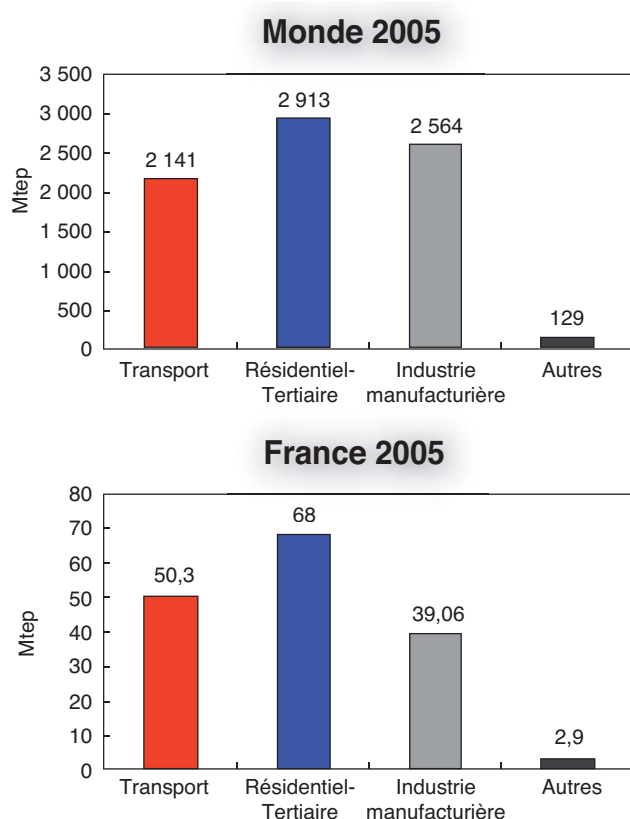


Les énergies pour le transport : avantages et inconvénients

Alors que le secteur des transports dépend à plus de 98 % des produits pétroliers, dans un contexte de prix des carburants élevés et de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre, les énergies alternatives se multiplient. De nombreuses filières sont successivement mises en avant, afin de prendre la relève des carburants pétroliers. Quels sont les atouts et les faiblesses de ces énergies de demain et d'après-demain ? Le point.

Le transport est un secteur extrêmement énergétivore. Dans le monde, le transport consommait en 2005 l'équivalent de 2 141 Mtep. Pour la France, le transport est même le deuxième secteur consommateur d'énergie avec 31 % de la consommation énergétique du pays (figure 1).

Fig. 1 - Consommation d'énergie par secteur en 2005



Sources : Statistiques AIE et DGEMP

Aujourd'hui, le secteur des transports est étroitement lié au pétrole mais les alternatives sont potentiellement nombreuses. Les sources d'énergie exploitables pour les transports couvrent les ressources fossiles, la biomasse et les énergies renouvelables ou nucléaires (via la production d'électricité). À partir de ces ressources, plusieurs types de carburants peuvent être obtenus puis utilisés dans différents types de véhicules. Ceux-ci peuvent se classer en quatre grandes catégories (figure 2) parmi lesquelles les véhicules équipés de moteurs à combustion interne, les plus répandus à l'heure actuelle, ou les véhicules hybrides en cours de mise sur le marché.

Devant ces nombreuses solutions possibles, comment faire un choix ? Comment évaluer ces carburants et appréhender leurs forces et leurs faiblesses aux niveaux économique, environnemental ou de la disponibilité de la ressource ?

Les transports sont aujourd'hui très dépendants des carburants conventionnels d'origine pétrolière

