

Des carburants alternatifs d'aujourd'hui à ceux de demain

Aujourd'hui, 97 % de l'énergie consommée dans les transports routiers provient des produits pétroliers. La substitution par différentes énergies alternatives est motivée, d'une part, par la réduction de la dépendance vis-à-vis du pétrole et, d'autre part, par la volonté de diminuer les gaz à effet de serre. Dans un contexte de prix élevé du pétrole, les carburants alternatifs traditionnels (biocarburants, GPL, GNV) connaissent un essor plus prononcé, mais on peut également noter un regain d'intérêt pour les carburants de synthèse (GTL, CTL, BTL) pour lesquels des projets industriels et « pilotes » existent.

Sur les 30 prochaines années, c'est la demande énergétique associée aux transports qui devrait progresser le plus rapidement (+ 2,1 %/an contre 1,7 %/an pour la demande globale d'énergie). Aujourd'hui, ce secteur économique utilise presque exclusivement des produits pétroliers. Outre cette dépendance, la question fondamentale de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, que cette activité génère, paraît primordiale.

Plus généralement, se pose la question du volume disponible de carburants alternatifs par rapport à la demande de transport actuelle et future ?

Des carburants alternatifs d'aujourd'hui ...

À l'échelle mondiale, les carburants issus du pétrole constituent 97 % de l'énergie utilisée par les transports routiers. Ces carburants ont déjà fait l'objet de nombreuses améliorations et, au-delà des évolutions déjà programmées, il est vraisemblable que de nouvelles spécifications soient mises en œuvre d'ici à 2020, pour répondre aux objectifs de qualité de l'air de l'Union européenne et/ou aux éventuelles exigences de nouveaux modes de combustion des moteurs à allumage commandé et diesel (CAI, HCCI, etc.).

Au-delà, pour réduire les émissions de gaz à effet de serre des automobiles en conservant des moteurs à combustion interne, une voie d'action est la mise en œuvre d'énergies alternatives au pétrole. Certaines sont déjà utilisées depuis fort longtemps, souvent pour réduire une dépendance au pétrole au profit d'une ressource spécifique (cas du Brésil).

Sur les 1500 Mtep consommées par le transport routier dans le monde en 2003, le gaz naturel (GNV), le gaz de pétrole liquéfié (GPL) et les biocarburants ne représentent toutefois aujourd'hui qu'une quarantaine de Mtep, soit moins de 3 % du total.

Par ailleurs, d'autres solutions font l'objet d'études ou d'unités pilotes : à court et moyen termes, il s'agit des carburants

de synthèse (GTL, CTL, BTL) issus respectivement du gaz naturel, du charbon et de la biomasse. Sur le plus long terme, l'hydrogène peut être imaginé comme une solution de rupture.

Les biocarburants

(voir fiche Panorama *Les biocarburants dans le monde*)

Il existe aujourd'hui deux grands types de biocarburants, qui devraient fortement se développer dans les prochaines années : l'éthanol, qui est utilisé dans des moteurs de type « essence » et les esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV), destinés à un usage dans les moteurs de type « diesel » :

- L'éthanol est le biocarburant dont l'usage est le plus répandu, sa production s'élevant à environ 19 Mt en 2003, obtenue pour l'essentiel au Brésil et aux États-Unis.
- La production d'EMHV a été de l'ordre de 1,6 Mt en 2003, réalisée pour l'essentiel en Europe.

L'éthanol, principal biocarburant en termes de consommation, est aujourd'hui le premier carburant alternatif utilisé dans le monde.

L'éthanol a surtout été utilisé à la suite des chocs pétroliers de 1973 et 1979 comme carburant en remplacement du supercarburant au Brésil et dans une moindre mesure aux États-Unis. Dans les pays européens, l'éthanol n'est généralement pas utilisé directement comme carburant mais est plutôt employé sous sa forme éther mélangé à l'essence, jusqu'à 15% (ETBE : produit à partir d'isobutylène et d'éthanol).

