, les progrès les plus importants que *pourraient faire les motorisations essence et diesel* seront de nature différente et poursuivront des objectifs différents : *réduction de la consommation pour les moteurs à essence et maîtrise des émissions polluantes pour les moteurs diesel* (à titre d'exemple les normes Euro 5 imposent, outre un abaissement des rejets de particules, une réduction de quasiment 30 % des émissions d'oxydes d'azote, et les normes Euro 6 imposeront sans doute des réductions du même ordre). Ainsi, les évolutions tant réglementaires que technologiques vont amener ces deux différents types de motorisations à *converger* dans les prochaines années, et ce aussi bien sur le plan de leur impact

environnemental (émissions et consommation) que sur le plan de leurs principes de fonctionnement (modes de combustion, technologies utilisées). Ce phénomène de convergence prévisible est initié depuis le début des années 2000, avec la mise en œuvre, dans les moteurs diesel puis dans les moteurs à essence, d'un concept appelé « downsizing ».

6.1.1. Le « downsizing » est à même de réduire la consommation en conservant la même performance

Le « downsizing » est un concept exploité pour le développement des moteurs plus économes qui consiste à *réduire la cylindrée d'un moteur sans en dégrader les performances dynamiques*. La réduction de la cylindrée d'un moteur permet de limiter les pertes par friction (réduction des frottements mécaniques à l'intérieur du moteur car les surfaces sur lesquelles les frottements s'exercent sont réduites), ce qui augmente le rendement du moteur. Le downsizing a un autre effet positif qui est de limiter le poids du moteur, ce qui contribue aussi à réduire la consommation du véhicule.

Pour concevoir de tels moteurs, les constructeurs se sont appuyés sur des technologies améliorant l'injection du carburant et de l'air dans les moteurs, lesquelles ont fait des progrès importants ces dix dernières années :

- Pour le carburant, c'est la technologie dite de *l'injection directe* qui s'est imposée. Le principe est de disposer d'un système de mise sous pression du carburant dans une rampe qui alimente les différents cylindres par des injecteurs commandés électroniquement (d'où le nom d' « injection par rampe commune » ou « common rail »). Depuis une vingtaine d'années, les pressions d'injection des moteurs diesel ont été multipliées par un facteur 10, pour atteindre 2000 bars sur les moteurs actuellement commercialisés, ce qui permet de pulvériser beaucoup plus finement le gazole. Les moteurs à essence ont aussi bénéficié de cette technologie, bien que plus tardivement et en ayant recours à des pressions environ 10 fois moindres.
- Pour l'air, c'est la technique de *suralimentation* qui a été utilisée. Le principe est d'introduire de l'air sous pression dans le cylindre, cette mise en pression étant en général opérée en récupérant une partie de l'énergie cinétique des gaz d'échappement. Ainsi, les développements des moteurs diesel ont été conditionnés ces dernières années par les progrès obtenus sur les turbocompresseurs.

Ce sont les moteurs diesel qui ont pu bénéficier les premiers du « downsizing » car les technologies d'injection directe et de suralimentation y étaient plus adaptées. La diffusion de ces nouveaux moteurs date de la fin des années 1990 pour les moteurs diesel, et du milieu des années 2000 pour les moteurs à essence. La mise en œuvre du downsizing a été à l'origine de réductions de consommation considérables, car il permet des gains pouvant atteindre 25 %, le tout à performance égale.

Néanmoins, le downsizing devrait permettre de nouveaux gains de consommation durant la décennie 2010. Il bénéficiera de l'adoption de technologies décrites dans la suite comme la recirculation des gaz d'échappement, la levée variable des soupapes, mais aussi des différentes techniques d'hybridation thermique/électrique qui permettront d'équiper les véhicules de moteurs thermiques moins puissants, mais assistés par des moteurs électriques pour les phases d'accélération (on pourra se référer au chapitre consacré au véhicule hybride pour plus de détails).

6.1.2. Les technologies de combustion, améliorées par l'introduction de l'électronique, pourraient connaître des progrès importants

Les technologies de combustion constituent les éléments qui différencient classiquement les moteurs à essence et les moteurs diesel. Pour schématiser, le diesel utilise un principe d'*auto-allumage* du mélange air-carburant grâce à une pression importante et *le moteur se régule par l'admission de gazole*. Le moteur diesel fonctionne en mélange pauvre (c'est-à-dire avec un excès d'air). En conséquence les oxydes d'azote ne peuvent pas être éliminés par la catalyse 3 voies, au contraire du moteur à essence qui utilise un système d'*allumage commandé* par une bougie et est *contrôlé par l'admission d'air*. Le moteur à essence, qui bénéficie de ce dispositif de post-traitement, émet moins de polluants que le moteur diesel, mais son système d'alimentation en air le pénalise sur le plan de la consommation.

Néanmoins, partant de ces avantages comparés, ces deux technologies pourraient converger durant la décennie 2010. En effet, de nouveaux processus de combustion sont en cours de développement :

- pour les *moteurs diesel*, il s'agit du processus dit HCCI (« Homogeneous charge compression ignition », c'est-à-dire combustion à autoallumage par compression en mélange homogène) ;
- pour les *moteurs à essence*, il s'agit du processus CAI (« Controled auto-ignition », c'est-à-dire combustion de l'essence par auto-allumage préréglé).

► Le procédé HCCI

Le HCCI est, pour un moteur à combustion interne, un mode de combustion dans lequel l'air et le carburant sont mélangés de la manière la plus homogène possible (comme dans les moteurs à essence), mais dans lequel le mélange est comprimé à des pressions suffisantes pour atteindre le point d'auto-allumage (comme dans les moteurs diesel).

Comme la combustion n'est pas déclenchée par une bougie, mais par la pression dans un mélange homogène, le démarrage de la combustion se fait de manière quasi-simultanée dans presque la totalité du mélange air-carburant. C'est pour cette raison que ce mode de combustion est particulièrement difficile à contrôler. Ainsi, ce n'est pas uniquement une meilleure compréhension de la physique de la combustion qui permet la mise au point de la combustion HCCI, mais ce seront avant tout les progrès réalisés dans l'électronique qui permettront de piloter ce processus d'auto-inflammation. La combustion en mode HCCI est possible pour des charges moyennes ou faibles des moteurs, c'est-à-dire qu'un moteur devrait être capable durant les phases d'accélération de revenir à un mode de combustion traditionnel diesel.

Prototype Opel Vectra équipé d'un moteur à combustion HCCI



Depuis plus d'une dizaine d'années, la combustion HCCI est étudiée chez les constructeurs et les équipementiers, spécialistes des systèmes d'injection (Bosch...). Ce mode de combustion pourrait être mis au point à un horizon proche. Selon L'IFP, qui participe à la recherche sur ce nouveau mode de combustion, la maîtrise de l'HCCI devrait être suffisante pour envisager une commercialisation durant la première moitié de la décennie 2010. On peut citer, à titre d'exemple, les travaux menés par General Motors, qui a déjà réalisé des prototypes roulants en 2007, sur la base d'une Saturn Aura et d'une Opel Vectra. Selon le

constructeur, des gains de 15 % en consommation seraient accessibles à condition d'utiliser notamment un moteur à injection directe et une activation électrique des soupapes. Ces gains sont comparables à ce qu'annoncent les équipementiers Bosch ou Valeo.

Mais ce ne sont pas tant les gains de consommation qui seraient intéressants dans la technologie HCCI pour les moteurs diesel (l'injection directe, le contrôle des soupapes permettent sans doute d'obtenir des gains comparables) que l'obtention de bons résultats en matière d'émissions de NOx.

► **Le procédé CAI**

Le mode de combustion CAI est une voie de progrès pour les motorisations à essence. Ce mode de combustion peut permettre de pallier certains défauts des moteurs à essence actuels. Dans ces moteurs, la combustion dans le mélange entre l'air et l'essence est déclenchée par une bougie. Ainsi, l'allumage n'est pas obtenu de manière homogène, puisqu'il démarre de la bougie, ce qui génère des points chauds et des pics de température au sein de la chambre de combustion. La combustion CAI a pour objectif de faire s'allumer le mélange entre l'air et l'essence de manière quasi simultanée dans tout le cylindre. Ceci permet d'optimiser la combustion en la régularisant. L'allumage ne se serait donc plus obtenu par une bougie mais par auto-allumage, comme dans les moteurs diesel, contrôlé par la pression et la température dans le cylindre. Afin de contrôler la pression et la température à l'intérieur du cylindre, le mode CAI nécessiterait d'introduire une recirculation des gaz d'échappement du moteur. Toutefois, les moteurs à essence ne pourront pas se passer d'un dispositif de déclenchement de la combustion (bougie par exemple) car le mode de combustion CAI n'est pour l'instant envisagé que pour les charges partielles du moteur, ce qui exclut les phases dans lesquelles la voiture nécessite une accélération importante. Ainsi, tout comme le HCCI pour les moteurs diesel, le CAI ne sera mobilisable que sur certaines plages de fonctionnement des moteurs.

Certains constructeurs ont d'ores et déjà révélé des prototypes de véhicules équipés de moteurs capables de fonctionner en mode de combustion CAI. C'est le cas par exemple de Daimler-Mercedes, dont le prototype Mercedes F700 utilise ce mode de combustion.



Concept car Mercedes F700 Diesotto

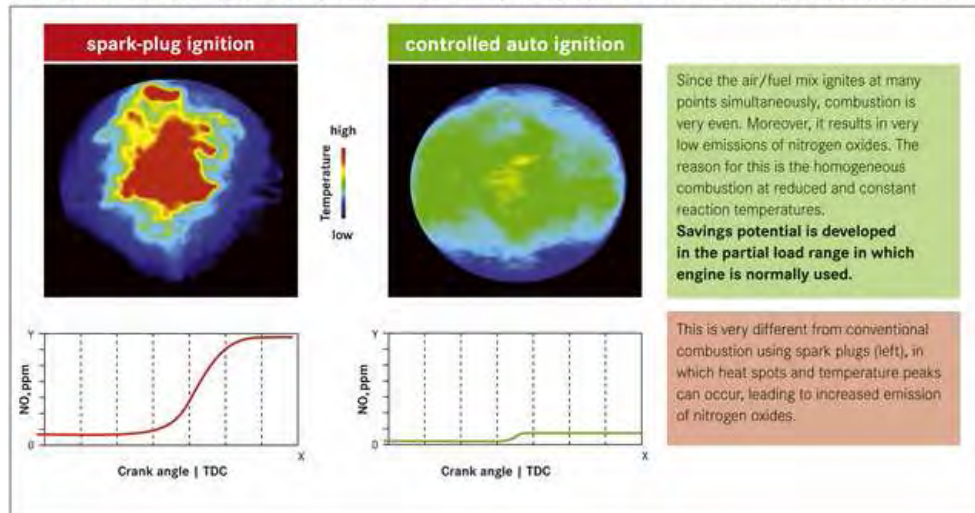
Il s'agit d'un véhicule qui intègre plusieurs autres technologies pour réduire la consommation de carburant : poids, aérodynamique, motorisation hybride (moteur thermique 238 ch, moteur électrique 20 ch), transmission automatique à 7 rapports. Les performances de ce véhicule sont comparables à la Mercedes Classe S350 : accélération de 0 à 100 km/h en 7,3 contre 7,5 secondes. La consommation normalisée en cycle européen est de 5,3 l/100 km et les émissions de CO₂ de 127 g/km, soit des valeurs réduites quasiment de moitié (10,5 l/100 km pour

la S 3.5 V6). La consommation d'un tel véhicule pourrait être encore substantiellement réduite à condition d'accepter une certaine réduction des performances, comme cela est expliqué plus loin : on peut en effet s'interroger sur la nécessité de telles performances dynamiques (bridées à 200 km/h, mais capable de plus de 250 km/h).

L'illustration ci-dessous permet d'apprécier la différence entre les modes de combustion classique et CAI. La cartographie des températures dans un cylindre lors de la combustion permet d'illustrer l'homogénéité de la combustion CAI.

lepoint.fr

**Mercedes-Benz F 700 DIESOTTO-engine
Controlled Auto Ignition (CAI) – the unique system for reducing consumption**

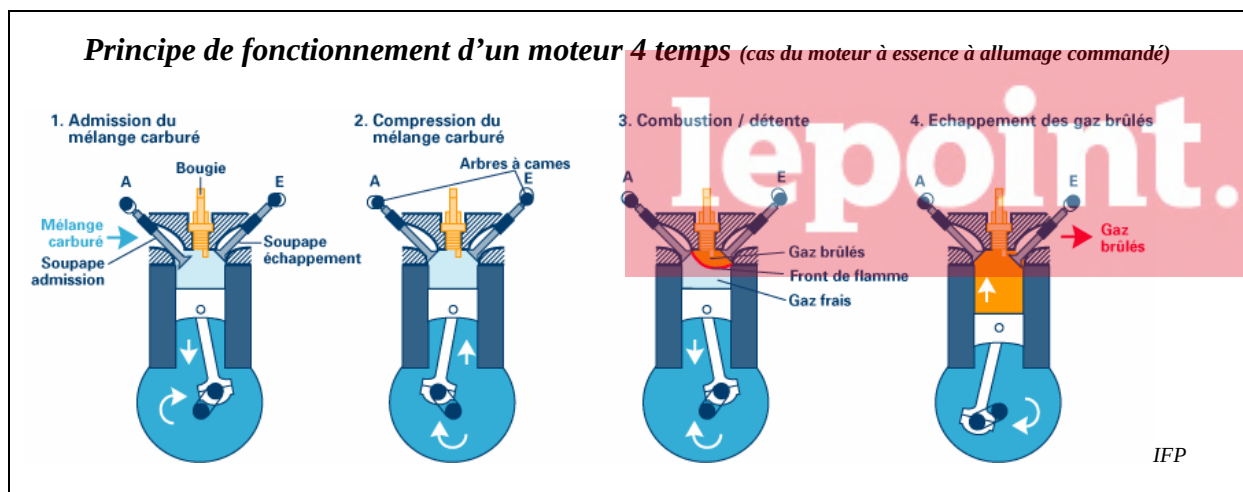


Néanmoins, les moteurs à mode de combustion CAI ne sont pas suffisamment au point pour être commercialisés à très court terme, car ils souffrent encore d'une grande sensibilité aux variations de caractéristiques des carburants et ont une plage d'utilisation faible. L'IFP estime que cette motorisation pourrait être commercialisée en masse d'ici la fin des années 2010. Différentes sources (IFP, équipementiers) indiquent que des gains de consommation compris entre 10 et 15 % peuvent être espérés avec cette technologie.

6.1.3. Les améliorations du groupe motopropulseur passent aussi par un meilleur pilotage des cycles de combustion, grâce notamment à l'électronique

Sur un moteur à combustion interne, un système de soupapes permet l'admission du mélange d'air et de carburant (pour la combustion) et l'évacuation des gaz d'échappement. Chaque cylindre d'un moteur est équipé de soupapes qui permettent l'admission et l'échappement. Ainsi, sur un moteur classique à 4 cylindres, on peut compter 8 ou 16 soupapes suivant que chaque cylindre est équipé d'une ou de deux soupapes d'admission et d'échappement.

A l'heure actuelle, sur la quasi-totalité des moteurs thermiques, les soupapes sont commandées par un système mécanique qui ne permet pas de moduler la durée d'ouverture des soupapes. L'illustration ci-dessous schématise le principe de fonctionnement d'un moteur à 4 temps et montre les 4 étapes qui permettent d'exploiter une combustion et de transformer un mouvement linéaire du piston à l'intérieur d'un cylindre en un mouvement rotatif.



► **La commande électromagnétique des soupapes**

Une voie de progrès majeure pour les moteurs à combustion interne réside dans une meilleure maîtrise de ce cycle par un pilotage optimisé des soupapes d'admission et d'échappement. En effet, à l'heure actuelle, dans un moteur thermique, toutes les soupapes sont pilotées par un même axe mécanique, appelé *arbre à cames*, qui est lui-même actionné par l'axe qui relie tous les pistons, le vilebrequin. Ce fonctionnement permet de concevoir des moteurs à plusieurs cylindres, tout en les synchronisant, mais ne permet pas de moduler les durées d'ouverture de chacune des soupapes ou de désactiver certains cylindres ; or ces possibilités permettraient d'adapter le fonctionnement du moteur au besoin de puissance de la voiture. C'est une cause de perte majeure de rendement dans un moteur. Ainsi, une amélioration très importante consisterait à disposer d'un système capable de piloter indépendamment chaque soupape. L'ouverture et la fermeture des soupapes seraient commandées par un système électromagnétique.

Ces systèmes de gestion des soupapes pourraient se diffuser largement dès le début de la décennie 2010. On peut citer à titre d'exemple le système e-valve mis au point par l'équipementier Valeo. Les données fournies par Valeo indiquent *un gain en consommation de carburant de 15 à 20 %*. Il s'agit là d'une version optimisée, qui aura sans doute des variantes. Néanmoins, selon différentes estimations d'acteurs de l'industrie automobile, **la commande électromagnétique des soupapes permettrait d'obtenir des réductions de consommation d'au moins 10 %**.

► **Le pilotage des pistons (variation du taux de compression)**

En complément du système de contrôle des soupapes, un progrès, d'un intérêt encore incertain, pourrait venir du pilotage des pistons. Aujourd'hui, la course d'un piston est toujours la même, ce qui fige le taux de compression du moteur (rapport entre volume maximal et volume minimal de la chambre de combustion). Plus ce rapport est grand, plus on exploite la détente des gaz de combustion, mais plus on perd de puissance. Pour éviter cet inconvénient, les motoristes pourraient, à l'avenir, développer des **moteurs à taux de compression variable**. C'est un concept déjà ancien dans l'industrie automobile : en 1928, Louis DAMBLANC a déposé un brevet pour moteur à taux de compression variable ; dans les années 1980, Volkswagen et Saab ont testé des moteurs puis abandonné cette piste pour manque de fiabilité.

Aujourd'hui, des travaux ont été repris sur ce concept. Ainsi, en France, la société MCE-5 a inventé un système permettant de moduler le volume de la chambre de combustion. Cette modulation est obtenue par l'ajout d'une pièce qui permet de faire varier la hauteur du piston dans l'axe du cylindre. Cette technologie doit encore faire l'objet d'améliorations pour avoir une chance d'être commercialisée car le surcroît de masse, le manque de résistance mécanique et le coût de la solution actuelle posent problème. Une collaboration entre MCE-5 et PSA, initiée en 2001, vise une industrialisation sur petites séries (milliers ou dizaines de milliers de véhicules par an) d'ici une dizaine d'années.

Le taux de compression variable permettrait d'obtenir des gains de consommation de 5 à 7 %.

► **Autres innovations**

D'autres innovations, en apparence plus modestes, permettront aussi des gains significatifs de consommation. On peut citer des optimisations de la gestion thermique du moteur. Par exemple, Valeo a développé une vanne qui permet de gérer l'intégralité des flux de liquides de refroidissement dans le moteur, qui pourrait entraîner une **réduction de 4 % de la consommation**.

Enfin, dans les moteurs thermiques, l'existence de nombreuses masses en mouvement entraîne des *pertes importantes par frottements*. **Des optimisations sur ces frottements pourraient conduire à réduire la consommation d'environ 5 %** (estimations fournies par différents experts). A titre d'exemple, on peut citer la Logan ECO2, pour laquelle un gain de 2 g CO₂/km (soit environ 2 %) a été obtenu « simplement » par un ajustement de certains jeux de pièces mécaniques et un choix d'huiles à basse viscosité pour réduire les frottements à l'intérieur du moteur et des transmissions, et fluidifier l'huile dans la boîte de vitesses (*pour plus de détails, se référer au dossier du chapitre 10*).

6.2. Pour les véhicules thermiques, la gestion de l'électricité au sein du véhicule est une source de réduction de consommation significative

La production d'énergie électrique dans une voiture à moteur thermique a un très faible rendement, du fait de la complexité du processus : l'énergie chimique du carburant est, dans un premier temps, transformée en énergie mécanique par le moteur, puis en courant électrique par l'intermédiaire d'un alternateur. Une voie d'amélioration à consisterait à convertir directement l'énergie thermique des gaz d'échappement en courant électrique par un effet thermoélectrique. Cette technologie ne devrait toutefois pas être diffusée en masse avant la fin des années 2010.



Alternateur LI-X, développé par Bosch

A titre d'exemple, l'alternateur LI-X développé par Bosch permet un gain en compacité par rapport à la génération précédente d'alternateurs comparables et est capable, selon le constructeur, de fournir 40 % de plus de puissance, tout en engendrant des gains de consommation qui peuvent aller jusqu'à 0,5 l/100km.

Plus généralement, ce n'est pas seulement la chaîne de production de l'énergie électrique qui devra faire l'objet d'améliorations, mais aussi sa chaîne d'utilisation. En effet,

si la production d'électricité dans une voiture thermique est une opération à faible rendement, les constructeurs auront tout intérêt à gérer au mieux le niveau de charge de la batterie qui stocke cette électricité. Cette voie est très prometteuse à court terme, comme l'a montré récemment le cas de la Logan ECO2 : un gain de 4g CO₂/km a été obtenu par Renault grâce à un pilotage de l'alternateur qui permet de charger la batterie au juste nécessaire. Cette modification se traduit par une charge moins fréquente de la batterie et explique de ce fait la moindre consommation d'énergie.

6.3. Les moteurs thermiques pourraient voir leur consommation réduite de 30 à 40 % par rapport à la situation actuelle

Durant la décennie 2010, toutes les technologies et améliorations présentées ici ne pourront naturellement pas toutes se développer massivement. Pour autant, ce bref aperçu permet d'illustrer l'importance des progrès qui peuvent être accomplis, pour réduire la consommation des motorisations thermiques. On liste ci-dessous les potentiels de réduction de

consommation associés à chaque technologie décrite dans ce chapitre. Il s'agit d'ordres de grandeur prudents.

Réduction potentielle des consommations du réservoir à la roue	Ordre de grandeur du gain potentiel
Downsizing (technologie déjà largement exploitée)	10 à 25 %
Combustion HCCI (pour moteurs diesel)	Réduction de la pollution du moteur (NO _x)
Combustion CAI (pour moteurs essence)	10 à 15 %
Commande électronique des soupapes	10 %
Taux de compression variable	6 %
Réduction des frottements internes	5 %
Alternateur à haut rendement	2 %
Système de gestion de la charge batterie	2 %

NB : On rappelle que, lorsque l'on combine 2 gains X et Y, le gain résultant se calcule en multipliant (1-X) par (1-Y) et non pas en additionnant X et Y.

Au total, on peut estimer, en tenant compte du fait que la voie du downsizing est déjà largement exploitée, que, durant la décennie 2010, des réductions de 20 % à coup sûr et pouvant aller jusqu'à 40 % de la consommation des moteurs thermiques sont accessibles.

7. Le véhicule électrique, qui a l'avantage de ne pas émettre directement de gaz polluants, souffre de trop de handicaps pour pouvoir prétendre se substituer massivement au véhicule thermique

L'histoire de l'industrie automobile montre que le véhicule électrique à usage urbain ou périurbain est une idée très ancienne dans l'industrie automobile. Le véhicule électrique a été surpassé par le véhicule équipé d'un moteur à combustion interne au début du XX^e siècle. Pour autant, de nombreuses tentatives ont été effectuées durant la seconde moitié du XX^e siècle pour introduire des véhicules électriques. Le véhicule électrique revient aujourd'hui à la mode, dans un contexte de prix des matières premières élevées et de lutte contre le changement climatique.

Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, l'électricité était perçue comme la seule énergie motrice capable de concurrencer la vapeur. Mais l'autonomie très limitée des premières batteries au plomb (inventées par Gaston Planté en 1839) et au nickel-cadmium (1892) a rapidement promu le véhicule électrique au seul rang de véhicule urbain : à l'essence les grandes distances, à l'électricité les courtes !

Ce qui était vrai il y a plus d'un siècle l'est toujours aujourd'hui : techniquement les performances limitées des batteries, leur poids, leur fiabilité, leur longévité et leur coût restent, malgré les progrès réalisés et à venir, de très lourds handicaps. On retrouve les deux raisons principales de la non-viabilité du véhicule électrique qui explique l'échec des tentatives de relance de la voiture électrique des années 1980.

La voiture électrique se définit toujours actuellement sur la base d'un concept éprouvé : une chaîne de traction simple, pas de boîte de vitesse, un système d'énergie embarquée toujours volumineux et surtout lourd (de 100 à 200 kilogrammes) pouvant représenter jusqu'à 20 % du poids total du véhicule, un coût représentant encore aujourd'hui la moitié du coût total (en gros le prix du système de batterie est aujourd'hui équivalent au prix d'un véhicule thermique de même catégorie) ; en revanche l'absence quasi-totale d'émissions polluantes *au niveau de l'utilisation locale* (sous réserve que les dispositifs de chauffage et de climatisation n'utilisent pas des carburants comme le GPL ou l'essence) reste, à côté du silence de fonctionnement, l'avantage principal du véhicule électrique. Des avancées technologiques importantes, telles que celle du « *moteur-roue* » (regroupement au niveau de chaque roue des fonctions de suspension, d'amortissement, de traction et de freinage) ou les nouvelles technologies de batterie au lithium/polymère, seraient de nature à améliorer le bilan du véhicule électrique.

Le concept de moteur-roue développé par Michelin

Le moteur dans la roue mis au point par Michelin (*Michelin Active Wheel*) présente des caractéristiques singulières qui en font une solution alternative très intéressante pour l'avenir. Le principe de locomotion est en effet radicalement différent : la fonction traction est intégrée dans la roue avec les systèmes de suspension, d'amortissement et de freinage. Le bloc moteur traditionnel est ainsi remplacé par quatre petits moteurs électriques dans chaque roue, d'une masse comprise entre 5 et 7kg et de densité massique de puissance comprise entre 2 kW/kg (moteur refroidi à l'air) et 4 kW/kg (moteur refroidi par liquide). Ainsi le volume disponible du véhicule est complètement libéré pour le logement des batteries et, bien sûr, pour l'espace utile aux passagers et aux bagages.

Si les défis posés par l'utilisation de l'électricité sont les mêmes que pour tout véhicule électrique (autonomie, puissance du moteur, durée de vie de la batterie...), un algorithme sophistiqué doit de plus gérer en temps réel la répartition de l'énergie électrique afin d'assurer en toutes circonstances une bonne tenue de route (état de la chaussée, type de conduite du conducteur, intempéries, virages et accélération...).

Mais **deux incertitudes majeures** affectent toujours le modèle économique du véhicule électrique : d'une part l'incertitude sur **la longévité des batteries**, dont le coût peut représenter la moitié du coût total du véhicule électrique, d'autre part l'incertitude concernant l'évolution de la **taxation de l'électricité** servant à la recharge des batteries.

7.1. La voiture électrique est pénalisée par les performances insuffisantes des batteries

Le développement du véhicule électrique doit surmonter plusieurs obstacles :

- **La performance trop limitée des batteries** dont l'énergie massique est comprise entre 30 et 200 Wh/kg environ, alors que la densité d'énergie des carburants liquides (essence, gazole) dépasse 10 000 Wh/kg, ce qui représente 50 fois plus que les meilleurs accumulateurs actuels. L'écart de rendement entre un moteur électrique et un moteur thermique (80 % – 65 % en tenant compte du rendement des opérations de charge-décharge des batteries – contre 25 %) est insuffisant pour donner aux véhicules électriques des autonomies comparables aux véhicules thermiques.
- **La durée nécessaire pour recharger les batteries** : sur une prise de courant ordinaire (220 V, 15A), il faut en effet environ 6 heures pour recharger un véhicule électrique. Cela

s'explique par la très faible puissance que délivre une prise électrique standard (environ 3 kW). A titre de comparaison, lorsque l'on fait le plein d'essence à une station-service, le véhicule reçoit 50 litres en 5 minutes. La puissance équivalente de recharge est alors de 6 MW thermiques ou 1,5 MW utiles si l'on tient compte du rendement thermique du moteur. *Il y a donc un facteur d'environ 500 entre le débit d'énergie d'une prise électrique et le débit d'une pompe à essence.* Cette différence serait réduite par l'utilisation de prises de charge qui délivrent 35 kW, soit un rapport de 1 à 40 par rapport à une pompe à essence. L'unique dispositif permettant de transférer autant d'énergie à un véhicule électrique que dans le cas d'un véhicule thermique est *l'échange de batteries*, opération qui est aujourd'hui utilisée pour des bus électriques (pour lesquels l'organisation des volumes permet un maniement plus aisé) et qui est en cours de mise au point pour les voitures électriques (en particulier dans le cadre du projet Renault en Israël décrit plus loin).

