

Transport routier : des carburants traditionnels aux solutions de rupture technologique

Les études de prospective énergétique convergent sur une forte croissance de la demande pétrolière (+60 % d'ici 2030) et sur le maintien de la part du pétrole (40 %) dans le bilan énergétique mondial. Dans ce contexte, deux défis majeurs sont à relever : renouveler, voire accroître, les réserves pour alimenter les véhicules en carburants traditionnels, mais limiter la progression des émissions de gaz carbonique dues au transport routier, grâce à des innovations technologiques aussi bien en termes de motorisation que de sources d'énergie.

par Bernard Bensaid
Ingénieur chargé d'études,
Direction des études économiques,
Institut français du pétrole

Dans les trente prochaines années, la demande énergétique générée par les transports devrait progresser plus rapidement que la demande

énergétique globale. Aujourd'hui, le transport routier utilise presque exclusivement des produits pétroliers, ce qui impose d'anticiper le rythme de renouvellement des réserves pétrolières, tout en s'efforçant de faire émerger des solutions alternatives industrielles pour infléchir la hausse inexorable des émissions de CO₂ et construire la transition de l'après-pétrole.

Exploiter les ressources pétrolières pour répondre à une demande croissante

Après les chocs pétroliers de 1973 et 1979, la progression de la demande mondiale a marqué un coup d'arrêt. Depuis 1980, elle a repris sa croissance au rythme de 1,4 % / an pour atteindre 75 Mb/j en 2002. Un basculement de la demande s'est produit de l'OCDE, dont la part dans la consommation mondiale a diminué de 75 % en 1970 à 62 % en 2002, vers les pays en voie de développement, dont le poids a augmenté de 15 à 33 % sur la même période.

Selon les perspectives de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la demande pétrolière mondiale pourrait encore progresser de 1,6 % par an sur la période 2000-2030 pour atteindre 120 Mb/j : la consommation dans la zone OCDE devrait progresser de 0,8 % par an, alors que celle dans les PVD augmenterait trois fois plus rapidement (avec une augmentation d'environ 3 % par an de la consommation des pays en forte croissance, tels que la Chine et l'Inde). Cette hausse au plan mondial proviendrait pour les trois quarts des

transports et plus particulièrement du secteur routier : sa part dans la demande finale de produits pétroliers (hors électricité) devrait progresser de 58 % en 2002 à 64 % en 2030.

Face à cette consommation pétrolière mondiale en progression continue et aux interrogations sur l'évolution à long terme des réserves de pétrole brut, l'industrie pétrolière va devoir explorer toutes les solutions pour renouveler et augmenter ses ressources physiques.

Quelles sont les ressources pétrolières mobilisables dans l'avenir (voir la figure 1) ?

Les réserves prouvées actuelles de pétrole conventionnel sont estimées à environ 1 000 Gb (145 Gt) en 2002. A ces volumes, peuvent être ajoutées les ressources récupérables de bruts conventionnels non encore découvertes. Rares sont les organismes ou les experts qui se risquent à faire des prévisions sur ce qu'il reste à trouver dans le monde. On peut citer le chiffre donné par l'USGS (*United States Geological Surveys*) qui les estime à 1 000 Gb pour le pétrole (liquides de gaz naturel inclus), un chiffre qui fait l'objet de beaucoup de critiques, mais qui a le mérite d'exister et d'être basé sur une analyse bassin par bassin du potentiel restant à découvrir.

A ces réserves, peuvent également être ajoutées les ressources mobilisables par augmentation du taux de récupération de l'huile dans les gisements (on ne récupère aujourd'hui en moyenne que 35 % de l'huile en place dans les formations). L'impact du progrès technique est ici essentiel. On le voit en regardant les progrès réalisés dans l'exploitation des

