

Biocarburants de deuxième génération : une nouvelle étape est franchie

La mise en service de plusieurs unités commerciales de production d'éthanol lignocellulosique à travers le monde a marqué une nouvelle étape dans le développement des biocarburants de 2^e génération (2G). Certes, de nombreux verrous, tant technologiques qu'économiques, restent encore à lever et des volumes conséquents d'investissements devront être mobilisés pour développer et pérenniser ces filières. L'évolution favorable du contexte réglementaire sur les marchés reste la clé de leur devenir.

Place actuelle des biocarburants dans le mix énergétique

En 2012, la filière biocarburants a représenté environ 3,4 % (soit 62 Mtep) de la consommation mondiale d'énergie (tous carburants confondus) dans le secteur des transports routiers, qui a atteint un volume total de l'ordre de 1,89 Gtep. En Europe, la consommation de biocarburants de 1^{re} génération (1G) – produits à partir de cultures alimentaires (canne à sucre, maïs, blé, colza, soja ou palme, etc.) a connu un essor important au cours des dix dernières années, promue par un contexte réglementaire favorable : la directive 2009/28/CE (RED) sur la promotion de l'utilisation des énergies renouvelables a notamment fixé un objectif d'incorporation de 10 % d'énergies renouvelables dans la consommation totale de carburants automobiles pour 2020. Ainsi, selon EurObserv'ER, la part des biocarburants dans la consommation du transport routier dans l'Union européenne est passée de 0,2 % en 2000 à 4,7 % en 2013 (soit 13,6 Mtep). L'Allemagne et la France sont les plus gros consommateurs d'éthanol carburant et de biodiesel dans l'UE.

Très largement décriés au cours des années récentes en raison de leurs impacts controversés, la part maximale des biocarburants 1G dans l'objectif défini par la RED fait l'objet d'ultimes négociations au sein de l'Union européenne autour de la valeur de 6 %. Afin de rester en ligne avec l'objectif 2020 de 10 % d'incorporation d'ENR, ce plafonnement nécessitera une contribution d'autres types de carburants renouvelables, comme les biocarburants

avancés dits de 2^e génération (issus de résidus ou autres matières lignocellulosiques), et d'électricité renouvelable *via* notamment les véhicules électriques.

Les enjeux économiques et technologiques majeurs de la filière biocarburants 2G

De nombreux défis tant économiques que technologiques restent encore à relever pour que les biocarburants 2G prennent une part significative dans le bouquet énergétique.

Même si la production d'éthanol 2G a aujourd'hui atteint une phase d'industrialisation, des enjeux économiques majeurs n'en restent pas moins les clés de succès de la poursuite du déploiement d'unités et de la pérennité de la filière.

Il s'agit notamment de diminuer encore le coût de la biomasse, qui compte pour quelque 25 % du coût total de production. Outre la nécessité de garantir un approvisionnement à prix bas, il faut aussi avoir la maîtrise et la garantie d'accès à un volume conséquent et pérenne.

À titre d'exemple, dans le projet Liberty récemment mis en service aux États-Unis dans l'Iowa par le partenariat POET/DSM, l'approvisionnement en biomasse a fait l'objet de nombreuses études en amont. Un partenariat de recherche a été établi entre l'université de l'Iowa et l'*US Department of Agriculture* (USDA), qui a apporté le financement, et des contrats de fourniture de biomasse ont ensuite été signés avec quelque 600 agriculteurs. Les

Biocarburants de deuxième génération : une nouvelle étape est franchie

résidus de culture du maïs (rafles, feuilles, enveloppes des épis) ont été sélectionnés comme matière première pour cette unité qui, à pleine capacité de production, utilisera 285 000 t/an de biomasse.

L'unité exploitée par POET/DSM utilise des balles de résidus (balles EZ) dont la composition a été spécialement mise au point pour une utilisation exclusive du projet. De nombreux critères, dont leur composition, l'impact sur le renouvellement des sols, leur condition de séchage et de stockage ont été étudiés (fig. 1).

Fig. 1 – Comparaison entre la composition des balles utilisées dans le projet Liberty et celle des balles traditionnelles



Source : Données projet Liberty

Au-delà de la ressource qui reste un verrou majeur en termes de réduction de coûts, d'autres postes sont concernés lorsqu'il s'agit d'étudier l'amélioration de la rentabilité de la filière :

- l'optimisation de l'étape de prétraitement ;
- l'hydrolyse enzymatique, dont le coût représente aujourd'hui environ 25 % du coût total de production ;
- l'utilisation optimale de la lignine, coproduit du processus de transformation de la biomasse en éthanol 2G : soit une utilisation pour la fabrication de matériaux (colles, résines, etc.) qui pourrait ainsi représenter un débouché à plus forte valeur ajoutée ; soit la valorisation énergétique pour les besoins de la bioraffinerie.