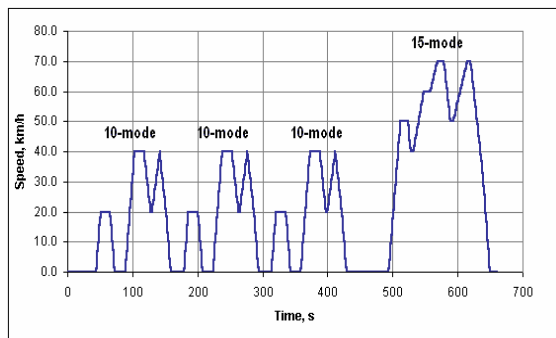
- ***L'incertitude sur l'autonomie des véhicules électriques*** : cette incertitude n'est pas nouvelle et s'explique par le caractère incomplet des tests normalisés (cycle NEDC pour l'Europe).

Le cycle NEDC (« New european driving cycle ») utilisé en Europe, entre autres, pour évaluer les niveaux d'émission des moteurs, correspond à un cycle de conduite d'une durée de 20 minutes comprenant 4 cycles répétés de type urbain (ECE-15) et un cycle de conduite sur route (EUDC) ; il est censé être représentatif de l'utilisation usuelle d'une voiture en Europe. D'autres tests normalisés utilisent des cycles d'homologation différents, tel le mode « 10-15 » utilisé au Japon et sommairement décrit ci dessous ; ce cycle, d'une durée plus courte (12 minutes de conduite), ne comprend que 3 cycles de conduite urbaine et se fonde sur une vitesse moyenne plus faible en ville comme sur route.

Ces tests ne prennent pas en compte **la consommation des accessoires (phares, essuie-glaces, dégivrage arrière...) et surtout le chauffage ou le refroidissement de l'habitacle**. Or la gestion thermique de l'habitacle peut réduire très largement l'autonomie d'un véhicule électrique. Des calculs effectués par L'Ecole des mines de Paris, l'ADEME et l'INRETS ont montré que la climatisation automobile pouvait absorber entre 1 kW (air extérieur à 25°C, température de consigne à 20°C) et 3 kW (air extérieur à 40°C, température de consigne à 20°C). De plus, le chauffage en hiver s'avère être un gros consommateur d'énergie, dont la consommation est supérieure à la climatisation dans le cas de pays très froids (cas de températures extérieures fortement négatives). Le chauffage d'un véhicule électrique pose un problème spécifique car, contrairement au véhicule thermique, il ne dispose pas d'une source de chaleur gratuite (gaz d'échappement). Ainsi, on peut constater que la gestion thermique peut engendrer des surconsommations telles qu'elles vont réduire significativement l'autonomie des véhicules.

En plus de la régulation thermique de l'habitacle, il faut tenir compte de tous les autres équipements consommateurs d'énergie, qui vont des essuie-glaces au chauffage de lunette arrière, la radio, l'éclairage. Ces consommateurs, qui ne sont pas non plus pris en compte dans les tests d'homologation classiques, représentent en moyenne 0,6 kW et peuvent atteindre plus de 1 kW (source : Automotive Handbook, Bentley Publishers).

Ainsi, entre la consommation théorique d'un véhicule électrique, tel que mesurée sur un cycle NEDC, et la consommation réelle, on doit tenir compte de l'impact potentiel d'un ensemble d'équipements qui peuvent nécessiter une puissance électrique d'environ 2,5 kW dans des cas d'utilisation de climatisation et jusqu'à 4 kW dans des conditions extrêmes.



Cycle d'homologation japonais « 10-15 »

On peut analyser l'impact de telles surconsommations sur un véhicule électrique. On prend ici, à titre d'exemple, le cas d'un véhicule dont les tests d'autonomie sur cycle normalisé ont été effectués. Il s'agit de la Mitsubishi i-mev, actuellement en test au Japon et dont la commercialisation débutera en 2009. Il s'agit d'un petit véhicule urbain (en Europe ce véhicule ferait partie du segment dit des « petites citadines » d'une longueur comprise entre 2,5 et 3,6 m), d'une masse de 1080 kg. Equipé d'un moteur de 47 kW de puissance, ce véhicule a une autonomie de 160 km en cycle normalisé « 10-15 » (norme japonaise) et est équipé de batteries de 16 kWh. Le profil du cycle d'homologation « 10-15 » est représenté ci-contre ; on peut constater qu'il correspond à un trajet de type urbain/péri-urbain.

La vitesse moyenne sur ce cycle est de 25 km/h. Cela signifie que le véhicule i-mev nécessite une puissance moyenne de 2,5 kW pour sa traction.

On peut donc conclure qu'en usage réel urbain, **l'autonomie d'un véhicule électrique pourrait être réduite de moitié**, dans le cas où les auxiliaires nécessiteraient 2,5 kW. Ces calculs ne tiennent pas compte d'éventuels progrès qui pourraient être faits sur les systèmes de climatisation, telle l'introduction de pompes à chaleur, ou encore des autres améliorations que les constructeurs devront apporter à leurs véhicules pour réduire leur consommation électrique.

- **Un coût élevé** : aujourd'hui le véhicule électrique doit supporter un coût environ double de celui d'un véhicule thermique conventionnel. L'une des raisons vient du fait que le véhicule électrique nécessite l'introduction d'une batterie de grande capacité (au minimum une dizaine de kWh) dont le coût est au minimum d'environ 500 \$/kWh, ce qui en fait un composant qui compte pour quasiment 10 000 \$ dans le prix de revient d'un véhicule. Par ailleurs, les progrès technologiques et les économies d'échelles liés à des productions en série sont aujourd'hui difficiles à anticiper tant la taille future du marché est incertaine.

- **La nécessité de construire l'infrastructure nécessaire à l'alimentation des véhicules électriques.** Ce n'est pas tant un problème technologique (prises de charges...) qu'un problème d'investissements : en effet, le véhicule électrique est à vocation urbaine ou périurbaine, et nécessite au minimum un très large déploiement de prises de recharge qui permette à des utilisateurs de recharger leur véhicule durant la nuit mais aussi durant la journée s'ils le souhaitent. Cela supposerait donc d'équiper les places de stationnement public, les parkings souterrains, les garages (pour ceux qui ont une maison), mais aussi plus généralement les parkings d'entreprise, voire les parkings de lieux de stationnement tels les supermarchés. Un tel réseau de surface s'impose donc et la multiplication des bornes publiques à carte (sujet sur lequel travaille actuellement EdF) pose des problèmes d'emprise au sol, de sécurité (électrocution, malveillance...) et, plus largement, de standardisation : un déploiement de véhicules électriques nécessite que des acteurs aussi nombreux que des constructeurs automobiles, énergéticiens, collectivités locales définissent des standards pour la connectique, les compteurs électriques, car chaque voiture doit pouvoir se recharger indifféremment sur n'importe quelle prise. Il ne faut pas sous-estimer la difficulté d'un tel processus : les exemples abondants sur les guerres de standards dans l'industrie électronique (standards pour les SVS, la télévision numérique, l'internet sur téléphone portable...) montrent que ces processus sont généralement longs en raison du grand nombre d'acteurs impliqués.

- **L'impact dominant des conditions de production de l'électricité.** Il est important enfin de noter que, si l'impact environnemental du véhicule électrique est très faible sur son lieu d'utilisation (le véhicule électrique pourrait débarrasser les centres-villes des oxydes d'azote,

des particules fines, du bruit des automobiles...), le véritable enjeu environnemental se situe **en amont** lors de la fabrication de l'électricité. La prédominance de la production électronucléaire en France ne doit pas faire oublier que, dans la plupart des autres pays au monde, une part significative de l'électricité provient de centrales thermiques fonctionnant au charbon, au lignite, au gaz ou au fioul. De nombreux calculs permettent de comprendre dans quels cas le bilan CO₂ d'un véhicule électrique est meilleur que celui d'un véhicule thermique. Le tableau suivant, proposé par EdF, donne quelques ordres de grandeur et montre que, si le bilan global est favorable en France au véhicule électrique par rapport à un véhicule essence/diesel moyen, il l'est tout juste à l'échelle européenne et il ne l'est plus à l'échelle mondiale.

Bilan « du puits à la roue » pour une voiture particulière en gCO ₂ /km			
Source d'énergie	Du puits au réservoir ¹	Du réservoir à la roue ²	Emissions totales
Essence / diesel	20 à 35	120 à 180	140 à 210
Electricité - mix France	15 à 20	0	15 à 20
Electricité - mix Europe	90 à 110	0	90 à 110
Electricité - mix monde	120 à 140	0	120 à 140

Source: EDF

¹ Correspond aux dépenses énergétiques nécessaires pour disposer du stock d'énergie embarqué

² Correspond aux dépenses énergétiques prélevées dans le stock d'énergie embarqué

Ce genre de comparaison doit cependant être interprété avec beaucoup de prudence :

- D'une part, *cette comparaison essence/diesel et électricité n'est pas équitable* car elle ne tient pas compte des différences de performances (vitesse de pointe, puissance) entre les deux types de véhicules : un véhicule électrique dont la vitesse de pointe est couramment aujourd'hui limitée à 110-120 km/h, n'a pas le même usage qu'une berline à propulsion conventionnelle pouvant atteindre les 160-250 km/h. Dit autrement, une voiture à essence, utilisée comme l'est une voiture électrique, verrait sans doute ses caractéristiques de consommation et d'émissions gazeuses singulièrement modifiées. Une comparaison équitable conduirait vraisemblablement à diviser à peu près par deux les émissions des véhicules essence/diesel. Il en résulte qu'un véhicule thermique de petite taille, ayant une puissance faible (donc des performances routières comparables à celles d'un véhicule électrique) et une consommation très réduite serait favorable du point de vue des émissions de CO₂ et pourrait prendre une part du marché.

- D'autre part, *ces chiffres sont tout à fait théoriques* puisqu'ils ne prennent pas en compte deux réalités importantes : les climatisations consomment beaucoup et les centres-villes sont embouteillés. En effet, la consommation d'un véhicule électrique est modifiée lorsque la climatisation est sollicitée, de même que la consommation d'un véhicule thermique est sensible au niveau de congestion du trafic.

Il faut donc admettre que la balance entre les deux bilans n'a rien d'évident (*sauf en France où l'électrique dispose d'un avantage comparatif grâce à son parc de production hydraulique et nucléaire*) et que l'intérêt, sur le plan des émissions globales de CO₂, du véhicule électrique devrait faire l'objet d'études beaucoup plus approfondies. Mais, en tout état de cause, il paraît peu probable que soient produites en grandes quantités des voitures qui seraient spécifiquement françaises.

7.2. Une volonté politique forte est nécessaire pour que le véhicule électrique se développe

Aujourd'hui, le contexte nouveau remet l'actualité sur les véhicules électriques urbains : prix des matières énergétiques élevés, politiques de lutte contre les gaz à effets de serre et les pollutions locales, normes environnementales plus contraignantes... Les qualités d'un usage urbain du véhicule électrique expliquent pourquoi cette option revient aujourd'hui sur le devant de la scène ; on peut même dire qu'il a pris la relève de la pile à combustible et de l'hydrogène comme idée à la mode.

Ainsi, des initiatives technologiques, commerciales et politiques voient le jour. Forts des échecs passés, les acteurs interviennent avec une plus grande prudence et tentent d'aborder la question des infrastructures, conscients que les difficultés de stockage de l'énergie électrique brident l'utilisation du véhicule électrique.

Le véhicule électrique bénéficie d'ores et déjà d'une incitation implicite du fait des méthodes de calcul des émissions de CO₂ de l'ensemble des gammes de véhicules commercialisés par les constructeurs : le véhicule électrique étant comptabilisé pour zéro émission, son développement fait artificiellement diminuer les chiffres moyens d'émission et *son apparition dans un catalogue constructeur lui permettra de respecter plus facilement les objectifs globaux* attendus en matière d'émission de CO₂.

Seule une volonté politique forte et constante, au niveau tant de l'Etat (fiscalité, politique tarifaire de l'électricité) que des collectivités locales (financement des infrastructures, limitations de la circulation dans les centres-villes, péages urbains), sera de nature à provoquer la validation d'un modèle économique durable pour que le véhicule tout électrique trouve une place dans les décennies à venir. Cette place sera probablement minoritaire (les acteurs les plus optimistes parlent de 15 % du parc automobile) et limitée à l'usage urbain ou périurbain, en priorité dans les zones à forte contrainte environnementale locale et pour des flottes captives.

L'Etat d'Israël a fourni en 2008 un exemple récent d'initiative politique forte dans le domaine du véhicule électrique. Cette expérience, que l'on peut qualifier d'expérimentation à grande échelle du véhicule électrique est brièvement décrite ci-dessous.

Le projet « Better place » en Israël

La création d'un parc de véhicule électrique en Israël où circulent un million de véhicules et où 90 % des automobilistes effectuent en moyenne moins de 70 km par jour, devrait voir le jour d'ici 2011-2012. Le projet « Better Place », dont Renault est l'un des principaux partenaires, sera soutenu par une politique fiscale rendant attractif l'achat des véhicules : la taxe à l'achat de 79 % sera ramenée à 10 % jusqu'en 2014, puis à 30 % à partir de 2019 – niveau de taxe pour les véhicules hybrides –, sauf si la part de marché des véhicules électriques atteint 20 % d'ici 2019. Les voitures seront des adaptations de modèles existants (Mégane) et seraient dotées de batterie lithium-ion fournie par Nissan et NEC. Les véhicules devraient avoir une autonomie d'une centaine de kilomètres dans des conditions d'utilisation locales, c'est-à-dire avec une forte utilisation de la climatisation.

Le modèle économique est calqué sur celui de la téléphonie cellulaire puisque les profits reposeront plus sur les services que sur l'acquisition du matériel. L'automobiliste achèterait sa voiture, louerait la batterie et se verrait facturer les services de maintenance et de charge (les frais mensuels de batteries sont estimés à 60 €). D'ici 2012, 500 000 points de charge devraient être installés sur le territoire ainsi que plusieurs centaines de stations d'échange des batteries. Le marché israélien, une fois stabilisé, est estimé à environ 30 000 véhicules par an. Une initiative analogue est prévue au Danemark.

Un accord de principe a été conclu au Portugal, afin d'étudier les conditions de faisabilité d'un déploiement massif de véhicules électriques dans ce pays. Pour Israël, la motivation fondamentale est avant tout l'indépendance énergétique du pays dans un contexte particulier que l'on ne retrouve pas nécessairement dans les pays européens et qui est à l'origine de l'engagement politique et budgétaire fort du gouvernement.

Certaines agglomérations envisagent de pénaliser voire d'exclure du centre ville la circulation de véhicules thermiques. La ville de Londres est, à ce titre, un pionnier. Seuls les véhicules « propres », label dont le véhicule électrique bénéficie, seraient autorisés à pénétrer sur le réseau d'infrastructure routière à l'intérieur d'un périmètre central défini. L'instauration d'un péage urbain pourrait alors favoriser le marché des véhicules électriques.

7.3. Les caractéristiques techniques des batteries disponibles actuellement appellent encore des développements importants

Pour répondre au problème d'autonomie, les recherches se sont orientées depuis toujours vers l'augmentation de la densité d'énergie des batteries. La filière plomb, technologie mature, a montré ses limites. D'autres couples électrochimiques ont été développés et pourraient favoriser la diffusion des véhicules électriques.

On distingue généralement trois familles d'accumulateurs :

- les accumulateurs en milieu aqueux : systèmes acides (batteries au plomb) ou alcalins (nickel-cadmium ; nickel-hydrure métallique...),
- les accumulateurs en milieu organique en phase liquide (lithium-phosphate ; lithium-ion : sels de lithium dissous dans un solvant organique),
- les accumulateurs en milieu polymère (lithium métal polymère).

Les batteries dites « chaudes », notamment de marque Zebra (Suisse), ont des caractéristiques très particulières car la cathode (aluminium et chlorure de sodium) et l'anode (sodium) doivent être maintenues à l'état liquide par chauffage environ 300°C), la paroi intermédiaire en céramique servant à la fois de séparateur et de conducteur ionique.

7.3.1. Les technologies dominantes actuelles devraient bientôt laisser la place aux technologies à base de lithium

L'état de l'art des technologies disponibles ou en cours de mise au point est très contrasté selon la nature des couples électrochimiques.

► Plomb-Acide (Pb)

Les batteries au plomb ont des performances limitées par une importante modification morphologique des matières actives au cours du cyclage qui en réduit le taux d'utilisation. Elles ont néanmoins l'avantage d'une production industrielle de masse depuis bientôt un siècle. Leur coût, nettement inférieur à celui des autres technologies, reste le principal attrait pour les constructeurs automobiles. La dernière Citroën C3 équipée d'un alerno-démarrreur utilise encore une batterie au plomb. L'augmentation du rendement des matières actives ayant jusqu'à ce jour été une butée, les améliorations possibles pourraient venir de nouvelles architectures internes (pseudo bipolaire, bipolaire) et de nouveaux procédés de mise en œuvre (compression, mousses métalliques).

Les batteries au plomb équipent aujourd'hui la quasi-totalité des petits véhicules électriques (chariots élévateurs, véhicules de golf, fauteuils roulants...), mais sont peu efficaces pour fournir l'énergie de puissance pour des véhicules routiers : les batteries au plomb qui équipent actuellement les voitures ont plus une vocation de réserve énergétique, spécialisée dans le stockage/déstockage de pointe.

► **Nickel-Cadmium (Ni-Cd)**

Longtemps restées du domaine des hautes technologies (aéronautique, télécommunications), les batteries Ni-Cd sont passées au domaine grand public avec l'outillage électroportatif. Elles ont connu en France un important développement avec les véhicules électriques du groupe PSA (Citroën AX, Saxo, Peugeot 106...) puis de Renault (Clio...). Réputées performantes et fiables, les batteries Ni-Cd souffrent, selon le mode d'utilisation, d'un « effet mémoire » réduisant la capacité utilisable. L'effet est cependant réversible et un cyclage approprié permet de retrouver la capacité initiale. Ce sont les réglementations européennes sur les métaux lourds qui ont condamné l'usage de cette technologie qui emploie de grandes quantités de cadmium, aujourd'hui interdit.

► **Nickel-métal hydrure (Ni-MH)**

La nature toxique du cadmium a conduit au développement du couple nickel-hydrure métallique pour la traction. L'utilisation d'un hydrure métallique pour l'électrode négative entraîne un surcoût mais apporte aussi une meilleure capacité. Les batteries Ni-MH tolèrent moins bien les surcharges et les températures élevées que les batteries Ni-Cd (risque d'explosion et d'incendie). Elles souffrent d'autres points faibles comme la difficulté de détecter la fin de charge, la durée de vie encore incertaine et leur prix. Mais en raison de leur capacité à fournir une puissance élevée et à assurer un nombre important de cycles, ces batteries sont largement utilisées pour les applications hybrides à forts régimes et faible amplitude de cyclage.

Panasonic a développé pour Toyota plusieurs générations d'accumulateurs Ni-MH de puissance. La seconde génération d'éléments prismatiques qui équipe le véhicule hybride Prius II fait référence en termes de performances et de fiabilité. La garantie offerte par le constructeur sur ce composant est de 8 ans. Le même type de batterie équipe l'hybride Honda Civic IMA. D'autres constructeurs comme GP Batteries proposent des produits aux performances un peu moins élevées mais à un coût nettement inférieur. En France, la SAFT propose, pour un coût encore élevé, une gamme Ni-MH basée sur les développements de SAFT USA.

► **Lithium-ion**

Des accumulateurs lithium-ion, dotés d'une électrode négative en carbone et d'une électrode positive à base d'oxyde de cobalt, ont été développés spécifiquement pour les applications automobiles. En France, aux Etats-Unis comme au Japon, des véhicules électriques équipés de telles batteries ont déjà démontré des performances jusqu'alors jamais atteintes.

Contrairement aux couples précédents, les batteries au lithium utilisent un électrolyte non aqueux. Ceci constitue un avantage en éliminant la réaction parasite de décomposition de l'eau. Cependant, la formulation d'un électrolyte est rendue délicate par un compromis difficile à réaliser. Outre une conductivité élevée dans la gamme des températures ambiantes, l'électrolyte constitué d'un sel de lithium en solution dans un solvant organique doit présenter une bonne stabilité chimique et thermique vis à vis des autres composants de la cellule. Ces incertitudes, non encore levées à ce jour pour des batteries de grande taille (risque d'échauffement voire d'incendie), ont amené Toyota, contrairement à ses intentions, à continuer d'équiper sa prochaine gamme Prius III de batteries Ni-MH.

En France, cette technologie est développée par la SAFT, à Poitiers pour les éléments de faible capacité, à Bordeaux pour les éléments de traction. Principalement pour des raisons de coût, ces accumulateurs sont aujourd'hui encore fort peu répandus. Parallèlement, on observe en Asie (Chine et Japon) un développement assez rapide de cette technologie porté par les marchés du portable et des véhicules légers (deux roues et voiturettes). La production en grande quantité permettra une baisse de coûts.

► **Lithium-ion Phosphate**

L'électrode positive d'une batterie lithium-ion est ici remplacée par un phosphate de métal, généralement du phosphate de fer. En plus des performances élevées et de la bonne tenue en cyclage des batteries lithium-ion, cette technologie à l'avantage d'une meilleure sécurité intrinsèque et d'un coût réduit du matériau. Outre leur grande disponibilité, les phosphates présentent une excellente stabilité lors des sollicitations électriques excessives et lors des élévations de température (stable jusqu'à 350°C). En raison d'une tension élémentaire plus faible, l'énergie spécifique de ce couple (120 à 140 Wh/kg) est un peu inférieure à celle du lithium-ion à base de cobalt. La cyclabilité est quant à elle très élevée (2000 cycles à 80 % de la capacité nominale). A titre d'exemple, aux Etats-Unis, la société Valence technology, basée au Texas, commercialise déjà ce type d'accumulateur tout comme la société BYD en Chine. Des essais effectués par la direction des études et recherches d'EdF confirment les performances annoncées.

► **Lithium-métal polymère**

L'utilisation d'une électrode négative constituée de lithium métallique permet théoriquement des capacités nettement supérieures à celles obtenues avec le carbone. Outre l'avantage d'un système entièrement solide (risque d'explosion faible), sa constitution interne, composée d'électrodes minces superposées autour d'un électrolyte solide en polymère extrudé permet d'envisager un coût de production avantageux ; par ailleurs on attend des packs près de 5 fois plus légers que des batteries au plomb correspondantes, une recyclabilité presque totale en fin de vie et une durée de vie estimée à 10 ans. Ce type de batterie nécessite cependant une température de fonctionnement proche de 80 °C pour assurer une conductivité suffisante. L'inconvénient majeur lié à l'électrode de lithium métallique est l'apparition, au cours du cyclage, de dendrites responsables de courts-circuits internes. En France, la société BatScap, qui appartient au groupe Bolloré, développe cette technologie et a acquis en mars 2007 les actifs de la société canadienne Avestor, qui était la première à commercialiser des modules de forte capacité.

► **Sodium - Chlorure de Nickel (Zebra)**

Le principe de base de la famille de batteries de type « chlorure de sodium-métal » dont fait partie la batterie Zebra a été breveté en 1975 par J.Werth. Depuis, cette technologie a subi une longue série d'améliorations pour atteindre aujourd'hui une performance, en termes de densité d'énergie, deux fois supérieures aux batteries nickel-cadmium. L'élément déterminant pour les performances et la fiabilité est l'électrolyte en céramique.

Cette technologie a été spécifiquement mise au point pour les applications véhicules électriques, transport lourd et transport public. La température interne de fonctionnement est comprise entre 270°C et 350°C. Les éléments sont enfermés dans un caisson isolé dont les parois externes ont une température de l'ordre de 30°C. Les principaux avantages de la technologie Zebra sont une densité d'énergie élevée (120 Wh/kg) et un bon rendement énergétique. La puissance est par contre pénalisée par la conductivité réduite de la céramique électrolyte.

Plus de 200 batteries Zebra équipent en Italie des autobus Autodromo électriques et hybrides, dont certains sont en service depuis 1998. Irisbus a choisi les batteries Zebra pour la version tout électrique de son minibus Europolis. En France, des bus électriques équipés de batteries Zebra sont en circulation à Lyon depuis fin 2004. Dans le domaine des utilitaires et des véhicules légers, les batteries Zebra équipent des utilitaires Daimler Chrysler et MicroVett. Think Nordic utilise des batteries Zebra pour son nouveau modèle de voiture électrique.

Compte tenu de l'énergie spécifique demandée, afin d'améliorer toujours davantage l'autonomie, les couples au lithium ou les technologies de type Zebra (Na-NiCl₂) devraient progressivement prendre le dessus sur les accumulateurs alcalins (Ni-Cd, Ni-MH), au fur et à mesure que les problèmes techniques et économiques (durée de vie, sécurité, coût...) sont en passe d'être résolus. La technologie Zebra, compte tenu de son handicap de puissance et des

incertitudes qui pèsent toujours sur l'adéquation de son mode de fonctionnement à des voitures particulières (température), paraît cependant plus dédiée aux véhicules plus lourds (livraison de fret, transport collectif...) qui peuvent beaucoup mieux accepter une configuration d'éléments en parallèle sous caisse (insertion d'éléments de sécurité en cas de mise hors service d'une partie de la batterie, conditions de refroidissement). D'ailleurs aucun constructeur ne l'annonce comme filière d'avenir pour les voitures « grand public ».

7.3.2. Les enjeux du stockage de l'électricité dans les batteries résident essentiellement dans l'autonomie, le temps de recharge, la fiabilité et le coût

► La caractérisation d'une batterie

La batterie électrochimique est l'organe qui doit répondre aux nécessités de stockage, de continuité et de fiabilité d'approvisionnement du véhicule en énergie électrique. L'accumulateur restitue sous forme électrique l'énergie produite par des réactions électrochimiques d'oxydation ou de réduction aux interfaces de deux électrodes séparées par un électrolyte. Celles-ci cèdent (anode) ou absorbent (cathode) des électrons. Les ions libérés circulent alors dans l'électrolyte.

Quatre caractéristiques définissent la technologie d'un accumulateur :

- sa densité d'énergie massique (ou énergie spécifique) : exprimée en Wh/kg, elle correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse ;
- sa densité d'énergie volumique, en Wh/l : elle indique la quantité d'énergie stockée par unité de volume ;
- sa densité de puissance : exprimée en W/kg, elle correspond à la puissance que peut délivrer une unité de masse ;
- sa « cyclabilité » : exprimée en nombre de cycles, correspondant à une charge et une décharge, elle caractérise la durée de vie de l'accumulateur, soit le nombre de fois où il peut restituer le même niveau d'énergie (après chaque recharge).

► Comparaison des caractéristiques techniques des différentes technologies disponibles ou envisagées

Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques des batteries utilisées ou à l'étude pour la traction d'un véhicule terrestre. Les couples nickel-hydrure métallique (Ni-MH) et lithium-ion (Li-ion) présentent des énergies massiques et des densités énergétiques très supérieures à celles des batteries traditionnelles plomb ou nickel-cadmium (Ni-Cd). Ces couples électrochimiques sont très utilisés dans les appareils nomades portatifs (téléphones mobiles, ordinateurs portables...). Mais le passage aux puissances et aux tailles de batteries exigées pour la motorisation automobile pose des problèmes de fonctionnement et de fiabilité non encore résolus à ce jour. Le type Zebra, qui offre une densité énergétique intéressante, a pour l'instant vu son développement limité à l'équipement d'autobus et de véhicules routiers lourds.

lepoint.fr

Comparaison des caractéristiques techniques des accumulateurs

	Plomb	Ni-Cd	Ni-MH	ZEBRA	Lithium-phosphate	Li-ion	Lithium-polymère
Energie spécifique (Wh/kg)	30-50*	45-80	60-110	120	120-140	150-190	150-190
Densité d'énergie (Wh/litre)	75-120	80-150	220-330	180	190-220	220-330	220-330
Puissance en pointe (W/kg)	Jusqu'à 700		Jusqu'à 900	200	Jusqu'à 800	Jusqu'à 1500	Jusqu'à 250
Nombre de cycles	400-600 ¹ 1200 ²	2000	1500	800	> 2000	500-1000	200-300
Autodécharge par mois	5 %	20 %	30 %	12% par jour	5 %	10 %	10 %
Tension nominale d'un élément	2 V	1,2 V	1,2 V	2,6 V	3,2 V	3,6V	3,7V
Gamme de température de fonctionnement	- 20°C à 60°C	- 40°C à 60°C	- 20°C à 60°C	- 20°C à 50°C	-0°C à 45°C (charge) -20°C à 60°C (décharge)	- 20°C à 60°C	0°C à 60°C
Avantages	Faible coût	Fiabilité, performance à froid	Très bonne densité énergétique	Très bonne densité énergétique, bonne cyclabilité	Très bonne densité d'énergie, sécurité, coût, cyclabilité	Excellente énergie et puissance	Batteries minces possibles
Inconvénients	Faible énergie, mort subite	Relative-ment basse énergie, toxicité	Coût des matériaux de base, danger en cas de température élevée	Puissance limitée, auto-consommation	Charge à température positive	Sécurité des gros éléments, coût	Performance à froid, coût
Coûts indicatifs (€/kWh)³	200 à 250 ¹ 200 ²	600	1500 à 2000	800 à 900	1000 à 1800	2000	1500 à 2000

Source : « le stockage électrochimique », dossier de l'ADEME, 2005 (Virginie SCHWARZ - Bernard GINDROZ)
Données techniques partiellement actualisées à 2007

* Les chiffres extrêmes des fourchettes correspondent à des tailles différentes d'éléments (les gros éléments ayant en général des énergies plus élevées) ou à des conceptions pour des applications différentes.