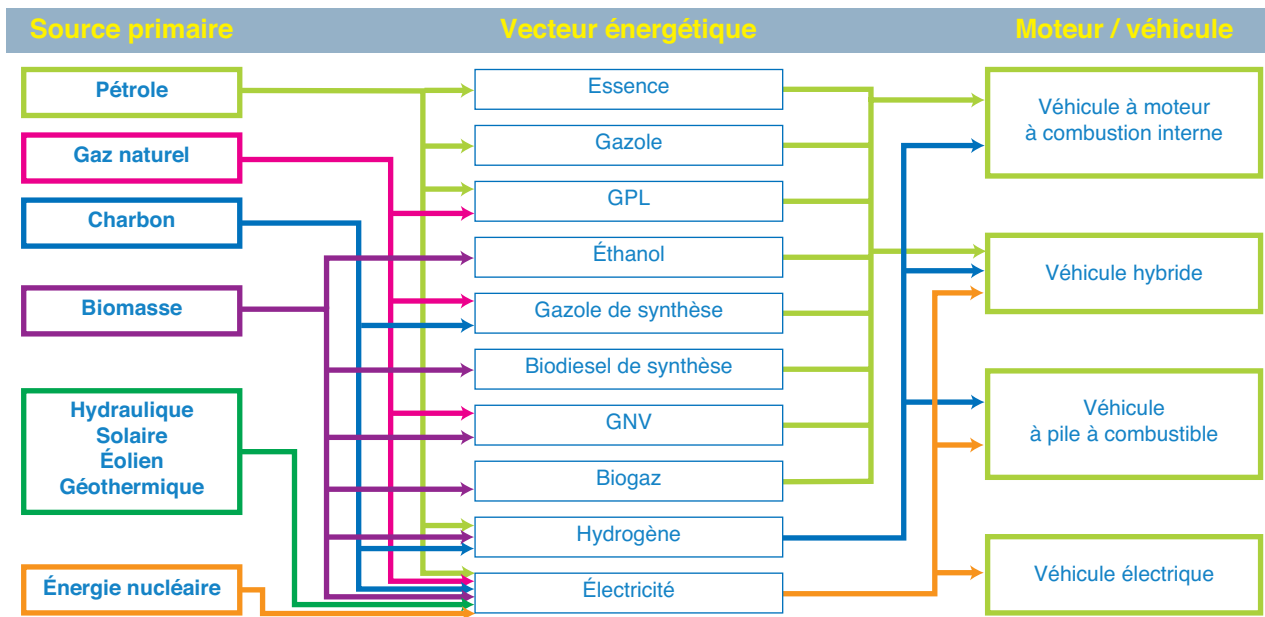
Les carburants conventionnels issus du pétrole assurent actuellement l'immense majorité des besoins en énergie pour la mobilité des personnes et des biens.

L'essence et le gazole couvrent 98 % de l'énergie utilisée dans le transport routier à l'échelle mondiale, et 96 % en Europe où les biocarburants représentent seulement 1,5 % et le gaz naturel à peine plus de 1 % (figure 3).

La consommation énergétique du secteur des transports augmente à un rythme annuel proche de 2 %. Les

Les énergies pour le transport : avantages et inconvénients

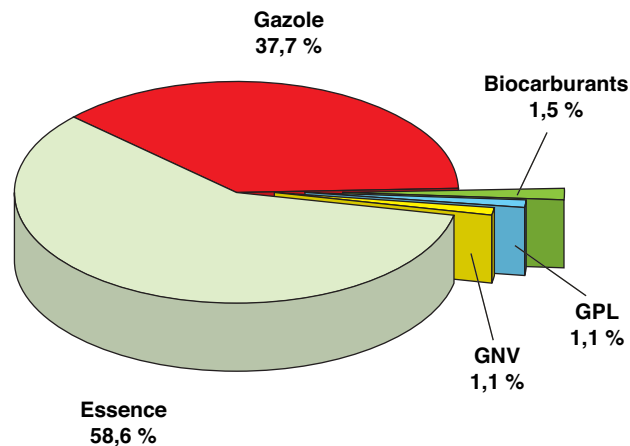
Fig. 2 - Les filières énergétiques



Source : IFP

carburants routiers traditionnels ont déjà fait l'objet de nombreuses améliorations (techniques : indices d'octane et cétane ; environnementales : teneur en plomb, soufre, etc.) pour répondre à des spécifications plus sévères et nécessitent encore d'autres améliorations pour répondre aux futures spécifications déjà programmées. Au-delà, il est vraisemblable que de nouvelles normes soient mises en œuvre d'ici à 2020, pour répondre aux futurs objectifs de qualité de l'air de l'UE et/ou aux éventuelles exigences de nouveaux modes de combustion des moteurs.

