

Les unités pilotes de biocarburants de deuxième génération dans le monde

Réchauffement climatique, augmentation des prix du pétrole et réduction des réserves pétrolières, ainsi que développement de nouveaux marchés pour l'agriculture sont autant de facteurs qui ont amené à un fort engouement pour la production de carburants d'origine agricole. Ces filières actuellement en développement connaissent cependant certaines limites en termes de disponibilité des surfaces et de concurrence avec des usages alimentaires. Afin de pallier ces limites, de nouvelles filières capables de convertir des ressources végétales peu valorisées avec de meilleurs rendements, sont depuis quelques années en cours de recherche et développement. Acteurs américains et européens ont lancé d'importants programmes de recherche dédiés à ces filières dont le développement industriel est attendu entre 2012 et 2020.

Cela fait aujourd'hui bientôt près de dix ans pour la production de biodiesel de type EMHV¹, et plus de vingt ans pour la production d'éthanol d'origine agricole, que se développent ces biocarburants, dits de 1^{re} génération, à l'échelle industrielle dans la plupart des continents. Malgré des procédés fondamentalement bien maîtrisés, de nets progrès - en termes de qualité des produits, de consommation d'utilités et de coûts de production - ont été observés avec le regain d'intérêt de ces filières depuis le début du 21^e siècle. Cependant, des limites à ces filières persistent. En effet, elles pourraient venir à mobiliser d'importantes surfaces de terres agricoles, pour la production de cultures à vocation également alimentaire. Cette production nécessite par ailleurs la prise en compte de pratiques agricoles durables pour assurer de bons bilans environnementaux des filières.

Des programmes de recherche se sont alors développés vers des procédés valorisant la biomasse en vue de pallier les contraintes environnementales et la concurrence avec l'usage alimentaire. Ces technologies dites de 2^e génération présentent l'avantage de valoriser la lignocellulose des plantes, constituant principal de la paroi de tout végétal. Le panel d'espèces valorisables devient alors bien plus large et peut s'orienter vers des espèces non alimentaires et ayant des rendements de matière à l'hectare nettement plus importants.

Deux principales voies de conversion de la biomasse lignocellulosique en carburant font aujourd'hui l'objet d'efforts importants en terme de recherche et développement :

- une **voie biochimique** qui, par fermentation des sucres contenus dans la lignocellulose, produit de l'éthanol de même nature que le bioéthanol actuel, et se substituerait à l'essence (figure 1) ;
- une **voie thermochimique**, qui comporte deux technologies capables de convertir la biomasse, la gazéification (voie indirecte) et la liquéfaction hydrothermale de la biomasse (voie directe) (figure 2).

La gazéification consiste en la production d'un gaz de synthèse (H_2 , CO , CH_4 , CO_2 , H_2O) suite à un prétraitement qui réduit la biomasse en particules sous forme sèche ou liquide (slurry).

Le gaz peut ensuite être orienté vers la production de différents carburants (figure 3).

Le BtL (*Biomass to Liquids*) est une voie qui fait réagir le gaz de synthèse selon la synthèse Fischer-Tropsch. Elle permet la production de gazole de synthèse (ou Diesel-FT), pour une incorporation directe dans les moteurs Diesel, de kérosène, pour un usage potentiel dans les moteurs de l'aviation, et de naphtha, pour un usage pétrochimique ou éventuellement essence.

(1) EMHV : Ester Méthylique d'Huile Végétale

Les unités pilotes de biocarburants de deuxième génération dans le monde

Fig. 1 – Procédé de production d'éthanol lignocellulosique

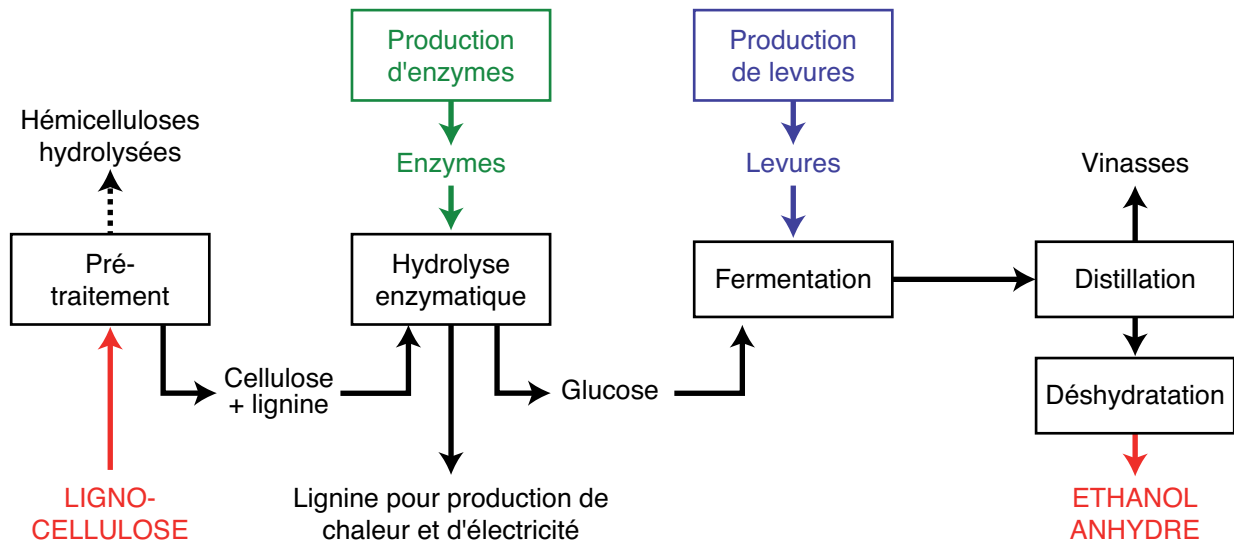
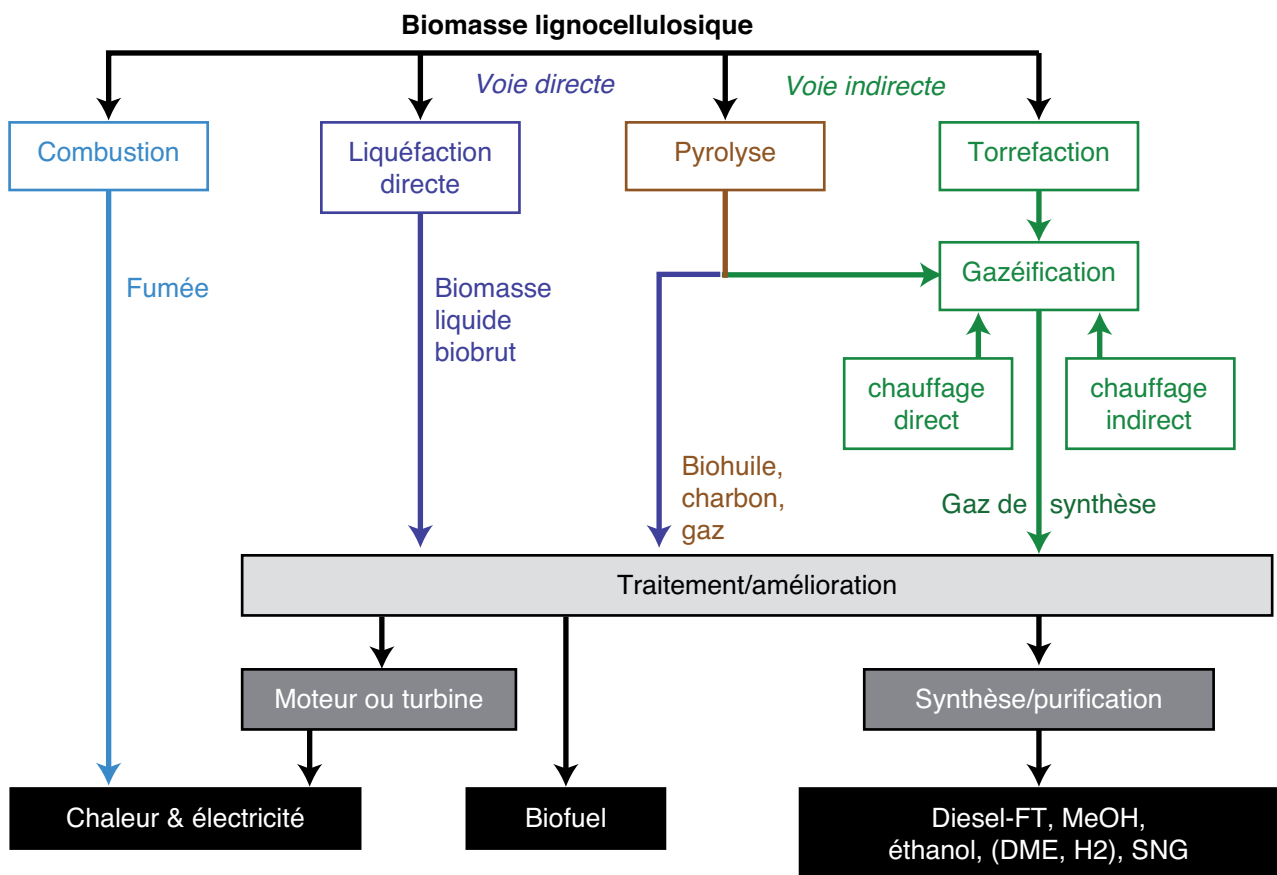
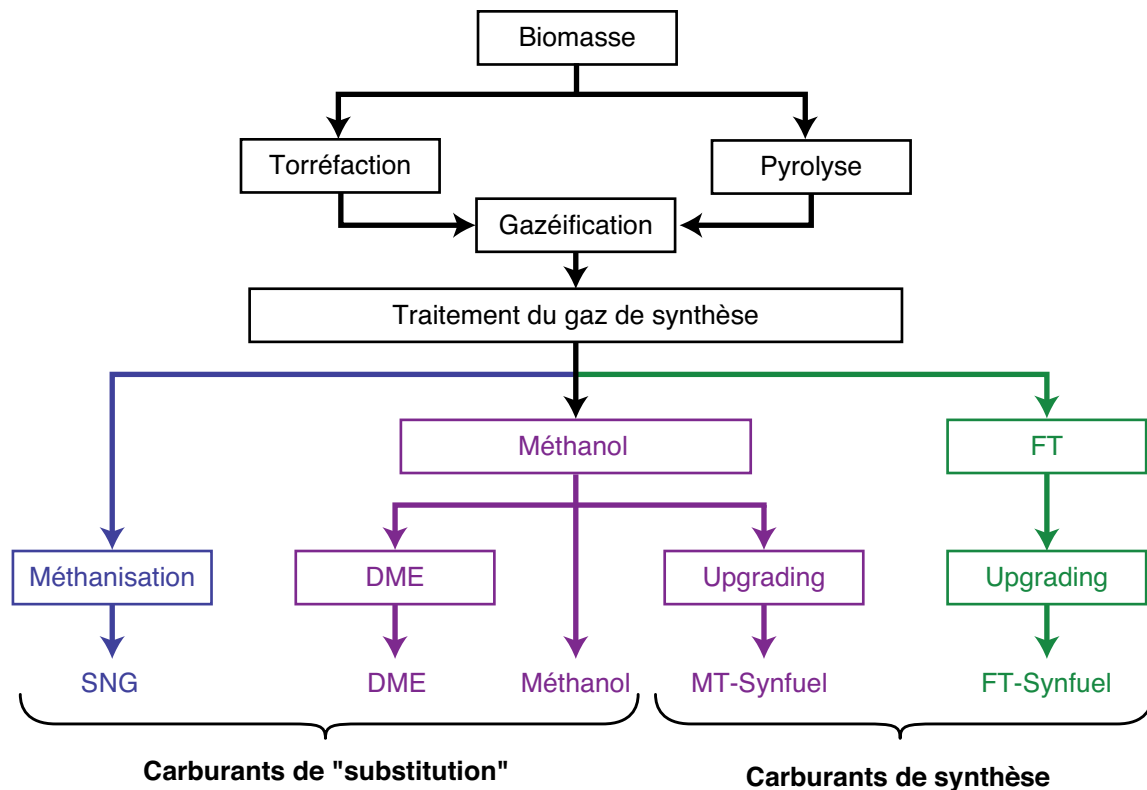