Par ailleurs, le développement et la mobilisation accrue des ressources lignocellulosiques vont nécessiter de la part des pouvoirs publics un volant de mesures incitatives pour assurer l'approvisionnement futur de tous les projets attendus, tant dans les secteurs énergétiques, notamment pour les biocarburants 2G, que dans l'ensemble des autres usages connus et potentiels (chimie biosourcée, matériaux).

Du point de vue technologique, l'amélioration des procédés de prétraitement de la biomasse, notamment en liaison avec la déconstruction de la matrice lignocellulosique afin de la transformer en sucres simples, reste un enjeu majeur. Très énergivore, cette étape comporte encore des verrous à lever (dégradation des sucres,

formation de composés toxiques, etc.). Plus généralement, les enjeux liés à la manipulation du vivant devront être maîtrisés afin d'assurer un maintien des performances dans le temps et sécuriser le développement des biomasses dans leur environnement.

Enfin, le changement d'échelle, du pilote à l'unité commerciale, nécessite l'adaptation des procédés. Aujourd'hui, seuls quelques promoteurs d'unités de production d'éthanol 2G ont relevé ce défi.

Qu'entend-on par biomasse lignocellulosique ?

On estime actuellement que 5 % au moins de la production totale de biomasse mondiale pourraient être mobilisables pour la production d'énergie, soit un total de 13,5 milliards de tonnes (Gt) de matières premières disponibles (i.e. 6 Gtep d'énergie primaire).

Selon la directive 2009/28/CE, la biomasse est définie comme "la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales animales), de la sylviculture et des industries connexes, y compris la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux".

Les biocarburants 2G sont issus de la biomasse lignocellulosique, ressource non-vivrière, disponible en grande quantité et sous différentes formes :

- résidus agricoles : pailles de céréales, tiges, bagasses de canne à sucre ;
- résidus d'exploitation forestière (branches, rameaux, troncs abîmés laissés en forêt) ;
- déchets de l'industrie du bois (sciures, rebuts) et du papier (papiers usagés, liqueurs noires) ;
- cultures dédiées à fort rendement : plantes annuelles (triticale, luzerne, etc.), cultures pérennes à rotation rapide (miscanthus, canne de Provence, peuplier, saule, etc.) ;
- déchets ménagers (fraction organique) et industriels (palettes, etc.).

La lignocellulose est constituée de trois polymères : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Ces trois composants s'entremêlent et forment une structure tridimensionnelle rigide, complexe et très résistante.

La composition de la biomasse lignocellulosique pouvant être utilisée dans la production de biocarburants 2G est présentée dans le tableau ci-après.

Biocarburants de deuxième génération : une nouvelle étape est franchie

Tableau 1
Composition de biomasse lignocellulosique

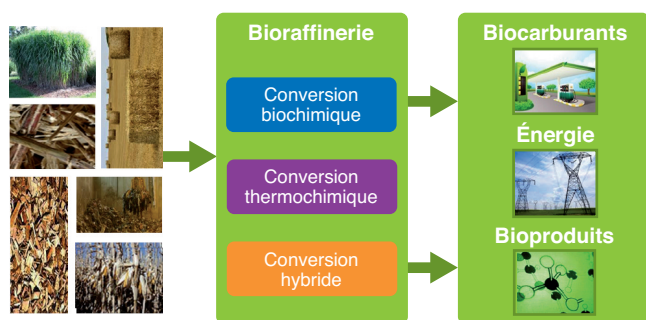
Biomasse lignocellulosique	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)
Paille de blé	33	23	17
Rafles de maïs	45	35	15
Journaux	40-55	25-40	18-30
Bois dur	40-55	24-40	18-25
Bois tendre	45-50	25-35	25-35
Miscanthus	45	30	21
Bagasse de canne à sucre	42	25	20

Source : *Advances in Valorization of Lignocellulosic Materials by Biotechnology: An overview. BioResources*, 2013, 8, 3157-3176

Les voies de valorisation de la biomasse lignocellulosique

Le choix de la voie de valorisation de la biomasse lignocellulosique dépend des caractéristiques de la biomasse d'entrée, de sa disponibilité et du type de carburant souhaité en sortie. Deux principales voies se dessinent pour transformer la biomasse lignocellulosique en biocarburants : la voie biochimique et la voie thermochimique. Une troisième voie, hybride, combine les deux voies (fig. 2).