Jusqu'à 5 %, l'EMHV peut être distribué à la pompe de manière tout à fait transparente pour l'utilisateur, et aujourd'hui, une partie des raffineries françaises l'incorpore aux carburants vendus dans des proportions variant de 2 à 5 %.

Un des avantages des biocarburants est la possibilité de les distribuer dans le réseau actuel de stations en les incorporant dans les carburants classiques, donc sans changement majeur de technologies moteurs des véhicules. En revanche, *leur coût est un des freins importants à une utilisation plus*

Des carburants alternatifs d'aujourd'hui à ceux de demain

générale, même si du point de vue environnemental le bilan est plutôt positif, en particulier vis-à-vis du CO₂.

Le Gaz de Pétrole Liquéfié carburant (GPLc)

Le GPL est un mélange de butane et de propane qui a deux origines : *il peut provenir directement des opérations de dégazolinage sur champs ou du raffinage de pétrole brut.* En France, près de 74 % de la production de GPLc est issu du raffinage, en Californie cette proportion est de l'ordre de 60 % contre 40 % en moyenne au niveau mondial.

Ce carburant présente certains avantages en terme d'environnement :

- indice d'octane élevé qui garantit une bonne résistance aux cliquetis ;
- pas de rejet de soufre, ni de plomb, ni de benzène et peu d'évaporations ;
- réduction des émissions de polluants réglementés par rapport à l'essence pour des véhicules dédiés (HC = - 73 %, NOx = - 79 %, CO = - 87 % par rapport aux normes 2005) ;
- mais il présente un bilan légèrement supérieur en termes d'émissions de CO₂ par rapport au diesel.

Mais les inconvénients du GPLc se situent à plusieurs niveaux : la nécessité de développer un réseau de distribution, le surcoût lors de l'achat du véhicule et les disponibilités limitées en produit.

Au niveau mondial, le parc de véhicules utilisant du GPL a progressé de 25 % en 3 ans, augmentant de 7,5 millions en 2000 à 9,5 millions en 2003 correspondant à une consommation de 16,5 Mt.

En 2003, la Corée détenait le premier parc mondial de voitures particulières (V.P.) GPL avec 1,7 million d'unités devant l'Italie (1,2 million), la Pologne (1,1 million) et la Turquie (1 million).

Au Japon et en Corée, le mélange propane/butane est principalement utilisé par les taxis qui ont bénéficié de subventions pour assurer leur conversion à partir de diesel.

En Europe, l'utilisation du GPLc a été introduite dans les années 50, surtout en Italie et aux Pays-Bas et a été rendue plus attractive dans ces pays par des politiques fiscales incitatives : dans ces deux pays, les parcs sont relativement stables sur la période 2000-2003. Il est également important de noter la montée en puissance de ce carburant dans les pays d'Europe de l'Est et plus particulièrement en Pologne, dont le parc de V.P. GPL a été multiplié par 3 sur la période 2000-2003.

Enfin, en France depuis 1996, les défiscalisations successives lui ont permis de devenir moins cher que le gazole mais sans percées réelles, avec un parc en recul en raison de problèmes techniques intervenus à la fin des années 90 et du manque d'offre.

Aux États-Unis, l'utilisation de ce carburant pour le transport s'est accrue durant les années 70 et 80, principalement dans des flottes captives comme les taxis, les véhicules postaux, les bus ou les camions de livraisons.