Fig. 2 – Vue d'ensemble des filières énergétiques de conversion thermochimique de la biomasse



Les unités pilotes de biocarburants de deuxième génération dans le monde

Fig. 3 – Les voies thermochimiques indirectes : les filières de conversion du gaz de synthèse en carburant



Un pays comme les États-Unis s'intéresse par ailleurs à l'orientation de ce gaz de synthèse vers la production d'éthanol.

D'autres filières biocarburants ex-gaz de synthèse sont en mesure de produire des biocarburants gazeux qui sont techniquement moins contraignants à produire, comme le bioDME (DiMéthyl Ether) ou le bioSNG² (ou biométhane). Mais leur nature gazeuse en conditions atmosphériques implique d'importantes contraintes d'utilisation.

La liquéfaction hydrothermale transforme dans un premier temps la biomasse en un biobrut (*biocrude*), duquel pourrait être extraite une fraction légère qui permettrait d'obtenir un gazole suite à une réaction d'hydrodésoxygénation.

Ces filières thermochimiques comme biochimiques sont autant de voies de production de carburants "propres" (réductions importantes des émissions de CO₂), faits à partir de matières renouvelables, susceptibles d'accompagner la réduction de consommation des

produits fossiles de manière durable. Aujourd'hui non développées à l'échelle industrielle, ces technologies présentent différents stades d'avancement. Le stade d'unité pilote est l'étape qui suit l'étude expérimentale en laboratoire, il permet d'expérimenter un procédé en tout ou partie à une échelle inférieure à l'échelle industrielle. Pour des procédés technologiques complexes, la phase unité pilote est suivie de l'étape "unité de démonstration", où l'installation est d'une taille proche de la taille industrielle mais ne commercialise pas encore ses produits.

État de l'art, les verrous à lever des filières de 2^e génération

La production de biomasse

Pour l'ensemble des filières valorisant la biomasse lignocellulosique à échelle industrielle, il est nécessaire de lever des verrous concernant la production de cette biomasse. En effet, les cultures dites dédiées ne sont aujourd'hui pas dans les systèmes de cultures des exploitations agricoles (cultures de type Miscanthus,

[2] SNG : Synthetic Natural Gas

Les unités pilotes de biocarburants de deuxième génération dans le monde

Switchgrass, taillis à courte rotation, etc.). D'importants travaux de recherche sont en cours et à venir sur l'adaptabilité de ces cultures aux contextes locaux (géographie, sols, économie des exploitations, etc.), les itinéraires techniques à pratiquer sur ces cultures (désherbage, récolte, optimisation logistique, etc.), les potentialités d'amélioration génétique de ces plantes, ainsi que l'acceptabilité sociale de ces mises en cultures (impacts sur les paysages notamment).

Il est également important d'appréhender dès aujourd'hui quels pourront être les impacts socio-économiques et environnementaux du développement de ces nouvelles filières.

La conversion biochimique

Il est actuellement possible de produire de manière expérimentale de l'**éthanol** à partir de ressources lignocellulosiques, la question de la faisabilité ne se pose donc pas en termes de science fondamentale, mais en terme d'optimisation de chaque étape, en particulier d'un point de vue économique. Cependant d'ici 2015-2020 (horizon de mise en place des futures unités industrielles), des sauts technologiques sont à envisager dans ce sens.

L'étape de prétraitement (déstructuration de la paroi végétale et éventuellement séparation des celluloses, hémicelluloses et lignine) peut être réalisée par différentes méthodes thermique, mécanique, chimique, voire enzymatique. L'adaptation de ces différentes techniques avec les différentes espèces végétales est aujourd'hui à l'étude. L'étape d'hydrolyse en sucre de la cellulose et éventuellement de l'hémicellulose peut encore être optimisée en améliorant les souches productrices d'enzymes. Enfin, la fermentation, et notamment celle des sucres en C5, est à l'étude avec de nouvelles souches de micro-organismes (levures et bactéries), afin d'augmenter le rendement en éthanol de la chaîne. D'autres voies de valorisation des C5 sont par ailleurs envisagées.