Fig. 2 – Principales voies de conversion de la biomasse lignocellulosique

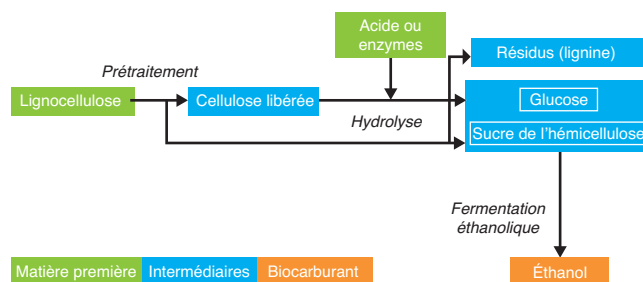


Source : IFPEN d'après *Advanced Biofuels*

La valorisation par la voie biochimique

La voie biochimique a pour but d'hydrolyser la biomasse lignocellulosique afin d'en extraire des sucres qui seront ensuite fermentés. Le principal produit issu de ce type de procédé est l'éthanol dit "cellulosique", fabriqué en quatre étapes (fig. 3).

Fig. 3 – Valorisation de la biomasse par la voie biochimique



Source : IFPEN

Le prétraitement

Avant d'être transformée en carburant, la biomasse lignocellulosique doit être décomposée lors d'une étape de prétraitement, par action thermique et/ou chimique, une étape clé des technologies développées par les industriels. Cette étape permet d'extraire la lignine qui est non fermentescible. Outre le traitement à la chaux, qui s'avère être le plus économique, d'autres solutions existent pour permettre l'accès aux parties sucrées de la biomasse, les seules à pouvoir être transformées en éthanol : parmi celles-ci la cuisson en présence d'acide dilué (procédé chimique) et l'explosion à la vapeur (procédé physico-chimique).

Les principaux acteurs propriétaires de technologies de prétraitement sont les sociétés autrichienne Andritz et finlandaise Valmet. Des promoteurs d'unités ont, quant à eux, leur propre technologie (POET, Abengoa, etc.).

L'hydrolyse de la cellulose

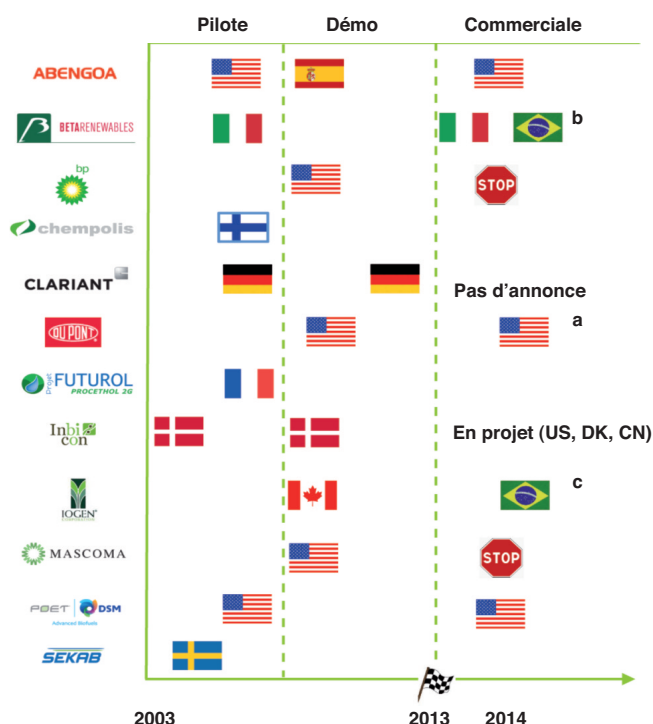
Un acide ou des micro-organismes (enzymes spécifiques) agissent comme un catalyseur dans cette étape, qui consiste à fractionner en sucres simples et fermentescibles (glucose, pentose, saccharose, etc.), les polysaccharides qui composent la cellulose et l'hémicellulose. La fermentation enzymatique est de loin la plus répandue. La société danoise Novozymes s'affiche comme le fournisseur d'enzymes le plus connu. IFPEN est également très engagé sur le sujet au sein du projet Futurol. D'autres acteurs comme DSM ou Dupont Danisco licencient leur procédé d'hydrolyse enzymatique.

La fermentation éthanologique et la distillation

La fermentation alcoolique des sucres libérés en C5 et C6 par des levures est similaire à celle pour la production des biocarburants 1G. En France, la société Lesaffre s'est positionnée dans la fourniture de levures pour produire des biocarburants 2G (partenaire du projet Futurol).