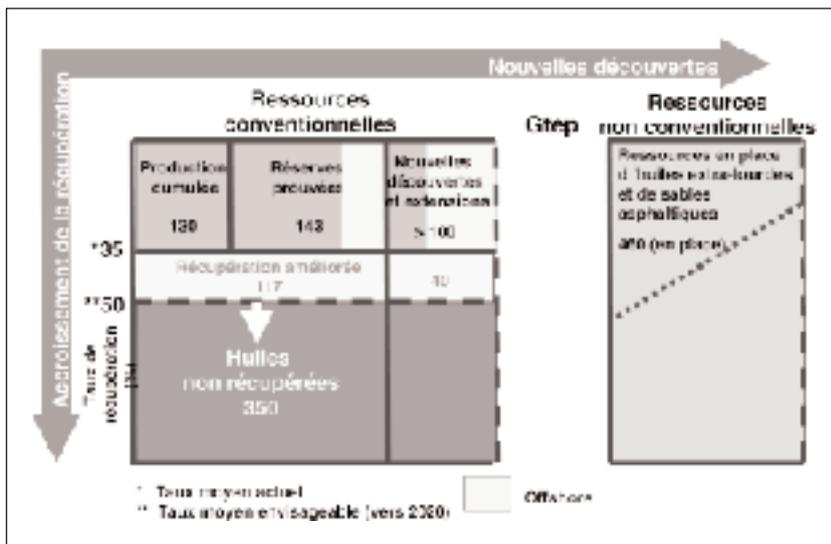


Fig. 1. - Accroissement et renouvellement des réserves de pétrole.

pétroles offshore. Il y a dix à quinze ans, les développements par plus de 200 mètres étaient appelés développements en *offshore* profond et considérés comme des prouesses techniques. Aujourd'hui, des champs sont développés par plus de 2 000 mètres de hauteur d'eau.

Enfin, il ne faut pas oublier le potentiel considérable représenté par les ressources de pétrole dites non conventionnelles comme les bruts extra-lourds et les sables asphaltiques du Canada et du Venezuela (des ressources en place de plus 460 Gt). Il existe d'ailleurs aujourd'hui une véritable continuité technique et économique entre les ressources de pétrole conventionnel et non conventionnel. A titre d'illustration, il suffit simplement de rappeler que l'*offshore* profond, voire très profond, qui était autrefois classé dans les non conventionnels est entré depuis déjà quelques années dans le rang des ressources conventionnelles. Le progrès technique permet d'envisager un tel continuum entre les différentes ressources de pétrole.

A côté des problèmes de disponibilité des ressources pétrolières sur le long terme se posent les enjeux d'environnement aussi bien au niveau local que global.

La lutte contre les pollutions locales et globales

Depuis les années 70, les industries pétrolières et automobiles se sont atta-

quées à la diminution des polluants locaux (CO, HC, NOx, particules, Ozone). Pour les prochaines années, le défi des industries énergétiques est la réduction des gaz à effet de serre.

Au cours des trente dernières années, les émissions de polluants locaux ont diminué de 100 gr/km à moins de 1 gr/km. Parmi les évolutions marquantes au plan technologique qui ont permis une telle évolution, on peut citer les progrès continus dans les moteurs :

- la généralisation de l'essence sans plomb a permis d'éliminer totalement les émissions de plomb dans l'air dues au transport, secteur qui était responsable de 95 % des émissions de plomb dans l'air en France en 1990 ;
- la « systématisation » des pots catalytiques pour les véhicules à allumage commandé (essence) à partir des années 90 a permis un fort déclin de l'ensemble des rejets à l'échappement (moins 90 %) ;
- enfin, les diminutions progressives des teneurs en soufre des carburants qui vont être abaissées à nouveau en 2005 (50 ppm) et 2008 (10 ppm) vont permettre la poursuite de cette tendance et faciliter la mise en place d'outils performants de dépollution comme les filtres à particules (catalytiques ou non) et les systèmes « dé-Nox » (réduction des oxydes d'azote en azote).

Le législateur européen qui, aujourd'hui, a l'initiative de toutes les réglementations, va poursuivre les efforts de réduction de ces polluants, en particulier les oxydes d'azote, l'ozone et les particules, mais va également axer ses actions sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Selon le scénario de référence de l'AIE (scénario tendanciel qui n'inclut pas de politique volontariste dans le domaine), les émissions mondiales de CO₂ du secteur de l'énergie devraient progresser de 23 Gt en 2000 à 27 Gt en 2010 pour atteindre 38 Gt en 2030 : cette progression de près de 65 % sur la période 2000-2030 serait principalement le fait de la production d'électricité et des transports. Lorsqu'on décompose les émissions mondiales de CO₂ par secteur, la part des transports devrait augmenter de 40 % en 2000 à 45 % en 2030. La diminution des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre liées à ce secteur du transport passera par des avancées technologiques, même si les aspects sociétaux (modes de transport, urbanisme...) seront également déterminants.