La conversion thermochimique

D'une manière générale, les procédés de la voie thermochimique sont pour la plupart déjà bien connus à partir du traitement de charges fossiles. La valorisation de la biomasse implique de nouvelles contraintes qui selon les technologies peuvent être plus ou moins difficiles à lever.

Le schéma de production BtL pour la production de **gazole de synthèse** (Diesel-FT) est un enchaînement complexe de technologies qui n'a encore jamais été démontré à l'échelle industrielle. Il s'inspire toutefois

des chaînes *Coal to Liquids* (CtL) et *Gas to Liquids* (GtL) qui existent au niveau industriel mais qui traitent des charges de natures différentes. En effet, l'intégration d'une charge biomasse implique la maîtrise d'éléments nouveaux ou plus contraignants.

Dans un premier temps, le passage par une étape de prétraitement de la biomasse, au-delà des conditionnements nécessaires à son transport, s'avère incontournable. Deux technologies sont aujourd'hui à l'étude : la pyrolyse et la torréfaction. Chacune est expérimentée à l'échelle pilote. Dans le cas de la production de gazole de synthèse (synthèse Fischer-Tropsch), la gazéification nécessite une épuration poussée des gaz (pas de goudrons, pas d'alcalins, pas d'HCN), un rapport molaire H_2/CO du gaz à optimiser et un taux d'inertes (CO_2 , CH_4 , N_2) le plus faible possible. Par ailleurs, le rendement massique en carburants de la chaîne est tel qu'il implique la mobilisation d'importantes quantités de biomasse (autour d'un Mt de biomasse/an) pour rendre l'installation rentable et produire un minimum de produits (environ 200 000 t). La logistique d'approvisionnement de la biomasse vers un complexe BtL en raffinerie peut alors devenir un élément limitant fortement le choix de la localisation de l'installation. Des systèmes sont alors à l'étude pour améliorer le rendement massique de la chaîne par des apports externes d'énergie (allothermie) qui permettraient la production d'une plus grande quantité de gazole par unité de biomasse. D'autres solutions techniquement plus simples, mais a priori plus coûteuses, comme l'apport d'hydrogène extérieur sont aussi envisagées.

Les procédés de production de **DME**, de **méthanol**, de **SNG** ou d'**éthanol** par gazéification présentent les mêmes incertitudes liées à la manipulation de biomasse en vue d'une gazéification, comme vu précédemment, quel que soit le carburant visé. Les contraintes de ces carburants résident aujourd'hui essentiellement dans leur utilisation dans les flottes de véhicules particuliers. En effet, l'utilisation de carburants gazeux à pression atmosphérique (DME et SNG) nécessite une adaptation spécifique des véhicules de la part des constructeurs. À l'image du GPL, ces carburants nécessitent une adaptation des véhicules classiques Diesel vers un nouveau système d'injection en raison de la spécificité des propriétés physiques du carburant. On peut également noter des incompatibilités avec les matériaux polymères.

Le bioSNG, quant à lui, exige par ailleurs un degré supérieur de purification du gaz pour être intégré à un réseau de distribution de gaz carburant existant, et son coût de compression reste encore élevé.

Les unités pilotes de biocarburants de deuxième génération dans le monde

Le bioéthanol et le biométhanol peuvent, selon les spécifications de carburants de chaque zone géographique, être incorporés pur ou sous forme d'éther à faible taux dans l'essence, ou alors utilisés dans des véhicules FlexFuel adaptés.

La voie directe de **liquéfaction hydrothermale** fait appel à deux technologies majeures : la conversion hydrothermale de la biomasse, dont la faisabilité technique a été seulement montrée en laboratoire, mais dont les conditions opératoires à plus grande échelle doivent être vérifiées ; l'hydrodésoxygénation qui est bien connue pour les produits pétroliers mais qui n'est pas encore démontrée pour une charge contenant des alcalins et des quantités importantes d'oxygène.

Chacun de ces procédés est aujourd'hui à des stades de maîtrise et de développement contrastés notamment entre une voie biochimique, pour laquelle des unités industrielles sont prévues, et une voie de liquéfaction hydrothermale, qui n'en est qu'au stade laboratoire. L'expérimentation par des pilotes et démonstrateurs reste dans tous les cas une étape courante pour tenter de lever ces verrous.

Un état des lieux de la localisation et des caractéristiques des pilotes, en fonctionnement et en projet, apporte un aperçu des zones et acteurs moteurs des filières ainsi qu'un horizon temporel de développement.

Les unités pilotes d'éthanol lignocellulosique

En Amérique du Nord

Les Canadiens ont été les pionniers en termes de construction de pilote d'éthanol de 2^e génération. C'est la compagnie Logen, important producteur d'enzymes pour les industries papetières, textiles et agro-alimentaires, qui en 2006 a mis en place la première unité pilote américaine. Depuis, deux autres unités ont été annoncées pour les années à venir par les sociétés Woodland Biofuels et Sunopta/Greenfiels Ethanol. Toutes visent à valoriser des résidus agricoles et forestiers. Le gouvernement a annoncé cette année l'allocation de 500 M\$ pour le développement des carburants de 2^e génération (The NextGen Biofuels Fund) dont 40 % seront alloués à la construction de la première unité de démonstration à l'échelle industrielle.

En 2007, le DOE (*Department of Energy*) du gouvernement des États-Unis accorde une subvention de 385 M\$ sur 4 ans pour développer six projets de bioraffineries industrielles permettant de produire de l'éthanol cellulosique, tout en produisant des coproduits valorisables et de l'électricité. Ces unités devraient être mises en fonctionnement au plus tard en 2012 avec des capacités de production entre 34 000 et 100 000 t/an d'éthanol cellulosique.

Une subvention de 200 M\$ a également été accordée pour la construction d'unités pilotes de 80 à 15 000 t de capacité de production. La première a été inaugurée cet automne par la société Abengoa Bioenergy, leader dans la production de bioéthanol européen et cinquième aux États-Unis. Les autres devraient voir le jour en 2008 et 2009.

Un montant de 23,3 M\$ a également été versé par le gouvernement à quatre industriels et une université pour promouvoir les programmes de recherche et développement sur l'éthanol cellulosique.

Les États-Unis comptent aujourd'hui quatre projets d'unités pilotes, et six projets d'unités commerciales, soutenus essentiellement par des groupes producteurs d'éthanol, producteurs d'enzymes ou de l'agroalimentaire. Certains bénéficient d'installations d'éthanol de maïs pour en valoriser les résidus mais la plupart s'orientent vers la valorisation de résidus forestiers ou de cultures dédiées (Switchgrass).

Au Brésil

C'est **Petrobras**, 1^{er} groupe pétrolier brésilien, qui met cette année en fonctionnement la 1^{re} unité pilote éthanol cellulosique brésilienne au sein de son centre de recherche d'Ilha do Fundão, une île de la baie de Rio. Montée pour la conversion de la bagasse de canne à sucre et pour en améliorer le rendement en éthanol, le pilote serait en mesure de valoriser d'autres sous-produits comme le tourteau de ricin issu d'unités de biodiesel brésiliennes.

Une unité de démonstration semi-industrielle est également prévue à l'horizon 2010 par la compagnie.

Vorantim, conglomérat industriel brésilien, qui a par ailleurs investi 60 millions de dollars dans la recherche sur l'amélioration des rendements en sucre de la canne à sucre, investit 20 millions de dollars dans un pilote éthanol cellulosique ex-résidus de culture, prévu pour 2009.

Le CTC (*Cane Technology Center*), centre de recherche coopératif de la canne à sucre au Brésil, prévoit de construire une unité pilote dans l'État de Sao Paulo

Les unités pilotes de biocarburants de deuxième génération dans le monde

(Piracicaba). Le projet est supporté par les agriculteurs qui financent la recherche sur la canne.

Au Brésil, l'éthanol de première génération est aujourd'hui produit à partir du jus sucré de la canne, tandis que la bagasse est utilisée pour la production de chaleur et d'électricité de la distillerie. Le développement de l'éthanol de 2^e génération permettrait l'augmentation du rendement en éthanol par tonne et par hectare de canne en ajoutant une chaîne de traitement de la lignocellulose contenue dans la bagasse. Les feuilles de canne (aujourd'hui laissées au sol) ainsi que les résidus de lignine de la nouvelle chaîne d'extraction serviraient alors de combustibles pour la production d'utilités.