Fig. 3 - Consommation d'énergie dans le transport routier mondial en 2007, par type de carburant

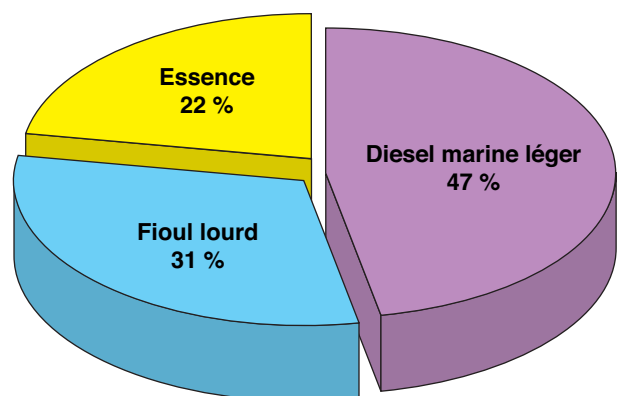


Source : Statistiques de l'OCDE

Le transport aérien est, quant à lui, encore plus intimement lié au pétrole car les avions sont alimentés à plus de 99,9 % en kérosène (*jet fuel*), produit dérivé du pétrole. Certains petits appareils utilisent encore un carburant proche de l'essence mais cela reste très marginal.

En ce qui concerne le transport maritime, il est lui aussi dépendant à 100 % d'hydrocarbures pétroliers (hormis les navires méthaniers), mais la flotte mondiale s'alimente en proportions plus équilibrées en essence, fioul lourd et enfin en diesel marine léger (équivalent du fioul domestique), qui est le carburant le plus répandu (figure 4).

Fig. 4 - Consommation de carburants dans le monde pour le transport maritime en 2006 : 18,8 Mtep



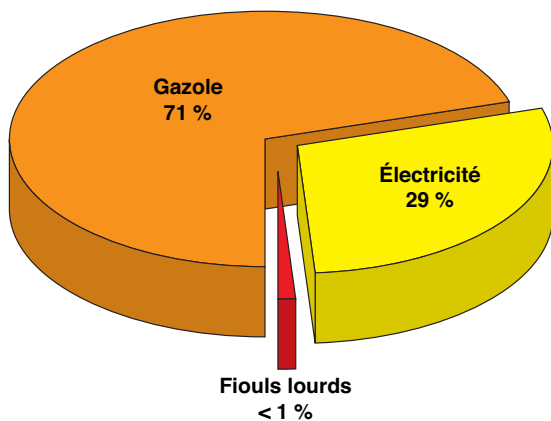
Source : Statistiques de l'OCDE

Les énergies pour le transport : avantages et inconvénients

Pour le futur, l'enjeu principal de l'évolution des spécifications concerne la teneur en soufre des fiouls de soutes maritimes.

Le transport ferroviaire se détache légèrement des ressources pétrolières grâce à l'électrification avancée des réseaux ferroviaires dans certains pays. Cependant, le transport ferroviaire mondial reste encore dépendant à 71 % du gazole contre 29 % pour l'énergie électrique (figure 5).

Fig. 5 - Consommation d'énergie mondiale du transport ferroviaire en 2006 : 28 Mtep



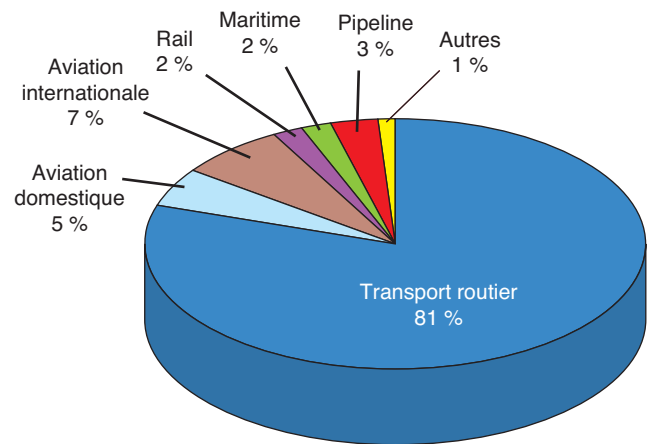
Source: Statistiques de l'OCDE

Les carburants liquides fossiles présentent des atouts considérables pour le transport. Leur densité énergétique importante permet une autonomie appréciable des véhicules (plus de 600 km). Les techniques de raffinage sont éprouvées et peu coûteuses (hors coût d'approvisionnement).