Tableau 1
GPLc dans le monde en 2003

Pays	Parc (milliers)		Consommation 2003 (kt)
	2000	2003	
Italie	1 234	1 220	1 202
Pays-Bas	323	290	435
Pologne	470	1 100	1 070
France	200	180	166
République tchèque	150	145	68
Bulgarie	120	195	258
Lituanie	100	125	120
Corée	1 214	1 723	3 740
Japon	290	290	1 528
Australie	590	492	1 213
États-Unis	180	190	730
Mexique	350	700	1 200
Russie	400	550	780
Turquie	950	1 000	1 260
Monde	7 504	9 416	16 445

Source : WLPGA

IFP/Direction des études économiques/2004

Même si la part du GPL utilisé dans les transports au niveau mondial a légèrement progressé de 6,6 % en 1990 à près de 8 % en 2003, une généralisation de l'utilisation du GPLc comme carburant automobile paraît improbable sur l'ensemble du parc, notamment pour des questions de disponibilités locales/régionales ou des contraintes au niveau des réseaux de distribution.

Toutefois, les volumes mondiaux mobilisables pour des applications au transport pourraient augmenter dans l'avenir. *En effet, le GPL peut s'obtenir à la sortie des raffineries mais également lors de la production de gaz sur champ.* De plus, l'utilisation du GPL en tant que carburant permettrait, dans une certaine mesure, une diversification des approvisionnements énergétiques des transports et la valorisation dans un contexte local de ressources qui peuvent être abondantes.

Actuellement, les véhicules fonctionnant avec ce combustible sont majoritairement commercialisés avec des systèmes à bicarburant (essence et GPLc) qui permettent de pallier le manque de stations de ravitaillement (moins de 10 % de stations en France permettent un ravitaillement en GPLc). Il reste que cette solution ne permet pas un fonctionnement optimisé, que ce soit pour l'un ou pour l'autre des carburants.

Par conséquent, certains véhicules à bicarburant GPLc, avec la mise en place des normes Euro 4 en 2005, vont nécessiter une adaptation importante. Tout comme pour les carburants classiques, un développement technologique spécifique devra être réalisé pour garantir les niveaux d'émissions de polluants.

Des carburants alternatifs d'aujourd'hui à ceux de demain

Le Gaz Naturel Véhicule (GNV)

Suite à la croissance importante des utilisations du gaz, principalement dans le domaine de l'électricité, le GNV (essentiellement sous forme comprimée) a fait l'objet depuis le début des années 90 d'un certain intérêt à travers le monde et de nombreux pays ont engagé des programmes ambitieux de développement. Ils ont, à leur échelle, mis en place des incitations fiscales pour l'utilisation de ce carburant. En outre, le GNV permet d'atteindre des objectifs de diversification énergétique et de sécurité d'approvisionnement, les réserves prouvées de gaz naturel étant supérieures à celles du pétrole, exprimées en nombre d'années de production.

Dans le monde, 3,6 millions de véhicules roulaient au GNV en 2003, selon une répartition donnée dans le tableau 2.

Tableau 2
GNV dans le monde en 2003

Pays	Parc véhicules (milliers)	Consommation (Mtep)	Nombre de stations
Italie	400	0,36	463
États-Unis	130	0,35	1 300
Canada	20	0,04	222
Japon	18	nd	226
Allemagne	19	nd	337
Irlande	10	nd	10
France	7	0,02	102
Argentine	1 243	1,7	1 105
Bésil	740	0,8	860
Pakistan	540	nd	574
Inde	159	nd	166
Chine	69	0,05	270
Venezuela	50	nd	140
Égypte	52	nd	79
Ukraine	45	nd	130
Russie	36	0,024	218
Bangladesh	32	nd	68
Monde	3 649	3,81	7 180

Source : IANGVA/IE

IFP/Direction des études économiques/2004

En Amérique latine, la croissance du GNV a été rapide en raison d'une législation gouvernementale favorisant le développement de ce carburant, notamment en Argentine, au Venezuela et en Colombie, en raison de leurs importantes réserves gazières.

L'Argentine est le leader mondial de la filière avec plus de 1,2 million d'unités. Avec près du tiers du parc mondial de véhicules fonctionnant au gaz naturel comprimé (GNC) et 1100 stations, l'Argentine est le pays où ce type de véhicules est le plus répandu : les véhicules fonctionnant au GNC représentaient 17,5 % du parc argentin en 2002.