En produisant de l'éthanol cellulosique à partir d'un résidu de culture son coût de production ne s'en retrouve que très peu supérieur à celui de l'éthanol actuellement sur le marché (moins de 0,5 \$/l selon le Dr Bon de l'université fédérale de Rio).

Les producteurs d'éthanol ne sont pour le moment pas favorables à l'adoption de cette nouvelle technologie plus efficace à l'hectare mais plus coûteuse. Cependant, le choix des producteurs pourrait être orienté si la demande en éthanol et la valeur des terres agricoles (multipliée par deux ces trois dernières années) continuent à progresser.

Au Japon

En janvier dernier, la société Verenum Technology a annoncé la mise en fonctionnement d'une unité de démonstration d'une capacité de 1100 t qui valorise des bois de rebut et résidus agricoles.

Par ailleurs, le gouvernement japonais envisage de soutenir une initiative de 2^e génération à hauteur de 60 M\$.

En Europe

La première unité pilote construite en Europe, mais aussi dans le monde, est opérée par la société Sekab, à Örnsköldsvik en Suède. Il y est produit chaque année 100 tonnes d'éthanol cellulosique. Depuis 2005, sur ce même site, la société opère notamment pour un programme de recherche européen NILE (*New Improvements for Ligno-cellulosic Ethanol*) coordonné par l'IFP.

Abengoa Bioenergy prévoit en cette fin d'année d'ouvrir également un pilote en Europe, sur le site de son unité espagnole de Babilafuente. D'une capacité de 4000 t d'éthanol par an, l'unité valoriserait les pailles d'orge et de blé dont l'amidon des grains est actuellement valorisé dans l'unité existante.

En France, un consortium d'industriels, de financiers et de centres de recherche a décidé d'engager le développement d'un procédé de production de bioéthanol lignocellulosique intégrant une étape pilote d'une capacité d'une centaine de tonnes/an ainsi qu'une phase prototype de validation.

La société Royal Nedalco a récemment annoncé accélérer son programme de développement d'éthanol cellulosique en prévoyant la construction d'une unité de démonstration de taille industrielle (160 000 t de capacité) à Sas Van Gent, aux Pays-Bas dans les années à venir.

Genencor, la filiale spécialisée dans la production d'enzymes de Danisco, et le fournisseur d'énergie Dong Energy ont mis en place un partenariat pour la création d'une unité pilote ex-paille de céréales d'une capacité de 4 500 t/an. Son ouverture est prévue pour 2009 à Kalundborg, Danemark.

Une autre société Danoise, BioGasol, travaille sur un pilote à l'université de technologie du Danemark. Au printemps 2006 le gouvernement danois a mis 27 M€ à disposition de la filière, notamment pour la mise en place d'une unité de démonstration implantée dans le pays. BioGasol souhaite profiter de l'opportunité pour construire un démonstrateur de 8000 t d'éthanol/an sur l'île de Bornholm.

Les unités pilotes de la voie thermo-chimique

Le procédé de gazéification de la biomasse peut être envisagé en vue de diverses applications carburants (Diesel-FT, DME, Méthanol, Ethanol, SNG), et énergétiques (chaleur et électricité). De nombreux acteurs de la sphère énergétique ont alors développé des pilotes et démonstrateurs de procédés de gazéification en Europe, aux États-Unis et en Asie.

Aux États-Unis, le DOE à tout récemment accordé une subvention de 7,7 M\$ pour le développement de quatre projets de recherche sur la conversion thermo-chimique de la biomasse en carburants par gazéification. La plupart de ces projets concentrent leurs efforts de recherche sur l'étape d'élimination des goudrons après gazéification de la biomasse et la purification du gaz de synthèse.

Les pilotes de production de carburants intégrant l'ensemble de la chaîne (du prétraitement de la biomasse à la synthèse du carburant) sont cependant encore peu nombreux et essentiellement localisés sur le continent européen.

Les unités pilotes de biocarburants de deuxième génération dans le monde

Diesel-FT

C'est en Allemagne, à Freiberg, que le premier et unique pilote de gazole de synthèse a été construit en 2005. Plusieurs étapes ont été nécessaires à la mise en place de ce pilote. La version d'une capacité de 15 000 t/an de BtL est attendue pour le premier trimestre 2008. À terme, Choren Industries, en partenariat avec le groupe Shell, souhaiterait mettre en place une unité commerciale d'une capacité de 200 000 t dans la région de Lubmin.

Le FZK, institut technologique de Karlsruhe, a lancé cette année un pilote qui comporte un prétraitement par pyrolyse décentralisé afin d'évaluer le transport de la biomasse prétraitée. Le pilote associe un gazéifieur en vue de tester à terme la production de gazole synthétique. Sa capacité de production s'élève aujourd'hui à 4 000 t de produit/an. La matière première principalement traitée est la paille de céréales.

L'université technologique de Vienne travaille actuellement sur différentes voies de production d'énergie à partir de la gazéification de biomasse : la cogénération, le BioSNG et le BioFit (synthèse Fischer-Tropsch). Cette dernière voie est étudiée sur un pilote de petite taille produisant environ 30 litres/jour sur son site de Güssing, en Autriche.

L'industrie de la pâte à papier s'intéresse également à la filière. Un partenariat a été monté entre le groupe papetier Stora Enso et le pétrolier finlandais Neste en vue de mettre en place dès 2008 un pilote de gazole de synthèse au sein de l'usine de pâte à papier de Varkaus en Finlande. Le pilote valoriserait ainsi les résidus forestiers et papetiers disponibles sur le site.

Le papetier américain Newpage a également établi un partenariat avec Chemrec, un industriel suédois spécialisé dans la gazéification d'un sous-produit de papeterie : la liqueur noire. Ils envisagent la construction d'une unité de gazéification de la liqueur noire pour la production de biocarburants au sein de l'usine de pâte à papier de Newpage dans le Michigan.

En France, le CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique) étudie la possibilité de monter un pilote de 15 000 t/an à Bure (Meuse) qui intégrerait la technologie Fischer-Tropsch, commercialisée par la société Axens.

DME/Méthanol

Plusieurs programmes de développement du bioDME sont actuellement en cours en Suède. Chemrec et la société Volvo Transfer Technology ont mis en place un pilote de production de bioDME à Pitea à partir de la liqueur noire. Une unité de démonstration est en projet pour 2010.

Par ailleurs, un projet européen Chrisgas sur cinq ans (2004-2009) vise à recycler l'ancien site de cogénération de Värnamo, fermé en 2000, pour y installer une plateforme pilote de production de bioDME et de biométhanol.

Le bioDME est aujourd'hui expérimenté en tant que carburant sur une flotte de camions de marchandises de la ville de Växjö (*EC-project DME Vehicle*).

Les unités de production de méthanol carburant sont aujourd'hui plus largement implantées, notamment en Suède et en Allemagne mais les unités commerciales fonctionnent en grande majorité à partir de gaz naturel fossile. Les sociétés Nykomb Synergetics en Suède, SVZ et l'IEC (*Institute for Energy Process, Engineering and Chemical Engineering*) en Allemagne, supportent cependant d'importants projets d'unités de production de biométhanol, les deux premiers sont en cours tandis que le troisième est prévu pour 2009.

Dans l'objectif de trouver différentes voies de substitution directe à l'essence fossile par de l'éthanol, des industriels américains (Range Fuels et Alico) ont obtenu des financements du DOE pour développer deux unités commerciales de production d'éthanol par gazéification de ressources lignocellulosiques, en Floride et en Georgie.

Compte tenu de sa forte dépendance au pétrole, la Chine, et notamment l'université de Shandong en partenariat avec Lurgi, ainsi que l'Académie des Sciences chinoise, étudient également depuis quelques années le biométhanol en tant que substitut à l'essence, ainsi que le bioDME en tant que substitut au Diesel.