(1) conception étanche

(2) conception tubulaire

(3) par kWh de capacité de la batterie et pour les volumes actuels de production

On peut comparer le bilan de ces différentes technologies pour fournir une autonomie de 100 km à une voiture (sans utilisation des équipements autres que le moteur de traction). Les calculs sont effectués avec une consommation-type de 150 Wh/km (ce qui correspond à une consommation de 50 % supérieure à celle typiquement réalisée sur un cycle d'homologation par un véhicule citadin). Ces chiffres sont très théoriques, car ils ne tiennent pas compte en

particulier de la diminution de la capacité des batteries au fur et à mesure de l'augmentation du nombre de cycles effectués.

<i>Comparaison des technologies de stockage électrochimique pour une autonomie de 100 km</i>							
Technologies	Plomb Acide	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion	Li-ion Phosphate	Li-métal polymère	Zebra
Masse (kg)	300-500	187-333	136-250	78-100	107-125	78-100	125
Volume (l)	125-200	100-187	45-68	45-68	68-78	45-68	83
Prix (€)	3 000 - 3 750	9 000	22 500 - 30 000	30 000	15 000 - 27 000	22 500- 30 000	12 000- 13 500
Coût (€) par cycle	13-16	15	12-17	15	10-19	12-17	14-15

Ces chiffres sont fournis à titre indicatif, dans la mesure où ne sont définis ni le type de véhicule (et donc sa masse), ni le standard utilisé pour mesurer l'autonomie (type de conduite).

Ce calcul fournit néanmoins des ordres de grandeur ; il montre qu'en dépit d'un siècle d'application dans l'automobile, les batteries au plomb sont trop lourdes pour être utilisées dans des véhicules hybrides ou électriques. Ensuite, la technologie nickel-cadmium a fait l'objet d'une directive européenne (2006/66/CE) qui en a interdit l'usage pour les applications portables, en raison de la pollution qu'elle engendre.

► Les minima requis d'un véhicule électrique terrestre

On considère un véhicule électrique correspondant au standard actuel de performances (entre 70 et 100 kW de puissance, entre 80 et 110 km/h de vitesse de pointe).

Nos modes de mobilités imposent qu'un véhicule électrique – et donc sa batterie – offre au moins les caractéristiques suivantes :

- une autonomie de l'ordre de 200 à 300 km, soit une énergie et une puissance massiques importantes (de l'ordre de 200 Wh/kg et 400 W/kg) et une densité énergétique de 300 Wh/l pour rendre possible l'intégration de l'accumulateur dans le véhicule ;
- une énergie embarquée suffisante : de 10 à 100 kWh selon la taille du véhicule ;
- une durée de vie de 10 ans soit une « cyclabilité » élevée (supérieure à 600) ;
- une plage de température de fonctionnement adaptée aux conditions extérieures d'utilisation (- 40°C à plus de + 50°C) ;
- une capacité de recharge rapide, du moins partiellement (au moins 80 % de la capacité nominale).

En résumé, on peut estimer la quantité d'énergie à stocker en fonction des kilomètres à parcourir (autonomie requise) et de la masse en considérant une consommation d'environ 135 Wh/tonne/km et une puissance de 40 kW/tonne.

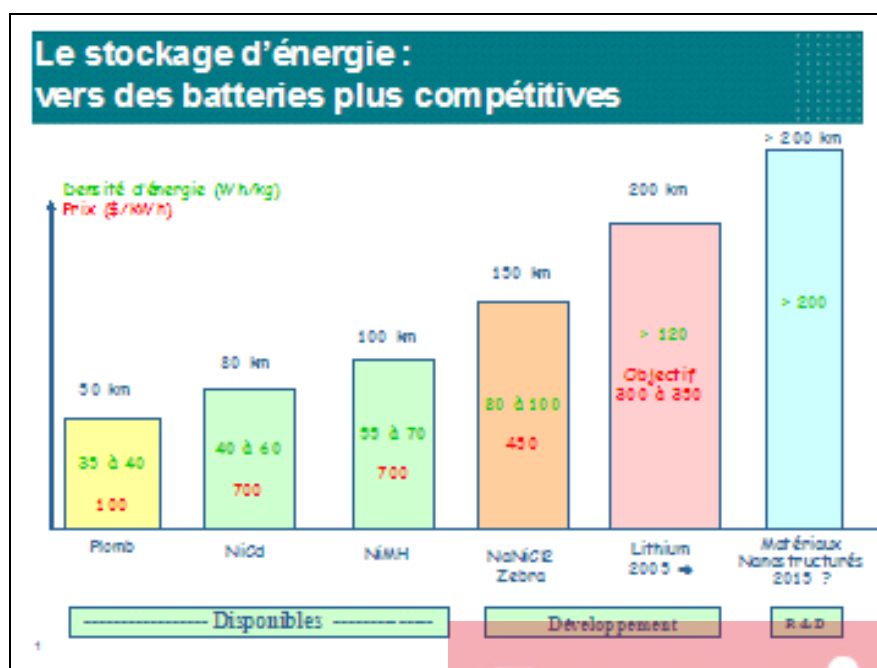
De la performance de la batterie dépend le fonctionnement des différents organes du véhicule. Outre les contraintes de fonctionnement énoncées ci-dessus (autonomie, temps de charge, durée de vie), elles doivent répondre :

- à des contraintes d'utilisation : chauffage et/ou refroidissement de la batterie en fonction du climat du pays dans lequel le véhicule est utilisé ;
- à des contraintes de fabrication : recyclage et pollution (par exemple batteries Ni-Cd), coût élevé de certains composants de la batterie (nickel...). Actuellement, le risque serait que soient mises sur le marché des batteries qui stockent des quantités d'énergie suffisantes, mais dont la probabilité d'explosion ou d'incendie soit trop élevée.

Les progrès technologiques de la batterie doivent répondre aux contraintes inchangées depuis plus d'un siècle. Il s'agit donc d'œuvrer pour :

- une augmentation de l'autonomie : augmentation de l'énergie spécifique,
- une augmentation de la durée de vie de la batterie: augmentation du nombre de cycles,
- une réduction du poids et du volume embarqués : augmentation de la densité de l'énergie volumique et de puissance,
- une réduction du coût de fabrication.

Une feuille de route d'évolution des performances, du prix et des autonomies accessibles en fonction des technologies de batteries avait été réalisée par EdF en 2005. On peut constater sur ce graphique qu'elle prédisait une domination des technologies à base de lithium, prédiction qui semble sur le point de se réaliser dans les délais prévus à l'époque ; on notera par contre que les objectifs de prix annoncés par EdF sont très généreux par rapport à d'autres estimations.



Source : EDF, 2005

La comparaison avec les tableaux précédents montre toute la difficulté d'avoir accès à des informations pertinentes sur les coûts ; une telle incertitude n'a pu être levée compte tenu de l'impossibilité d'obtenir des chiffres précis auprès des entreprises contactées.

7.3.3. La batterie lithium-ion représente l'option d'avenir la plus probable pour le véhicule particulier.

Parmi l'ensemble des différentes options technologiques pour le stockage de l'énergie, c'est la technologie lithium-ion qui fait l'objet des espoirs les plus importants. Elle serait capable,

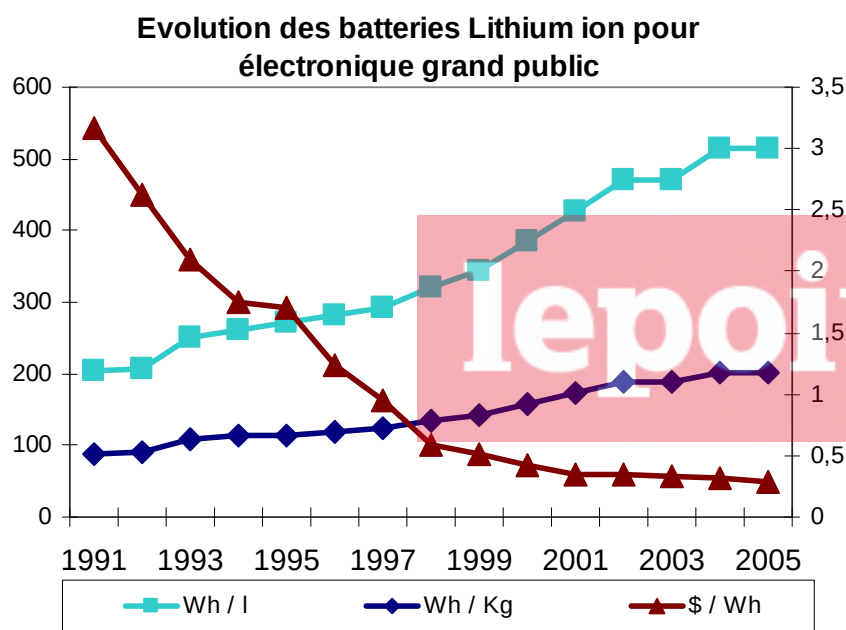
selon la plupart des experts de l'industrie automobile, de permettre à la fois le développement de véhicules hybrides rechargeables et de véhicules purement électriques.

Le tableau ci-dessous donne une idée du nombre de constructeurs ayant décidé d'appliquer la technologie Li-ion pour commercialiser avant 2015 des véhicules hybrides ou électriques. Ce tableau, établi à partir d'informations disponibles en juin 2008 dans la presse, ne prétend pas être exhaustif ; il illustre néanmoins l'intérêt manifesté par l'industrie automobile pour les batteries lithium-ion.

Type de véhicule	Constructeur	Date de commercialisation
Electrique	Mercedes + Smart	2010
	Subaru	2010
	Mitsubishi	2009
	PSA Peugeot Citroën	Date non communiquée
	Renault-Nissan	2010
	Tesla	2008
Hybride (full)	Toyota	2010
	General Motors	2010
	Volskwagen	2010
Hybride (mild)	Mercedes	2009
	BMW	2009

La technologie lithium-ion a déjà été commercialisée en masse pour des petits équipements. Elle équipe aujourd'hui les ordinateurs ou téléphones portables mais elle n'a encore jamais été déployée en masse par l'industrie automobile. Durant les années 1990 et la première moitié des années 2000, cette technologie a fait l'objet d'un rythme de progrès technologique (mesuré par la densité d'énergie massique et volumique des batteries) d'environ 5 % par an, et a réalisé des gains de productivité (mesurés par le taux de décroissance du prix de ces batteries) d'environ 10 % par an.

Le graphe ci-dessous illustre ces évolutions :



Sources: The Freedonia Group Inc., Huret Associates, Inc
(cité par Battery University) et Institute of Information Technology, Ltd. Japan

Cette rapide progression a permis aux batteries au lithium de surpasser les batteries Ni-MH au début des années 2000 et le prix des batteries lithium-ion, qui était environ le double de celui des batteries Ni-Mh à la fin des années 1990, était à la mi-2005 quasiment égal¹³.

Ainsi, la technologie des batteries lithium-ion est en cours d'adoption par une majorité de constructeurs automobiles, à la fois pour des véhicules purement électriques et pour des véhicules hybrides. C'est ce qui justifie les investissements de la part des fabricants de batteries, pour développer à la fois des batteries de grande capacité (pour les véhicules électriques et la plupart des types de véhicules hybrides rechargeables) et des batteries de grande puissance (pour les véhicules hybrides). Plusieurs fabricants de batteries (NEC, Sanyo, GS Yuasa entre autres) ont annoncé la production de masse (supérieure à 10 000 unités par an) de batteries au lithium pour véhicules électriques pour le début des années 2010.

7.4. Le véhicule électrique pur nécessite la création préalable d'une infrastructure pour la recharge des batteries

Le véhicule électrique pâtera encore longtemps d'une autonomie trop réduite. Le panorama des technologies de batteries laisse imaginer des autonomies théoriques jusqu'à 200 km, avec les développements les plus récents, mais aussi les plus coûteux. Le véhicule hybride rechargeable n'a pas ce problème ; c'est pourquoi il apparaît comme une option pertinente pour le véhicule du futur (on pourra se reporter au chapitre 8 pour plus de précisions sur les véhicules hybrides et hybrides rechargeables). Néanmoins, le véhicule hybride rechargeable suppose d'adjoindre à la chaîne de traction électrique une chaîne de traction thermique (hybride parallèle) ou un moteur thermique qui sert de générateur d'électricité (hybride série). Ces ajouts réduisent le volume des batteries nécessaire, mais complexifient le véhicule par rapport à une solution tout électrique, en raison de l'addition de différents composants (moteur thermique, réservoir de carburant, échappement...).

Aussi, différents constructeurs et équipementiers travaillent-ils sur deux pistes qui peuvent rendre possible, en théorie du moins, l'adoption massive de véhicules électriques : *les systèmes de recharge rapide* des batteries d'une part, *les systèmes d'échange rapide* des batteries d'autre part.

Chacun de ces systèmes ajoute une certaine complexité au véhicule, moindre que celle résultant de l'ajout d'un moteur thermique, mais il ne réduit pas le volume des batteries et il entraîne un investissement lourd en infrastructures.

- **Les systèmes de recharge rapide** reposent sur l'utilisation d'une puissance électrique très importante pour recharger la batterie : typiquement de l'ordre de 50 kW, contre 3 kW (valeur moyenne, qui varie d'un pays à l'autre en raison de standards différents) pour un système reposant sur une prise électrique ordinaire. Les systèmes de recharge rapide imposent une seconde prise pour recharger la batterie du véhicule, étant donnée la puissance (> 50 kW) qui devra être transmise. Ainsi, pour un véhicule équipé d'une batterie de 20 kWh (ce qui fournit théoriquement environ 150 km d'autonomie à un véhicule compact), un système de charge rapide permettrait de recharger la batterie en moins d'une demi-heure. Il s'agit donc d'un système qui peut équiper avantageusement certains parkings (centres commerciaux...) et des stations-service, mais qui ne permettra pas de faire rouler des véhicules électriques sur des distances comparables à celles que peuvent parcourir les véhicules thermiques : on ne

¹³ Source : EPRI, 2006 "technology review and assessment of distributed energy resources"

concevrait en effet pas de devoir s'arrêter 30 minutes tous les 150-200 km pour recharger la batterie.

Notons que ces systèmes de recharge rapides doivent encore faire l'objet d'études poussées car :

- de telles puissances engendrent une surchauffe des batteries, ce qui suppose d'adjoindre au véhicule un système pour les refroidir ;
- ces recharges rapides ont un rendement inférieur aux recharges sur prise classique, ce qui détériore le bilan « du puits à la roue » des véhicules électriques ;
- il faut évaluer d'impact économique de telles recharges, car proposer ces puissances de recharge engendrera un surcoût (infrastructure de charge, conception des véhicules) et réduira la durée de vie des batteries, donc l'intérêt économique du véhicule électrique ;
- ces systèmes seront utiles uniquement s'ils sont présents en grand nombre, ce qui suppose de trouver des acteurs capables de les installer en prévision d'un déploiement de véhicules électriques. Cela ne se produira que si *un standard* est défini et adopté par tous les constructeurs automobiles, à une échelle pertinente (par exemple européenne) ; des initiatives visant à standardiser ces systèmes et à faire émerger des accords entre constructeurs automobiles, équipementiers, énergéticiens et distributeurs d'énergie sont donc nécessaires pour rendre cette option technologique crédible.

• **Les systèmes d'échange de batteries** reposent sur la substitution d'une batterie chargée à une batterie vide. Ils présentent l'intérêt de pouvoir, en théorie, supprimer le problème de la durée de la recharge. Il est en effet possible de concevoir des stations d'échanges de batteries qui permettent de substituer les batteries d'une voiture en quelques minutes au moyen de robots manipulateurs (similaires à ceux utilisés dans les usines d'assemblage). Leur introduction suppose néanmoins *une infrastructure* dont la densité serait comparable à celle des stations-service actuelles, constituée de stations d'échange disposant d'un stock tampon de batteries chargées. Elle suppose également *une standardisation poussée des batteries*, car de tels systèmes perdraient tout intérêt si chaque constructeur automobile équipait ses véhicules de batteries de formes et de connexions incompatibles avec celles de ses concurrents. Enfin, elle suppose évidemment que des constructeurs soient prêts à *intégrer cette contrainte dans la conception* de leurs véhicules et que des acteurs disposant de capitaux importants soient prêts à *investir dans la construction d'un tel réseau* de stations (le coût d'une station d'échange de batterie pourrait se chiffrer en plusieurs millions d'euros).

Une expérimentation à l'échelle de petits pays (Israël, Danemark) devrait avoir lieu dès le début des années 2010 (on pourra se reporter à l'encadré sur le projet « Better Place » en début de ce chapitre). Elle permettra de juger de la pertinence d'un tel système, de son acceptabilité par les automobilistes, de la **volonté réelle de constructeurs automobiles, énergéticiens ou autres fournisseurs de services d'imposer cette solution.**

8. L'hybridation thermique/électrique représente un compromis séduisant ; l'hybride rechargeable sur le réseau constitue sans doute la solution d'avenir

8.1. L'hybridation recouvre une grande variété de techniques

Techniquement, les motorisations hybrides combinent deux sources d'énergie distinctes pour mouvoir un véhicule. Plusieurs formes d'hybridation peuvent être envisagées en théorie. Elles diffèrent selon la nature, le degré et le niveau de fonctionnalité de cette combinaison ; leur

maturité technologique diffère fortement, lorsque leur faisabilité n'est pas simplement contestée : l'association d'un moteur thermique à essence à un moteur électrique alimenté par une batterie, l'utilisation de deux types de carburants, l'adjonction d'une pile à combustible à un moteur électrique répondent, en théorie, à la notion d'hybridation.

On distingue trois familles de véhicules hybrides selon l'architecture de la chaîne de propulsion :

- mode électrique/électrique : combinaison d'une pile à combustible et d'un super condensateur (architecture de plusieurs véhicules à hydrogène) ;
- mode thermique/thermique : bicarburant, mélange ou circuits parallèles (véhicules flex-fuel¹⁴, véhicules essence / GNV) ;
- mode thermique/électrique : association d'une motorisation électrique à un moteur thermique en série ou en parallèle.

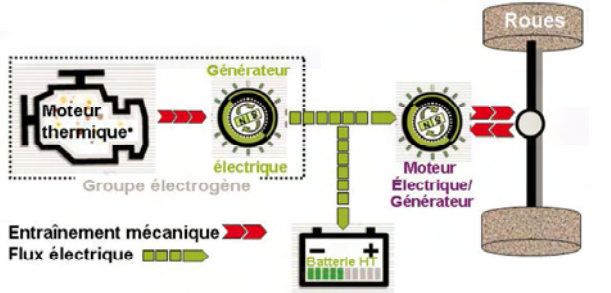
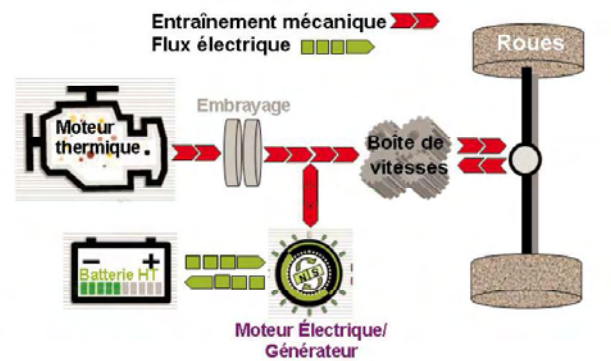
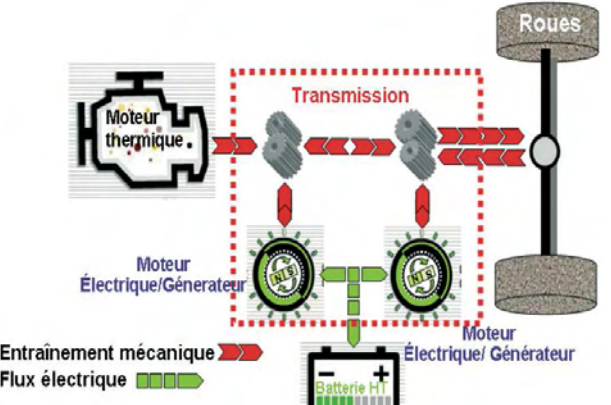
C'est cette dernière architecture qui sera examinée dans la suite du rapport : le véhicule hybride, faute d'être d'une conception originale comme le véhicule tout électrique, reste fondamentalement un véhicule thermique dont on améliore les performances grâce à l'ajout de composants électriques dans la chaîne de propulsion (en particulier le moteur). Dans cette optique, l'électrification du véhicule à essence n'est que partielle, voire secondaire. L'électricité peut être produite dans le véhicule ou apportée par le réseau ; dans ce dernier cas on parle de véhicule hybride rechargeable (« plug-in ») ; c'est alors un véhicule principalement électrique qui comporte un petit moteur thermique.

Fondamentalement le véhicule hybride thermique/électrique est un véhicule thermique amélioré par l'introduction innovante, dans le champ de la propulsion, de l'électricité dans la gestion et le stockage de l'énergie ; la propulsion électrique peut être mobilisée pour de courts trajets urbains (autonomie qui devra être suffisante pour traverser les centres-villes, ce qui n'est pas encore le cas pour les modèles vendus actuellement), mais la vraie vocation de l'énergie électrique est de servir d'appoint à la motorisation thermique ; on demande dans ce cas à la batterie d'être capable de stocker en peu de temps une certaine quantité d'énergie (récupération à la décélération, au freinage) et de la restituer encore plus rapidement pour fournir un appoint de crête à la propulsion (démarrage du véhicule, redémarrage du moteur « stop & start », effet turbo à l'accélération...).

Le véhicule hybride rechargeable doit par contre être considéré non pas comme le stade d'achèvement ultime du véhicule hybride simple, mais plutôt comme une préfiguration du véhicule tout électrique, notamment par la caractéristique de la batterie qui doit emmagasiner une grande quantité d'énergie (on lui demande moins de puissance de crête pour réagir aux sollicitations, mais une plus grande réserve d'énergie sur la durée). Même si nombre de composants sont de conception commune (moteurs électriques, électronique de puissance, régulation...), les systèmes de batteries répondent dans les deux cas à des spécifications radicalement différentes ; **les véhicules hybrides et les véhicules hybrides rechargeables répondent donc à des logiques industrielles différentes.**

L'hybridation optimise le fonctionnement du moteur thermique selon l'architecture de la chaîne de traction : hybride série, hybride parallèle, ou hybride à dérivation de puissance.

¹⁴ Véhicule acceptant différents types de carburants, dont l'E 85 contenant 85 % de bioéthanol

Hybride série : le moteur thermique, associé à un générateur électrique, fait office de groupe électrogène en transformant l'énergie issue de la combustion en énergie électrique. Combinée à celle fournie par la batterie, cette énergie est ensuite utilisée par le moteur électrique, qui assure seul la propulsion du véhicule. Il n'existe donc pas de liaison mécanique entre le moteur thermique et les roues. Les multiples conversions d'énergie (thermique => mécanique => électrique => mécanique) limitent le rendement maximal de cette chaîne de traction.	
Hybride parallèle : le moteur thermique sert principalement à déplacer le véhicule. Associé à une transmission d'un fonctionnement classique, on lui adjoint un moteur électrique qui utilise l'énergie des batteries. La récupération d'énergie cinétique pendant les phases de décélération et de freinage du véhicule assure la recharge des batteries. Les phases de roulage en mode électrique correspondent principalement aux situations où le moteur thermique est peu efficace, soit essentiellement à faible charge. Cette architecture permet temporairement un mode de fonctionnement 100% électrique.	
Hybride à dérivation de puissance : identique au précédent sur le principe de fonctionnement, il s'en distingue uniquement par une transmission totalement dédiée, dotée de machines électriques indispensables à son fonctionnement. La puissance délivrée par le moteur thermique suit deux chemins distincts : l'un mécanique, l'autre électrique. L'usage des machines électriques limite le rendement de la transmission dans certaines circonstances, spécialement lors des phases nécessitant la puissance maximale du moteur. Comme dans le cas de l'hybride parallèle, cette architecture offre la possibilité d'un mode de fonctionnement 100% électrique.	

Les niveaux de fonctionnalités adaptées aux technologies disponibles rendent le véhicule hybride plus intéressant en mode urbain. Son intérêt sur des longues distances est au mieux limité, sinon négatif, car le véhicule hybride est, toutes choses égales par ailleurs, alourdi par la double chaîne électrique/thermique. Trois niveaux d'hybridation sont couramment distingués :

► **L'hybridation partielle** correspond au cas où l'énergie électrique assiste les performances du moteur thermique, mais ne contribue pas directement à la propulsion durable du véhicule. Les deux moteurs sont montés en série (chaîne de traction hybride en série). L'hybridation partielle met en œuvre des techniques qui ont été développées pour les véhicules électriques.

- *Le « stop & start »*

Lorsqu'un véhicule est à l'arrêt, si le moteur fonctionne au ralenti, il consomme de l'énergie et émet du CO₂ ainsi que des gaz polluants qui sont maintenant de moins en moins tolérés dans les centres-villes et dans les embouteillages. Au ralenti, différents systèmes, dits « stop & start », permettent de couper le moteur thermique lorsque son fonctionnement n'est pas nécessaire. Il s'agit des situations d'embouteillages, d'arrêt au feu rouge... Dès que

l'accélérateur est activé ou que la pédale de frein est lâchée, le moteur redémarre. Le « stop & start » peut être débrayé en cas de nécessité (par exemple si la batterie est insuffisamment chargée). Sur un véhicule à moteur thermique, il existe de nombreuses possibilités d'intégrer ce type de systèmes. Les systèmes déjà commercialisés par Valeo et Bosch ou sur le point de l'être par Magneti Marelli permettent de réduire de plus de 20 % la consommation en ville, soit 5 % en cycle normalisé.

- *La récupération d'énergie au freinage*

Le freinage, au moyen de freins à tambour ou à disques, transforme la totalité de l'énergie cinétique du véhicule en chaleur. Il pourrait être assuré par conversion d'énergie mécanique en électricité au moyen par exemple d'un freinage électromagnétique qui, par induction, fournira un courant électrique, qui sera stocké dans le véhicule. Mais, contrairement à un véhicule électrique ou hybride, le véhicule thermique ne dispose pas d'une batterie ou de super capacités capables d'absorber cette électricité. Les constructeurs doivent donc ajouter un système capable de recueillir une grande puissance électrique en très peu de temps. Le coût de tels systèmes (autour de 500 €) explique pourquoi peu de constructeurs proposent cette possibilité alors qu'ils apportent un gain de consommation d'environ 5 %. Néanmoins, on peut noter que ce système se généralise dans les véhicules haut de gamme : à titre d'exemple, il fait partie du programme « efficient dynamics » de BMW et est, à ce titre, proposé sur la plupart des véhicules de la gamme de ce constructeur.

<i>Réduction potentielle des consommations du réservoir à la roue</i>	<i>Ordre de grandeur du gain potentiel</i>
Start & stop	5 à 8 % ¹ 20 à 25 % ² jusqu'à 40 % ³
Système de freinage régénératif	5 %

¹ sur le cycle normalisé

² en centre-ville encombré

³ dans le cas où le véhicule est arrêté 90 % du temps

- *L'optimisation du moteur thermique (« mild hybrid »)*

Mécaniquement, le moteur électrique est intégré en série entre le moteur thermique et la transmission. 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. La combinaison des courbes de couple du moteur thermique et du moteur électrique permet d'obtenir un couple résultant plus favorable aux démarrages. Le moteur électrique permet un surcroît de puissance et évite la surconsommation momentanée de l'accélération au moteur thermique. Ce niveau d'hybridation permet donc de diminuer la cylindrée du moteur thermique (cas de la Honda Civic Hybrid) et d'optimiser son rendement.