Lorsqu'on décompose les émissions mondiales de CO₂ par secteur, la part des transports devrait augmenter de 40 % en 2000 à 45 % en 2030

Il n'existe pas de solutions technologiques uniques mais plutôt un ensemble de possibilités qui doit être examiné et pourrait être combiné pour répondre aux problèmes des gaz à effet de serre. Le transport routier est ainsi un système où moteurs et carburants sont interdépendants.

On passera en revue les différentes sources d'énergie, puis les enjeux technologiques en termes de motorisation. Enfin, toutes ces solutions seront examinées du point de vue environnemental et économique, qui constituent les deux variables de décision sur le moyen et long termes (voir la figure 2).

On passera en revue les différentes sources d'énergie, puis les enjeux technologiques en termes de motorisation. Enfin, toutes ces solutions seront examinées du point de vue environnemental et économique, qui constituent les deux variables de décision sur le moyen et long termes (voir la figure 2).

Des carburants alternatifs d'aujourd'hui...

A l'échelle mondiale, les carburants issus du pétrole constituent 98 % de l'énergie utilisée par les transports rou-

Moteurs conventionnels - à allumage commandé et injection directe ou indirecte de carburant : moteur à essence - à allumage par compression et injection directe de carburant : moteur diesel	Carburants conventionnels - issus du pétrole - avec composants oxygénés et additifs
Moteurs alternatifs - moteurs dédiés (GNV, GTL, ...)) - nouveaux procédés de combustion (HCCI, CAI) - motorisation électrique (batteries ou pile à combustible) - motorisation hybride thermique/électrique	Carburants alternatifs - carburants reformulés (moteurs conventionnels, nouveaux procédés de combustion, reformeur) - gazeux : GPL, GNV, H2 - GTL, CTL, ETL - bio-carburants (ethanol, ETBE, EMHV)

Fig. 2. - Les solutions d'aujourd'hui et de demain.

tiers. Les énergies alternatives déjà utilisées, et certaines depuis fort longtemps, sont le gaz naturel (GNV), les gaz de pétrole liquéfiés (GPL) et les biocarburants. Mais la totalité des carburants alternatifs ne représente aujourd'hui qu'une vingtaine de Mtep, soit moins de 2 % du total de l'énergie des transports. A la fin de l'année 2001, la Commission européenne a proposé des objectifs de pénétration des carburants de substitution à l'horizon 2020 qui devraient représenter 23 % de la demande de carburants en 2020 : 10 % de gaz naturel, 8 % de biocarburants et 5 % d'hydrogène.

Bien qu'une généralisation de l'utilisation du GPLc comme carburant automobile ne soit pas réaliste sur l'ensemble du parc, notamment pour des questions de disponibilités locales et régionales ou de réseaux de distribution, les volumes mondiaux mobilisables pour des applications au transport pourraient être à l'avenir assez importants. De plus, son utilisation permettrait, dans une certaine mesure, une diversification des approvisionnements énergétiques des transports. Actuellement, les véhicules fonctionnant avec ce combustible sont majoritairement commercialisés avec des systèmes à bicarburant (essence et GPLc), qui permettent de pallier au manque de stations de ravitaillement (moins de 10 % de stations en France permettent un ravitaillement en GPLc). Cette solution ne permet pas un fonctionnement optimisé, ni pour l'un ni pour l'autre des carburants. Enfin, les performances environnementales du

véhicule GPLc dédié sont « convenables », mais nécessitent l'utilisation d'un pot catalytique trois voies.

L'utilisation du GNV dans les transports ne représente 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. La nécessité d'un stockage à haute pression et la mise en place d'une infrastructure relativement lourde limitent un développement de masse. Son potentiel le plus important porte sûrement sur les flottes de véhicules captifs, amenées à réaliser de nombreux déplacements dans les centres urbains. De plus, les qualités environnementales du GNV dédié plaident en sa faveur : un bon comportement vis-à-vis des polluants locaux (résultats inférieurs au standard ULEV californien), des effluents des moteurs GNV en moyenne 2 fois moins réactifs à la formation d'ozone troposphérique que ceux issus des moteurs essence ; cependant, une attention toute particulière doit être portée au niveau des rejets de méthane, ce gaz étant particulièrement néfaste en termes d'impact sur l'effet de serre. Tout comme pour le véhicule GPLc, la commercialisation de véhicule GNV va nécessiter des développements technologiques pour assurer des niveaux d'émissions compatibles avec les normes actuelles, Euro 4, et les normes futures, Euro 5.