L'accent a été mis sur ce carburant au début des années 80, lors de la mise en place d'un plan de développement des véhicules équipés au GNC. À l'époque, ce pays disposait de

plusieurs atouts : réserves de gaz naturel importantes et bonne infrastructure de gazoducs. Plus récemment, en 2001, la crise économique et la dévaluation de la monnaie ont accéléré la conversion du parc au GNC en raison de la forte progression des prix des produits pétroliers qui ont doublé.

En Europe, l'Italie a été le premier pays à utiliser de façon significative le GNV dans les années 30 et représente actuellement le marché le plus important d'Europe, avec 400 000 véhicules, mais sans réel développement aujourd'hui. Enfin, *aux États-Unis*, ce sont près de 130 000 véhicules qui roulent au gaz naturel.

L'utilisation du GNV dans les transports ne représente également 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 davantage sur les flottes de véhicules captifs amenées à réaliser de nombreux déplacements dans les centres urbains (bus, camions, etc.). Toutefois certaines expériences de « distribution à domicile pour le particulier » font l'objet de démonstration avec installation et utilisation de petits compresseurs (par exemple GDF en France) mais qui ne suppriment pas vraiment la contrainte de mise en place d'un réseau pour les longs déplacements.

L'impact sur l'environnement de son usage est plus favorable par rapport aux carburants liquides, à condition de disposer d'un moteur optimisé :

- aucune odeur, fumée noire, particule, salissure, perte par évaporation ;
- réduction de 90 % des émissions de CO et de 60 % pour les NOx ;
- sur un moteur optimisé au gaz naturel, une réduction des émissions de CO₂ de 5 à 10 % par rapport au moteur diesel est possible.

Tout comme pour le véhicule GPLc, la commercialisation de véhicule GNV va nécessiter, à l'avenir, des développements technologiques pour des raisons de niveaux d'émissions et de mise en place de normes Euro 4 en 2005. Alors qu'une adaptation sommaire à partir d'un moteur essence suffisait à un véhicule GNV pour obtenir une amélioration en termes d'émissions de polluants réglementés, les niveaux exigés en 2005 nécessiteront une optimisation conséquente et une possible remise en cause de la bicarburant.

... aux carburants de demain

Sur le moyen terme, la production de carburants liquides, essence et/ou gazole, peut être envisagée non plus uniquement

Des carburants alternatifs d'aujourd'hui à ceux de demain

à partir de pétrole, mais aussi à partir d'autres ressources telles que le gaz naturel, le charbon et la biomasse.

Le Gas to Liquids

Les technologies GTL (Gas to Liquids), utilisant la synthèse Fischer-Tropsch, offrent de nouvelles voies possibles de valorisation du gaz naturel avec la production de produits pétroliers de très bonne qualité (indice de cétane supérieur à 60-65, pas d'aromatique et pas de soufre). Le coût de ce type d'installation a été fortement réduit au cours des dernières années : les projets affichaient un montant d'investissement de plus de 50 000 \$/b/j au début des années 90, alors que sur les projets actuels il 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 des coûts unitaires d'investissement.

En 2004, la capacité de production des complexes de GTL dans le monde se situait autour de 51 000 b/j qui se répartissaient entre deux unités construites au début des années 90 en Afrique du Sud et en Malaisie.

Tableau 3
unités GTL dans le monde en 2004

Compagnie	Capacité	Lieu d'implantation
Petro S.A.	47 000 b/j	Afrique du Sud (1991)
Shell	14 700 b/j	Malaisie (1993)

Source : IFP

IFP/Direction des études économiques/2004

En 2006, une unité devrait être lancée au Qatar à l'initiative de la compagnie sud-africaine Sasol et de Qatar Petroleum (34 000 b/j).