L'extrême dépendance pétrolière des principaux modes de transport pose des problèmes complexes. Au plan économique, l'utilisation d'une ressource rare (non renouvelable), dont les économies développées sont souvent très dépendantes (importations), et exposées à la volatilité des cours, est source de vulnérabilité énergétique. Au plan environnemental, le contenu en carbone des produits pétroliers, les émissions de gaz à effet de serre et la pollution locale associées aux activités de raffinage et à la combustion dans les moteurs sont des enjeux majeurs, dans un contexte où le développement durable prend une importance considérable.

En plus d'efforts sur la demande (comportements de conduite, modifications des habitudes de déplacement, etc.), une diversification des carburants dans le transport routier s'impose comme le levier d'action majeur dans la lutte contre les émissions de CO₂ (figure 6) et la réduction de la consommation de ressources non renouvelables.

Fig. 6 - Émissions de CO₂ du transport dans le monde en 2005



Source: Statistiques de l'OCDE

Les carburants alternatifs d'aujourd'hui

Le GPL

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) a été historiquement le premier vrai carburant alternatif. C'est un mélange de butane et de propane issu du raffinage du pétrole (40 % de la ressource) et du traitement du gaz naturel (60 % de la ressource au niveau mondial).

La consommation de GPL représentait 5,7 Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole) en 2006 en Europe OCDE, en croissance de 6 % par rapport à 2005, notamment grâce à l'apparition de parcs de véhicules GPL dans les pays d'Europe de l'Est : la Pologne est ainsi passé d'un parc de 470 000 véhicules en 2000 à près de 2 000 000 de véhicules GPL fin 2007.

En revanche, en France, le parc de véhicules GPL est peu répandu et son développement semble en suspens à l'heure actuelle. On ne compte que 140 000 véhicules équipés en France contre 200 000 en Allemagne et un million en Italie, malgré les 2 000 stations réparties sur 98 % du réseau autoroutier français.

Le GPL – dans le cas d'un véhicule optimisé pour ce carburant – présente pourtant des avantages sur les carburants traditionnels, notamment au niveau environnemental :

- des émissions de CO₂ réduites de 10 % par rapport à un véhicule essence, mais supérieures au diesel,
- des émissions de NOx réduites par rapport aux véhicules essence et plus encore par rapport aux véhicules diesel,
- pas de rejet de particules de suie,
- un indice d'octane élevé qui permettrait d'améliorer le rendement du moteur,

Les énergies pour le transport : avantages et inconvénients

- d'un point de vue économique, ce carburant a bénéficié en France de défiscalisations lui permettant d'être disponible à la pompe à des tarifs inférieurs à ceux du gazole.

Malgré ces bons points, les inconvénients du GPL expliquent le succès relatif de cette filière :

- l'équipement du véhicule entraîne un surcoût non négligeable (de l'ordre de 15 à 20 % par rapport au même modèle diesel),
- le réseau de distribution reste modeste, surtout loin des grands axes de circulation,
- la ressource en GPL, liée à celles de pétrole ou de gaz naturel, est limitée et n'apporte pas réellement de diversité énergétique,
- un apport limité à la lutte contre le changement climatique.

Le GNV

Le gaz naturel véhicule (GNV) a fait l'objet d'un intérêt important lié au développement du marché du gaz naturel et aux disponibilités a priori plus durables que le pétrole.

Malgré tout, la consommation de GNV reste très limitée ; elle représentait 0,55 Mtep en 2006 (données pour l'Europe OCDE), avec l'Italie comme marché leader, et ce grâce à un développement de la filière entrepris dès les années 1930.