Les deux principaux biocarburants, qui font l'objet de développements industriels, sont l'ester méthylique d'huile végétale (EMHV) et l'éthanol

Les deux principaux biocarburants, qui font l'objet de développements industriels, sont l'ester méthylique d'huile végétale (EMHV) et l'éthanol.

Non utilisables pour l'alimentation directe de moteur diesel moderne, les huiles végétales issues de colza ou de tournesol sont transformées en une opération de transestérification avec du méthanol, qui donne les esters méthyliques d'huiles végétales ou EMHV. Jusqu'à 5 %, l'EMHV est distribué à la pompe de manière tout à fait transparente pour l'utilisateur et, aujourd'hui, la majorité des raffineries françaises l'incorpore aux carburants vendus dans des proportions variant de 2 à 5 %. Au-delà et jusqu'à 30 %, il est employé dans les flottes captives sans nécessité de contraintes techniques particulières. C'est d'ailleurs le taux maximal au-delà duquel Renault VI et PSA n'accordent plus leur garantie constructeur. Il faut souligner que cette filière est très dépendante d'une politique fiscale avantageuse, les coûts de production étant nettement plus élevés que ceux des carburants pétroliers. Le coût des

EMHV est un des freins importants à une utilisation plus générale, même si, du point de vue environnemental, le bilan est plutôt

positif.

L'éthanol a surtout été utilisé comme carburant en remplacement du supercarburant au Brésil et dans une moindre mesure aux Etats-Unis. Au Brésil, les crises pétrolières des années 70 ont été le moteur de la production de masse de l'éthanol comme carburant de substitution et, dès 1979, l'Etat assurait à l'industrie automobile qu'il serait disponible dans tous les centres importants. Durant la fin des années 80 et le début des années 90, la baisse des prix du brut a rendu moins intéressante la production d'éthanol.

Le second pays ayant lancé une initiative d'envergure en faveur de cet alcool sont les Etats-Unis. Le président Carter inaugurerait en 1978 le premier programme éthanol, « l'Energy Tax Act », qui permettait une détaxe fiscale sur la production de cet alcool. Comme carburant alternatif, il est utilisé en mélange

avec l'essence : l'E10 et, dans une moindre mesure, l'E85 sont les plus couramment employés. Depuis la fin des années 70, l'éthanol a reçu de nombreuses aides fiscales qui ont été reconduites jusqu'en 2007. Dans les pays européens, l'éthanol n'est généralement pas utilisé directement comme carburant, du fait des difficultés liées au stockage du mélange et à l'impact sur la volatilité. Il est plutôt employé sous sa forme éther (ETBE : produit à partir d'isobutylène et d'éthanol).

...aux carburants de demain...

Sur le moyen terme, la production de carburants liquides, essence ou gazole, peut être envisagée non plus uniquement à partir de pétrole, mais aussi à partir d'autres ressources telles que le gaz naturel, le charbon et la biomasse. Les technologies GTL (Gas to Liquids) offrent de nouvelles voies possibles de valorisation du gaz naturel avec la production de produits pétroliers de très bonne qualité. Ces technologies intéressent de nombreux opérateurs. Le coût de ce type d'installation a été fortement réduit au cours des dernières années. Alors que les projets affichent un coût d'investissement de plus de 50 000 \$/b/j, au début des années 90, le coût d'investissement des projets actuels est évalué entre 20 000 et 35 000 \$/b/j. Des progrès importants en matière de performances des procédés, combinés à une augmentation sensible de la taille des projets (12 000 b/j au début des années 90, 30 000 à 75 000 b/j aujourd'hui), ont permis une telle réduction. Aujourd'hui, plus de 30 projets sont en cours (phase d'étude ou de développement), représentant une capacité de production de près de 1,2 Mb/j. En octobre 2003, Shell a décidé d'investir 5 G\$ au Qatar pour le premier grand projet de GTL d'une capacité de 140 000 b/j.