► *L'hybridation totale* (non rechargeable) consiste à associer en parallèle moteur électrique et moteur thermique (hybridation parallèle ou à dérivation de puissance). Ces architectures permettent une conduite ZEV (Zero Emission Vehicle), soit une propulsion sur des courtes distances (adaptée aux déplacements en milieux urbains) en mode électrique, sans intervention du moteur thermique (fonction E-drive® sur la Toyota Prius).

- L'hybridation totale permet l'interruption complète des deux moteurs du VEH au moindre arrêt de la circulation (par exemple un feu rouge). Au démarrage, le moteur électrique assure la première phase d'accélération du véhicule de 0 à 50 km/h environ ; au-delà, le moteur thermique reprend son rôle : la propulsion du véhicule hybride jusqu'à la vitesse de croisière est assurée par le moteur thermique uniquement. Le moteur électrique est alors utilisé en appoint pour fournir une puissance supplémentaire en cas d'accélération importante, par exemple lors d'un dépassement.

	Stop & start	Start & go	Mild hybrid	Full hybrid
Arrêt du moteur au ralenti	✓	✓	✓	✓
Freinage récupératif	-	✓	✓	✓
Downsizing du moteur thermique et assistance à l'accélération	-	-	✓	✓
Mode électrique	-	-	-	✓
Puissance électrique	2 kW	3 kW	10 kW	30 kW
Electronique de haute puissance	< 60V	< 60V	> 60V	500 V
Gain carburant (estimations sur cycle mixte) *	5 %	5 à 10 %	15 %	25 %
Surcoût de fabrication	~ 200€	~ 500€	~ 2000 €	~ 5000 €
Exemples d'applications	Citroën C3, Volkswagen Lupo	BMW Série 1 et 3	Chevrolet Tahoe GMC Yukon	Toyota Prius, Ford Escape Honda Civic, Nissan Altima

* données : constructeurs, équipementiers

Actuellement, la batterie la plus utilisée dans la chaîne électrique des véhicules « full hybrid » thermique/électrique repose sur le couple électrochimique nickel-métal hydrure (Ni-MH). Malgré des performances en retrait par rapport à celles des batteries à base de lithium (lithium-ion), les batteries Ni-MH gardent l'avantage de bien supporter de forts courants de charge et de décharge et sont beaucoup plus sûres en cas de surchauffe. A l'avenir, la technologie lithium-ion devrait l'emporter, avec des perspectives encore incertaines concernant les batteries lithium-métal polymère. Le développement de ces techniques, détaillées de façon plus précise dans le chapitre précédent consacré au véhicule électrique, conditionne la faisabilité des véhicules hybrides rechargeables.

lepoint.fr

Deux exemples de véhicules hybrides

Toyota PRIUS et Honda Civic (hybrides essences utilisant des batteries Ni-MH)

	Toyota Prius	Honda Civic
Moteur thermique	1,5 l, 77 ch	1,3 l, 95 ch, 123 Nm
Moteur électrique	50 kW, 68 ch	15 kW, 103 Nm
Puissance totale	115 CV à 4 000 tr/mn	115 ch, 170 Nm à 2 500 tr/mn
Consommation	4,3 l / 100 km	4,6 l / 100 km
Capacité des batteries	1310 Wh	870 Wh
Rejets de CO ₂	104 g/km	109 g/km
Autonomie électrique	2 km	A très basse vitesse seulement

► Projet PSA Peugeot Citroën – Hybride diesel électrique (HDi)

La consommation moyenne de ces voitures, qui existent mais ne sont pas actuellement vendues, se situerait à 3,4 l de gazole aux 100 km et les émissions de CO₂ seraient de 90 grammes par km du « réservoir à la roue ». Ces chiffres constituent un record pour des véhicules du segment des voitures moyennes, segment le plus populaire du marché européen. Le gain obtenu en comparaison d'un véhicule similaire équipé d'une chaîne de traction hybride essence serait de 1 litre aux 100 km sur cycle mixte, soit près de 25 %.

L'adjonction du système STT permet notamment aux véhicules Hybrides HDi, même en cas de décharge totale du pack de batteries haute tension, de démarrer et de rouler en mode thermique seul, contrairement à d'autres systèmes hybrides où un tel cas de figure entraîne une immobilisation totale du véhicule.

Peugeot 307 et Citroën C4 Hybride HDi dotés d'une chaîne de traction hybride diesel-électrique offriraient les caractéristiques suivantes:

- Moteur HDi 1,6 l + Système FAP
- Boîte de vitesses manuelle pilotée
- Système « stop & start » évolution II
- Moteur électrique et son onduleur
- Pack de batteries haute tension
- Electronique de contrôle dédiée
- Mode 100 % électrique pour des vitesses inférieures à 50 km/h
- Mode ZEV « étendu » sur sollicitation du conducteur.

Les supercapacités peuvent renforcer l'intérêt de l'hybridation non rechargeable.

À mi-chemin entre les batteries et les condensateurs, les **supercapacités**, développées par exemple par Batscap permettent d'absorber et de restituer de fortes puissances électriques sur des temps très courts correspondants à plusieurs centaines d'ampères sur quelques secondes ou dizaines de secondes.

Le principe des supercapacités repose sur la création d'une double couche électrochimique par l'accumulation de charges électriques à l'interface entre une solution ionique (électrolyte) et un conducteur électronique (électrode). À la différence des batteries, il n'y a pas de réaction d'oxydo-réduction.

L'interface entre les charges joue le rôle d'un diélectrique. L'électrode contient du charbon actif de surface spécifique très élevée. La combinaison d'une surface conductrice élevée et d'une épaisseur de diélectrique très faible permet d'atteindre des valeurs de capacité extrêmement élevées en comparaison des condensateurs traditionnels. L'électrolyte limite la tension des éléments à quelques Volts.

Outre leur rendement énergétique très élevé, les supercapacités présentent les avantages suivants :

- une durée de vie de plusieurs centaines de milliers de cycles de charges et décharges ;
- une faible sensibilité aux variations de température et de courant ;

- un contrôle d'état de charge fiable ;
- un temps de réaction quasi instantané.

Mais elles présentent l'inconvénient d'être très encombrantes.

► **L'hybride rechargeable**

Pour les véhicules hybrides actuellement commercialisés, la batterie qui alimente en électricité le moteur électrique est rechargée par le moteur thermique en marche ou par l'exploitation de l'énergie cinétique du véhicule (technologie « start & go »). Pour atteindre un niveau d'utilisation plus important de l'électricité, une solution supplémentaire consiste à pouvoir recharger la batterie en la connectant au réseau électrique domestique ou sur des bornes de charge publiques spécifiquement conçues.

Cette technologie se heurte aujourd'hui, tout comme le véhicule électrique, aux temps de charge requis et nécessite également la mise en place massive d'infrastructures de branchement au réseau électrique national dont la répartition sur un territoire doit être adaptée à l'autonomie très limitée des batteries actuelles : la Toyota Prius hybride rechargeable, dont les tests seront effectués conjointement avec EDF, devrait avoir une autonomie d'une quinzaine de kilomètres en mode électrique pour un temps de charge d'une heure.

La chaîne électrique d'aide à la propulsion du véhicule constitue une technologie transversale s'adaptant quasiment à toutes les formes d'hybridation, dont les éléments principaux sont : le moteur électrique, le pack batterie haute tension, l'onduleur et le système de freinage récupératif, sans oublier les éléments de régulation et d'électronique de puissance.

Les performances des batteries limitent l'utilisation de la partie électrique d'un véhicule hybride. On trouvera dans le chapitre consacré au véhicule électrique des éléments quantitatifs concernant les caractéristiques des différentes technologies des batteries, ainsi qu'un bilan CO₂, toutefois imparfait sur toute la chaîne « du puits à la roue ».

8.2. L'hybridation présente des avantages environnementaux et industriels

- *D'un point de vue environnemental, la technique hybride apporte à court terme un élément de réponse nouveau dans la lutte pour la réduction des émissions de polluants locaux.*

En combinant les avantages de deux motorisations distinctes, la technique hybride permet un développement progressif de véhicules plus économes en carburant que les véhicules thermiques conventionnels, s'adaptant sans difficulté aux infrastructures actuelles d'approvisionnement en énergie et répondant à nos besoins de mobilité et donc diffusables rapidement à terme (il faut cependant en moyenne de 10 à 15 ans pour renouveler un parc automobile). En utilisant l'autonomie électrique pour les déplacements en centre-ville, le véhicule hybride évite les émissions polluantes et le bruit.

En supposant une production primaire d'électricité peu émettrice en CO₂ (cas de la France), l'hybridation rechargeable réduit les émissions de CO₂ du véhicule. La mise au point de véhicules diesels hybrides améliorerait les performances du véhicule diesel : actuellement, les performances des versions hybrides essence sont proches d'une motorisation thermique diesel avec des gains CO₂ qui n'excèdent pas 10 % par rapport au moteur diesel et un coût nettement supérieur à celui d'un véhicule diesel équivalent. *Pour autant, l'avenir du véhicule diesel hybride est incertain, dans la mesure où il cumule le surcoût du diesel avec celui de la chaîne électrique (sans parler de l'évolution comparée des prix de l'essence et du gazole).*

- ***D'un point de vue industriel, la chaîne électrique constitue une technologie « transversale » s'adaptant à toutes les formes d'hybridation.***

La variété des technologies et des innovations utilisées fait du véhicule hybride une plateforme de technologie « transversale » dont le fonctionnement en situation réelle sert de banc d'essai en grandeur nature pour nombre de composants électroniques et électriques ; c'est apparemment la stratégie d'un groupe comme Toyota qui, fort de ses deux filiales industrielles (équipements et électronique) et grâce au parc d'un million de Prius en circulation, peut envisager une politique de brevets et de licences très structurée sur les composants électroniques de puissance, les batteries, les appareils électriques...

La commercialisation massive des véhicules hybrides devrait encourager l'investissement privé dans la recherche et développement de la partie électrique pour enfin l'adapter à nos modes de mobilité.

- ***Les coûts des véhicules hybrides doivent baisser et des progrès techniques doivent encore être réalisés pour permettre une diffusion de masse***

Le développement des véhicules hybrides thermiques/électriques passe inévitablement par un abaissement des coûts de la technologie pour accéder à des prix de marché réalistes, facteur d'accroissement des volumes de commercialisation.

Cependant, leur coût est encore élevé (+ 20 à + 30 %) : une série de composants s'additionne au prix de la chaîne de traction classique. C'est pourquoi les premiers véhicules hybrides sont des véhicules haut de gamme, ce qui rend plus facile l'absorption du surcoût de fabrication.

Au-delà du prix élevé, on peut distinguer les faiblesses suivantes, qui constituent une transposition partielle de celles du véhicule électrique :

- la fiabilité des composants (batterie et électronique de puissance) ;
- les limites intrinsèques de fonctionnement et d'utilisation de la batterie (autonomie, temps de charge, infrastructure d'approvisionnement) ;
- le bilan énergétique et environnemental d'un véhicule hybride rechargeable du « puits à la roue » n'est pas forcément positif et dépend fortement de la production de l'énergie utilisée. C'est le cas notamment de la production d'électricité à partir d'énergie fossile.

8.3. L'hybride rechargeable cumule les avantages du thermique et de l'électricité sans en supporter les inconvénients les plus pénalisants

- *L'hybride rechargeable a les avantages de l'électricité :*
 - il n'émet pas de pollution sur son lieu d'utilisation, en mode électrique ;
 - il est très silencieux à basse vitesse ;
 - il permet d'utiliser une source d'énergie indépendante des hydrocarbures.
- *L'hybride rechargeable n'a pas les inconvénients de l'électrique pur du fait de la souplesse que confère le passage au mode thermique en cas de besoin :*
 - il résout l'essentiel des conséquences des performances insuffisantes des batteries ; comme une autonomie électrique d'une cinquantaine de kilomètres serait suffisante, il nécessite un volume, un poids et un coût de batterie limités et peut supporter à court terme des défaillances des batteries ;
 - son développement sur le marché ne nécessite pas, en préalable, un équipement très dense de bornes de rechargement : les prises électriques existantes dans des maisons individuelles et

dans la plupart des parkings collectifs publics et privés permettent le rechargement de bon nombre de véhicules et laissent le temps de procéder à l'extension du réseau de bornes ;

- grâce au stockage à bord de combustible liquide, l'angoisse du conducteur de tomber en panne sèche n'a pas lieu d'être, parce qu'il dispose d'une grande autonomie et, en tout état de cause, d'une station-service de distribution de carburants pas très éloignée.

- *Pour se développer sur le marché*, l'hybride rechargeable doit surmonter des difficultés :
 - s'il nécessite moins de batteries qu'un véhicule électrique pur, il en requiert beaucoup plus que les véhicules actuels ; en outre, comme pour les véhicules électriques purs, les batteries convenant aux hybrides rechargeables doivent être de type « batterie de puissance », encore largement en phase de développement, contrairement aux véhicules conventionnels ou hybrides simples, qui sont équipés de « batteries de pointe », mieux maîtrisées ; les performances des batteries de puissance doivent donc encore beaucoup s'améliorer, notamment en fiabilité ;
 - de nombreux développements sont encore nécessaires sur différents composants, notamment en ce qui concerne les éléments de régulation et l'électronique de puissance ;
 - la complexité du véhicule hybride conduit à des coûts supplémentaires ; l'hybridation sera introduite sur de nombreux modèles si les performances obtenues en matière de bruit, de pollution locale, de consommation, d'émission totale de gaz à effet de serre sont convenablement valorisées par les pouvoirs publics au travers de tous les instruments dont ils disposent : réglementations, bonus-malus, taxation des carburants, limitation de circulation en centre-ville des véhicules thermiques...

La stratégie en ce domaine sera payante si elle est annoncée sans attendre, pour fournir le cadre incitatif clair nécessaire à la stratégie des constructeurs.

9. Les véhicules à gaz (essentiellement GNV et hydrogène) ne paraissent pas offrir des perspectives pertinentes en France

Ce chapitre ne traite pas des véhicules à base de pétrole liquéfié (GPL), ni des véhicules à gazogène.

- *Le gaz de pétrole liquéfié (GPL)* est un mélange de butane et de propane, liquide à température ambiante sous une pression relativement faible. Il est utilisé comme carburant en bicarburant avec l'essence ; comme la composition du GPL n'est pas stable, des difficultés de réglage sont apparues, notamment pour limiter les émissions de NO_x. Le véhicule à GPL est disponible depuis de nombreuses années (environ 150 000 exemplaires sont en circulation en France) et il bénéficie d'incitations financières sur l'investissement et la taxation du carburant. Son développement a été handicapé par quelques accidents et il ne fait plus guère d'objet de promotion commerciale en France, en dépit de ses aspects positifs (« le GPL : un carburant performant, économique et écologique »).
- *Le gazogène* a été inventé au début du XIX^{ème} siècle et utilisé au XX^{ème} siècle, plus particulièrement pendant la seconde guerre mondiale. Il transforme un combustible solide à base de carbone en gaz pauvre par combustion incomplète en présence d'air en vase clos : la combustion produit alors du monoxyde de carbone et du gaz carbonique. En présence d'eau, il se forme, en outre, de l'hydrogène. Le combustible utilisé est le bois ou le charbon de bois. Le rendement est faible (moins de la moitié de celui des hydrocarbures) et, malgré l'intérêt

renouvelé pour l'utilisation de la biomasse, la renaissance du véhicule à gazogène semble bien ne pas pouvoir être raisonnablement envisagée.

9.1. L'air comprimé n'est vraisemblablement pas viable pour la propulsion de véhicules grand public

Depuis plus d'un siècle, de nombreuses initiatives ont tenté de trouver des applications viables dans les transports à l'énergie emmagasinée dans l'air comprimé. A part quelques applications spécifiques, notamment dans les milieux industriels (secteur minier, manutention...), le véhicule à air comprimé n'a jamais trouvé sa place dans l'évolution automobile grand public et il est peu probable qu'il en soit différemment dans l'avenir.

De manière succincte, le véhicule à air comprimé, dans son concept actuel, est équipé de réservoirs en matériaux composites (fibres thermoplastiques) contenant de l'air comprimé sous forte pression (200 à 300 bars) et d'un moteur avec des pistons mus par la pression de l'air. La recharge en air comprimé pourrait se faire en 3 minutes dans une station-service d'air comprimé (ce qui n'existe actuellement que dans l'industrie) ou en quatre heures en branchant le compresseur intégré à la voiture à une prise de courant. L'intérêt majeur de ce type de véhicule réside bien sûr dans l'absence d'émissions polluantes lors de son usage local, même si le bilan CO₂ doit bien sûr tenir compte de l'origine de l'électricité qui a servi à comprimer l'air.

Les problèmes se situent à différents niveaux :

- *La détente* : lorsque l'air comprimé se détend, la température s'abaisse très fortement jusqu'à descendre très en dessous de 0°C (jusqu'à -100 °C, voire moins, selon le volume que l'on détend) ; cette circonstance, qui ne peut être compensée que partiellement par plusieurs étages de détente, occasionne un givrage très pénalisant, car le réchauffement de certaines parties du dispositif de motorisation grève singulièrement le bilan énergétique déjà peu favorable.
- *Le stockage de l'énergie* : la densité énergétique est faible, même pour des réservoirs de taille imposante : pour stocker l'équivalent d'un litre de carburant (10 kWh), il faut une réserve de 200 litres d'air comprimé à 300 bars, ce qui correspond à un volume d'implantation dans le véhicule de l'ordre de 250 litres !
- *Le rendement global* : en fait, en mode « air comprimé seul », on ne va récupérer en roulant qu'une partie de l'énergie électrique utilisée pour comprimer l'air introduit dans les réservoirs ; avec un rendement de compression de 60 % (on comprime avec 3 étages de 1 bar à 300 bars), on constate que l'on ne pourra utiliser que 60 % des kWh électriques dépensés, indépendamment du rendement du moteur à pistons (50 à 60 % au maximum)... ; les pertes mécaniques par frottement sont élevées.
- *L'autonomie* : liée au volume des réservoirs, avec 300 litres d'air sous 300 bars et un véhicule pesant 700 à 800 kg, compte tenu des rendements effectivement observés, l'autonomie pratique ne peut prétendre dépasser 30 à 35 km au grand maximum dans le cas d'un fonctionnement exclusivement à l'air comprimé, sur la base d'une vitesse maximale de l'ordre de 100-110 km/h.

De ce fait, les prestations proposées par le véhicule air comprimé (consommation équivalente à 2 litres d'essence aux 100 km) peuvent être atteintes avec un moteur thermique traditionnel de puissance comparable sur un véhicule de poids équivalent ; le véhicule à air comprimé n'apporte donc de ce point de vue aucun avantage.

Des versions alternatives plus élaborées sont actuellement envisagées, visant à hybrider le concept en utilisant simultanément une motorisation à essence et un « booster » à air comprimé. Cette solution résout le problème du réchauffage de l'air détendu grâce à l'utilisation des gaz d'échappement du moteur thermique. Un constructeur en France essaie de développer un type de véhicule à air comprimé mais les résultats ne pourraient être validés qu'à l'issue de la procédure d'homologation.

9.2. Le gaz naturel ne paraît pas bien adapté au cas de la France

9.2.1. *Le marché européen du GNV est limité*

Le gaz a su trouver sa place dans les utilisations les plus diverses, domestiques et industrielles, mais il n'a pas de marché captif. Il est le plus souvent remplaçable par d'autres formes d'énergie. Il représente une diversification par rapport au pétrole dans les approvisionnements énergétiques, mais pose les mêmes problèmes géopolitiques que ce dernier : l'OPEP contrôle à peu près la moitié des réserves mondiales de gaz et, avec la Russie, les trois-quarts, comme c'est le cas pour les réserves de pétrole.

D'un usage plus récent que le pétrole, le gaz est la source d'énergie qui a connu la plus grande croissance depuis le premier choc pétrolier de 1973 : il fournit aujourd'hui 21 % de l'énergie primaire consommée dans le monde, ce qui le place en troisième position, derrière le pétrole et le charbon, et devant la biomasse traditionnelle. Le gaz est plus difficile, et donc plus onéreux, à transporter et à stocker et son usage domestique n'est pas dépourvu de danger d'explosion.

Utilisé comme carburant automobile, il a été appelé GNV (gaz naturel véhicule) ; il diffère du GPL (gaz de pétrole liquéfié) par son état en usage carburant : gazeux pour le premier (pression de stockage à température ambiante : 200 bars), liquide sous sa propre pression de vapeur issu du raffinage pour le second (pression typique de stockage à température ambiante : 7 – 10 bars).

Le GNV n'est pas un carburant nouveau. Dans le monde, plus de 7 millions de véhicules GNV circulent, avec une mention particulière pour l'Argentine, le Pakistan et le Brésil, qui dépassent tous trois 1,5 million. Depuis 2 à 3 ans, l'intérêt pour cette énergie se manifeste également dans d'autres régions du monde, notamment sur le continent asiatique (Inde et Chine) ; malgré ses réserves de pétrole, l'Iran s'y intéresse aussi, car ce pays producteur et exportateur de gaz et de brut est contraint d'importer des produits pétroliers raffinés (objectif d'un million de véhicules au GNV d'ici 2010).

Le marché européen (550 000 véhicules GNV) est globalement peu développé. Plus de 435 000 véhicules dont 2 900 véhicules lourds (V.L.), l'ont adopté en Italie, championne d'Europe en la matière (avec 620 stations de remplissage). C'est ce qui explique la présence au catalogue Fiat du Multipla Natural Power roulant au gaz. La France (10 250 véhicules dont 2 750 V.L. / une cinquantaine de stations professionnelles), grâce aux flottes de bus et de véhicules d'entretien urbain converties au GNV, se situe au troisième rang derrière l'Allemagne (55 300 véhicules dont 1 920 V.L. / 800 stations de remplissage). La progression en France a été constante puisque seulement 600 véhicules fonctionnaient au GNV en 1997. Sous l'impulsion des instances européennes, cette situation semble devoir évoluer : un objectif indicatif de contribution à hauteur de 10 % de la consommation énergétique dans les transports en 2020 en Europe a été fixé par la Commission européenne pour l'utilisation du GNV.

L'utilisation du GNV dans les transports ne représente toutefois qu'une très faible part de la consommation globale de cette source primaire d'énergie (essentiellement utilisée pour la production d'électricité et le chauffage) et du parc automobile mondial.

Le GNV présente, dans les sites urbains, une alternative intéressante aux carburants traditionnels pour diminuer les émissions atmosphériques et réduire la dépendance énergétique des transports terrestres vis-à-vis du pétrole. Mais pour le chauffage des locaux, il représente une alternative non moins intéressante au fuel domestique, qui est en fait du gazole sans taxe. *Pour la France, il est plus rationnel de réserver le gaz naturel au chauffage des locaux en taxant le fuel domestique qui deviendra disponible comme carburant. On évitera ainsi la construction d'une infrastructure de stations-service de GNV.*

Les principaux développements du GNV au cours de ces dernières années ont concerné les véhicules lourds (autobus et bennes à ordures ménagères). Le GNV est désormais reconnu comme une solution efficace à de nombreux égards pour les véhicules de flottes opérant en milieu urbain. En France, le GNV s'est développé prioritairement sur le marché des flottes de véhicules captifs comme les autobus. Il y a déjà 2000 bus au GNV en circulation ; un nouveau bus sur trois est aujourd'hui acheté au gaz naturel. L'autre marché est celui des véhicules urbains, notamment des bennes à ordures avec près de 750 bennes au GNV, dont plus d'une centaine à Paris et 500 voitures de fonction consommant du GNV.

9.2.2. Le bilan environnemental n'apporte pas d'avantage décisif

• Le fonctionnement des véhicules au GNV

Le gaz naturel est un combustible fossile incolore et inodore (mais il est odorisé pour sa distribution), largement disponible dans la nature: il s'agit d'un mélange d'hydrocarbures contenant plus de 85 % de méthane (CH_4), entre 2 et 8 % d'éthane (C_2H_6), de l'azote et, en très faibles quantités, d'autres hydrocarbures tels que le propane et le butane. Il ne s'enflamme qu'au dessus de 540°C contre 400°C pour le GPL (gaz de pétrole liquéfié), 280° pour le supercarburant et 235° pour le diesel. A température ambiante, le méthane reste à l'état gazeux (il ne se liquéfie qu'à -160°C). Ce gaz a une densité de 0,6 par rapport à l'air. Le GNV a une faible énergie volumique (40 MJ/m³) pour le gaz à 1 bar, contre 35 300 MJ/m³ pour le gazole.

Le GNV, qui est alimenté sous forme gazeuse, doit être comprimé à 200 bars pour être stocké dans des réservoirs spécifiques en acier ou en matériaux composites. L'approvisionnement en station est d'une durée sensiblement égale à celle valable pour l'essence (environ 5-6 minutes pour un plein).

Les réservoirs sont maintenant de plus en plus souvent placés sous le plancher, ce qui permet de conserver intact le volume utile du coffre à bagages. Les réservoirs et les circuits du véhicule sont conçus pour résister à des chocs violents et sont équipés d'organes de sécurité qui, en cas d'incendie, contribuent à l'évacuation contrôlée du gaz naturel. Les modèles de véhicules GNV qui sortent des chaînes de fabrication des constructeurs ont subi positivement toute une série de crash-tests destinés à vérifier le comportement de l'équipement gaz embarqué en cas de collision et font l'objet d'une homologation européenne (règlement ECE 110).

Les techniques du gaz naturel sont applicables aux véhicules neufs mais aussi aux véhicules à essence, qui doivent alors subir une adaptation au nouveau carburant.

Les véhicules à gaz naturel se divisent en deux groupes, selon leur stratégie d'utilisation du carburant:

- les véhicules mono-carburant, qui fonctionnent exclusivement avec le gaz naturel.
- les véhicules bicarburant, qui possèdent, outre un réservoir à gaz, un réservoir à essence normal et peuvent, par conséquent, utiliser ces deux types de carburant. Si la réserve de gaz est épuisée, le moteur passe automatiquement en mode essence. Le fait de disposer de deux réservoirs sécurise l'alimentation du véhicule et augmente l'autonomie du véhicule.

Le choix entre bi et mono-carburant ne dépend en fait que de la disponibilité des réseaux de distribution, l'autonomie en mono-carburant étant limitée. Actuellement, les voitures roulant au GNV sont essentiellement des voitures bicarburant essence/GNV. Elles sont réalisées sur la base de voitures à essences auxquelles ont été ajouté un système d'alimentation en gaz et une centrale électronique d'injection capable de gérer les deux carburants. Les véhicules roulant au gaz naturel utilisent les technologies des moteurs thermiques, maîtrisées et disponibles aujourd'hui.

Côté conduite, la bicarburant est presque entièrement transparente pour le conducteur. Seuls quelques éléments supplémentaires au tableau de bord montrent la présence du GNV (jauge de niveau de gaz, sélecteur de mode de fonctionnement, indicateur du type de carburant en cours d'utilisation). Avec le sélecteur en position « essence », le fonctionnement de la voiture est en tout point identique au modèle à essence classique. En position « gaz automatique », le moteur est démarré à l'essence, puis au bout de quelques secondes, quand les conditions optimales sont atteintes, l'alimentation du moteur passe automatiquement sur le GNV. Lorsque les bouteilles de GNV sont vides, la centrale électronique commute d'elle-même sur essence.

Le passage d'un carburant à l'autre se fait dans la plus grande discrétion et le conducteur ne s'aperçoit de rien s'il ne surveille pas l'indicateur le renseignant sur le type de carburant en cours d'utilisation. Cette double carburant présente aussi l'avantage d'augmenter de 200 à 500 km (selon le modèle) l'autonomie du véhicule. L'autonomie en essence permet de compenser la faible densité de points de remplissage publics GNV en France.