SNG

Quant à la voie de production de gaz naturel de synthèse à partir de la biomasse, la technologie semble correctement maîtrisée. Cependant, la société ECN aux Pays-Bas doit prochainement lancer un pilote et l'université technologique de Vienne prévoit d'ici 2008 l'ouverture d'un démonstrateur de 1 MW (dont le gazéifieur CHP est déjà en service) à Güssing en Autriche, à partir de bois.

Le *Catalytic Process Engineering Group* du Paul Scherrer Institut suisse opère sur les installations de Güssing dans l'objectif d'implanter la technologie en Suisse. Le gaz pourrait être distribué par le réseau de gaz naturel existant et être utilisé dans diverses applications comme le chauffage au gaz, comme carburant pour véhicules à gaz ou comme source d'électricité et de chaleur dans des centrales à gaz.

Les unités pilotes de biocarburants de deuxième génération dans le monde

En considérant les biocarburants de 2^e génération comme des filières mobilisant un autre type de ressource en biomasse convertie par des technologies attendues à une échelle de temps future, d'autres filières pourraient alors être considérées comme de 3^e génération comme par exemple l'utilisation de familles d'algues capables de fixer le CO₂ et de le convertir en réserves lipidiques intracellulaires. Compte tenu de la vitesse de croissance des algues, d'importantes quantités d'huiles pourraient alors être extraites et converties en biocarburants. Des programmes de recherche ont alors démarré notamment aux Etats-Unis (par le NREL), au Japon, où 117 M\$ ont été attribués spécifiquement sur cette voie, en Afrique du Sud et en Europe de l'Ouest, avec la France, l'Espagne, l'Angleterre et l'Allemagne. D'importants verrous techniques mais surtout économiques sont encore à lever avant de pouvoir dépasser le stade laboratoire et produire un carburant de qualité similaire au biodiesel actuel.

Les projets d'unités pilotes de démonstration et d'unités commerciales montrent bien par leur nombre que la voie biochimique est une technologie plus avancée avec de très importants moyens mis en œuvre. Notamment, les États-Unis la considère comme la voie privilégiée pour pallier les contraintes liées à l'usage du maïs alimentaire.

L'Europe, plus consommatrice de gazole que d'essence, développe en parallèle les voies biochimiques et thermochimiques de manière à assurer la substitution des deux types de carburants. La commercialisation des

produits des technologies biochimiques comme thermochimiques n'y sont pas envisagées à grande échelle avant 2015. Quant au Brésil, il produit actuellement le biocarburant de substitution à l'essence le moins cher de la planète. Ce seront certainement des problèmes de gestion du foncier qui pousseront les producteurs à passer à une technologie de 2^e génération. Enfin, l'Asie développe peu à peu ses filières de 1^{re} génération, mais compte tenu de l'importance des volumes de carburants fossiles à substituer, les problèmes de ressources risquent d'apparaître rapidement. L'Asie pourrait alors devenir une cible importante pour les industriels américains et européens.

Rappelons en effet, que l'ensemble de ces filières de demain a vocation à valoriser des ressources en biomasse n'ayant aujourd'hui pas d'autres usages que la production d'énergie. Les résidus lignocellulosiques de l'agriculture, de la sylviculture ou de l'industrie du bois figurent ainsi parmi les ressources à privilégier. Ces ressources souvent dispersées, avec des coûts d'approvisionnement parfois élevés, amènent cependant à envisager l'intégration de cultures dédiées à forte productivité dans les systèmes agricoles et forestiers. Avec de meilleures productivités à l'hectare et souvent moins exigeantes en termes de qualité de sol que les cultures alimentaires, la concurrence sur l'usage des sols s'en verra amoindrie mais néanmoins à prendre en considération.

*Daphné Lorne - daphne.lorne@ifp.fr
Manuscrit transmis en décembre 2007*

Second-generation pilot biofuel units worldwide

The production of biofuels from agricultural raw material is attracting great interest for many reasons, among them global warming, oil price hikes, the depletion of oil reserves and the development of new agricultural markets. However, the technologies currently under development are hindered by the fact that available land is limited and by a risk of competition with food crops. In the last few years, research and development efforts have sought to alleviate these limitations by exploring new pathways to convert little-used plant feedstocks to biofuels with better efficiencies. Large-scale research programs concentrating on these new technologies are underway in the U.S. and Europe, with industrial development expected between 2012 and 2020.

Production of the so-called "first generation" biofuels at industrial scale started on most continents nearly ten years ago in the case of VOME¹ (biodiesel), and more than twenty years ago for ethanol from agricultural feedstocks (biogazoline). The basic processes are well known, but renewed interest in these pathways since the beginning of the 21st century has led to significant progress in terms of product quality, utilities consumption and production costs. Yet these pathways continue to run up against limits. Eventually, large areas of farmland may be used to raise energy crops that are also used for food crops. Moreover, good sustainability practices must be implemented so that these pathways perform well in environmental terms.

Subsequent research programs focused on biomass-to-biofuel technologies, seeking to minimize environmental constraints and alleviate competition with food crops. The advantage of these so-called "second-generation" processes is that they use the lignocellulose in plants, i.e. the main component of the cell wall in any plant. This broadens the range of plants that can be converted to biofuels, including non-food crops that obtain significantly higher yields per hectare.

Today, major R&D efforts are focusing on two pathways for producing biofuels from lignocellulosic biomass:

- A biochemical pathway to ferment the sugars in lignocellulose and obtain ethanol the same product as existing bioethanol, a product that could be substituted for gasoline (Figure 1);
- A thermochemical pathway with two approaches to biomass conversion: gasification (an indirect method) and hydrothermal liquefaction (a direct method) (Figure 2).

Gasification involves producing a synthetic gas (H₂, CO, CH₄, CO₂, H₂O) following a pretreatment that reduces biomass to particulate matter in dry or liquid form (slurry).

The gas can then be directed towards the production of various biofuels (Figure 3).

The biomass to liquid pathway (BtL) involves reacting the syngas using the Fischer-Tropsch process to yield synthetic diesel (FT diesel) that can be incorporated directly into diesel fuel, kerosene (potentially suitable for jet fuel) or naphtha (for petrochemicals or possibly gasoline).

The United States is also interested in exploring how this syngas can be used to produce ethanol.