En France, la consommation 2006 dépassait à peine les 60 ktep et le parc atteignait une dizaine de milliers de véhicules au milieu de l'année 2007. Parmi ceux-ci, on retrouve bon nombre de véhicules de flotte qui disposent d'un point fixe permettant de faire le plein la nuit par exemple.

Les véhicules GNV présentent des avantages sur le plan environnemental par rapport aux véhicules essence et diesel :

- des émissions de CO₂ réduites de 20 à 24 % par rapport à un véhicule essence ou un véhicule diesel,
- des émissions de NOx réduites par rapport aux véhicules diesel,
- pas de rejet de particules de suie et de manière générale, une toxicité de l'échappement nettement réduite,
- la bonne résistance au cliquetis, ce qui permet d'améliorer le rendement via la turbo-suralimentation.

Ces avantages ne font pas oublier les inconvénients d'une filière encore jeune :

- le réseau de distribution reste à mettre en place en France,

- un stockage à bord du véhicule et une autonomie plus contraignants,
- des évolutions technologiques sont attendues sur les véhicules aussi bien au niveau d'une amélioration des motorisations dédiées à un fonctionnement à 100 % en GNV qu'au niveau de la dépollution dans le respect des futures normes,
- le surcoût de tels véhicules est encore important mais l'élimination de la bicarburant permettrait d'abaisser la facture.

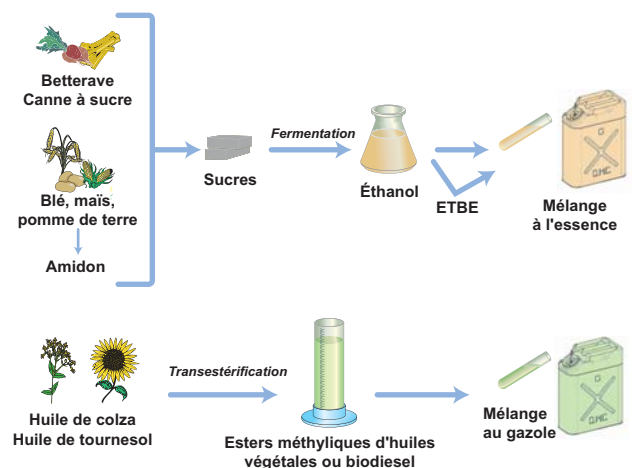
Les biocarburants

Il existe aujourd'hui deux grands types de biocarburants : l'éthanol et les esters méthyliques d'huile végétale (EMHV), voire animale, ou biodiesel. L'éthanol, qui s'utilise dans des moteurs de type essence, est un produit de plantes sucrières comme la canne à sucre et la betterave, ou de plantes amylacées comme le blé ou le maïs (figure 7). Rappelons que ces deux carburants, et en particulier l'éthanol, ont déjà été utilisés par le passé comme carburants.

Le principal biocarburant en termes de volumes consommés est le bioéthanol. Ainsi, 20 Mtep ont été produites dans le monde en 2006, essentiellement au Brésil et aux États-Unis. Dans le même temps, la production de biodiesel a atteint 4,9 Mtep, l'Allemagne étant le premier producteur mondial avec 41 % de la production totale et la France ayant produit 0,49 Mtep.

L'atout principal des biocarburants est qu'ils peuvent être mélangés à l'essence et au gazole, profitant ainsi des réseaux de distribution classiques de carburants, et qu'ils ne nécessitent pas de bouleversement technologique majeur au niveau des moteurs des véhicules.

Fig. 7 - Filières de biocarburants de 1^{re} génération



Source : IFP

Les énergies pour le transport : avantages et inconvénients

Toutefois, l'utilisation de ces biocarburants devra prendre en compte le partage des ressources entre une utilisation alimentaire et une utilisation destinée à satisfaire nos besoins énergétiques. Une gestion globale devra être mise en place afin de satisfaire aux exigences de ces deux usages. De plus, si le bilan en CO₂ des biocarburants semble positif et certains impacts, notamment à l'échelle globale (effet de serre, épuisement des ressources énergétiques fossiles), sont bien renseignés, d'autres impacts (impacts sur l'eau, le sol, etc.) restent, en revanche, mal connus, en particulier aux échelles locales.