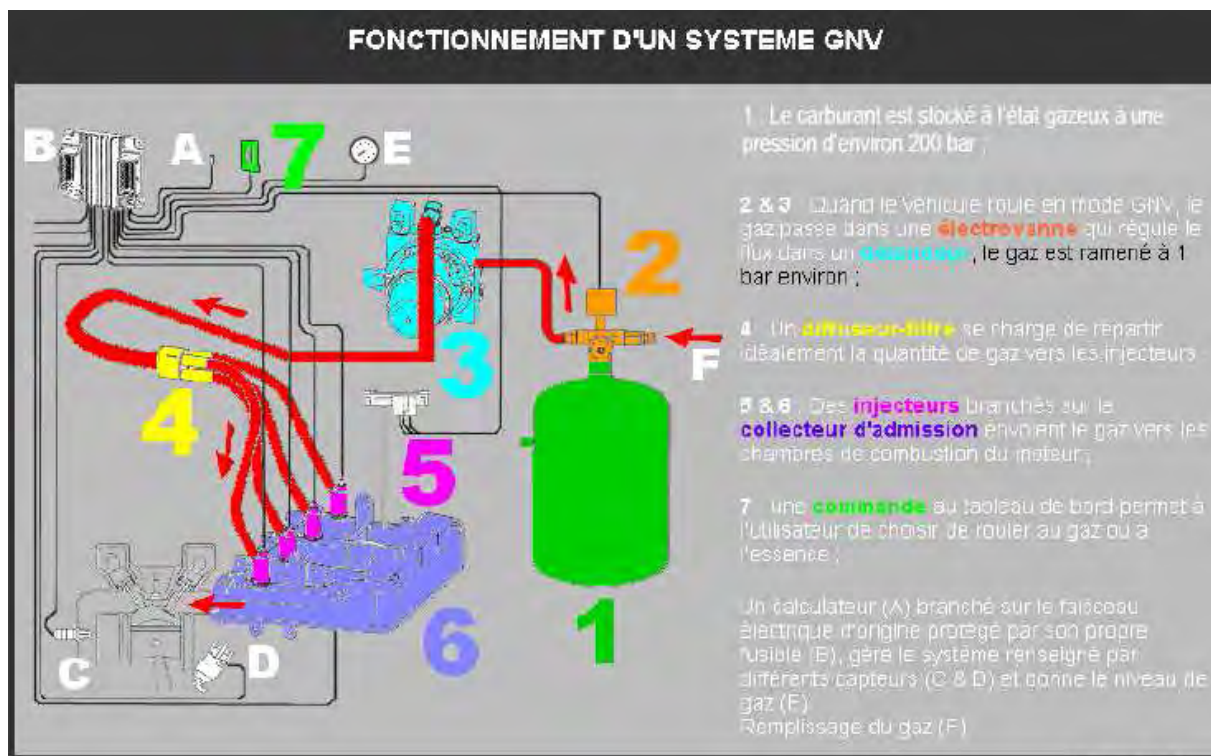
Les véhicules actuellement disponibles sur le marché sont des véhicules à bi-carburant gaz naturel/essence. Les constructeurs automobiles proposent aujourd'hui une gamme de véhicules bi-carburant allant de la petite citadine (Citroën C3, Fiat Punto, Fiat Panda...) à la grosse berline (Volvo S60, V70, Mercedes classe E) en passant par des monospace (Fiat Multipla, Opel Zafira) sans oublier les ludospaces, Volkswagen Caddy...).

Les constructeurs sont prêts à répondre à une demande de véhicules GNV, mais ils ne voient guère de grands développements en dehors de pays disposant d'importantes ressources en gaz et un outil de raffinage de pétrole limité (cas de l'Iran et de l'Argentine).

Des constructeurs automobiles tels que Fiat, Ford, Mercedes, Opel, Peugeot, Renault, Citroën, Volvo et Volkswagen fabriquent en série des véhicules à gaz naturel, en général sur le mode bi-carburant. Ces véhicules sont commercialisés dans toute l'Europe mais à ce jour, en France, seul Citroën propose au grand public une offre avec la C3 GNV (outre l'offre en petit utilitaire type Citroën Berlingo et Renault Kangoo). Dorénavant il faut compter avec Fiat qui lance en France 3 modèles propulsés par un moteur alimenté avec du GNV et de l'essence. Renault commercialise aujourd'hui dans les pays du Mercosur des Clio, Mégane et Kangoo équipés pour le GNV avec le moteur 1,6 l. Des développements sont en cours pour l'Europe et pour le Moyen-Orient

L'exemple de la C3-GNV de PSA

Le véhicule C3 GNV de PSA est doté d'un moteur essence-GNV de 1,4l et 68 ch.. La commutation à l'essence se fait automatiquement lorsque la réserve de gaz se trouve épuisée. Avec un volume de réservoir de gaz de 56 litres et le réservoir à essence classique, l'autonomie globale atteint 700 km. Cette C3 1.4i gaz naturel diminue de 23 % les émissions de CO₂ (soit 119 g de CO₂/km) par rapport à la version C3 1.4i essence.



Source FAM

• Le bilan environnement

► Réduction des émissions locales de gaz à effet de serre

Les véhicules actuellement commercialisés ont une base moteur thermique à essence et émettent localement 24 % de GES de moins que les modèles équivalents essence actuels ; ils se situent au même niveau que les meilleurs véhicules diesel ; selon l'IFP, le GNV dispose d'une forte marge de progression en matière de diminution de consommation et d'émissions de gaz à effet de serre, mais il en est de même pour les véhicules à essence.

► Limitation de la pollution locale

L'application des normes Euro 6 en 2014 va entraîner pour les véhicules diesel l'ajout d'un système de réduction des NOx, une augmentation de la consommation et un surcoût sensible, donnant indirectement de ce fait un avantage économique au GNV. Mais, d'ici là, le véhicule à essence aura sans doute également enregistré des progrès et rattrapé globalement le diesel en termes de performances.

► Le bilan global du puits à la roue

Contrairement aux Pays-Bas, autosuffisants, et à la Grande Bretagne, devenue pourtant récemment importatrice, la France est très dépendante des producteurs étrangers : les importations, qui couvrent 98 % de la consommation annuelle française, proviennent essentiellement de quatre pays (Russie, Pays-Bas, Norvège et Algérie).

Le bilan global « du puits à la roue » comprend le transport du gaz depuis le pays d'importation, les pertes des réseaux de transport (typiquement à 40 bars) et de distribution (typiquement à 4 bars), ainsi que l'énergie de compression du gaz en station-service en vue de sa livraison à 200 bars. Le bilan global n'amène pas de ce fait d'avantage décisif pour les véhicules GNV en termes d'émission de CO₂.

9.2.3. Le GNV bénéficie d'incitations fortes de la part des pouvoirs publics, sans grand effet jusqu'à présent

La Commission européenne a présenté dans son livre vert un objectif ambitieux qui fixe la part des carburants de substitution en 2020 à 20 % globalement et à 10 % pour le seul GNV. En respectant cet objectif, les émissions des véhicules particuliers pourraient être réduites en 2020 :

- de 2 Mt éq. CO₂ /an en supposant que la substitution soit répartie également entre essence et gazole,
- de 3,4 Mt éq. CO₂ /an en affectant la substitution de 10 % uniquement à des véhicules essence, remplacés par des véhicules hybrides GNV.

En France, les pouvoirs publics et les acteurs de la filière GNV 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 par la mise en service de 350 autobus au GNV ;
- un second protocole (novembre 1999-juillet 2005) a permis d'amplifier ces premiers résultats ;
- un troisième protocole a été signé le 4 juillet 2005 entre l'Etat et la filière GNV. Il fixe les objectifs communs pour 2010 : 100 000 voitures particulières et 300 stations-service.

Pour y parvenir, il a été 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 un compresseur. Mais Gaz de France a renoncé à les équiper, sans doute en raison du coût et du danger de fuite et d'explosion que représentent des compresseurs de gaz naturel à 200 bars chez des particuliers.

Les pouvoirs publics ont souhaité participer à la promotion du GNV en créant et en maintenant un cadre favorable au développement des véhicules utilisant le GNV. Il s'agit de mesures législatives, réglementaires et fiscales complétées par les aides au financement proposées par l'Ademe ; en particulier, le GNV ne supporte pas de taxe du même ordre de grandeur que celui de la TIPP supportée par l'essence ou le gazole.

L'acquisition d'un véhicule à gaz naturel, qui bénéficie d'un certain nombre d'aides financières, est généralement un peu plus coûteuse que celle du véhicule traditionnel équivalent mais les prix bas du carburant permettent de compenser en partie les coûts supplémentaires. Le prix du carburant gaz naturel est de 0,58 euros TTC/m³ (1m³ équivaut à 11litre SP98) dans le cadre de l'offre de Gaz de France. L'équivalent-litre de carburant gaz naturel affiche un prix (hors prix de la mini-station) environ de 50 % inférieur à celui de l'essence et 40 % inférieur à celui du diesel, car le GNV bénéficie de mesures fiscales non négligeables (suppression de la TIPP depuis le 1^{er} janvier 2008).

9.3. L'hydrogène, un carburant automobile utopique

L'hydrogène bénéficie d'une aura exceptionnelle : dans un monde où les sources d'énergie classiques, charbon, pétrole, gaz passent pour devoir être épuisées à terme pas très éloigné, où le nucléaire (et spécialement les réacteurs à neutrons rapides qui peuvent prendre la relève pour une très longue période) est contesté, l'hydrogène, l'élément le plus abondant sur notre planète, puisqu'il est un des atomes composant l'eau, non polluant, non toxique, pourrait être le sauveur. Le même raisonnement a justifié le lancement des travaux sur la fusion nucléaire (ITER en dernier lieu), sensée produire de l'électricité parée des mêmes vertus, puisque, partant de tritium et de deutérium, eux aussi extraits de l'eau.

L'espoir porté par l'hydrogène fait suite à celui des trois dernières décennies du siècle dernier pour la pile à combustible et semble avoir été dépassé ces dernières années par celui qui repose sur l'électricité, pour les transports. L'hydrogène est connu depuis plus de deux siècles et il est utilisé dans l'industrie, principalement pour ses propriétés chimiques (synthèse de l'ammoniac, raffinage de pétrole...) mais pas pour ses mérites énergétiques.

Le passage progressif d'une économie du carbone à une économie de l'hydrogène d'ici 2050 a pu être évoqué : les étapes intermédiaires seraient la mise en place d'un premier réseau de stations-service à hydrogène (exemple des « autoroutes de l'hydrogène » en Californie) en 2010, la construction en série de véhicules utilisant une pile à combustible en 2015, la généralisation de la distribution de l'hydrogène en 2030... Cet agenda reste toutefois fortement spéculatif car, outre deux handicaps majeurs liés au coût et à la sécurité publique, de nombreux verrous technologiques sont présents tout au long de la filière hydrogène, depuis sa production jusqu'à son utilisation dans un véhicule, en passant par sa distribution. Dès lors que certains constructeurs font rouler un prototype à hydrogène, les autres se sentent obligés d'assurer que « c'est pour après 2030 » même s'ils n'en croient pas un mot.

9.3.1. Le véhicule à hydrogène n'a d'intérêt qu'avec une pile à combustible

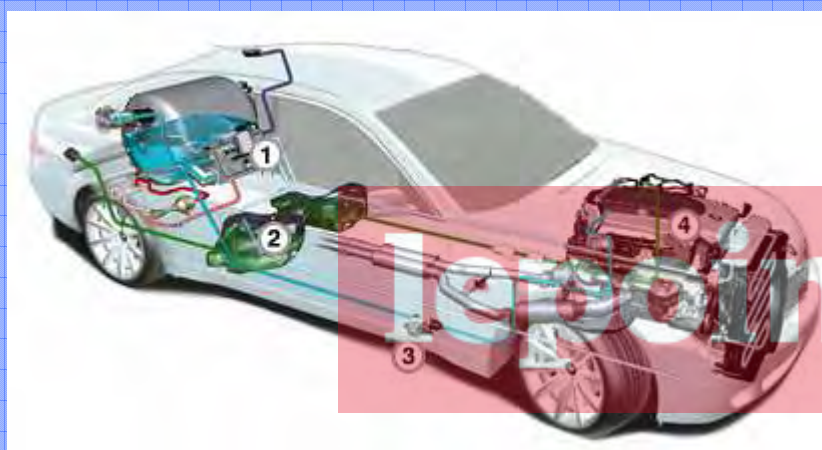
Sur le plan de la « consommation », l'hydrogène peut être utilisé soit en combustion directe, soit dans une pile à combustible (PAC) :

- Ford et BMW ont choisi d'orienter leurs recherches vers la première solution.
- La PAC est la voie d'investigation empruntée par la plupart des constructeurs (Renault, Nissan, Mercedes...); elle offre un rendement de 50 % pour une température de fonctionnement de 70°C.

► L'utilisation de l'hydrogène en combustion directe

Le principe est d'utiliser directement l'hydrogène dans la chambre de combustion, en lieu et place de l'essence. Le groupe BMW a présenté début 2008 un prototype basé sur un modèle haut de gamme de la série 7, d'une puissance de 260 ch.

BMW est le constructeur le plus avancé sur la voie de la combustion interne. Son modèle « Série 7 Hydrogène » dispose d'un moteur fonctionnant aussi bien avec de l'essence qu'avec de l'hydrogène.



Le véhicule à hydrogène de BMW

- 1 : réservoir calorifugé contenant 8 kg d'hydrogène liquide à -253°C
- 2 : réservoir à essence de 74 litres
- 3 : compresseur à hydrogène
- 4 : moteur fonctionnant à l'essence et à l'hydrogène

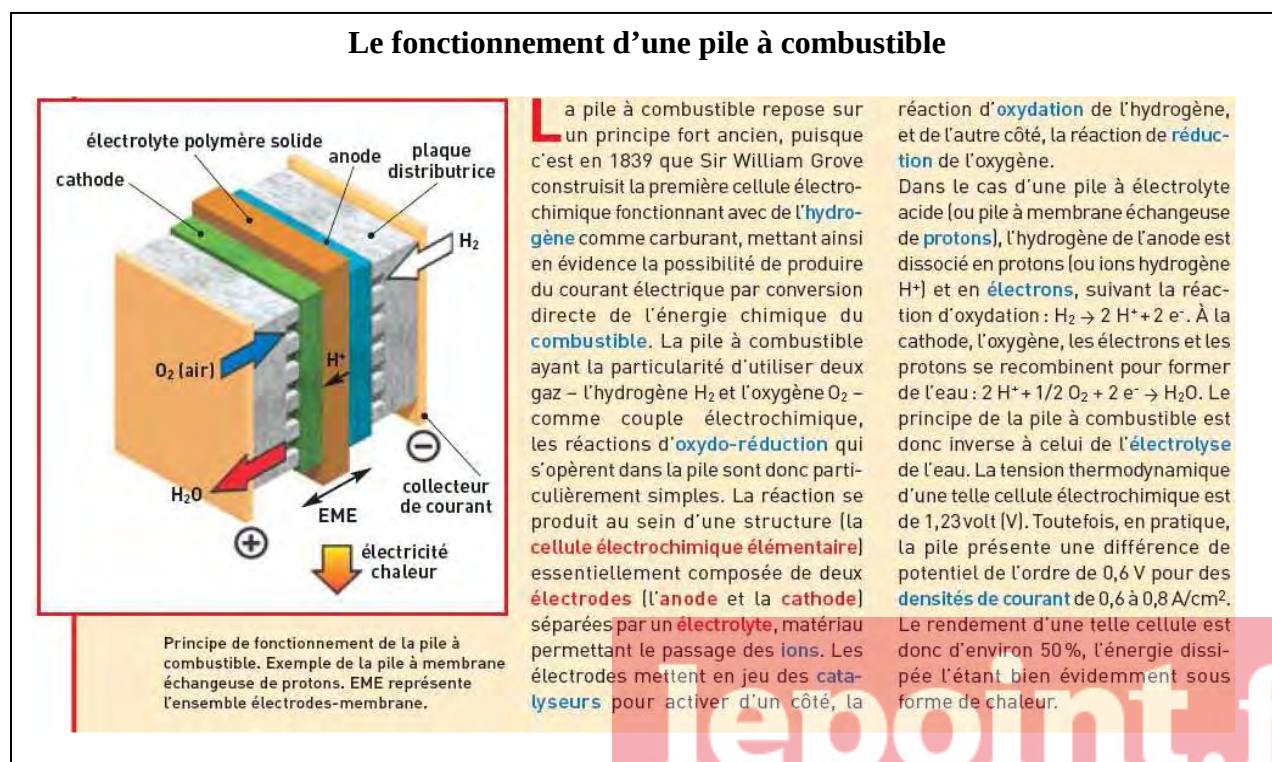
La combustion interne présente plusieurs inconvénients :

- L'hydrogène est utilisé sous sa forme gazeuse dans le moteur, mais avec un taux de compression insuffisant : il faut donc recourir à de grosses cylindrées (moteur V12 de 6 litres de cylindrée pour la Série 7). En outre les réglages sont difficiles à maîtriser car du gaz dans la chambre de combustion d'un moteur est plus difficile à contrôler que du liquide.
- Les bilans énergétiques (rendement énergétique d'environ 35 %) et environnemental (émissions de NO_x dues à la température élevée de combustion : 3000°C) sont plutôt mitigés.
- Pour des raisons d'autonomie, on fait coexister un réservoir classique à essence avec un réservoir à hydrogène. Cela induit un encombrement et un surpoids notables.
- Enfin, le coût d'un tel dispositif est important, en particulier pour le réservoir calorifugé.

L'avenir de ce type de véhicule paraît structurellement peu favorable en version grand public, même pour des modèles très puissants (susceptibles de recevoir des cylindrées importantes) et même en faisant abstraction du coût des infrastructures nécessaires.

► L'utilisation de l'hydrogène pour alimenter une pile à combustible

La pile à combustible combine l'hydrogène du réservoir avec l'oxygène de l'air. Un courant électrique et de l'eau sont les produits de cette réaction chimique élémentaire ; l'électricité produite fait ensuite fonctionner un moteur électrique. Le rendement électrique est d'environ 50 %, les 50 % restant étant de la chaleur.



Source : extrait du numéro 50 des « Clefs du CEA »

La pile à combustible a été, après les deux premiers chocs pétroliers, une idée à la mode, associée, dans le véhicule, à un convertisseur (reformeur embarqué) transformant un carburant (méthanol, éthanol, gaz) en hydrogène. Ces projets ont été abandonnés pour l'essentiel et la pile à combustible est aujourd'hui présentée comme le moyen le meilleur pour utiliser l'hydrogène directement comme combustible.

Comme son nom l'indique, dans son principe, la pile à combustible (couple électrochimique hydrogène-oxygène) est proche des accumulateurs (batteries lithium-ion, nickel-cadmium...) à ceci près que le stockage de l'énergie est extérieur à la pile, dans le réservoir à hydrogène.

La pile à combustible apparaît comme une solution séduisante pour la lutte contre la pollution locale ou dans le cadre de la diversification des sources d'énergie pour le secteur des transports. Elle est cependant très coûteuse : la réaction chimique nécessite une membrane en polymères ainsi qu'un catalyseur de platine, métal précieux, rare et mal distribué à la surface terrestre. Le rendement énergétique final est de peu supérieur au moteur à explosion traditionnel.

9.3.2. La production et la distribution de l'hydrogène sont maîtrisées industriellement, mais sont très coûteux

- *La production d'hydrogène* se fait actuellement, pour l'essentiel, par *reformage*, à partir de combustibles fossiles, principalement de gaz naturel. La molécule de méthane réagit sur de la vapeur d'eau très chaude pour obtenir, avec un rendement de 70 %, de l'hydrogène et du gaz carbonique. La méthode a deux inconvénients : le rejet à l'atmosphère du CO₂ et le coût de l'hydrogène qui est à peu près le triple de celui du gaz naturel. Cette opération n'augmente évidemment pas les ressources en énergie de la planète.

Des quantités plus modestes sont produites par *électrolyse* : la molécule d'eau est divisée pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène moyennant une consommation d'électricité de 5,5 kWh/m³ d'hydrogène. Pour l'avenir, l'hydrogène pourrait être produit avec des électrolyseurs plus performants que ceux d'aujourd'hui. L'électricité nécessaire à l'électrolyse est produite par des centrales électriques qui sont soit des centrales thermique, sources de CO₂, soit des centrales nucléaires. On parle aussi, mais pour un avenir éloigné, au-delà de l'horizon de la présente étude, de réacteurs nucléaires à haute température produisant l'hydrogène par dissociation directe de la molécule d'eau.

Ces différents procédés conduisent à se poser la question de l'intérêt de l'hydrogène comme vecteur énergétique : si on l'obtient à partir de gaz naturel, pourquoi ne pas utiliser directement le gaz naturel dans le véhicule ? Si on l'obtient à partir d'électricité, pourquoi ne pas utiliser directement l'électricité dans le véhicule, puisque l'hydrogène y est transformé en électricité dans une pile à combustible ?

- *La distribution de l'hydrogène* nécessite la mise en place d'un réseau spécialisé de gazoducs (hydrogène gazeux à quelques dizaines de bars) ou de distribution par camions (hydrogène liquide à - 253°C) pouvant difficilement s'appuyer sur les infrastructures existantes. Si un réseau de distribution d'environ 1000 km existe entre France, Belgique et Pays-Bas, il est destiné aux seuls industriels ; une distribution généralisée pour les véhicules est plus difficile et pose des problèmes de sécurité conséquents (forts risques de fuite, explosivité si confinement). Au niveau de l'utilisateur, mais avec un matériel de professionnel, le remplissage d'un réservoir à hydrogène (gaz à 700 bars obtenu par une station de compression dans une station-service) prend environ 5 minutes (débit d'environ 1 kgH₂/min).

Les investissements dans un réseau de distribution de l'hydrogène sont considérables : l'Agence internationale de l'énergie (AIE) chiffre à plus de 2 000 milliards de dollars la construction d'un tel réseau à l'échelle mondiale, dont 600 milliards pour le seul territoire américain¹⁵.

¹⁵ GM quant à lui estime à 10-15 milliards de dollars le déploiement d'un réseau suffisamment dense de stations-service distribuant de l'hydrogène...

9.3.3. *Le stockage de l'hydrogène à bord du véhicule constitue un défi technologique majeur*

- **Les technologies de stockage**

Que l'hydrogène soit sous forme gazeuse ou sous forme liquide, les technologies de stockage doivent être améliorées pour augmenter l'autonomie des véhicules :

► Le *stockage gazeux* permet actuellement une autonomie comparable à celle offerte par le pétrole, à condition d'installer un réservoir de 150 litres, pesant 100 kg et pressurisé à 700 bars¹⁶. Un tel réservoir coûte 1000 € avec une cible de 300 € en 2015 ; il est fabriqué par les entreprises spécialisées dans les matériaux composites de l'*Aerospace Valley* (Bordeaux-Toulouse). La matrice de fibre de carbone de l'enveloppe du réservoir représente environ 40 % des coûts. A terme, les progrès sur les matériaux composites et les polymères (constituant le *liner*, c'est-à-dire l'enveloppe interne anti-fuite) et, à plus long terme, sur les nanomatériaux, pourraient augmenter la résistance des réservoirs pour un stockage à 1200 bars, dans un volume de 87 litres.

La compression de quelques dizaines de bars (en sortie de l'électrolyseur ou du reformeur) à 700 bars dépense l'équivalent de 10 % du contenu énergétique de l'hydrogène compressé obtenu.

► Le *stockage liquide* permet certes un gain substantiel de volume, mais au prix d'une liquéfaction de l'hydrogène et d'une calorifugation du réservoir, opérations toutes deux onéreuses. En effet, la perte durant la liquéfaction est équivalente à 30 % du contenu énergétique de l'hydrogène tandis que l'évaporation de l'hydrogène liquide est significative (entre 3 % et 5 % de la masse par jour). Cette solution n'est pas considérée comme acceptable pour un véhicule grand public en raison du danger qui en résulte.

► Le *stockage solide* en est encore au stade de la recherche mais pourrait profiter des progrès dans les nanomatériaux. L'industrialisation à grande échelle de ce procédé n'est toutefois pas envisageable à l'horizon 2025.

► Enfin, le *reformatage* à bord du véhicule émet du CO₂ sans qu'il soit possible de le capter, pour un encombrement et un surcoût rédhibitoires.

- **Les problèmes de sécurité « grand public »**

Sur le plan de la sécurité, les obstacles semblent difficilement surmontables. L'amélioration de la sécurité passe avant tout par une meilleure compréhension des propriétés explosives des mélanges air-hydrogène, l'expérimentation, en conditions réelles, des procédés de distribution (cf. programmes « HySafe » du 6^e PCRD, « Ectos » en Islande...) et une réglementation appropriée. Mais l'hydrogène a la caractéristique incontournable de fuir par les moindres fissures et d'exploser très facilement, mélangé à de l'air, en engendrant des dégâts importants. Et que dire de ce qui se passerait en cas d'incendie d'un véhicule à hydrogène ?

Dans l'industrie, seule la chimie fine a l'expérience de manipuler de l'hydrogène à une pression de 700 bars ; le raffinage n'utilise l'hydrogène qu'à une pression de 350 bars. Or, les modes opératoires et les conditions de sécurité propres à l'industrie sont difficilement applicables au grand public : la difficulté de voir les fuites éventuelles et de les supprimer, l'obsolescence des matériaux des réservoirs de stockage et une mauvaise utilisation diminuent considérablement la sécurité. Quant bien même l'hydrogène serait largement distribué, quelques accidents pourraient signer la fin de la filière hydrogène, à l'instar de ce qui s'est passé pour la filière GPL.

¹⁶ La loi des gaz parfaits $PV=nRT=1,22 \cdot m$ (en USI) permet de calculer les relations entre volume, pression et masse d'hydrogène embarqué à température ambiante (20°C).

C'est pourquoi les problèmes de sécurité ruinent, à eux seuls, tout espoir de succès pour l'hydrogène carburant, du moins pour un usage « grand public ».

9.3.4. Les verrous technologiques, les coûts considérables de l'ensemble de la filière et les problèmes de sécurité constituent des handicaps insurmontables à l'horizon 2030

Les éléments problématiques dans la filière hydrogène sont souvent des verrous technologiques, soit insurmontables à l'heure actuelle, soit très onéreux :

- Le **coût de production** varie fortement selon la méthode retenue. Des arbitrages entre coût intolérable pour le grand public et émissions rédhibitoires de CO₂ sont souvent à effectuer à ce stade de la filière.
- Le **coût de distribution** : les investissements dans un pipeline véhiculant l'hydrogène est deux fois plus élevé que pour le gaz naturel (probablement plus dans la phase initiale de lancement) et ses besoins énergétiques de fonctionnement 5 fois plus importants. Pour une distribution d'hydrogène liquide par camions, solution retenue par Air Liquide, la liquéfaction dégrade fortement les performances énergétiques de l'ensemble de la filière.
- Le **coût de stockage** : actuellement un réservoir de stockage de l'hydrogène coûte environ 200 € par kilogramme de H₂ stocké. La filière liquide est plus onéreuse que la filière gazeuse (besoins électriques pour la liquéfaction et isolation du réservoir).
- Les **conditions de sécurité** draconiennes sont difficiles à assurer pour les usages grand public.

Comme il est habituel, s'agissant de projets nécessitant encore de nombreuses mises au point, les données économiques disponibles sont très variables, les promoteurs d'un nouveau concept ayant tendance à sous-estimer les difficultés économiques à résoudre et les coûts futurs. Mais, malgré cela, personne ne prétend que le véhicule à hydrogène sera moins coûteux que le véhicule thermique. En ce qui concerne le bilan énergétique, partant du seul schéma envisageable, celui de la pile à combustible avec un stockage à 700 bars embarqué, en chiffres ronds, le rendement de la compression est de 80 % et celui de la pile à combustible de 50 %, ce qui conduit à un rendement global de 40 % à bord du véhicule, c'est-à-dire à peu près le même rendement que celui du moteur thermique. Or il faut tenir compte du rendement de la production de l'hydrogène :

- Si c'est par *électrolyse*, le rendement est de l'ordre de 60 %. Autrement dit, l'opération consiste à consommer de l'électricité, 100 MWh par exemple, pour disposer, à l'entrée du moteur électrique du véhicule, de seulement 24 MWh d'électricité : autant envoyer directement les 100 MW d'électricité dans un véhicule électrique qui disposera alors de 80 MWh, le chargement/déchargement de la batterie consommant environ 20 MWh.
- Si c'est à partir d'une installation de *reformage* de gaz naturel, le rendement est de l'ordre de 70 %. Sachant que la compression de l'hydrogène pour son stockage à bord a un rendement de l'ordre de 90 %, l'opération qui consiste à consommer du gaz naturel pour produire de l'hydrogène utilisé dans le moteur a un rendement d'environ 32 %. Or un véhicule fonctionnant au gaz naturel peut avoir un rendement supérieur à 40 %. Il serait donc plus intéressant d'utiliser directement le gaz naturel dans le moteur thermique.

Les perspectives de généralisation du véhicule à hydrogène se heurtent donc à une rationalité très contestable, même après le terme de 2030.

10. Les perspectives de progrès communs à tous types de véhicules

10.1. Les évolutions conduisant au véhicule du futur résulteront autant de perfectionnements techniques que d'une modification des comportements et d'une meilleure organisation du secteur du transport individuel

Les leviers sur lesquels on peut jouer s'inspirent des considérations générales suivantes : le transport routier comporte trois segments : les déplacements par voiture particulière, le transport routier de fret et, entre ces deux segments, un ensemble disparate intégrant les transports collectifs urbains, les flottes captives, les véhicules de livraison, les taxis... L'agrégation des voyageurs-kilomètres ou des tonnes-kilomètres – comme cela se pratique souvent dans les études prospectives –, de même que la consolidation de statistiques énergétiques assemblant des consommations d'essence et de gazole représentent mal une réalité complexe, dans la mesure où les fondamentaux dans ces trois segments apparaissent très différents. Or la prise en compte de cette **segmentation des consommations** semble un élément clef d'une stratégie intégrée et équilibrée. Ainsi, s'il est peu raisonnable d'envisager à très court terme de modifications majeures sur la voiture individuelle et sur les camions, le segment intermédiaire pourrait évoluer rapidement grâce à des **politiques urbaines** qui commencent à émerger partout en Europe, et en particulier en France.