Dans les futurs projets, le Qatar apparaît comme le pays phare pour le développement de la filière GTL avec des projets d'une capacité totale de 800 000 b/j, dont certains sont mentionnés ci-dessous :

- Shell et Qatar Petroleum ont finalisé leur projet d'unité de conversion de gaz naturel en carburants de synthèse nécessitant des investissements de 5 à 6 G\$ (2 unités de 70 000 b/j prévues en 2009).
- Le consortium Sasol-Chevron a signé un protocole d'accord pour trois projets de GTL d'une valeur totale de 6 G\$ (construction de deux unités de capacités respectives 130 000 et 65 000 b/j) (2009-2010).
- Enfin, ExxonMobil a conclu un accord préliminaire concernant la construction d'une unité de GTL de 154 000 b/j pour un coût de 7 G\$ (2011).

Enfin, au Nigeria, est évoqué un projet d'unité de GTL entre Chevron et la compagnie nationale NNPC devant démarrer en 2007 avec une capacité de 34 000 b/j.

Dans ce contexte de multiplication de projets d'unités GTL, il est important de noter la collaboration entre un pétrolier et un constructeur automobile. Dans le cadre d'un programme de recherche, Shell et Volkswagen testent des véhicules mis à la disposition de collectivités et fonctionnant avec des carburants de synthèse issus de la filière GTL.

Le Coal to Liquids

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, dont la consommation d'énergie est amenée à progresser fortement dans les années à venir. À titre d'exemple, en Chine, avec un coût d'extraction du charbon faible (autour de 12 \$/t), 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 40 \$/b. Il est également important de souligner le faible effort de recherche effectué dans ce domaine au cours des 20 dernières années, laissant présager des progrès significatifs dans l'avenir.

La seule unité de liquéfaction du charbon actuellement en fonctionnement se situe en Afrique du Sud dans la ville de Secunda et est opérée par la compagnie sud-africaine Sasol. La technologie utilisée est la liquéfaction indirecte. À partir de gaz de synthèse, des carburants liquides sont obtenus grâce au procédé Fischer-Tropsch. Il s'agit de 3 unités anciennes 1955/1982 (SASOL I, II et III) pour un total de 175 000 b/j, orientées actuellement vers la production de combustibles et carburants, mais aussi de produits chimiques.

La compagnie sud-africaine travaille également sur deux études de faisabilité en Chine pour développer des unités de liquéfaction du charbon dans deux régions : la province du nord de Shaanxi et la région autonome de Ningxia.

D'autre part, un seul projet en phase de construction existe pour l'instant et se situe en Chine sur le site d'une mine de charbon, avec Shenhua (plus grand producteur de charbon de Chine) utilisant la technologie de liquéfaction directe (slurry HTI, design : Axens). D'un coût prévu de 1 G\$, le démarrage du premier train (2 réacteurs en série) est prévu à la fin 2006/début 2007 : 20 000 b/j essence, kérosène, gazole avec une répartition 1/3 essence - 2/3 kérosène/gazole produits à partir de 6000 t/j de charbon à basse teneur en soufre.

Pour le GTL et le CTL, se pose la problématique des émissions de CO₂ qui sont supérieures à celles des filières traditionnelles. La capture du CO₂ émis par ces unités et leur stockage dans des formations géologiques pourraient être envisagés à terme pour améliorer le bilan « effet de

Des carburants alternatifs d'aujourd'hui à ceux de demain

serre » de ces options mais elles devraient entraîner un surcoût de 10 à 20 \$/b.

Biomass to Liquids

La dernière ressource envisageable pour produire des carburants liquides de type pétrolier est la biomasse (BTL). Cette production sera réalisée en deux étapes comme dans le cas des GTL ou CTL. 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 et du kerosène/jet. Pour ces produits d'origine végétale, les coûts exprimés en euros par tonne équivalent diesel sont aujourd'hui très élevés, de l'ordre de 700-800 €/tep. Cette filière, qui n'a pas la maturité technologique du GTL ou CTL, en est encore au stade de la recherche-développement : des opérations de démonstration existent, en particulier dans le cadre de projets européens, avec l'objectif d'optimiser l'étape de collecte-gazéification.