De la même manière, on peut envisager la voie CTL (Coal to Liquids), plus coûteuse, mais réalisable techniquement : cette solution est attrayante pour des pays possédant d'importantes ressources de charbon. Ces dernières qui représentent plus de 200 années de

production au rythme actuel sont concentrées dans des pays tels que la Chine et l'Inde qui seront de plus en plus consommateurs d'énergie dans les années à venir. Une étude récente menée par l'IFP montre que, pour un prix de la tonne de charbon de 30 \$, la solution CTL peut s'avérer compétitive par rapport aux filières traditionnelles, dès lors que le prix du baril reste durablement à un niveau supérieur à 35-40 \$/b. Il est important de souligner que peu d'efforts de recherche ont été faits dans ce domaine au cours des 20 dernières années. Cependant, cette filière ne pourrait être envisagée qu'en optant pour la capture et la séquestration du CO₂.

La dernière ressource envisageable pour produire des carburants liquides de type pétrolier est la biomasse. Dans un premier temps, les matières premières collectées sont transformées en « gaz de synthèse », puis en produits liquides par le procédé Fischer Tropsch pour obtenir du gazole. Pour ce produit, les coûts exprimés en euros par tonne équivalent diesel sont très élevés, de l'ordre de 700-800 euros. Sur le long terme, l'hydrogène peut être envisagé comme un carburant. Il est utilisé aujourd'hui à 99 % comme gaz industriel : la production d'ammoniac représente le secteur le plus consommateur (50 %), devant le raffinage (37 %), la synthèse de méthanol (8 %) et, enfin, la production d'autres spécialités chimiques ; seul, 1 % du volume mondial est valorisé actuellement à des fins énergétiques dans le secteur spatial. Sa production exige beaucoup d'énergie car elle part de molécules riches en hydrogène, particulièrement stables, telles que l'eau ou le méthane. Les énergies fossiles sont les sources d'énergie les plus utilisées pour produire l'hydrogène : le vaporéformage du gaz naturel est aujourd'hui la technologie la plus communément employée pour une production en grandes quantités et à moindre coût. La production d'hydrogène par transformation de la biomasse est une voie attrayante, qui nécessite des travaux de R&D impor-

tants. Enfin, malgré son coût actuel élevé et son rendement énergétique médiocre, l'électrolyse de l'eau à partir d'énergie nucléaire est la principale voie de production de l'hydrogène à partir de composés non fossiles.

Toutefois, l'impact environnemental des carburants ne se mesure réellement qu'au travers de l'efficacité des convertisseurs.

...en passant par les progrès continus des moteurs traditionnels...

Dans les années récentes, le développement et la généralisation de l'injection directe haute pression a permis une réduction significative des consommations unitaires des véhicules, notamment diesel. Le moteur diesel à injection directe présente, du fait de son principe de combustion, une consommation en carburant et des émissions de CO₂ inférieures d'environ 30 % à celles du moteur à essence de même performance. Un autre axe de progrès est l'approche « *downsizing* », c'est-à-dire la réduction de cylindrée avec maintien des performances.

Aujourd'hui, les avancées technologiques et les recherches en cours autour des moteurs à combustion interne permettent d'espérer des gains en consommation (selon les solutions) de 10 à 30 % par rapport au moteur conventionnel actuel :

- nouveaux modes de combustion HCCI (*Homogeneous Combustion Compression Ignition*) ou CAI (*Controlled Auto Ignition*) ;
- « *downsizing* » des moteurs ;
- travaux de R&D dans le domaine de la combustion ou de la distribution variable.

La prochaine évolution attendue dans la filière « moteurs à combustion interne » est le véhicule hybride. Il s'inscrit dans la continuité par rapport au véhicule à combustion interne actuel. Il ne

nécessite pas, en effet, de modifications ou d'évolutions lourdes des infrastructures de distribution et il offre de bonnes opportunités de réduction des consommations d'énergie et des émissions de CO₂ au niveau du véhicule. Les solutions alternatives de type véhicule hybride (essence ou diesel) permettent d'envisager 20 à 40 % en termes de gain de consommation par rapport au moteur conventionnel actuel. Toyota a été le premier constructeur à proposer un véhicule hybride essence dans sa gamme à la fin des années 90 : il s'agit de la Toyota Prius dont le constructeur japonais va proposer la deuxième version. Honda est l'autre constructeur japonais à proposer un véhicule hybride dans sa gamme. Le constructeur américain General Motors projette de commercialiser des véhicules pour les modèles fortement consommateurs de carburants (4x4, SUV). Quant aux Européens, ils portent pour l'instant un intérêt limité pour ce type de motorisation en raison du succès commercial et technologique du diesel.