Les évolutions peuvent être de différentes natures ; on évoquera en particulier :

- *Des modifications de comportement :*

- une conduite rendue plus économe par l'information et la formation à « l'éco-conduite » ;
- le respect rigoureux des limitations de vitesse en vigueur ;
- la diminution de la mobilité des personnes, sans remise en cause de la liberté de se déplacer.

Celle-ci peut être stimulée par exemple par :

- la sensibilisation aux enjeux d'une modération volontaire des déplacements et du changement des modes de déplacement (un quart des déplacements motorisés en Ile-de-France est de moins d'un kilomètre et pourrait se faire, pour l'essentiel, sans recours à un véhicule automobile) ;
- le développement des substituts au transport (télétravail, services en ligne...) ;
- le développement des vélos électriques ainsi que des petits véhicules urbains électriques en libre service (système « autolib ») ;
- les incitations au développement du covoiturage ;
- la taxation des carburants, les péages urbains, la mise en œuvre pour les péages de modulations adaptées dans le temps (en ville, sur autoroutes, sur voies rapides) ;
- le coût du parking ;
- l'aménagement du territoire et, en particulier la densification des agglomérations, la répartition des centres locaux de services.

Il est clair que certaines de ces actions sont d'effet presque immédiat, alors que d'autres s'inscrivent dans des perspectives à long terme.

- *Une meilleure organisation du secteur des transports :*

Elle passe par le développement des modes alternatifs à la route, chacun dans sa zone de pertinence :

- les transports collectifs urbains et périurbains dans les grandes agglomérations ;
- les TGV pour la longue distance – ville à ville –.

En ce qui concerne les *déplacements de courtes distances*, cette optimisation doit pouvoir bénéficier d'initiatives destinées à réduire, de façon plus ou moins contraignante, la circulation (aménagement urbains, offre de moyens de locomotion alternatifs, péages...). Il est probable qu'une telle évolution sera de nature à structurer le marché, voire à le segmenter – ce qui peut conduire à multiplier le nombre de voitures –, et donc à favoriser l'apparition de nouveaux modèles dédiés majoritairement ou exclusivement à l'usage urbain (véhicules électriques notamment).

- *Les progrès technologiques en matière de véhicules :*

- **Dans l'immédiat :** *objectif d'émission, pour les constructeurs européens, de 130 g CO₂/km à l'horizon 2012 dans un premier temps (objectif Europe), de 120 g CO₂/km dans un second temps*, ce qui nécessite naturellement un accord au niveau européen. Pour que le renouvellement naturel du parc se réalise effectivement avec des véhicules émettant peu de CO₂ et si possible s'accélère, le rétablissement d'un système de *bonus-malus avec malus annuel* assis sur les émissions de CO₂ paraît être le dispositif le plus efficace.

Cette mesure serait beaucoup plus performante que l'augmentation du prix de la carte grise, laquelle ne s'appliquerait qu'aux véhicules neufs (ou d'occasion), ce qui aurait tendance à ralentir leur achat et à favoriser la pollution puisque les automobilistes auraient ainsi tendance à conserver des voitures plus anciennes et plus polluantes.

- **A moyen et long termes :** on ne peut anticiper valablement sur les évolutions fiscales et réglementaires, tant les décisions politiques en ce domaine peuvent être inattendues compte tenu de tous les facteurs qui pèsent sur ces décisions, notamment au plan européen. Notons à ce stade que les perspectives d'évolution du régime fiscal appliqué aux biocarburants de deuxième génération, au GNV ou à l'électricité utilisée pour la charge des batteries des véhicules électriques ou hybrides rechargeables sont encore chargées de beaucoup d'incertitudes.

10.2. La diminution des performances dynamiques deviendra incontournable

L'une des voies particulièrement efficaces pour augmenter la performance énergétique est la diminution des performances dynamiques. L'analyse des données sur le parc automobile actuel permet, à technologie inchangée, de mettre en évidence des potentiels importants d'amélioration de l'efficacité énergétique des automobiles. En effet, une relation étroite existe entre les performances dynamiques d'une automobile et la performance énergétique du véhicule. Ce paragraphe illustre cette relation et montre que, à technologie constante, une réduction modérée des performances dynamiques des véhicules pourrait apporter une contribution notable à l'amélioration de la performance énergétique des automobiles. Ces considérations concernent les véhicules à essence ou diesel, mais elles s'appliquent bien évidemment à tous types de véhicules quel que soit le mode de propulsion.

► Les indicateurs de la performance dynamique d'une voiture

Pour un modèle donné de voiture, la puissance du moteur se décline en un nombre restreint d'indicateurs : le couple maximal utilisable, la vitesse maximale atteignable sur piste (ou sur autoroute en Allemagne), l'accélération généralement mesurée par le temps nécessaire pour atteindre 100 km/h départ arrêté ou les 1000 m départ arrêté, le temps nécessaire pour passer de 80 à 120 km/h...

Ces indicateurs, du moins ceux relatifs à la vitesse maximale ou à l'accélération, sont souvent mis en évidence dans les revues spécialisées dans l'automobile et dans les publicités pour satisfaire et entretenir l'attrait de la performance sportive et l'ego de l'automobiliste.

Ce paragraphe fournit une analyse de la relation entre la performance des véhicules et leur consommation. Il fait apparaître que la réduction des performances est un levier permettant de réduire significativement la consommation des véhicules, sans nuire à la sécurité – au contraire – ou à la liberté que procure une automobile. La performance des véhicules sera mesurée par les deux paramètres les plus couramment utilisés dans l'industrie automobile : vitesse maximale et temps nécessaire à l'accélération de 0 à 100 km/h.

► Comparaison de la performance des voitures

Afin d'analyser la relation entre la performance des véhicules et leur consommation, on choisit de comparer ce couple « performance-consommation » à partir de données issues de différents constructeurs automobiles.

Parmi les différents segments du marché automobile, on peut effectuer l'analyse sur le segment des voitures dites « compactes » (segment M1 ou C dans les dénominations de l'industrie automobile). Ce sont de petites berlines, d'une longueur comprise entre 4,05 m et 4,5 m, également appelées « familiales compactes ». Dans ce segment, les volumes de vente sont très importants : en 2007, parmi les dix véhicules les plus vendus en France, cinq appartenaient à ce segment de marché (source : CCFA).

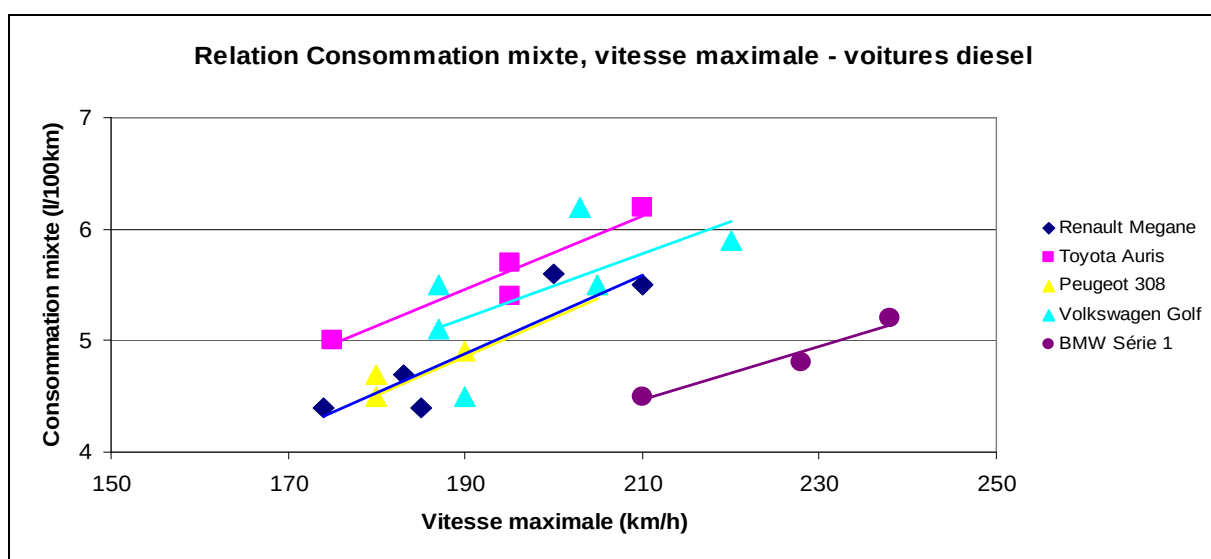
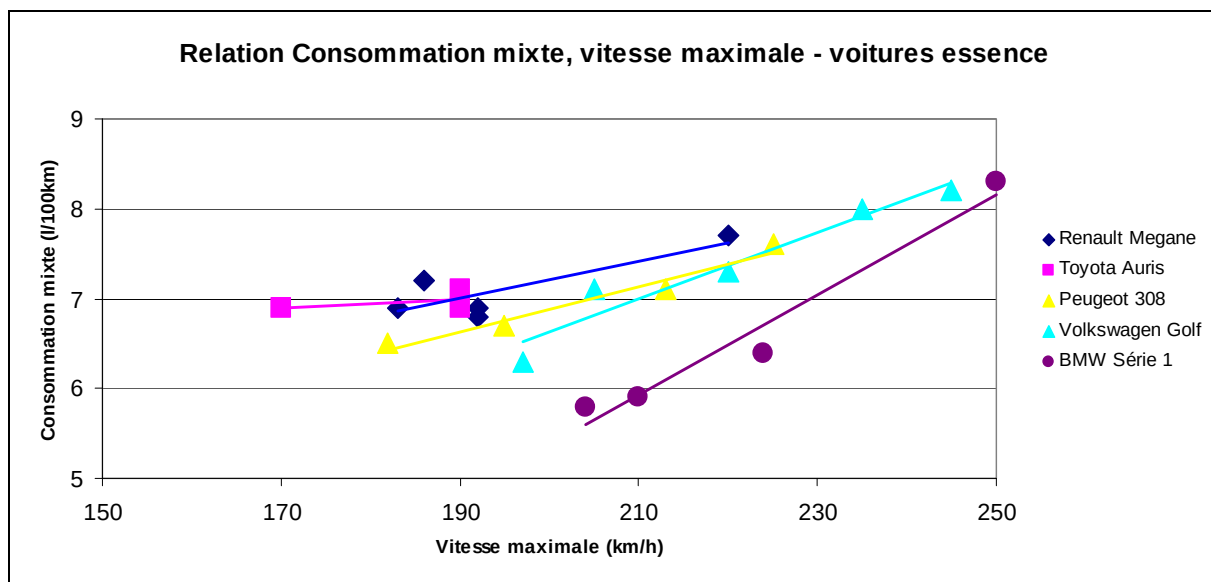
Pour analyser la relation entre performance et consommation pour les véhicules de ce segment, les données relatives à cinq des modèles de ce segment de marché ont été collectées (directement sur les notices techniques des constructeurs) : deux modèles de groupes français, deux modèles de groupes allemands et un modèle d'un groupe japonais. Il s'agit des BMW série 1, Volkswagen Golf, Peugeot 308, Renault Mégane, et Toyota Auris. Il s'agit de berlines compactes, dont les longueurs sont comprises entre 4,2 m et 4,27 m.

Chacun de ces modèles propose plusieurs motorisations essence et plusieurs motorisations diesel.

10.2.1. Une vitesse de pointe inutilement élevée coûte très cher en consommation

Le premier critère de performance dynamique d'une voiture est *la vitesse maximale*. En effet, les modèles cités ci-dessous permettent tous d'atteindre des vitesses très largement supérieures aux 130 km/h, vitesse maximale autorisée en France ainsi que dans la plupart des pays européens (à l'exception notable de l'Allemagne). Les graphiques ci-dessous présentent la relation entre vitesse maximale des véhicules et la consommation mixte en carburant (la consommation mixte étant pondérée sur cycle urbain et sur route à vitesse stabilisée selon les tests normalisés).

lepoint.fr



Source : CAS d'après données constructeurs (juillet 2008)

Ces graphes conduisent au constat suivant : à modèle équivalent, l'augmentation de la performance du véhicule de 10 km/h en vitesse maximale se fait au prix d'une dégradation importante de la performance énergétique du véhicule, comprise entre 0,2 et 0,4 l/100km dans le cas des moteurs diesel, entre 0,2 et 0,6 l/100km dans le cas des moteurs à essence.

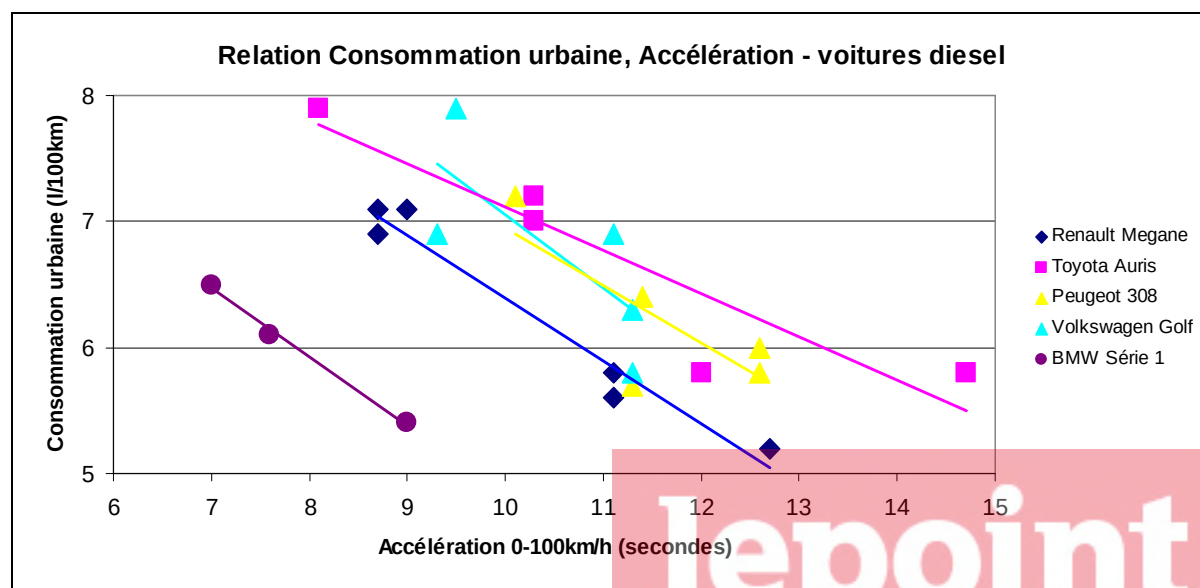
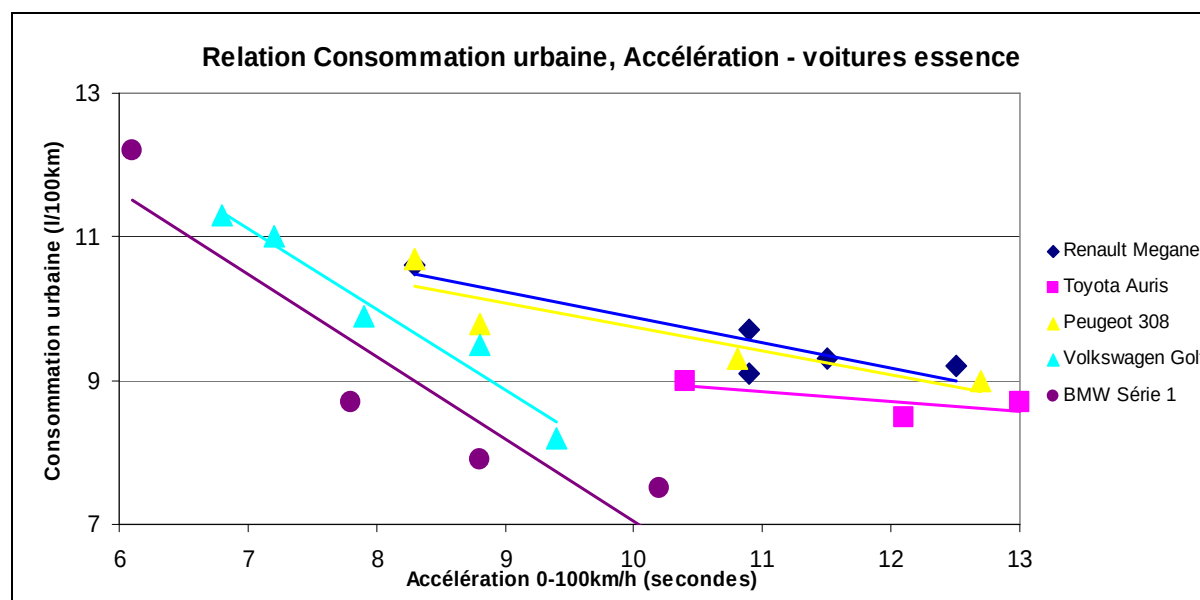
Des études menées par l'INRETS fournissent des résultats concordant, en montrant que l'accroissement de la vitesse de pointe de 10 km/h à la construction d'un modèle se traduisait par une augmentation de consommation de 0,4 à 0,7 l/100 km en ville et de 0,2 à 0,3 l/km sur route.

Ainsi, la mise sur le marché de véhicules capables de rouler largement au-delà des limites de vitesses autorisées a un double impact négatif pour les automobilistes : ils les expose au danger de telles vitesses (danger d'accident ou risque de contravention) et il les conduit, à mode de conduite identique, à consommer à tous les régimes plus de carburant qu'avec des véhicules aux performances plus limitées. On conçoit dès lors l'importance des propositions commerciales des constructeurs et de l'attitude des consommateurs au moment de l'acquisition d'un véhicule.

10.2.2. Une accélération inutilement élevée coûte très cher en consommation

Le second critère de performance dynamique est l'accélération. A la différence de la vitesse maximale, qui fait l'objet de limitations en fonction du type de route, les réglementations ne limitent pas l'accélération des véhicules. C'est une des raisons pour lesquelles ce paramètre a tendance à différencier les véhicules.

Les graphiques ci-dessous illustrent, aussi bien pour les motorisations essence que diesel, la relation qui existe entre la consommation en carburant (mesurée par la consommation mixte) et l'accélération (mesurée par le temps nécessaire pour passer de 0 à 100 km/h) :



Source : CAS d'après données constructeurs (juillet 2008)

Ces graphes appellent la conclusion suivante : à modèle équivalent, l'augmentation de la performance du véhicule de 1 seconde sur le segment 0-100 km/h se traduit par une dégradation importante de la performance énergétique du véhicule, comprise entre 0,3 et 0,6 l/100km dans le cas des moteurs diesel, entre 0,3 et jusqu'à 1 l/100km dans le cas des moteurs à essence en cycle urbain.

Ainsi l'augmentation des performances dynamiques d'une automobile implique toujours une diminution significative de la performance énergétique. Notons que ce résultat s'applique aussi bien pour des constructeurs généralistes que pour des constructeurs qui misent sur la sportivité de leur véhicule.

10.2.3. Vouloir des performances inutilement élevées coûte particulièrement cher en ville

On s'intéresse ici au segment des berlines compactes à vocation familiale, qui sont généralement prévues pour des trajets de longue distance avec 5 personnes à bord. Sur le marché européen, ces véhicules ont une longueur qui varie entre 4,50 m et 4,80 m.

Pour illustrer la relation entre performance et consommation pour les véhicules de ce segment de marché, les données relatives à quatre des modèles de ce segment ont été collectées (directement sur les notices techniques des constructeurs) : deux modèles de groupes français, deux modèles de groupes allemands. Il s'agit des BMW série 3, Volkswagen Passat, Peugeot 407 et Renault Laguna. Ce sont des berlines familiales dont les longueurs varient entre 4,55 m et 4,76 m.

Chacun de ces modèles propose plusieurs motorisations essence et plusieurs motorisations diesel. Ci-dessous, on compare, pour chacun de ces modèles, les performances et les consommations de la motorisation la plus puissante et de la motorisation la moins puissante que chaque constructeur propose.

Moteurs diesel	Performance (0-100 km/h en secondes)	Vitesse maximale	Consommation en ville	Consommation mixte
BMW Série 3				
Minimum	9,3	210	5,1	4,7
Maximum	6,2	250 (bridage)	9,1	6,7
Volkswagen Passat				
Minimum	12,1	188	7,2	5,6
Maximum	8,6	223	8,5	6,5
Peugeot 407				
Minimum	11,7	192	6,8	5,3
Maximum	8,5	230	11,7	8,4
Renault Laguna				
Minimum	12,1	192	6,1	4,9
Maximum	8,5	222	8,6	6,5
Moteurs essence	Performance (0-100 km/h en secondes)	Vitesse maximale	Consommation en ville	Consommation mixte
BMW Série 3				
Minimum	10,8	210	7,7	5,9
Maximum	5,6	250 (bridage)	13,2	9,1
Volkswagen Passat				
Minimum	12,4	190	10,1	7,7
Maximum	6,9	246	13,9	9,8
Peugeot 407				
Minimum	10,3	203	10,5	7,7
Maximum	6,4	235	14,5	9,8
Renault Laguna				
Minimum	11,7	192	10,4	7,6
Maximum	7,8	232	11,5	8,2

Source : CAS d'après données constructeurs (juillet 2008)

Ces données brutes permettent de calculer, pour chaque modèle et pour chaque type de motorisation, les écarts de performances dynamiques et de performances énergétiques entre la motorisation la plus puissante et la moins puissante :

Ecart entre motorisation la plus puissance et la moins puissante	0-100km/h, secondes	Vitesse maxi, km/h	Consommation ville (l/100km)	Consommation mixte (l/100km)
Moteurs essence				
BMW Série 3	48%	19%	71%	54%
Volkswagen Passat	44%	29%	38%	27%
Peugeot 407	38%	16%	38%	27%
Renault Laguna	33%	21%	11%	8%
Moteurs diesel				
BMW Série 3	33%	19%	78%	43%
Volkswagen Passat	29%	19%	18%	16%
Peugeot 407	27%	20%	72%	58%
Renault Laguna	30%	16%	41%	33%

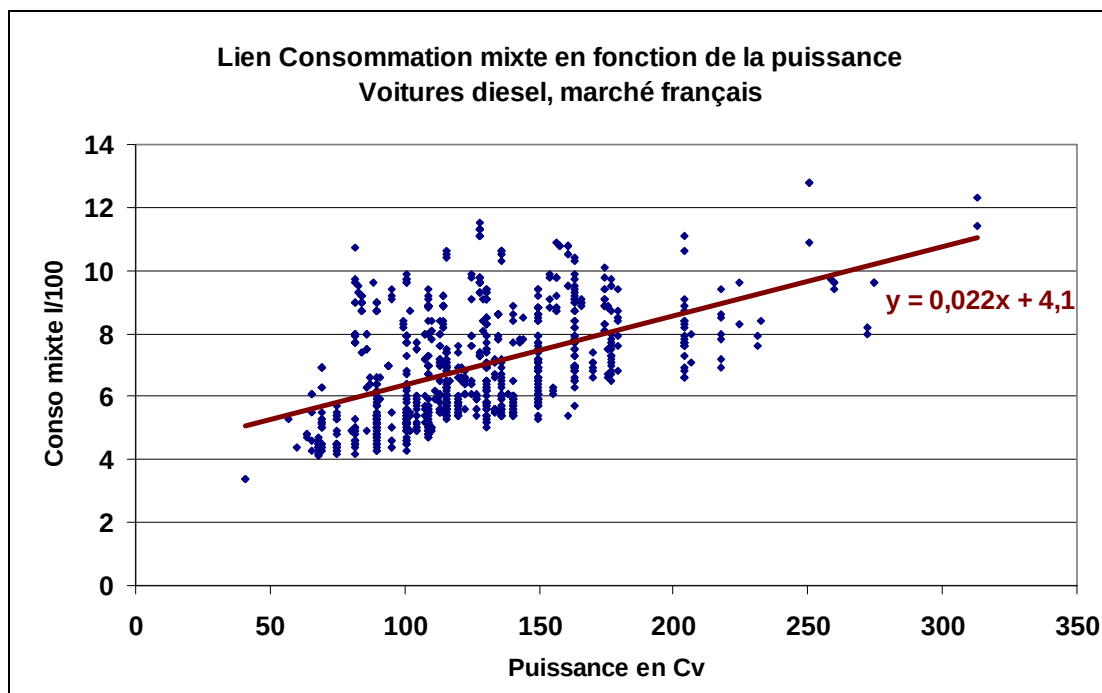
Source : CAS d'après données constructeurs (juillet 2008)

Ces données montrent que, sur le segment des berlines compactes, des écarts considérables de performance énergétique existent entre les différentes motorisations qui équipent un même véhicule. *On peut noter que les motorisations les plus modestes permettent encore d'atteindre des vitesses supérieures d'au moins 60 km/h à la vitesse maximale autorisée en France.* Enfin, en termes d'accélération, les moins puissantes permettent tout de même de passer de 0 à 100 km/h en à peine 12 secondes, ce qui est très loin de représenter une gêne pour un conducteur ordinaire.

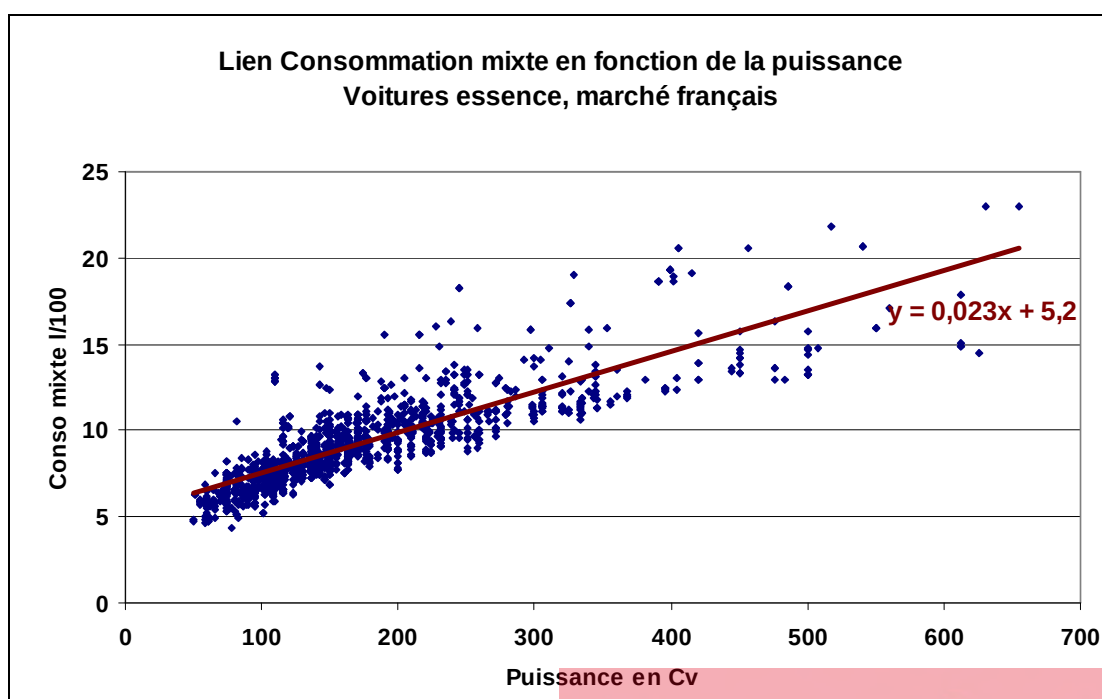
► Généralisation des résultats obtenus sur les voitures compactes

Les comparaisons effectuées sur le segment des véhicules compacts ont illustré l'effet de levier que représente la diminution des performances dynamiques des automobiles pour augmenter, à technologie constante, leur performance énergétique. Pour généraliser ce raisonnement, on peut, à partir des bases de données de l'ADEME sur les véhicules commercialisés en France, représenter la relation entre la puissance des véhicules (exprimée en Cv) et leur consommation mixte (exprimée en l/100km). Les graphes ci-dessous illustrent cette relation :

lepoint.fr



Source : CAS d'après bases de données ADEME



Source : CAS d'après bases de données ADEME

Cette relation illustre le lien entre la consommation de carburant (diesel ou essence) et la puissance sur les véhicules du marché français.