L'électricité

Le cas de l'électricité, qui est un vecteur d'énergie et non une énergie primaire, est quelque peu différent de celui des autres énergies déjà évoquées. L'électricité est déjà présente dans nos véhicules, gagnant peu à peu de l'importance via une hybridation grandissante. La Toyota Prius, véritable succès commercial, est l'étendard de la nouvelle génération de véhicules hybrides et a marqué le début d'une nouvelle ère. Les constructeurs automobiles ont, pour la plupart, annoncé de nouveaux véhicules hybrides pour compléter leur gamme.

Cependant, à l'heure actuelle, le fonctionnement en tant que machine électrique est transparent pour le conducteur. Nul besoin de raccorder le véhicule au secteur, les batteries sont rechargées notamment dans les descentes ou lors des freinages, puis déchargées pour propulser le véhicule à faible vitesse ou lui donner un surplus d'accélération.

La prochaine étape semble de plus en plus être le véhicule hybride *plug-in*, c'est-à-dire connectable au réseau électrique pour une recharge des batteries, augmentant le rôle alloué au moteur électrique. Cela permettrait d'améliorer les performances environnementales du véhicule, à condition de fournir de l'électricité à bas CO₂ c'est-à-dire dont le cycle entier de production produit de faibles quantités de CO₂.

Enfin, il faut également compter avec les véhicules entièrement électriques, c'est-à-dire équipés de batteries et de moteurs électriques capables de mouvoir le véhicule avec des performances acceptables sur des distances de l'ordre de 100 à 200 km sans émission au niveau du véhicule. Les projets de véhicules électriques reviennent en force chez les constructeurs aussi bien français que japonais, et de nouveaux modèles devraient apparaître sur le marché pour 2010.

Le seul obstacle reste encore et toujours les batteries. D'importants progrès sont nécessaires aussi bien pour faire décroître leurs coûts que pour améliorer leurs performances afin de diminuer les poids et volumes à

embarquer. La R&D est très active dans ce domaine et les effets d'annonce se multiplient pour laisser entrevoir d'importants progrès dans les années à venir.

Les carburants alternatifs de demain

À moyen terme, la production de carburants liquides peut être envisagée non plus uniquement à partir de pétrole, mais aussi d'autres ressources fossiles (gaz naturel, charbon) ou de biomasse.

Les carburants de synthèse

La production des carburants de synthèse repose sur deux étapes, qui sont communes à toutes les charges envisageables. Dans un premier temps, la matière première est convertie en gaz de synthèse (un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone), puis en produits liquides par le procédé Fischer-Tropsch pour obtenir du gazole et du kérosène/jet. Cette voie produit des carburants, et en particulier du diesel, de très bonne qualité (indice de cétane supérieur à 60-65, pas d'aromatiques, pas de soufre). Le naphta est le principal coproduit du procédé.

Le gaz naturel, le charbon et la biomasse peuvent servir de matière première ; on parle des filières *XtL* (*Something to Liquids*). Les avantages et coûts environnementaux et économiques de chaque filière dépendent en grande partie du type de charge considéré.

À partir d'énergies fossiles, les filières *Gas to Liquids* (GtL) et *Coal to Liquids* (CtL) sont les deux options envisageables. La filière GtL offre un intérêt majeur pour les pays disposant d'importantes ressources en gaz naturel. Cependant, de nombreux projets envisagés au début des années 2000 ont été gelés du fait de la hausse importante des coûts d'investissement. Les progrès importants en matière de performance des procédés combinés à une augmentation sensible de la taille des projets (de l'ordre de 10 000 b/j au début des années 90 ; de 30 à 75 000 b/j actuellement) ont été plus que compensés par la hausse des coûts de construction (ingénierie, matériaux, etc.) depuis 2003. Actuellement, les coûts d'investissement des unités GtL sont de l'ordre de 60 000 \$/b/j, contre 20 à 35 000 \$/b/j au début des années 2000.

La majorité des projets démarrés ou en développement à l'heure actuelle sont concentrés au Qatar et au Nigeria.