...jusqu'aux solutions de rupture technologique sur le long terme

Sur le long terme, deux types de solution de rupture se dégagent autour du moteur électrique : les véhicules utilisant des batteries pour le stockage de l'électricité ou des piles à combustible produisant l'électricité nécessaire à bord du véhicule.

Les véhicules électriques ont suscité beaucoup d'intérêt dans le passé du fait de leurs avantages intrinsèques lors de la prise de conscience des problèmes de pollution locale. Cette motorisation présente plusieurs avantages : aucune émission de polluants, des émissions sonores très réduites et une conduite urbaine agréable. En revanche, cette filière présente une série de difficultés : un temps de recharge trop long, des performances limitées et une autonomie beaucoup trop réduite de ces véhicules, de 100 à 200 km en usage réel. Cette situation est essentiellement due aux performances encore insuffisantes des batteries utilisées pour le stockage

de l'énergie électrique à bord du véhicule. Malgré la mise en œuvre de nouvelles technologies (batteries Nickel-Cadmium, Nickel métal hydrure ou Lithium-ion), le véhicule purement électrique est forte-

ment concurrencé par le véhicule hybride et la pile à combustible (PAC). De fait, l'avenir de l'hydrogène dans les transports est très lié à celui des piles à combustible (PAC) : en effet, si en termes de CO₂ l'efficacité demeure, son utilisation dans un moteur conventionnel offre peu d'avantages en termes de consommation d'énergie et de rejets de polluants tels que les oxydes d'azote.

Sans autres émissions que de la vapeur d'eau, le véhicule à PAC fonctionnant à l'hydrogène peut apparaître, au premier abord, comme une réponse au problème des émissions de gaz à effet de serre et une alternative au véhicule à batterie en tant que véhicule « zéro émissions ». En effet, il apporte une réponse à l'échec des automobiles électriques durant les années 1990, comme solution crédible au problème de pollution urbaine. L'automobile PAC pourrait permettre, *a priori*, de s'affranchir des temps de ravitaillement trop longs ainsi que de la faible autonomie des solutions purement électriques.

Mais le développement de la filière PAC se heurte toutefois, quelle que soit la solution étudiée (hydrogène stocké à bord du véhicule ou hydrogène produit à bord du véhicule), à plusieurs difficultés majeures.

Dans le cas d'une production centralisée d'hydrogène, il faut mettre en place les infrastructures de production, un véritable réseau de distribution et des technologies de stockage embarquées d'hydrogène. Dans ce cas, le bilan CO₂ de la filière est complètement dépendant du mode de production de l'hydrogène et du développement de la capture ou séquestration du CO₂.

Dans le cas de solutions embarquées, il reste à mettre au point des technologies de production de l'hydrogène compatibles avec les contraintes de fonctionnement d'un véhicule (démarrage, fonctionnement transitoire, etc.) et à sélectionner le carburant liquide adé-

quat (méthanol, éthanol, naphta, etc.). En produisant l'hydrogène à bord du véhicule, le bilan CO₂ ne présente pas nécessairement d'avantages significatifs par rapport aux autres solutions. Il semble que General

Motors ait décidé d'écarter définitivement cette solution de son programme de R&D et que le « *Department of Energy* » américain se prononce sur cette option au cours de l'année 2004. Enfin, un des freins majeurs au développement de la PAC est son coût relativement élevé. Le coût des piles fabriquées aujourd'hui (de type PEM ou basse température) est supérieur à 3000 €/kw, par rapport à 30 à 50 €/kw pour les moteurs à combustion interne conventionnels, produits en série. Lorsqu'on envisage la mise en production de plusieurs centaines de milliers d'exemplaires de PAC, l'avantage reste au moteur à combustion interne puisque le coût de production des piles (hors moteur électrique et système de stockage) reste compris entre 100 et 200 €/kw (1), soit trois à quatre fois plus que celui d'un moteur conventionnel. Cependant, la PAC représente une option sur le long terme où les progrès technologiques sont possibles et peuvent laisser entrevoir l'amélioration des performances et la diminution des coûts.