Ainsi, on peut constater que toute réduction de 15 Cv de la puissance d'un véhicule (soit entre 10 et 20 % de la puissance typique d'un véhicule ordinaire) se traduit par un gain d'environ 0,35 l/100km en consommation mixte (soit un gain de consommation compris entre 4 et 6 %). Or une réduction de 15 Cv de la puissance d'un véhicule n'est que très peu pénalisante pour un véhicule. Pour s'en convaincre on peut se rappeler que les motorisations qui équiper une Renault Mégane sont comprises entre 100 et 165 Cv, entre

110 et 204 Cv pour une Renault Laguna, entre 95 et 175 Cv pour une Peugeot 308 ou encore entre 110 et 211 Cv pour une Peugeot 407.

► Implications des résultats précédents

Ces résultats permettent de quantifier la place que pourrait avoir la réduction des performances, à technologie constante, dans les objectifs de réduction de la consommation énergétique des automobiles.

Sur l'exemple des véhicules compacts, en prenant comme hypothèses une réduction d'environ 30 km/h de la vitesse maximale (par exemple de 200 à 170 km/h pour la moyenne des véhicules compacts) et une augmentation de 3 secondes du temps d'accélération de 0 à 100 km/h (par exemple de 9 à 12 s pour la moyenne des véhicules compacts), les gains de consommation seraient compris, en cycle mixte, entre 0,6 et 1,5 l/100km.

Ainsi, il semble raisonnable de considérer comme atteignable une réduction d'au moins 15% de la consommation des véhicules, grâce à une réduction des performances dynamiques des véhicules.

10.3. Des améliorations incrémentales, notamment sur les auxiliaires, peuvent être sources importantes de réduction de la consommation et des émissions

Des réductions significatives des consommations et des émissions peuvent être obtenues en travaillant un à un tous les postes fonctionnels de base d'un véhicule, autres que ceux relevant de la motorisation ; ces perfectionnements sont d'ailleurs pour la plupart communs à tous types de véhicules quel que soit le mode de propulsion. Ils concernent en premier lieu les caractéristiques structurelles des véhicules (poids, aérodynamisme, frottement des pneumatiques...). Par ailleurs, depuis une trentaine d'années, le contenu fonctionnel d'une automobile s'est considérablement enrichi avec, bien souvent, en corollaire un accroissement de la masse et de la consommation associée : climatisation, intégration de nombreux dispositifs de sécurité tels que ABS et airbags, automatisation et électrification de nombreuses fonctions...). On citera quelques-uns de ces perfectionnements à titre d'exemple, sans chercher à être exhaustif.

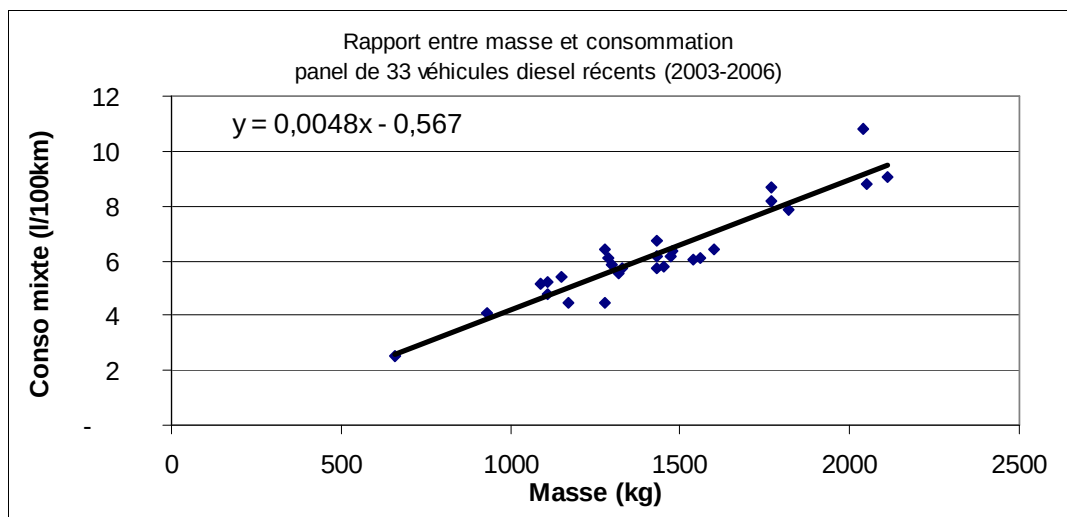
Avant de faire le bilan des réductions de consommation atteignables grâce à une optimisation de tous les consommateurs d'énergie d'un véhicule, il est nécessaire de préciser que tous ces consommateurs ne sont malheureusement *pas pris en compte dans les cycles d'homologation des véhicules*. On peut citer, à titre d'exemple emblématique, le cas de la climatisation dont l'impact sur la consommation n'est pas inclus dans les chiffres officiels, c'est-à-dire lors des tests NEDC. Il s'agit là d'un réel problème, car cela n'incite pas les acteurs de l'industrie automobile à optimiser ce composant.

10.3.1. L'allègement des véhicules et l'utilisation de nouveaux matériaux

Il existe aujourd'hui un véritable besoin d'allègement des véhicules. L'allègement peut être un des facteurs importants d'amélioration de la performance des véhicules.

- **D'une façon générale, un surpoids de 100 kg de masse conduit à une surconsommation d'environ + 0,5 litre/100km** (calculs sur une base de 33 véhicules diesel récents).

Le graphe ci-dessous illustre la dépendance entre consommation des véhicules et leur poids.



Source : CAS d'après données constructeurs

La réduction de masse d'un véhicule peut enclencher un cercle vertueux : réduire la masse du véhicule permet de réduire la taille du moteur, qui lui-même permet de diminuer le poids du véhicule.

- *Le progrès de la sécurité*, souvent invoqué en matière d'alourdissement des véhicules, constitue un facteur important pour expliquer la hausse du poids des véhicules, mais il n'explique pas à lui seul cette hausse. Depuis le milieu des années 1990, la sécurité passive – c'est-à-dire l'ensemble des dispositifs qui permettent de réduire les dommages causés par un accident – a réalisé des progrès extraordinaires. L'indicateur de référence dans l'industrie automobile est celui fourni par l'organisme indépendant EuroNCAP, qui établit depuis plus de 10 ans des notations pour les véhicules, ce qui permet de mesurer le rythme des progrès accomplis par l'industrie automobile dans le domaine de la sécurité. A titre d'exemple, il y a 10 ans une Renault Clio ou une Peugeot 406 ne recueillaient que 2 étoiles, une Volkswagen Passat que 3 étoiles, alors que désormais les remplaçants de ces modèles obtiennent tous la notation maximum qui est de 5 étoiles.

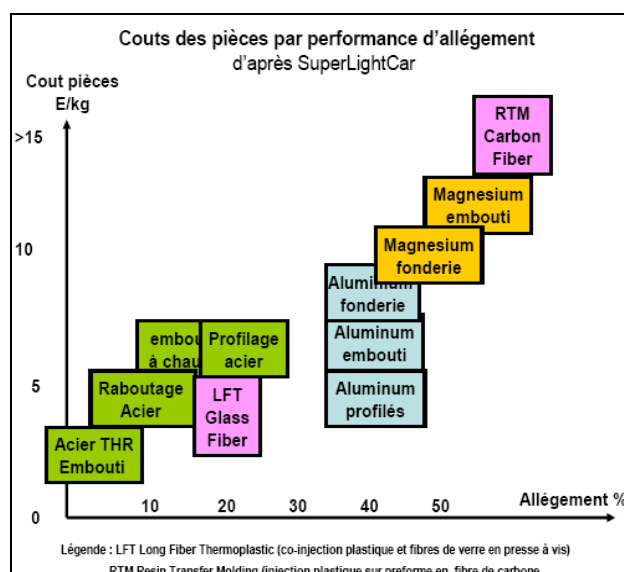
- Ces progrès considérables n'ont néanmoins pas été obtenus au détriment uniquement de la masse, car l'industrie automobile a relevé le défi d'une sécurité améliorée en introduisant très rapidement des *matériaux innovants* :

- apparition au début des années 90 des aciers HLE (haute limite élastique), deux à trois fois plus résistants qu'un acier doux (300 à 500 mégapascals¹⁷ contre 100 à 250 MPa) ;
- apparition à la fin des années 90 des aciers THLE (très haute limite élastique) qui ont permis un nouveau doublement de la résistance (500 à 800 MPa) et, plus récemment, des aciers UHLE (ultra haute limite élastique) ;
- utilisation du magnésium dans les blocs moteurs.

De plus, le secteur automobile pourra dans les années à venir appliquer de *nouveaux matériaux* qui contribueront à réduire significativement la masse des véhicules. Le graphique ci-dessous, d'après des données du consortium SuperLightCars, cartographie les possibilités d'allègements dans l'automobile et montre que le rythme d'introduction de l'aluminium, du magnésium ou d'autres matériaux est aujourd'hui largement conditionné par une

¹⁷ La résistance des aciers est donnée en Newton par millimètre carré [N/mm²] ou en mégapascal [MPa]

problématique de coût : plus la tonne de CO₂ évitée sera valorisée et plus rapide sera l'allègement des véhicules :



Source : Super Light car

SuperLightCar est un projet européen de R&D, qui implique 38 entreprises (dont Volkswagen, Fiat, Opel, Renault, Volvo, Porsche, Daimler) et dont le but est de faciliter l'adoption de matériaux capables de réduire la masse des véhicules. Ce consortium a pour objectif de réduire de 30 % la masse des véhicules compacts avec des coûts raisonnables (5 €/kg épargné).

- A l'avenir, l'introduction massive des *matériaux composites*, non encore validée au plan industriel (problèmes des coûts de fabrication, de la reproductivité des caractéristiques, des émanations aux postes de fabrication, du recyclage en fin de vie...) peut représenter des gains substantiels. La large diffusion que connaissent aujourd'hui les matériaux composites dans de nombreux secteurs industriels pourrait en effet concerner aussi l'automobile.

Mais, encore aujourd'hui, du fait des difficultés persistantes de mise en œuvre, des coûts de transformation pas toujours maîtrisés, de l'émiettement des initiatives industrielles et du cloisonnement des actions de recherche et développement, le travail de ces composites n'est guère partie prenante dans des grandes séries industrielles et ne donne lieu, dans le secteur automobile, qu'à des productions de petites séries à haute valeur ajoutée (Mercedes, Aston Martin, Lotus, Jaguar...) ou à des expérimentations à tirage limité (Mercedes-Unimog). Actuellement, hors pièces diverses d'habillage et de carrosserie non structurales, l'intégration de 10 % de composites dans un véhicule de grande série relève de l'exploit industriel !

L'avenir des composites, activité en pleine évolution, pleine de promesses mais encore en recherche de maturité, passe, pour ce qui concerne le secteur automobile, par la production industriellement fiable de matériaux structuraux à moyennes et hautes performances et à coût maîtrisé, ce qui n'est pas acquis pour des grandes séries.

- Ce contexte pose d'abord la question de l'avenir des composites en termes de **culture industrielle**, le passage du plastique et surtout du métallique (concurrence de l'aluminium et de certains alliages spéciaux) au composite imposant, au sein des PME et de bon nombre de bureaux d'études de grandes entreprises, une remise en cause certaine de beaucoup de

schémas de pensée au niveau de la conception et de l'élaboration des produits ou au niveau de l'ingénierie des assemblages complexes.

- Les grands donneurs d'ordre ne sont pas, par ailleurs, totalement convaincus de la faisabilité à terme de productions en série utilisant largement de tels matériaux composites, en dépit de la pression exercée par l'évolution de la situation énergétique.

Un dirigeant auditionné estime que la contrainte énergétique s'appliquera essentiellement sur deux domaines de recherche/développement (motorisation 3l/100 km et aérodynamisme) et ne croit pas, pour les véhicules de grande série et a fortiori « low cost », à l'avenir des composites à grande échelle (allègement des structures à sécurité constante) pour des raisons liées à la difficulté de maîtriser techniquement et économiquement les processus de fabrication en grandes séries de véhicules à forte intégration de composites ; les problèmes de recyclage en fin de vie et d'hygiène aux postes de production [émissions de COV, styrènes], actuellement dirimants, peuvent pourtant être résolus si on s'en donne les moyens, comme l'on fait les Etats-Unis : captation et traitement des émissions aux moules de formage, mise en poudre des therm durcissables, recyclage des thermoplastiques au prix d'une dégradation des propriétés....

Par son caractère très résistant et léger, le composite à renfort fibre de carbone (PRFC, ou « fibre de carbone ») est un composite déjà appliqué dans de nombreux domaines (aussi bien l'aéronautique que le sport). On peut citer le cas de l'industrie aéronautique, qui correspond certes à la mise en œuvre de systèmes très complexes en petite série : l'Airbus A380 comporte un caisson central (« wingbox ») entièrement en composite, 40 % de la structure de l'Airbus A350 sera en composite, près de 80 % du Boeing 787 Dreamliner en masse sont constitués de matériaux composites.

Dans le domaine de l'automobile, ce matériau est jusqu'à présent utilisé majoritairement en compétition (Formule 1, Indy Car). Néanmoins des constructeurs automobiles (par exemple General Motors ou BMW) ont initié l'intégration de fibre de carbone dans certains de leurs modèles (ailes avant, passages de roues sur Chevrolet Corvette Z06, toit des BMW M6, M3, supports de pare-chocs avant et arrière) ; il s'agit cependant de versions sportives produites en petites séries et peu vendues.

Certains constructeurs automobiles commencent à dévoiler des « concepts cars » qui préfigurent l'utilisation massive de fibre de carbone dans les véhicules de grandes séries. C'est le cas par exemple de Toyota, qui a présenté au salon de Tokyo 2007 un véhicule hybride rechargeable (Toyota 1/X) dont la coque est entièrement réalisée en fibre de carbone, et qui ne pèserait que 420 kg, avec un système de propulsion thermique-électrique logé sous les sièges arrière.

Concept car Toyota 1/X à coque en fibre de carbone



En résumé, on peut estimer que la réduction de masse des véhicules est une piste importante de réduction de la consommation des véhicules. De manière prudente, on peut estimer qu'une réduction de 100 kg de la masse de berlines réduirait leur consommation d'environ 7 %, pour un surcoût au véhicule d'environ 500 €.

10.3.2. L'aérodynamisme

Depuis toujours l'aérodynamique est identifiée comme l'une des principales sources de progrès dans les performances automobiles. En effet, les forces aérodynamiques peuvent représenter jusqu'à 50 % de la résistance des véhicules à l'avancement¹⁸.

¹⁸ Cela dépend de la vitesse : négligeable en comparaison des forces d'inertie en mode urbain, elle devient plus importante que celle consommée par le roulement des pneus sur la chaussée à partir de 90 km/h environ.

La force de résistance aérodynamique F_a dépend de la densité de l'air Q , de la surface frontale S ou maître-couple et du coefficient de traînée C_x , selon la formule :

$$F_a = \frac{1}{2} C_x \cdot S \cdot V^2 \cdot Q$$

Ainsi, la puissance absorbée (P_a) croît, elle, avec *le cube de la vitesse* selon la formule :

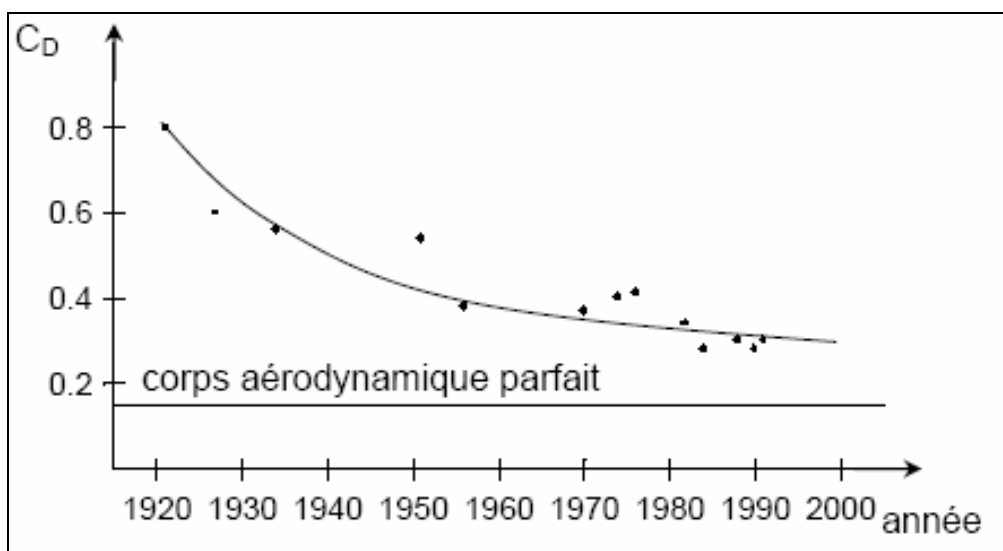
$$P_a = \frac{1}{2} C_x \cdot S \cdot V^3 \cdot Q$$

La traînée se répartit en traînées interne et externe :

EXTERNE	90%	INTERNE	10%
Traînée de pression	60 %	Traînée de refroidissement	7 %
Traînée de frottement	5 %	Traînée due à la ventilation	3 %
Traînée due aux accessoires	25 %		

La théorie aérodynamique indique que la voiture « aérodynamiquement » parfaite aurait la forme d'une goutte d'eau, avec un C_x de 0,15.

Des progrès considérables ont été consentis depuis les débuts de l'automobile pour diminuer ce coefficient alors même que les designers imposaient leur style et que le maître-couple aérodynamique se dégradait du fait de l'évolution des largeurs et hauteurs des véhicules :



Source : ENS Cachan (Thierry Faure)

Malgré que l'on tende vers une asymptote depuis 30 ans, des améliorations significatives (de l'ordre de 4 ou 5 %) peuvent encore à terme être obtenues par un travail constant de synergie entre les stylistes et les aérodynamiciens. Il semble toutefois difficile de diminuer le C_x jusque 0,2 malgré l'adoption d'éléments issus de l'automobile de compétition tels que le fond plat lisse, les déflecteurs avant et arrière...

10.3.3. Les pneumatiques

Du côté des pneumatiques, des progrès sont attendus aussi bien par l'introduction de pneus à bas niveau de frottement que par la généralisation des systèmes permettant de mieux gérer la pression des pneus.

- Les pneumatiques à bas niveau de frottement pourraient permettre de réduire d'au moins 3 % la consommation des véhicules. L'enjeu de ce composant est de taille car la résistance au

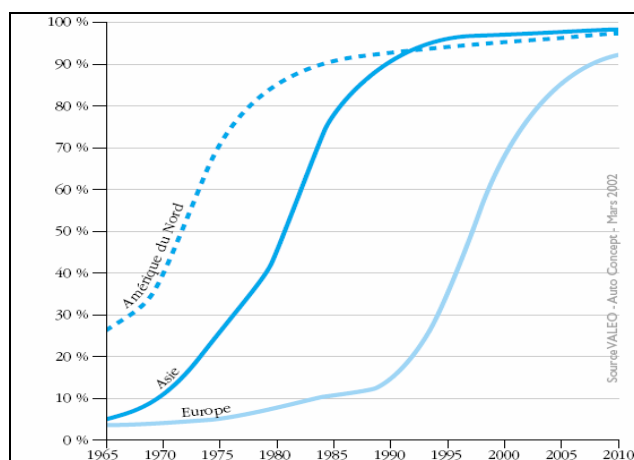
roulement du pneu peut absorber jusqu'à un tiers de l'énergie fournie par le moteur. Ces progrès sont accessibles à très court terme. On peut citer par exemple la dernière génération de pneumatiques Michelin « Energy Saver », qui permettent de réduire la consommation moyenne de 0,2 l/100km, soit environ 4 gCO₂/km. Ces pneumatiques ont été récemment commercialisés au lancement de la Peugeot 308. D'autres concepts de pneumatiques innovants sont aussi imaginés : on pourra retenir par exemple l'innovation que le manufacturier américain Goodyear souhaite introduire sur le marché avant 2010. Il s'agit de pneumatiques qui utilisent une substance d'origine végétale (l'amidon de maïs) pour réduire la consommation jusqu'à 5 %, ce qui ferait environ 8 gCO₂/km. Le niveau de réduction de la résistance au roulement pourrait alors atteindre 30 %.

- Une économie substantielle de carburant peut être obtenue par ailleurs grâce aux *systèmes de gestion de la pression de pneus*, qui vont se généraliser dans les années à venir. En détectant le gonflage insuffisant des pneumatiques, ces systèmes peuvent permettre de réduire de 3 % la consommation des véhicules (source : Continental) en usage réel, mais pas sur cycle d'homologation (en effet, lorsque les véhicules passent leurs tests d'homologation, leurs pneumatiques sont bien gonflés).

10.3.4. La climatisation

Depuis les années 60, les systèmes de climatisation se sont généralisés dans l'automobile. La courbe ci-dessous illustre ce phénomène de basculement, observable successivement en Amérique du Nord, en Asie, puis en Europe :

Taux de pénétration de la climatisation



Source : ADEME

Les climatisations sont depuis longtemps reconnues comme l'un des auxiliaires du véhicule qui contribuent le plus à augmenter la consommation énergétique des véhicules. Les chiffres ci-dessous montrent qu'en fonction des situations de conduite et du type de motorisation, la surconsommation engendrée par un usage de la climatisation varie entre + 12 % et + 43 %.

Surconsommation due à la climatisation

Surconsommation en l/100 km (entre parenthèses variation en %)			
	Cycle urbain (ECE)	Cycle extra-urbain (EUDC)	Cycle mixte (MVEG)
Essence (moyenne 10 véhicules)	+ 3,1 (+ 31 %)	+ 0,9 (+ 16 %)	+ 1,7 (+ 23 %)
Diesel atmosphérique	+ 2,4 (+ 26 %)	+ 0,7 (+ 12 %)	+ 1,3 (+ 19 %)
Diesel suralimenté (turbo Diesel)	+ 4,0 (+ 43 %)	+ 1,5 (+ 28 %)	+ 2,5 (+ 36 %)
Ensemble des Diesel (moyenne 10 véhicules)	+ 3,2 (+ 35 %)	+ 1,1 (+ 20 %)	+ 1,9 (+ 27 %)
<i>T extérieure = 30 °C, T consigne = 20 °C, essai sur cycle NMVEG cf. Dir. 98/69.</i>			

Source : ADEME

- Pour cette raison, **les systèmes de climatisation sont aujourd'hui sur la liste des composants dont le rendement devrait être optimisé en priorité**. Les systèmes de climatisation vont connaître dans la décennie 2010 d'importantes modifications. D'abord sur le plan de la réglementation, car ces systèmes, en plus d'augmenter la consommation, utilisent des fluides sur le point d'être interdits. En effet, dès 2011, pour les véhicules déjà homologués, et en 2017, pour tous les nouveaux véhicules, les climatisations utilisant des gaz à effet de serre fluorés seront interdites en Europe. En effet, le potentiel de réchauffement planétaire, qui valorise l'impact d'un gaz à effet de serre fluoré par rapport au CO₂, est supérieur à 150 (ce niveau est calculé en fonction du potentiel de réchauffement sur 100 ans d'un kilogramme d'un gaz donné par rapport à un kilogramme de CO₂). Pour mémoire, le fluide R134a, couramment utilisé, présente un potentiel de 1 300. Ainsi, l'industrie automobile va devoir introduire des fluides innovants ; différents concepts sont à l'étude ; on peut citer le cas du CO₂, qui sera limité aux véhicules haut de gamme en raison de son surcoût.

- Au-delà de ces mises aux normes, les climatisations pourront bénéficier de l'introduction de composants novateurs allégés, dont un pilotage, grâce à des algorithmes de contrôle optimisés, pourrait permettre d'obtenir une réduction d'environ 3 % de la consommation d'un véhicule.

10.3.5. Les transmissions et la direction

► Parmi les équipements qui se sont largement standardisés dans les véhicules, on retrouve *la direction assistée*, qui, si elle améliore le confort de conduite, n'en provoque pas moins un surcroît de consommation. C'est la raison pour laquelle on mentionne ici ce composant, car une amélioration déjà disponible sur de nombreux véhicules – notamment sur les petits modèles compacts ou urbains – consiste à passer d'une direction assistée hydraulique à une *direction assistée électrique*, ce qui peut engendrer un gain de consommation sensible (2 % selon Continental).

► Enfin, concernant *la transmission*, qui est le système transmettant le couple moteur aux roues, différentes améliorations peuvent être apportées aux systèmes actuels. Les transmissions étaient historiquement de 2 deux types : boîtes manuelles (changement au levier de vitesse après débrayage) ou boîtes automatiques. Les boîtes automatiques entraînent généralement un surcroît de consommation, qui peut être évalué à 10 % (par exemple sur la Peugeot 308 1.6VTi, la version automatique a une consommation normalisée en cycle mixte de 7,3 l/100km contre 6,7 pour la version à boîte manuelle). C'est pourquoi les constructeurs

automobiles et fabricants de transmissions ont, depuis une dizaine d'années, initié la mise sur le marché de transmissions dites *robotisées* ; ces dernières permettent de libérer le conducteur de la pédale d'embrayage et même, dans certains cas, de lui offrir un agrément de conduite similaire à celui obtenu avec une boîte automatique, au moyen d'un double embrayage et tout en limitant la surconsommation de carburant, voire en la réduisant. De l'augmentation du nombre de rapports à leur meilleur étagement, en passant par un déclenchement automatisé des changements de rapports, nombreuses sont les pistes d'améliorations dans le domaine des transmissions.

Les réalisations récemment présentées par Volkswagen constituent un exemple parmi d'autres des progrès à attendre dans ce domaine. A près avoir introduit dès 2003 des boîtes de vitesses robotisées DSG6 à 6 rapports (ce sont des boîtes de vitesse « classiques », à la différence près que les changements de rapports ne nécessitent plus de pédale d'embrayage, car le débrayage est gérée directement par la transmission), le constructeur introduit en 2008 une version à 7 rapports, DSG7. Sur un véhicule comme la Golf, équipée d'un moteur 1.4TSI, cette transmission réduit la consommation de 6 % par rapport au même modèle équipé de la transmission à 6 rapports. Cette voie continuera d'être exploitée à l'avenir, mais demandera sans doute quelques années : si la DSG6 est démocratisée (il s'en est vendu plus d'un million à fin 2007), la DSG7 est seulement proposée en option, pour 1700 €.

Ainsi, aussi bien l'automatisation d'un nombre croissant de rapports que la meilleure gestion du système de transmission (par exemple par l'introduction de gestion électro-hydraulique de la boîte) représentent des voies de progrès substantiels, **avec un gain potentiel de consommation estimé à 6 % au minimum**. On notera également que l'automatisation de la transmission, outre qu'elle participe au confort du conducteur, constitue un élément déterminant de *sécurité routière*, dans la mesure où elle libère le conducteur de tâches fastidieuses et répétitives en cas de conduite urbaine en circulation dense et lui permet de consacrer plus sereinement son attention aux pièges du trafic.

10.3.6. L'éclairage

La LED (Light Emitting Diodes, pour diodes électroluminescentes) est un semi-conducteur qui convertit directement le courant électrique en photons, c'est-à-dire en énergie lumineuse. Associée à un réflecteur ou une lentille, cette « mini-ampoule » de 3 à 10 millimètres de diamètre donne une lumière dont la couleur varie selon la variété de matériau (phosphore de gallium) utilisée. Le blanc est obtenu par la juxtaposition de diodes rouges, vertes et bleues, ou bleues et jaunes.

La première voiture au monde commercialisée avec un éclairage de jour à LED à l'avant a été l'Audi A8 W12 6.0 quattro. Depuis, Audi est le seul constructeur « haut de gamme » à



proposer des feux de position (ou codes) à LED à l'avant. Cette technologie est aujourd'hui présente en série sur les Audi A8, S8 et S6. L'éclairage à LED, bien qu'encore coûteux, permet de mettre la technologie au service de la sécurité, de l'économie d'énergie ou bien encore de l'esthétique.

- En matière de sécurité, grâce à l'allumage quasi immédiat des feux stop (2 à 15 millisecondes contre 150 à 300 ms pour une lampe classique et 500 ms pour une lampe au xénon), le freinage est signalé plus rapidement. Les distances de freinage,

à partir du moment où l'on appuie sur le frein, sont donc diminuées (3 mètres à 60 km/h, 6 mètres à 120 km/h). La visibilité est également améliorée : la surface lumineuse des feux de signalisation est plus homogène grâce à la multitude des diodes employées. L'allumage précis des LED améliore l'impact visuel de 5 mètres à 120 km/h.