Par ailleurs, Petronas vient de s'engager pour un projet GtL en Ouzbékistan. Des rapprochements entre développeurs de technologies de GtL et de raffinage (par

Les énergies pour le transport : avantages et inconvénients

Tableau 1

Projets de nouvelles installations GtL

Projet	Partenaires	Capacité	Développement
Oryx (Qatar)	Qatar Petroleum et Sasol	34 000 b/j	Démarré début 2007
Escravos (Nigeria)	Sasol - Chevron	34 000 b/j	Démarrage en 2009
Oryx (Qatar)	Qatar Petroleum et Sasol	65 000 b/j	En cours
Pearl (Qatar)	Qatar Petroleum et Shell	140 000 b/j	En cours

exemple Rentech et UOP) sont également annoncés. Shell et Airbus réalisent des tests pour l'utilisation de carburants de synthèse dans le transport aérien (tableau 1).

D'un point de vue environnemental, le bilan peut être amélioré. Les émissions de CO₂ sur l'ensemble de la chaîne (production/véhicule) sont au mieux équivalentes à la voie classique par raffinage, mais le bilan est le plus souvent défavorable compte tenu d'un rendement énergétique sensiblement plus faible ; de l'ordre de moins de 60 %. Pour obtenir un bilan CO₂ plus favorable, des conditions très spécifiques sont nécessaires, comme le recours à du gaz brûlé par exemple, ou le développement du captage et du stockage du CO₂.

De la même manière, on peut envisager de produire les carburants de synthèse à partir du charbon ; c'est la voie CtL. Les pays disposant d'importantes ressources en charbon peuvent être particulièrement intéressés par une telle option. C'est notamment le cas de pays asiatiques comme l'Inde ou la Chine, qui disposent de réserves de charbon considérables et dont la consommation énergétique va croître fortement dans les prochaines décennies.

À l'heure actuelle, l'Afrique du Sud dispose de la seule infrastructure de production de CtL, à hauteur de 190 000 b/j de produits. De nombreux projets de CtL ont éclos ces trois dernières années. Dans un contexte de hausse des prix du brut, la rentabilité économique de la filière s'est accrue ; des enjeux autour de la sécurité d'approvisionnement ont également contribué à cet engouement. Ces projets sont actuellement à différents stades du processus de décision et tous ne seront vraisemblablement pas construits (tableau 2).

Par ailleurs, la Chine a annoncé de nombreux projets portant sur un total de 700 000 b/j d'ici 2020. On dénombre également aux États-Unis un minimum de six projets de liquéfaction pour une capacité finale cumulée de près de 150 000 b/j. Certains sont au stade de la demande d'autorisation administrative, d'autres sont simplement en cours d'étude de faisabilité.

Le CtL souffre cependant de deux inconvénients majeurs. Les coûts d'investissement requis sont largement

Tableau 2

Projets de nouvelles installations CtL

Projet	Partenaires	Capacité	Développement
Shenhua (Chine)	Shenhua	20 000 b/j	Démarrage en 2008
Shenhua (Chine)	Shenhua	50 000 b/j	Prévu pour 2015
H&WB (Philippines)	H&WB	50 000 b/j	Construction à partir de 2009
Sasol (Af. Sud ou Inde)	Sasol	80 000 b/j	

supérieurs à ceux d'une unité GtL, de l'ordre de 125 000 \$/b/j. D'autre part, le bilan gaz à effet de serre du CtL est particulièrement défavorable, si bien que cette option est, en pratique, difficilement envisageable sans technologie de captage et stockage du CO₂.

Pour le GtL et le CtL se pose la problématique des émissions de CO₂ qui sont supérieures à celles des filières traditionnelles. Le captage du CO₂ émis par ces unités et leur stockage dans des formations géologiques pourraient être envisagés à terme pour améliorer le bilan effet de serre de ces options, mais en entraînant un surcoût.

La dernière ressource envisageable pour la production de carburants de synthèse est la biomasse (incluant les déchets), et l'on parle de filière BtL (*Biomass to Liquids*). Cette filière, qui n'a pas la maturité technologique du GtL ou du 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 les étapes de collecte, pré-traitement et gazéification de la biomasse, et purification du gaz de synthèse.