[1] VOME: Vegetable oil methyl esters

Second-generation pilot biofuel units worldwide

Fig. 1 - Lignocellulosic ethanol process

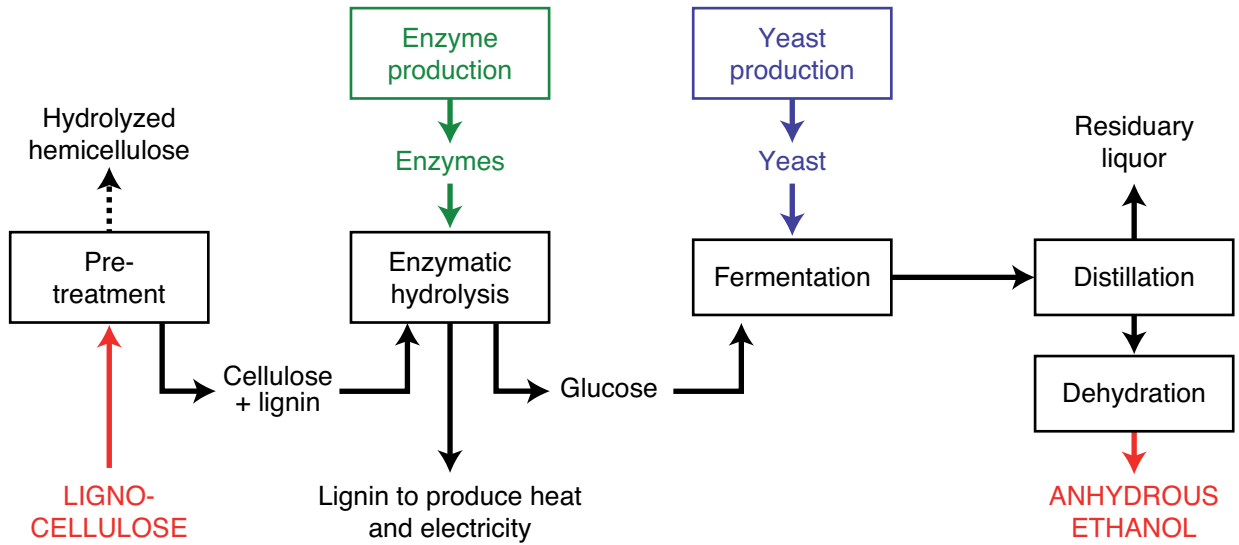
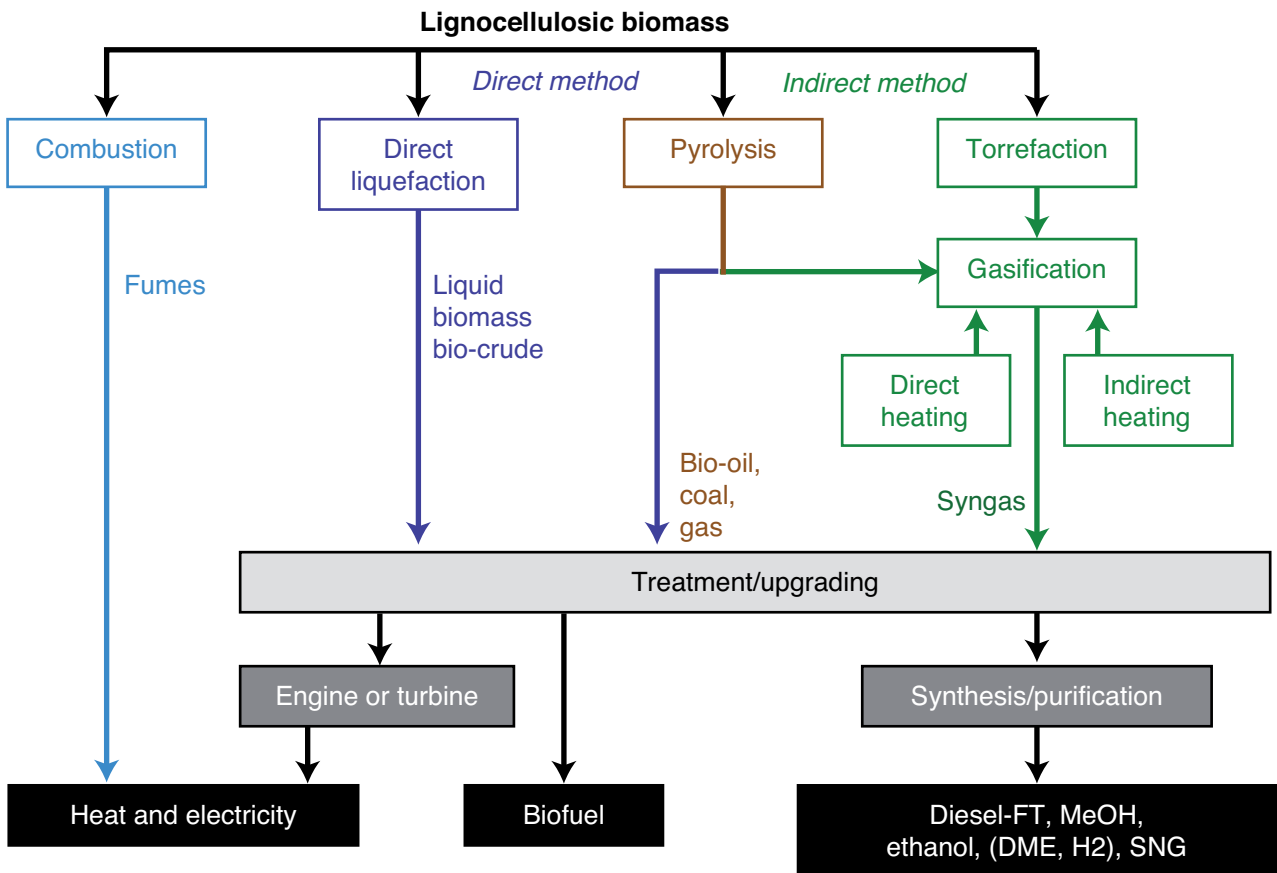
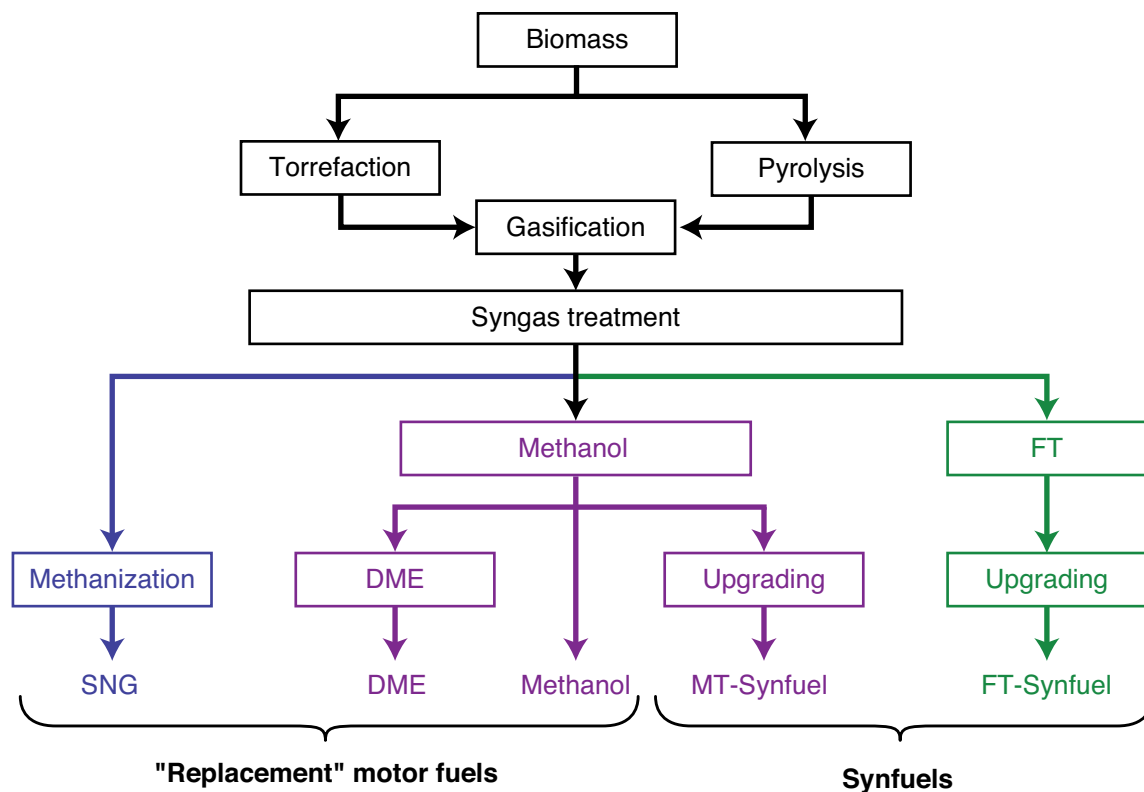


Fig. 2 - Energy pathways based on the thermochemical conversion of biomass



Second-generation pilot biofuel units worldwide

Fig. 3 - Indirect thermochemical methods of transforming a synthetic gas into a biofuel



Other ex-syngas pathways can yield gaseous biofuels that represent fewer processing constraints, such as bioDME (dimethyl ether) or bio-SNG² (or biomethane). However, the use of these gases under atmospheric conditions implies major using constraints.

Hydrothermal liquefaction transforms biomass into biocrude from which a light fraction could be extracted to obtain a diesel following a hydrodeoxygenation reaction.

These thermochemical and biochemical processes offer ways to produce "clean" motor fuels (i.e. with substantially lower CO₂ emissions) from renewable materials. It is likely that they will become a permanent feature on the energy scene as the consumption of fossil fuel decreases. None of these techniques, which are all at different points in their development, has reached the industrial stage. After the laboratory study and experimental work are complete, a pilot unit is used to test all or part of a process on a smaller-than-industrial scale. For complex technological processes, the next step is a demonstration plant, which produces at near-industrial scale; however, its products are not marketed.