Pour l'instant, une unité pilote de production de BTL est en service à Freiberg (Allemagne de l'Est) : il s'agit d'une unité de démonstration dédiée à la production de gazole de synthèse ainsi que de méthanol à partir de sous-produits végétaux et résidus organiques. Ce projet résulte d'un partenariat conclu en 2002 entre DaimlerChrysler et la société Choren-Industries : le budget global est de 11 M€ dont 5 M€ provenant des autorités fédérales et 1 M€ de DaimlerChrysler.

Un autre projet est à l'étude en Suède à partir de pâte à papier pour générer des gaz de synthèse que l'on convertit en méthanol et DME (Varnamö).

Hydrogène/Électricité

Sur le long terme, l'hydrogène peut être envisagé comme un carburant, utilisé soit directement soit en mélange avec du gaz naturel (dans des proportions pouvant aller jusqu'à 20 %) dans un moteur à combustion interne. Son utilisation pure, via une pile à combustible et un moteur électrique, peut être vue comme une alternative au stockage direct d'électricité dans les batteries, surtout si l'hydrogène a été produit par électrolyse.

Aujourd'hui utilisé à 99 % comme gaz industriel, la production d'ammoniac est actuellement le secteur le plus consommateur (50 %) d'hydrogène, devant le raffinage (37 %), la synthèse de méthanol (8 %) et, enfin, la production d'autres spécialités chimiques. Seul 1 % du volume mondial est aujourd'hui valorisé à des fins énergétiques dans le secteur spatial. Les énergies fossiles sont les sources d'énergie les plus utilisées pour produire l'hydrogène : ainsi 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, mais qui nécessite des travaux de R&D importants.

Enfin, malgré son coût actuel très élevé et son rendement énergétique médiocre, l'électrolyse de l'eau est la principale voie de production de l'hydrogène à partir de composés non fossiles : toutefois son véritable intérêt « environnemental » dépendra du mode de production d'électricité utilisé.

Il reste à souligner que, pour le long terme, l'usage de l'hydrogène impliquera la mise en place d'une infrastructure lourde (transport par pipe, stockage intermédiaire, stockage à bord du véhicule) qui soulève des difficultés techniques et entraîne des surcoûts importants.

Aujourd'hui, il existe une quarantaine de stations-service distribuant de l'hydrogène au niveau mondial, réparties de manière relativement homogène entre l'Europe, l'Amérique du Nord et le Japon.

Dans un horizon plus proche, l'électricité via les technologies hybrides pourrait jouer un rôle plus important et permettre des réductions de l'ordre de 30 % sur les demandes spécifiques en carburants liquides. Cette option fait l'objet de développement aux États-Unis, ce qui repousse d'autant une éventuelle pénétration du diesel dans cette région (*cf. note de synthèse sur les véhicules hybrides*).

Actuellement, les carburants alternatifs les plus utilisés au niveau mondial sont les biocarburants (éthanol et EHMV), le GPL (Gaz de pétrole liquéfié) et le GNV (Gaz naturel pour véhicule).

À moyen terme, on devrait assister à la montée en puissance des carburants de synthèse produits à partir du gaz naturel (GTL), du charbon (CTL) et de la biomasse (BTL), pour lesquels il existe des projets industriels ou pilotes. Sur le plus long terme, l'hydrogène pourrait se positionner comme un carburant de substitution si certains obstacles sont levés, notamment en termes de coûts.

Bernard Bensaid
bernard.bensaid@ifp.fr

Manuscrit remis en décembre 2004



IFP - Diffusion des Connaissances

IFP (Siège social)

1 et 4, avenue de Bois-Préau - 92852 Rueil-Malmaison Cedex - France
Tél. : +33 1 47 52 59 18 - Fax : +33 1 47 52 53 04

IFP-Lyon

BP 3 - 69390 Vernaison - France
Tél. : +33 4 78 02 20 20 - Fax : +33 4 78 02 20 15