Pour l'instant, une unité pilote de démonstration est en service à Freiberg. Cette unité doit servir à démontrer et dimensionner dans le futur une unité de production de BtL d'une capacité d'un million de tonnes de biomasse sèche, pour une production de 200 000 t/an de carburant. Pour cette unité, l'investissement dépasserait les 800 M€. Les coûts d'approvisionnement en biomasse sont évalués, en moyenne, de l'ordre de 180 à 280 €/tep.

Des travaux sont en cours pour l'utilisation de carburants BtL dans l'aviation.

Les biocarburants de deuxième génération

La filière BtL est une voie thermo-chimique de conversion indirecte¹ de la biomasse en carburants de synthèse, au même titre que les filières DME (Di Methyl Ether), méthanol, gaz naturel synthétique ou éthanol par

(1) Il existe aussi une voie de liquéfaction directe, qui permet de convertir la biomasse en biobrut sans passer par une étape de gazéification : c'est la liquéfaction hydrothermale.

Les énergies pour le transport : avantages et inconvénients

gazéification ; elle fait partie des filières biocarburants de deuxième génération.

Les programmes de recherche se sont également largement développés autour de la conversion de la biomasse lignocellulosique en éthanol par voie biochimique. Il s'agirait alors, par fermentation des sucres contenus dans la lignocellulose, de produire de l'éthanol substituable à l'essence traditionnelle.

Aujourd'hui, la faisabilité industrielle de production d'éthanol lignocellulosique reste à démontrer. Cependant, la mise en œuvre industrielle de cette filière soulève de nombreuses questions en termes d'optimisation des différentes étapes (prétraitement, hydrolyse, fermentation), notamment au plan économique.

Les premières unités pilotes d'éthanol lignocellulosique ont été réalisées en Amérique du Nord à partir de 2006. Sous l'effet de politiques de subventions importantes du gouvernement américain, les États-Unis comptent une douzaine de projets d'unités pilotes et commerciales. Ils sont soutenus essentiellement par des groupes producteurs d'éthanol, producteurs d'enzymes ou de l'agroalimentaire. Au Brésil, la première unité pilote a été mise en service cette année par Petrobras ; plusieurs autres projets sont prévus pour 2009-2010. Un pilote a également été mis en service au Japon. Enfin, l'Europe compte six projets annoncés pour des pilotes ; l'un d'eux, le projet Futurol, rassemble des industriels, financiers et centres de recherche français, dont l'IFP.

À long terme, la biomasse marine (algues) pourrait constituer une autre ressource mobilisable pour la production de nombreux biocarburants. La voie privilégiée à l'heure actuelle consiste en la production de biodiesel à partir d'huiles algales.

L'hydrogène

Sur le long terme, l'hydrogène peut être envisagé comme un carburant, utilisé soit directement, soit en mélange avec du gaz naturel (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.

Aujourd'hui, l'hydrogène est utilisé à 99 % comme gaz industriel. À l'échelle mondiale, le raffinage est le

secteur le plus consommateur d'hydrogène (51 %), devant la production d'ammoniac (34 %) et la production d'autres spécialités chimiques (14 %). 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. 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.

En conclusion, la dépendance pétrolière dans le secteur du transport va durer. Les carburants alternatifs les plus utilisés au niveau mondial sont les biocarburants, le GPL et le GNV. La solution biocarburants offre un avantage net en termes de contenu de CO₂.

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 pilotes ou industriels. Leur rentabilité comparée aux carburants fossiles dépend toutefois du prix du pétrole brut.

L'électricité va voir son poids s'accroître, quel que soit le niveau d'électrification du véhicule. Enfin, sur le plus long terme, l'hydrogène pourrait être envisagé comme un carburant de substitution si certains obstacles sont levés, notamment aux plans technique et économique.

*Stéphane Tchong-Ming & Simon Vinot
stephane.tchong-ming@ifp.fr - simon.vinot@ifp.fr
Manuscrit remis en décembre 2008*