[2] SNG: Synthetic Natural Gas

Current status of second-generation pathways and challenges to overcome

Biomass production

For all pathways producing biofuels from lignocellulosic biomass at industrial scale, there are challenges to overcome as far as the production of biomass is concerned. The so-called "dedicated" crops (e.g. miscanthus, switchgrass and short rotation coppice) are not currently an integral part of farm cultivation systems. Whether already underway or planned, large research projects are focusing on the adaptability of these crops to local conditions (e.g. geography, soil and farm economics), the technical routes to prefer for these crops (e.g. to control weeds, harvest and optimize logistics), the potential for genetic improvement of these plants and the social acceptability of growing these crops (particularly as regards the impact on the landscape).

It is also vital today to anticipate the socio-economic and environmental impacts that the development of these new pathways might have.

Second-generation pilot biofuel units worldwide

Biochemical conversion

Today, it is possible to produce ethanol experimentally from lignocellulose resources, so the question is not whether the basic research is feasible, but whether each stage can be optimized, especially from the economic perspective. Between now and 2015-2020, by which time industrial units should be coming onstream, technology leaps can be expected in this respect.

The pretreatment stage, which involves deconstructing the plant cell wall with, in some cases, the separation of cellulose, hemicellulose and lignin, can be carried out using different thermal, mechanical, chemical or even enzymatic methods. Researchers are investigating how to adapt these techniques to various plant species. The stage involving the hydrolysis of cellulose and possibly hemicellulose into sugars still needs to be optimized by improving the enzyme-producing strains. Finally, fermentation, of C5 sugars in particular, using new strains of microorganisms (yeasts and bacteria), is under study to boost the ethanol yield for this processing chain. Other methods of converting C5 sugars to ethanol are also under consideration.

Thermochemical conversion

As a general rule, most thermochemical processes are well known from processing fossil feedstocks. The use of biomass as a raw material imposes new constraints which, depending on the technology concerned, can be more or less difficult to overcome.

The BtL production flowchart for the production of synthetic diesel (FT diesel) involves a complex sequence of technologies and has not yet reached the industrial demonstration stage. It is inspired by the coal-to-liquids (CtL) and gas-to-liquids (GtL) production chains, which exist at industrial scale but use different types of feedstock. Introducing biomass as the raw material means having to master elements that are new or more constraining.

Initially, biomass will inevitably have to undergo pretreatment as well as the necessary conditioning for shipment. Two solutions are currently under study: pyrolysis and torrefaction, both of which are being tested at pilot plants. For the production of synthetic diesel (Fischer Tropsch diesel), gasification requires advanced scrubbing (no tars, alkaline substances or HCN), an optimized molar H_2/CO ratio and a percentage of inerts (CO_2 , CH_4 , N_2) that is as low as possible. Furthermore, given the fuel mass efficiency of the processing chain, large quantities of biomass (about one Mt/year) must be mobilized to make the installation profitable and produce a minimum quantity of product

(approximately 200,000 t). The logistics of supplying biomass to a BtL complex at a refinery may become a major limiting factor in deciding where to locate the installation. Efforts to improve mass efficiency are being made by using external (allothermal) energy inputs to produce a larger quantity of diesel per unit of biomass. Consideration is also being given to solutions – such as the addition of external hydrogen – that are technically simpler but cost more, in principle.

The processes used to produce DME, methanol, SNG or ethanol by gasification present the same uncertainties relative to the handling of biomass, shown previously, irrespective of the type of biofuel desired. Today, the constraints associated with these biofuels mainly arise from their use in fleets of passenger cars. Car manufacturers must specifically convert vehicles to use gaseous biofuels (DME and SNG) at atmospheric pressure. As in the case of LPG, the conventional diesel vehicle must be equipped with a new injection system to use these fuels, given their specific physical properties. These biofuels are also incompatible with polymer materials in certain respects.

As for BioSNG, it needs extra purification before it can be incorporated into an existing gas fuel distribution network, and the cost of compression is still high.

Depending on local fuel specifications, small concentrations of bioethanol and biomethanol can be added to gasoline, either pure or in their ether form, or used in FlexFuel vehicles adapted for that purpose.

The direct method of hydrothermal liquefaction draws primarily on two technologies. The first is hydrothermal conversion of biomass, whose technical feasibility has only been shown in the laboratory; this method still needs to be tested under operating conditions at a larger scale. The second is hydrodeoxygenation, well known when applied to petroleum products, but not yet demonstrated for a feedstock containing alkaline substances and large quantities of oxygen.

None of these processes are at the same stage in terms of knowledge and development. A biochemical process might be ready for industrial exploitation whereas a hydrothermal liquefaction method might still be at the lab stage. Often, researchers will use experimentation at pilot and demonstration plants to tackle the particular problems associated with a process.

Let's briefly look at existing and planned pilot plants, their location and their characteristics to get a general idea about where research is happening, which players are involved and what the development time frame might be.

Second-generation pilot biofuel units worldwide

Pilot plants producing lignocellulosic ethanol

In North America

The Canadians pioneered the construction of second-generation ethanol pilot plants. In 2006, Iogen Corporation, a large manufacturer of enzymes for the textile, animal feed, and pulp and paper industries, built the first pilot plant in the United States. Since then, Woodland Biofuels and Sunopta/Greenfields Ethanol have each announced plans to build a unit. The purpose of all of these installations is to produce ethanol from agricultural and forest residues. This year, the Canadian government launched the NextGen Biofuels Fund, making USD 500 million available for the development of second-generation biofuels. Forty percent of this fund will serve to finance construction of the first demonstration plant at industrial scale.

In 2007, the United States Department of Energy made grants worth USD 385 million over four years to develop six industrial biorefinery projects to produce cellulosic ethanol along with co-products and electricity. Scheduled to start up no later than 2012, these units will have between 34,000 and 100,000 t/year of production capacities of cellulosic ethanol.

A grant of USD 200 million was also awarded to build pilot plants ranging from 80 to 15,000 tons in capacity. The first started operating in the autumn of 2007, owned by Abengoa Bioenergy, Europe's top ethanol producer and Number Five in the United States. The others are expected to come onstream in 2008 and 2009.

The government also earmarked USD 23.3 million to four industrial firms and one university to promote R&D programs on cellulosic ethanol.

In the United States, there are now four pilot and six commercial facilities planned, financed primarily by corporate ethanol, enzyme or agrifood producers. Some include installations to make ethanol from corn stover, but most use forest residues or dedicated crops (e.g. switchgrass).

In Brazil

This year, the foremost Brazilian oil company, Petrobras, will bring the country's first pilot plant for the production of cellulosic ethanol into service. The unit will be situated at its research center on Fundão Island in Guanabara Bay off Rio de Janeiro. Designed to convert sugarcane bagasse into ethanol with an improved yield, the pilot plant will also be equipped to use other by-products such as castor cake from Brazilian biodiesel units.

Petrobras also plans to have a semi-industrial demonstration unit up and running by 2010.

The Brazilian industrial conglomerate Vorantim—which also invested USD 60 million in research to improve the sugar yield of sugar cane—has put 20 million dollars into a pilot plant to make cellulosic ethanol from agricultural waste that should come onstream by 2009.

The Centro de Tecnologia Canavieira (Cane Technology Center), run by a Brazilian cooperative of sugar and alcohol producers, aims to build a pilot plant in the State of Sao Paulo (Piracicaba). The project is backed by growers that are financing sugar cane research.

In Brazil, first-generation ethanol is produced today from cane juice, while bagasse is used to generate heat and electricity for the distillery. The development of second-generation ethanol would make it possible to obtain a higher yield of ethanol per ton and per hectare of sugar cane, by adding a line to process the lignocellulose contained in bagasse. The cane leaves, which are currently left on the ground, as well as the lignin residues from the new extraction line, could then serve to fuel utilities production.

It costs very little more to make cellulosic ethanol from agricultural waste than to produce the ethanol currently on the market (less than USD 0.50 per liter, according to Dr. Bon at the Universidade Federal do Rio de Janeiro).

Ethanol producers do not yet favor adopting this new technology, which offers better efficiency per hectare but costs more. However, if ethanol demand and the value of farmland continue to rise – the price of the latter has doubled in the last three years – they may change their mind.