- *En matière d'économie*, les LED, grâce à leur rendement (80 % de l'énergie électrique est transformée en lumière contre 20 % pour une lampe classique), ont une très faible consommation électrique (10 Watts contre 21 pour un feu stop) ; l'alternateur est moins sollicité, la consommation de carburant réduite.
- *En matière d'esthétique*, les LED, compactes et dégageant moins de chaleur, offrent davantage de liberté aux designers, ce qui permet au véhicule de gagner en caractère et en identité.

Audi, comme Lexus, utilise également la technologie LED pour les feux stop arrière et les feux de position. Les Audi A8 et S8 bénéficient en outre de clignotants à LED à l'arrière.

Les ingénieurs travaillent déjà à de nouvelles applications comme l'aide à la vision nocturne ou bien encore à l'affichage tête haute avec l'OLED (Organic Light Emitting Diodes).

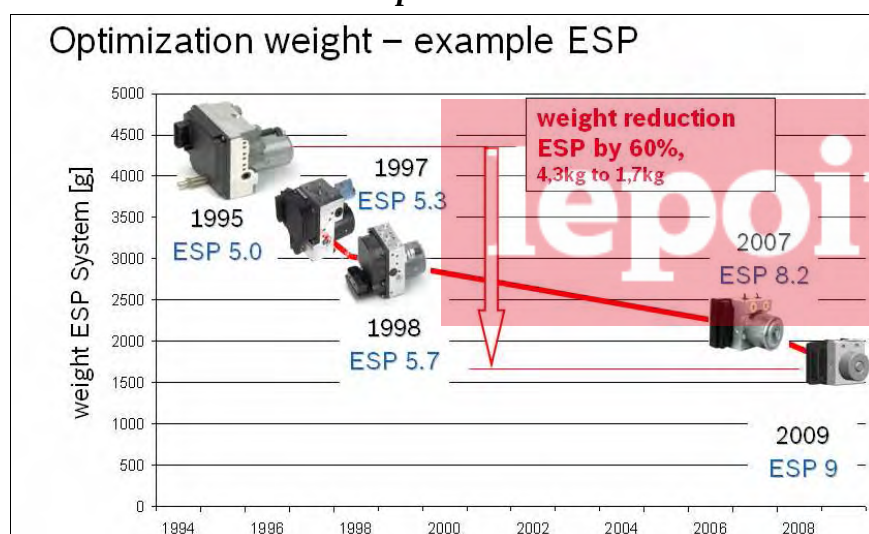
Plusieurs équipementiers automobiles vont proposer ces systèmes d'éclairage dès le début de la décennie 2010 avec des volumes de production plus significatifs que ceux relatifs aux véhicules de niche sur lesquels on retrouve aujourd'hui cet équipement. Grâce à l'introduction de LED, les clignotants, feux de stationnements et phares engendreront une réduction significative de consommation des véhicules, d'environ 3 %.

10.3.7. *Les autres équipements auxiliaires (sécurité, électronique, électricité...)*

Nombre d'auxiliaires utilisés dans les véhicules modernes font l'objet de progrès constants, que ce soit en matière d'alimentation électrique (alternateurs à haut rendement...), en matière d'électronique embarquée (« ordinateurs de bord », électronique de puissance...) ou en matière de sécurité (ceintures de sécurité, airbags, ESP...). Tous ces progrès concourent à diminuer selon les cas les déperditions énergétiques ou le poids des dispositifs.

L'exemple de l'ESP (« *Electronic stability program* » : dispositif électronique de correction de trajectoire) montre l'ampleur des progrès réalisés sur le poids du module électronique embarqué, liés à la miniaturisation et à l'utilisation de matériaux très légers (boîtier) : ainsi le poids a été réduit de 60 % en moins de 15 ans. Des améliorations vont continuer d'augmenter les performances pour des poids encore décroissants. Cet exemple montre que l'intégration de dispositifs de sécurité ne conduit plus forcément à des alourdissements massifs des véhicules comme cela a pu être le cas dans les modèles sortis dans les années 1980.

Evolution du poids du boîtier ESP



Source : Bosch

Toutes ces améliorations incrémentales peuvent amener des réductions de consommation de l'ordre de 1 à 2 %.

10.3.8. Le cas de la Logan ECO2 : illustration d'une stratégie de réduction de la consommation par une série d'optimisations

Des progrès accessibles à court terme- le cas Logan ECO2

Des progrès considérables sont ainsi à anticiper pour les véhicules conventionnels. Un exemple récent en a été fourni par Renault, lors du challenge Bibendum Michelin à Shanghai en 2007. Renault a préparé une Logan « Renault ECO2 » expérimentale qui a terminé deuxième au challenge. Grâce à une série d'optimisations et à la technique de son pilote, cette Logan a parcouru les 172,2 km du Challenge en ne consommant que 4,69 litres de gasoil, soit une consommation moyenne de 2,72 l/100 km correspondant à des émissions de 71 g de CO₂ au km. Ci-dessous nous avons représenté les performances réalisées par la Logan ECO2 en cycle normalisé (NEDC) et lors du Challenge, tout en comparant cette Logan au modèle série équipé du moteur 1,5DCi :

	1,5DCi (NEDC)	ECO2 (NEDC)	ECO2 (challenge)
Consommation (litre/100km)	4,9	3,9	2,72
Emissions (g CO ₂ /km)	120	97	71



Pour obtenir ces gains considérables, Renault n'a eu recours qu'à des technologies aujourd'hui matures :

- **Le groupe moto-propulseur : gain de 11g CO₂/km**

- A partir de la motorisation 1,5 DCi (85 ch) commercialisée en fin d'année 2007, allongement du rapport de pont de 8 %, réduisant la consommation tout en conservant des reprises compatibles avec un usage courant : gain de 4 g de CO₂ /km.

- Application d'un nouveau réglage et d'une nouvelle mise au point pour la combustion avec des injecteurs 7 trous (contre 5 en série) et un bol de piston élargi, offrant une meilleure pulvérisation du carburant et une meilleure répartition lors de la combustion : gain de 5 g CO₂/km.

- Ajustement de certains jeux de pièces mécaniques et choix d'huiles basse viscosité, pour réduire les frottements internes moteurs et fluidification de l'huile de boîte de vitesse : gain de 2 g CO₂ /km.

- **L'aérodynamisme : gain de 5 g CO₂/km**

Réduction du coefficient de pénétration dans l'air de l'ordre de 20 % en passant d'un C_x de 0,36 (Logan de série) à 0,29 par :

- Une lame souple sous le bouclier réduisant les turbulences sous le plancher, associée à un carénage sous la cuve de roue de secours.

- En face avant, les entrées d'air de la calandre ont été ajustées pour réduire la traînée de refroidissement.

- Des bavettes de roues réduisent les turbulences latérales.

- Un becquet arrière optimise la traînée globale du véhicule.

- Des générateurs de vortex, petits éléments aérodynamiques placés sur le toit du véhicule permettent, en particulier dans le cas d'un tri-corps, de diriger les flux d'air à l'arrière du véhicule et ainsi de diminuer la traînée d'air.



- L'assiette de la voiture a été légèrement abaissée.

- **La liaison au sol : gain de 3 gCO₂/km**

L'objectif dans ce domaine était de réduire les frottements mécaniques générateurs de consommation de carburant par des solutions réalistes.

- La Logan « Renault ECO2 Concept » est équipée des nouveaux pneumatiques Michelin Energy Saver 185/65R15 à faible résistance au roulement. Ils apportent un gain de 2 g CO₂/km sur le cycle NEDC (cycle d'homologation).

- Des roulements de train arrière à faibles frottements apportent un gain de l'ordre de 1 g CO₂/km ; le contact pneu/sol est également optimisé par des réglages adéquats.

- **Les auxiliaires consommateurs d'énergie : gain de 4 gCO₂/km**

L'alternateur piloté permet de charger la batterie au juste nécessaire (tension de 12,8 volts au lieu de 13,5 volts). Cela se traduit par une charge moins fréquente et, de ce fait, une moindre consommation d'énergie.

10.3.9. Bilan sur les auxiliaires de consommation

On constate que, étant donnée l'étendue du portefeuille d'améliorations, une réduction de 10 % de la consommation normalisée et de 15 % de la consommation réelle des véhicules est totalement envisageable grâce aux progrès sur ces composants.

Réduction potentielle des consommations du réservoir à la roue	Gain potentiel
Allègement (nouveaux matériaux)	7 %
Aérodynamisme	4 %
Pneumatiques à bas frottement	3 %
Système de contrôle de la pression des pneus	3 %
Système de climatisation	5 %
Direction assistée électrique (par rapport à la direction assistée hydraulique)	2 %
Pompe électro-hydraulique pour boîte de vitesses	2 %
Transmission automatisée	4 à 6 %
Eclairage (LED)	3 %
Autres (gestion thermique optimisée, sécurité...)	5 %

Les gains indiqués sont non cumulatifs et les pourcentages ne doivent pas être additionnés

10.4. Les conducteurs pourront bénéficier d'outils intelligents d'aide à la conduite, pouvant réduire jusqu'à 20 % en moyenne la consommation

10.4.1. Les économies de carburant liées au bon comportement du conducteur

Dans différentes circonstances et différents contextes, on a pu montrer qu'avec un véhicule donné et un parcours identique, pour une vitesse minimale fixée, un conducteur nerveux peut consommer 40 % de carburant de plus qu'un conducteur expérimenté ayant adopté le mode de conduite le plus économique. En moyenne, l'écart peut être d'environ 20 % entre un conducteur soucieux d'économie et un conducteur moyen. Les méthodes de conduite économique, particulièrement efficaces en ville, sont connues mais peu pratiquées :

- accélérer le plus doucement possible ;
- adopter le rapport boîte de vitesse le plus élevé compatible avec la vitesse recherchée, quitte à disposer d'une marge d'accélération relativement faible et de rétrograder pour accélérer (diminution de consommation et donc d'émissions de CO₂ d'environ 5 %) ;
- anticiper les arrêts à venir, en cessant d'accélérer, pour avoir à freiner le moins possible ;
- conduire à la vitesse la plus constante possible (environ 3 % d'émissions de CO₂ évitées) ;
- éviter autant que possible les encombrements de circulation pour ne pas avoir à faire fonctionner inutilement le moteur, la voiture étant arrêtée (jusqu'à 5 % de gain de consommation)...

D'autres sources d'économie fondées sur le bon sens peuvent encore être mentionnées :

- ne pas rouler inutilement vite lorsqu'on n'est pas pressé (jusqu'à 10 % de baisse de consommation) ;
- ne pas utiliser le système de climatisation lorsqu'il n'est pas indispensable et l'utiliser pour obtenir la température acceptable la plus élevée (surconsommation comprise entre 12 % et 43 % selon les modèles selon l'ADEME) ;
- dans le cas de la voiture électrique, utiliser le chauffage de façon similaire ; en hiver, pour des températures extérieures usuelles en France, la température ambiante optimale dans l'habitacle de 19°C permet d'économiser entre 5 et 20 % de consommation (selon l'énergie embarquée dédiée au chauffage) par rapport à une température de 22°C dans l'habitacle ;
- gonfler suffisamment les pneus (approximativement 2 % de diminution de consommation pour un véhicule moyen)...

10.4.2. Les dispositifs d'aide à la conduite

Rappelons en premier lieu que, bien que s'agissant de la conception-même du moteur, il existe désormais sur le marché des voitures équipées d'un dispositif « stop & start » qui coupe le moteur quand la voiture est à l'arrêt et qui le remet en fonctionnement dès que le conducteur lâche la pédale de frein ou actionne l'accélérateur. En ce qui concerne les dispositifs optionnels hors motorisation, des systèmes de guidage disponibles sur le marché (GPS / Inforoutes) indiquent les embouteillages et la façon la plus astucieuse de les éviter.

Le dispositif d'éco-conduite de Continental : une diminution simple et immédiate des émissions de CO₂ comprise entre 5 et 20 %

Cet appareil électronique calcule pour le conducteur la consommation optimale par la confrontation d'informations provenant, d'une part, d'un système de navigation associé aux informations de trafic et, d'autre part, les paramètres du moteur, mesurés par un ensemble de capteurs. Les informations émises par ces derniers sont transmises au calculateur par un bus CAN (Controller Area Network).

L'intérêt de ce dispositif d'éco-conduite est de fournir en temps réel au conducteur des informations sur une consommation moyennée, et non instantanée comme les indicateurs de consommation d'ores et déjà en série sur les nouveaux véhicules. Par un système d'alerte visuel pertinent, relativement ludique et bien intégré au tableau de bord, le conducteur peut ainsi visualiser les marges de progrès lui restant dans sa consommation de carburant. Cet outil permet d'éduquer les conducteurs à la conduite économe ; une formation pourrait avantageusement être dispensée en auto-école.

Le système en développement nécessite certes encore des améliorations ; disponible au début pour les véhicules plutôt haut de gamme, sa généralisation à l'ensemble des véhicules neufs est tout à fait envisageable à l'horizon 2015, pour peu qu'une réglementation l'impose.

In fine, selon les situations, ce système électronique permet de diminuer entre 5 et 20 % la consommation de carburant et donc de CO₂.

Ainsi, partant d'une analyse du trajet prévu et des paramètres du véhicule en fonctionnement, des dispositifs peuvent afficher, sur l'écran d'un système de navigation GPS, en particulier le meilleur itinéraire, la vitesse recommandée, le bon rapport de vitesse ainsi que la consommation prévisible en fonction du comportement du conducteur.

Il reste à faire adopter par les constructeurs des dispositifs d'assistance à la conduite qui existent aujourd'hui à l'état de prototype ou sont en cours de développement, soit en vue d'inciter les conducteurs à conduire de façon plus économique en les informant en temps réel des conditions de fonctionnement et de roulage, soit en vue de se substituer à eux pour que soient opérées automatiquement les actions d'optimisation de la consommation.

Réduction potentielle des consommations du réservoir à la roue	Gain potentiel moyen
Indicateur de passage de vitesse	2 %
Système de navigation paramétré « éco-conduite »	5 %
Régulateur de vitesse adaptatif	3 %
Mesure permanente de la pression des pneumatiques	3 %

Un tour de piste des équipementiers montre ainsi que de nombreux dispositifs existent ou sont près d'être commercialisés ou intégrés dans les nouveaux modèles, laissant espérer, pour un conducteur moyen normalement attentif aux consignes de bon sens en matière de conduite, un potentiel d'économie de carburant de l'ordre de 20 %.

lepoint.fr

► PRECONISATIONS

11. Préconisations

Pour faire face au double défi que représente l'entrée dans une période de prix élevés de l'énergie et, simultanément, dans une lutte durable contre le réchauffement climatique, les pouvoirs publics doivent mener une politique énergétique nouvelle par son ampleur et par sa permanence. Dans le cas du véhicule « grand public », à la difficulté inhérente à un tel changement s'ajoute le caractère irrationnel des choix et des comportements d'une partie significative des automobilistes. La consommation des véhicules et, plus généralement, leur niveau d'émissions polluantes diminueront d'autant plus que l'économie, la sécurité, le caractère utilitaire auront remplacé, dans leur esprit, la fascination pour la vitesse, l'accélération, la puissance des véhicules.

Pour faire diminuer la consommation des véhicules et leurs émissions directes et indirectes, l'Etat intervient de façons multiples, mais l'expérience montre que, dans ce domaine, la coercition est plus efficace que l'incitation.

- *L'information*

Elle permet de justifier toute nouvelle politique, d'y faire adhérer les automobilistes et de leur faire adopter un comportement mieux adapté au nouveau contexte.

- *L'exemplarité de l'Etat*

L'Etat doit montrer l'exemple en tant qu'acheteur et utilisateur de véhicules.

- *La réglementation*

Elle permet de réduire la consommation des véhicules et leurs émissions, directement ou en limitant la vitesse, la circulation ou le stationnement.

- *La taxation*

Elle concerne le prix des véhicules et celui de leurs sources d'énergie.

- *L'incitation financière*

Elle peut dissuader l'acquisition des véhicules les plus consommateurs, aider à l'acquisition des véhicules les plus performants, en combinant éventuellement les deux options (« bonus-malus ») ; elle peut par ailleurs orienter la recherche, en tenant compte de ce que les crédits publics dans ce domaine sont très limités par rapport à ceux mobilisés par les grands constructeurs automobiles (dans un rapport de 1 à 30).

Les mesures à prendre sont à traiter, suivant le cas, au plan communautaire ou au plan national.

11.1. Caractéristiques des véhicules

- ***Limitation à partir de 2012 à 120 g/km des émissions de CO₂ des véhicules neufs de tourisme.*** Annonce d'une limite plus basse à l'horizon 2017.

La Commission européenne prévoit une limitation à 130 g/km en 2012 ; la mesure proposée incite à faire mieux.

- **Harmonisation des vitesses limites sur autoroute** à 130 km/heure pour toute l'Union européenne.

L'intérêt de cette mesure réside moins dans les économies directes de carburant du fait de la réduction de vitesse limite avec les véhicules existants que dans l'impact sur la conception des véhicules mis en vente sur le marché européen ; la perspective de limitation généralisée des vitesses inciterait les constructeurs à concevoir des véhicules aux performances moins élevées, donc moins puissants, et à obtenir des gains de consommation à tous les régimes et à toutes les vitesses, y compris en circulation urbaine. La diminution de consommation entraîne une diminution de la pollution, ce qui est particulièrement bénéfique dans les centres-villes très congestionnés.

- Obligation, dans un délai maximum de trois ans, de doter les véhicules neufs d'un **dispositif arrêtant automatiquement le moteur lorsque le véhicule est à l'arrêt.**

Cette mesure impliquerait, pour les véhicules thermiques, la mise en œuvre d'un dispositif de type « stop & start ». Ce dispositif est déjà livré en série sur plusieurs modèles.

Au moment où la pollution urbaine est considérée comme préoccupante, la mesure proposée permettrait de réduire de 20 à 25 % les émissions de polluants *en centre-ville* – jusqu'à 40 % pour les zones les plus congestionnées –, en évitant le fonctionnement des moteurs thermiques au ralenti et, par conséquent, la consommation de carburant, la pollution et le bruit qu'ils engendrent.

- **Assistance à la conduite automobile** : des équipements déjà disponibles sur des modèles automobiles ou prêts à être commercialisés pourraient être rendus obligatoires ou bénéficier d'une détaxation (affichage au tableau de bord de la consommation instantanée ou des écarts par rapport à la consommation optimale, régulateur de vitesse, jauge de pression des pneus...).

11.2. Information relative à la consommation et aux émissions des véhicules

- **Modification des cycles d'homologation actuels** pour qu'ils intègrent, dans la consommation normalisée et dans la mesure des émissions spécifiques de CO₂, les consommations dues à l'utilisation des auxiliaires.

La consommation des auxiliaires (chauffage, climatisation, dégivrage des vitres...) peut représenter une proportion significative de la consommation de carburants dédiée à la seule propulsion du véhicule. Or elle n'est pas prise en compte dans les mesures normalisées actuelles.

11.3. Achat et détention des véhicules

- **Système de malus annuel** : prolonger le dispositif de la loi du 25 décembre 2007 par un système de « malus » annuel, lequel s'appliquerait, chaque année, à l'ensemble des véhicules en circulation.

Le gouvernement a instauré un système de bonus/malus destiné à favoriser l'acquisition des véhicules dont la consommation est la plus basse et à pénaliser ceux dont la consommation est la plus élevée. Cette décision a eu un effet à court terme. Cependant, l'incitation représente un pourcentage faible du prix d'achat des véhicules, même pour les plus consommateurs, moins que l'effort commercial consenti par les constructeurs pour encourager la vente de leurs produits. Son effet sur l'évolution globale du parc automobile restera trop limité si le dispositif ne s'applique pas chaque année à tous les véhicules en circulation.

Tout ou partie du malus pourrait être utilisé pour accélérer le renouvellement du parc existant au moyen d'aides à l'achat de remplacement pour les ménages à faible revenu.

11.4. Utilisation des véhicules

- **Taxation des sources d'énergie pour l'automobile** : la taxe intérieure pour les produits pétroliers (TIPP) doit être transformée en « taxe carbone » applicable à toutes les sources d'énergie utilisées par les véhicules « grand public » et être en proportion des émissions de CO₂ engendrées par chaque véhicule, directement (mesurées sur le cycle normalisé) et indirectement (calculées sur le processus de production de l'énergie à partir de l'énergie primaire).

Le niveau de la taxe pourrait être calé au minimum sur le niveau actuel de la TIPP sur l'essence. Cette disposition rendrait équitable la comparaison des coûts du kilomètre parcouru par les véhicules en fonction de l'énergie qu'ils consomment (gazole, essence, gaz de pétrole liquéfié, gaz naturel, électricité...).

- Donner aux **collectivités locales** compétentes les pouvoirs concernant la circulation en ville (autoriser les péages urbains, interdire la circulation de certains types de véhicules en centre ville...)

11.5. Transports urbains

- Les transports alternatifs ne font pas partie du champ du présent rapport, mais leur amélioration quantitative et qualitative est une clef de la réduction de l'utilisation du véhicule individuel.

11.6. Recherche publique

Le dispositif d'intervention public français en matière de recherche sur les transports, et en particulier sur les véhicules, s'appuie sur plusieurs sources de financement coordonnées au sein du programme PREDIT, qui dispose d'un budget de 500 M€ sur 5 ans (2008-2012).

D'une manière générale, le PREDIT devrait d'une part mieux intégrer la dimension internationale, d'autre part recentrer les interventions sur un nombre plus restreint de projets que par le passé, enfin favoriser, notamment dans le cadre des pôles de compétitivité, un environnement scientifique et technologique des grands groupes industriels à travers les réseaux de PME, de laboratoires publics et d'universités.

En ce qui concerne plus spécifiquement le véhicule « grand public », deux préconisations apparaissent essentielles :

- ***Donner la priorité aux thématiques qui contribuent à l'amélioration des véhicules thermiques et à l'introduction de l'électricité (en premier lieu hybride rechargeable) et supprimer l'intervention publique dans des domaines sans grand avenir (air comprimé, hydrogène, gaz naturel...).***

- ***Faire une place croissante aux travaux visant à une meilleure compréhension du comportement des automobilistes***

Il s'agit de mieux comprendre le comportement des conducteurs pour surmonter les réticences sociologiques quand il s'agit d'adopter un type de conduite, spontané ou bénéficiant de l'**assistance de l'électronique embarquée**, ou d'approprier des nouvelles technologies ou des pratiques d'utilisation de nouvelles infrastructures urbaines.

lepoint.fr

lepoint.fr

► **ANNEXE : liste des personnes auditionnées**

► **Administrations et organismes publics**

Direction générale de la recherche et de l'innovation (DGRI, ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche)

Eric LEMAITRE, chargé de mission, département Chimie, Sciences pour l'ingénieur, Physique nucléaire et des hautes énergies, Energie, Développement durable

Direction générale des entreprises (DGE, ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi)

Luc ROUSSEAU, directeur général

Ivan FAUCHEUX, sous-directeur des matériels de transports, biens d'équipement mécaniques et services pour l'industrie, service des industries manufacturières et des activités postales (SIMAP)

Michel FERRANDERY, chef de bureau « matériels de transport », SIMAP

Direction générale du trésor et de la politique économique (DGTPE, ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi)

Coordination des enquêtes auprès des missions économiques : Vincent TOUSSAINT, chef du bureau des réseaux d'expertise et de veille internationale, secrétariat général, et Valéry ALVES (bureau des réseaux d'expertise et de veille internationale SGE4)

OSEO Agence d'innovation

François DROUIN, président-directeur général

Direction de la sécurité et de la circulation routières (DSCR, ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire)

Bernard GAUVIN, sous-directeur de la réglementation technique des véhicules

Commission interministérielle pour les véhicules propres et économes (CIVEPE)

Dominique CLÉMENT, président, vice-président de la Communauté d'agglomération de Poitiers

Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

Pierre MATARASSO, directeur scientifique adjoint, département « Environnement et développement durable »

Jean-Marie TARASCON, professeur, Laboratoire de réactivité et de chimie des solides (LRCS), CNRS / Université de Picardie Jules VERNE, Amiens

Michel ARMAND, professeur, LRCS

Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (INRETS)

Jean DELSEY, directeur délégué du Centre de Marseille-Salon de Provence, président du groupe 8 du PREDIT « Véhicules propres et économes »

Programme PREDIT (Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres)

Jean-Louis LÉONARD, président du conseil d'orientation du PREDIT, député de Charente-Maritime

Bernard DUHEM, secrétaire permanent

Jean DELSEY, président du groupe 8 « Véhicules propres et économes »

Académie des technologies

Thierry CHAMBOLLE, membre de l'Académie (mission évaluation du PREDIT 3)

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)

Chantal JOUANNO, présidente

François MOISAN, directeur exécutif « Stratégie et recherche », directeur scientifique

Alain MORCHEOINE, directeur « Air, bruit, efficacité énergétique »

Institut Français du Pétrole (IFP)

Olivier APPERT, président

Philippe PINCHON, directeur du Centre de résultats « Moteurs-Énergie »

► **Constructeurs automobiles**

Renault

Patrick PÉLATA, directeur général adjoint « Plan, produits, programmes »

Jean-Louis RICAUD, directeur général adjoint « Ingénieries & qualité »

Jacques VERDONCK, vice-président « Plan stratégique du groupe »

Serge YOCCOZ, responsable de la cellule « Stratégie véhicule zéro émission »

PSA-Peugeot Citroën

Grégoire OLIVIER, membre du directoire de PSA Peugeot Citroën, membre du Comité de direction générale, directeur des programmes

Pascal HENAULT, directeur de la recherche et de l'innovation automobile, direction « Innovation et stratégie »

Jean-Marc NICOLLE, conseiller auprès du président du Conseil de surveillance

Thérèse MARTINET, directrice des affaires publiques et de l'environnement (direction juridique, des relations institutionnelles et de l'audit)

Joseph BERETTA, responsable « Énergies et émissions automobiles », direction des affaires publiques et de l'environnement

Claude SATINET, ancien membre du directoire de PSA, ancien directeur général des Automobiles Citroën

Toyota France

Michel GARDEL, président-directeur général

BMW France

Nicolas WERTANS, président du directoire de BMW Group France, vice-président de BMW Group AG

Société de véhicules électriques (SVE / groupe DASSAULT)

Jean-François HERCHIN, président-directeur général

Gérard THÉRY, président honoraire

lepoint.fr

► **Équipementiers**

Fédération des industries des équipements pour véhicules (FIEV)

Armand BATTEUX, président
Jacques MONNET, délégué général

Robert Bosch (France) SAS

Guy MAUGIS, président

Valeo

Guillaume DEVAUCHELLE, directeur « Recherche et développement » du groupe

Continental Automotive France SAS (ex-Siemens VDO)

Jean-Luc MATÉ, vice-président « Stratégie & technologie automobile »

Michelin

Patrick OLIVA, directeur délégué auprès des gérants du groupe (stratégie de recherche et développement durable)

Pôle de compétitivité MOV'EO (Haute/basse Normandie / Ile-de-France)

Michel GIGOU, directeur général du pôle

► **Entreprises de fourniture d'énergie**

Electricité de France (EdF)

Jean-Louis MATHIAS, directeur général délégué
Yves BAMBERGER, directeur de la recherche et du développement
Rouzbeh REZAKHANLOU, responsable du programme « Nouveaux métiers et collectivités territoriales, direction de la recherche et du développement »
Cédric LEWANDOWSKI, directeur « Transport et véhicules électriques » (DTVE)
Sylvain VITET, directeur-adjoint « Transports et véhicules électriques » (DTVE)
Jean-Louis BERTHOU, responsable du secteur « Transport collectif urbain », DTVE

Gaz de France (GdF)

Henri DUCRÉ, directeur de la branche Énergie France
Pascal ZANETTA, GdF Énergie

TOTAL

Bruno WEYMULLER, conseiller auprès du directeur général
Jean-Jacques MOSCONI, directeur stratégie
Daniel LE BRETON, Raffinage & marketing ; Stratégie / développement, Transport et énergie – TOTAL France

Air Liquide

François DARCHIS, vice-président, membre du comité exécutif du groupe Air Liquide, responsable des activités ingénierie et construction
Dominique BERNAL, directeur « Technologies avancées » Europe
Guy de RÉALS, responsable du développement commercial « Énergie / Hydrogène »

SAFT

Jean-Michel DURAND, directeur de la stratégie et du développement

Association française du gaz naturel pour véhicules (AFGNV)

Jean-Marc NICOLLE, président

Vincent TISSOT-FAVRE, secrétaire général

► **Utilisateurs**

La Poste

Patrick WIDLOECHER, directeur du développement durable du groupe La Poste

Patrice POISSON, directeur des matériels roulants et équipements de la distribution

Groupe MAAF Assurance (Mutuelle d'assurance artisanale de France)

Stéphane RUSSEIL, chef de marché « auto », département « Marketing stratégique »



lepoint.fr

lepoint.fr