L'hydrogène couplé à la PAC focalise aujourd'hui l'intérêt des pouvoirs publics. L'administration américaine a dégagé un budget de 1,2 G€ sur la période 2003-2007 et le Japon a lancé un programme dans ce domaine, équivalent à celui des Etats-Unis. Au niveau européen, les Etats membres prévoient un budget de 300 M€ sur la période 2003-2007, dont 50 % provenant de l'Allemagne. Dans le cadre de l'Union, les travaux dans le domaine de l'hydrogène se font à travers le 6^e programme cadre de recherche et développement (PCRD), avec un budget prévu de 300 M€. Globalement, l'effort européen

La prochaine évolution attendue dans la filière « moteurs à combustion interne » est le véhicule hybride

(1) Source : DOE et DTI, « DFMA Cost Estimates of Fuel-Cell/Reformer Systems at Low/Medium/High Production Rates », Brian D. James, Greg D. Ariff, Reed C. Kuhn Future Car Congress 2002, 4 June 2002.

TABLEAU I
Bilan CO₂ « du puits à la roue » des carburants conventionnels et alternatifs

Energie	Origine	Type de moteur	Energie MJ/100 km	g eq CO ₂ /km	g CO ₂ /km relatif
Diesel	Pétrole	D injection directe	212	164	1,00
Diesel	Pétrole	Reformeur + PAC*	188	142	0,87
Diesel	Pétrole	Hybride	164	125	0,76
Essence	Pétrole	AC*	255	196	1,20
Essence	Pétrole	Reformeur + PAC*	185	140	0,85
Essence	Pétrole	Hybride	184	140	0,85
Diesel FT	Gaz Naturel	D*	222	169	1,03
Diesel FT	Gaz Naturel	Hybride	171	129	0,79
Diesel FT	Bois	D*	401	22	0,13
Diesel FT	Bois	Hybride	309	16	0,10
Gaz Naturel	Gaz Naturel	AC*	216	127	0,77
Gaz Naturel	Gaz Naturel	Hybride	164	97	0,59
Ethanol	Béttérave	AC*	630	116	0,71
Ethanol	Béttérave	Hybride	459	85	0,52
EHMV	Oléagineux	D*	389	93	0,57
EHMV	Oléagineux	Hybride	300	71	0,43
H2 comp	Nucléaire	PAC*	566	7	0,04
H2 comp	Nucléaire	PAC* + Hybride	504	6	0,04
H2 comp	Gaz Naturel (mix E.U.)	PAC*	173	98	0,60
H2 comp	Gaz Naturel (mix E.U.)	PAC* + Hybride	154	88	0,54
H2 liquid	Gaz Naturel (mix E.U.)	PAC*	221	135	0,82
H2 liquid	Gaz Naturel (mix E.U.)	PAC* + Hybride	197	120	0,73
H2 liquid	Electricité E.U.	PAC*	491	222	1,35
H2 liquid	Electricité E.U.	PAC* + Hybride	437	197	1,20

Sources : « Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context », EUCAR, JRC, CONCAWE, November 2003.
*AC : allumage commandé D : diesel PAC : pile à combustible

entre 2003 et 2007 représente la moitié de celui des Etats-Unis et du Japon.

Bilans environnementaux et économiques des solutions alternatives

La comparaison de l'ensemble de ces filières doit se faire en intégrant essentiellement le bilan en termes d'effet de serre (les bilans énergétiques en MJ/100 km et les émissions de CO₂ exprimées en grammes de CO₂ équivalent par km) et le coût économique.

De l'analyse des filières de carburants conventionnels et alternatifs en prenant comme référence le gazole avec moteur à injection directe, on peut tirer les enseignements suivants (voir le tableau I) :

- le bilan CO₂ du diesel FT produit à partir de gaz naturel est proche de celui du diesel ;
- le gaz naturel en tant que carburant ainsi que les biocarburants (Ethanol, EHMV) présentent des émissions de

CO₂ inférieures de 30 à 50 % à la référence ; mais la filière biocarburants est fortement consommatrice d'énergie ;

- l'hydrogène comprimé produit à partir de gaz naturel a des émissions de CO₂ sur toute sa filière proche de celles des biocarburants ; lorsqu'on envisage l'opération de liquéfaction, le bilan CO₂ se dégrade en raison d'une consommation d'énergie plus importante ;

- si la filière hydrogène électrolytique-PAC, dans le cas de l'électricité d'origine nucléaire sans émissions de CO₂, présente, « du puits à la roue », le bilan le plus satisfaisant du point de vue environnemental, elle présente en revanche la consommation d'énergie la plus élevée.