In Japan

Last January, Verenium Technology announced the start-up of a demo plant (capacity: 1,100 tons) using wood residue and agricultural waste.

In addition, the Japanese government plans to allocate USD 60 million for a second-generation initiative.

In Europe

The first pilot plant ever built in Europe – or anywhere in the world – is operated by Sekab in Örnsköldsvik, Sweden. Every year, it produces 100 tons of cellulosic ethanol. Since 2005, the company has been working at this site notably to validate technologies for a European research program (New Improvements for Ligno-Cellulosic Ethanol, NILE) coordinated by IFP.

Second-generation pilot biofuel units worldwide

As 2007 drew to a close, Abengoa Bioenergy was about to open a pilot facility at its existing grain-to-ethanol plant in Babilafuente, Spain (capacity: 4,000 t of ethanol per year). The facility will use barley and wheat straw for the raw material; starch from the latter is used at the existing unit.

In France, a consortium of industrial, financial and research partners decided to launch the development of a lignocellulosic bioethanol production process that would include construction of a pilot plant (capacity: about 100 tons/yr) as well as a validation prototype.

Royal Nedalco recently announced that it was stepping up the pace of its cellulosic ethanol development program by building an industrial demonstration plant (capacity: 160,000 tons) in Sas Van Gent, Netherlands, in the next few years.

Danisco's enzymes division, Genecor, and energy provider Dong Energy have entered into collaboration to establish a pilot cereal-to-biofuel facility (capacity: 4,500 tons/year). It is slated to start up by 2009 near Kalundborg, Denmark.

Another Danish company, BioGasol, is working on a pilot plant at the Technical University of Denmark. In the spring of 2006, the Danish government made EUR27 million available to the cellulosic ethanol sector, mainly to create a demonstration plant in Denmark. BioGasol would like to take advantage of this opportunity to build a demonstration plant (8,000 t of ethanol a year) on Bornholm Island.

Thermochemical pilot facilities

Biomass gasification can be considered for various fuel applications (FT diesel, DME, methane, ethanol, SNG) and energy applications (biofuels but also heat and electricity). Many players in the energy industry have developed pilot facilities and demonstration plants for gasification processes in Europe, the United States and Asia.

In the United States, the Department of Energy very recently made USD 7.7 million available to fund four research projects on thermochemical biomass-to-fuel processes using gasification. Most of these projects will concentrate their research efforts on the tar removal stage, that follows the gasification of biomass, and on the purification of syngas.

Biofuel production pilots that integrate all of the steps from biomass pretreatment to fuel synthesis are still few and far between; most of them are located in Europe.

FT diesel

The first - and only existing - synthetic diesel pilot plant was built in 2005 in Frieberg, Germany. This project involved several stages and the β version (BtL capacity: 15,000 t/yr) is expected to start operating in the first quarter of 2008. Eventually, Choren Industries, working in cooperation with Shell, would like to establish a commercial facility (capacity: 200,000 t) near Lubmin.

This year, the Karlsruher Institut für Technologie, FZK, launched a pilot plant including decentralized pyrolysis pretreatment to evaluate the transportation of pretreated biomass. The pilot combines a gasifier to test ultimately synthetic diesel production.

Present capacity is 4,000 tons of product/year. Cereal straw accounts for the bulk of the raw material.

The Technische Universität Wien is working on different energy production pathways based on the gasification of biomass: cogeneration, BioSNG and BioFit (Fischer-Tropsch synthesis). The latter is under study at a small-scale pilot unit in Güssing, Austria that produces about 30 liters a day.

The pulp and paper industry is also interested in this production stream. The paper company Stora Enso is working with the Finnish oil company Neste to have a syndiesel pilot running by 2008 at the Varkaus pulp mill in Finland. The pilot unit would use forest residue and pulp/paper waste generated by the mill.

Newpage Corporation, a paper manufacturer based in the United States, has also formed a partnership with Chemrec, a Swedish company specialized in the gasification of a paper-making by-product: black liquor. They are planning to build a black liquor gasification plant to produce biofuels at the Newpage paper mill in Michigan (U.S.).

In France, the Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) is looking into the possibility of installing a pilot plant (capacity: 15,000 tons/year) in Bure (Lorraine), using the Fischer-Tropsch technology marketed by the company Axens.

DME/Methanol

In Sweden, several bio-DME development programs are in progress. Chemrec and Volvo Transfer Technology have set up a pilot plant in Pitea to produce bio-DME from black liquor. A demonstration plant is planned by 2010.

The EU-sponsored Chrisgas project (2004-2009) aims to retrofit a cogeneration plant in Värnamo that closed in 2000 by installing a pilot platform to produce bio-DME and biomethanol.

Second-generation pilot biofuel units worldwide

As part of the DME Vehicle project (EC), bio-DME is being used experimentally by a freight truck fleet in the city of Växjö.

Methanol fuel plants are more widespread today, especially in Sweden and Germany, but a large majority of the commercial units burn fossil natural gas. Nykomb Synergetics in Sweden as well as SVZ and the IEC (Institute for Energy Process, Engineering and Chemical Engineering) in Germany are backing large projects for biomethanol production units. The first two are in progress, the third is scheduled for 2009.

In the United States, the search is on for different ways to substitute ethanol directly for fossil gasoline. Range Fuels and Alico received DOE grants to develop two commercial units to produce ethanol by gasifying lignocellulosic material, one in Florida and the other in Georgia.

In the last few years, aware of its heavy oil dependency, China – particularly Shandong University and the national academy of sciences – has been investigating biomethanol as a replacement fuel for gasoline and bio-DME to replace diesel.

SNG

The technology for producing synthetic natural gas from biomass seems well in hand. A company in the Netherlands, ECN, is soon to launch a pilot and the Technische Universität Wien plans to open a wood-to-SNG 1MW demo-plant by 2008 (the CHP gasifier is already in service) in Gussing, Austria.

The Catalytic Process Engineering Group at the Paul Scherrer Institut in Switzerland is working at the Gussing plant, hoping to apply this technology in Switzerland. The gas could be distributed via the existing natural gas network and used for various applications, such as gas heating, motor fuel for gas-powered vehicles or as a source of electricity and heat at gas-fired power plants.

If the term "second generation" covers the conversion of different biomass resources to biofuels using processes to be developed in the not-too-distant future, then other pathways may be viewed as third-generation. Among them is the use of families of algae that can fix CO₂ and convert it to intracellular lipid reserves. Given how fast algae grow, large quantities of oil could then be

extracted and converted to biofuels. Research programs have been undertaken, especially in the United States (by the NREL), Japan (which has USD 117 million allocated to this pathway), South Africa and Western Europe (France, Spain, the UK and Germany). Major technical and especially economic problems must be overcome to finish the laboratory phase and produce a biofuel whose quality is similar to that of the existing biodiesel.

Measured by the number of projects and their stage of development, the technology that has made the most progress is the biochemical method of producing ethanol. Very large sums have been spent on research in this area, especially in the United States, which sees it as the pathway that will best alleviate the constraints associated with the use of corn for food and feed.

Since Europe consumes more diesel and less gasoline, it is developing biochemical and thermochemical processes in parallel to cover the replacement of both. There are no plans to market these products on a large scale before 2015. Right now, Brazil produces the biofuel that is the world's cheapest replacement fuel for gasoline. Problems associated with land management will eventually push producers to adopt second-generation technology. Finally, Asia is gradually developing its first-generation pathways, but fossil fuels need to be replaced on such a tremendous scale that, in all likelihood, resource problems will soon emerge. Asia may then become a major target for American and European firms in this sector.

Let's recall that all of these prospective pathways will exploit biomass resources that are now only used to produce energy. The lignocellulosic residues of agriculture, forestry or the timber industry figure as the resources of choice. Although these resources are often widely dispersed and the costs of supply can be high, there is good reason to consider integrating high-productivity energy crops into agricultural and forestry systems. Energy crops not only achieve better per-hectare productivity, but are often less demanding than food crops with respect to soil quality. This would help make competition between different types of land occupancy less acute, although it would still be a factor to take into account.

*Daphné Lorne - daphne.lorne@ifp.fr
Final draft submitted on December 10, 2007*