Pour chacune de ces sources d'énergie, dès qu'on envisage l'option « hybride », le gain en termes d'émissions de CO₂ par rapport aux motorisations classiques peut aller de 10 % pour l'hydrogène jusqu'à 25-30% pour les solutions

classiques (essence, gazole) ou alternatives (gaz naturel, biocarburants...).

A coté de ce bilan environnemental, il est important d'examiner les coûts des différentes solutions alternatives pour évaluer leur performance économique. Le tableau II reprend l'ensemble des coûts de production et de distribution : les premiers sont liés au mode de production et au coût de

l'énergie primaire utilisée alors que les seconds vont plutôt représenter les différences

dues à l'état physique du carburant (liquide ou gazeux) et aux conditions d'exploitation (toxicité, sécurité...). Ces coûts sont calculés sans prendre en compte l'investissement initial dans le véhicule.

Cette analyse montre que le surcoût aux 100 km par rapport aux solutions conventionnelles varie de 15 % à plus 100 % pour les options hydrogène/pile à combustible, avec l'hypothèse pourtant forte que la PAC est proposée à un

L'hydrogène couplé à la pile à combustible focalise aujourd'hui l'intérêt des pouvoirs publics

TABLEAU II
Coût de revient au kilomètre des différents carburants

	Consommation (MJ/100 km)	Coût du carburant (€/GJ)	Coût (€/100 km)
MCI*+essence	224	8	1,8
MCI*+gazole	184	8	1,5
MCI* Hybride+gazole	141	8	1,1
PAC+H2 comprimé ex gaz	84	25	2,1
PAC+H2 comprimé ex charbon	84	32	2,7
PAC+H2 comprimé ex biomasse	84	37	3,1
PAC+H2 comprimé ex électricité France	84	42	3,5
EHMV	183	12	2,2
Ethanol	224	21	4,7
Carburants via biomasse	224	20	4,5

Source : « Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context », EUCAR, JRC, CONCAWE, November 2003.
* MCI : moteur à combustion interne

coût équivalent à celui des moteurs à combustion interne.

L'éthanol, dont le coût est trois fois supérieur à celui des carburants classiques, est pénalisé par son contenu énergétique qui est d'environ un tiers inférieur à celui de l'essence. Seule la mise en place d'une défiscalisation peut donc permettre aux biocarburants d'être aujourd'hui compétitifs. D'autant plus que les biocarburants bénéficient, en outre, d'une aide indirecte via la politique agricole commune (PAC). Enfin, si la fabrication de carburants de synthèse à partir de biomasse présente un bilan CO₂ très avantageux, le coût de revient pour 100 km est du même ordre que pour la filière éthanol.

En première approximation, la solution hybride/gazole semble présenter le meilleur compromis environnement/coût. Dans l'étude « Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context », publiée récemment et réalisée dans le cadre d'une association des constructeurs automobiles européens (EUCAR), de la Commission européenne (JRC ISPRA) et des pétroliers (CONCAWE), un scénario de pénétration de 5 % des solutions alternatives a été établi au niveau européen : le coût exprimé en euro par tonne de CO₂ évitée varie ainsi de 200 €/t pour les solutions hybrides, à 300 €/t pour les biocarburants, jusqu'à 600 €/t pour l'hydrogène

embarqué et 5 000 €/t dans le cas d'une production d'hydrogène à bord du véhicule.

Un avenir ouvert sur une multitude de solutions potentielles

En ce début de XXI^e siècle, le transport routier doit faire face à un défi majeur pour les cinquante prochaines années : infléchir la tendance à la hausse des émissions de CO₂ d'ici 2030. A court terme, l'utilisation des biocarburants offre l'avantage d'avoir l'impact le plus rapide sur les émissions de gaz à effet de serre. Les solutions hybrides semblent présenter également un bon compromis environnement/coût. A plus long terme, et selon l'évolution des coûts relatifs, la compétition est ouverte entre le véhicule à essence et toutes ses améliorations techniques envisageables et un véhicule électrique où l'énergie est stockée à bord du véhicule, soit dans les batteries améliorées, soit en utilisant une pile à combustible à hydrogène. ●

BIBLIOGRAPHIE

- World Energy Outlook 2002 (Agence Internationale de l'Énergie).
- « Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context », EUCAR, JRC, CONCAWE, November 2003.