Biocarburants de deuxième génération : une nouvelle étape est franchie

Fig. 4 – Principaux acteurs de la voie biochimique



a – Implantation commerciale en construction dont la mise en production est prévue début 2015

b – Implantation brésilienne en partenariat avec GranBio

c – Unité en partenariat avec Raizen

Source : IFPEN

Lancé en 2008, le projet Futurol vise le développement et la commercialisation d'une solution complète de production d'éthanol cellulosique, depuis le champ jusqu'à l'obtention du produit fini. Le projet a ainsi mis au point un procédé, particulièrement optimisé dans son intégration industrielle et dans ses performances. Grâce à son usine pilote et à l'implication de ses partenaires, le projet a pu générer des ruptures sur les trois éléments clés que sont le prétraitement, les enzymes et les levures. Le projet utilisera ainsi un cocktail enzymatique qui peut être produit *in situ* dans le procédé à partir de coproduits, aux performances équivalentes aux cocktails industriels disponibles. Les levures permettent de fermenter tous les sucres susceptibles de produire de l'éthanol. L'industrialisation de la technologie issue du projet est attendue dès 2016 et le procédé sera commercialisé par Axens. Porté par la société PROCETHOL 2G, le projet Futurol associe 11 partenaires. Le projet est accompagné par Bpifrance et labellisé par le pôle IAR (fig. 4).

Maîtrisée depuis des siècles, l'hydrolyse enzymatique a ouvert la voie au développement à grande échelle des unités de production d'éthanol 2G. Au cours de ces deux

dernières années, les annonces de mise en service d'unités se sont succédé : Beta Renewables à Crescentino (Italie), POET/DSM et Abengoa aux États-Unis, GranBio au Brésil et plus récemment Raizen (j-v Shell-Cosan) au Brésil. En 2015, Dupont-Danisco mettra en service son unité commerciale dans le Nevada.

La valorisation par les voies thermochimiques

Les voies thermochimiques (traitement thermique) permettent de décomposer la matrice lignocellulosique et transformer la biomasse solide et hétérogène en combustibles/carburants gazeux (méthane de synthèse porté par le projet Gaya coordonné par GDF Suez en France) ou liquides. Trois procédés font l'objet de travaux de R&D pour la production de biocarburants liquides (biodiesel, biojet notamment) :

- la pyrolyse rapide suivie d'un *upgrading* qui cherche à maximiser l'obtention de phase liquide. Dans ce procédé, l'étape de liquéfaction est réalisée en l'absence d'hydrogène et de catalyseur (pyrolyse flash). Le produit obtenu est l'huile de pyrolyse, ou *bio-oil*, qui peut être utilisée directement pour la production d'électricité ou de vapeur. Ce mélange n'est toutefois pas utilisable en l'état dans un moteur thermique conventionnel et doit donc subir une phase de conversion supplémentaire ou *upgrading* (hydrotraitement catalytique) pour en faire un biocarburant liquide compatible. Si la pyrolyse flash est d'ores et déjà industrielle (unité FORTUM), la conversion de l'huile de pyrolyse en carburants est encore au stade R&D. IFPEN, BTG et VTT travaillent sur ce sujet ;
- la liquéfaction directe de biomasse dont le produit final, appelé *biocrude*, est plus stable que le *bio-oil* et convertible en substitut du diesel. Des travaux de recherche menés par le centre de recherche néerlandais TNO-MEP ont conduit au développement du procédé *Hydrothermal Upgrading* ;
- la pyrolyse catalytique tente de conjuguer pyrolyse flash et conversion dans une seule et même unité. La société Kior a bâti une démonstration industrielle aux États-Unis mais a déposé son bilan récemment ;
- la voie *Biomass to Liquids* ou BtL : cette voie fait appel à la gazéification (traitement thermique) qui produit un gaz de synthèse, le *syngas*, qui, après purification, est converti par la mise en œuvre de procédés de synthèse, en particulier la synthèse catalytique Fischer-Tropsch en produits liquides de type gazole ou kérosène. Les produits finis sont de très bonne qualité (absence de soufre, indice de cétane élevé). Axens commercialise d'ores et déjà la technologie Fischer-Tropsch Gasel® pour BtL.

Biocarburants de deuxième génération : une nouvelle étape est franchie

Toutefois, pour minimiser les pertes thermiques et bénéficier des économies d'échelle, la capacité de production envisagée des projets est supérieure à 100 000 tonnes de carburants. Compte tenu du rendement massique de l'ensemble de la chaîne de procédés (18 % pour un fonctionnement à 100 % à partir de biomasse lignocellulosique), la mobilisation d'une très grande quantité de biomasse, de l'ordre du million de tonnes par an, sera rendue nécessaire. La logistique d'approvisionnement peut donc devenir un facteur limitant majeur pour le choix de la localisation des bioraffineries.

Après une période relativement dynamique, plusieurs projets européens, dont notamment ceux pilotés par Choren, Linde-Forest BtL, NSE Biofuels, sont actuellement à l'arrêt en raison de difficultés financières de leurs promoteurs.

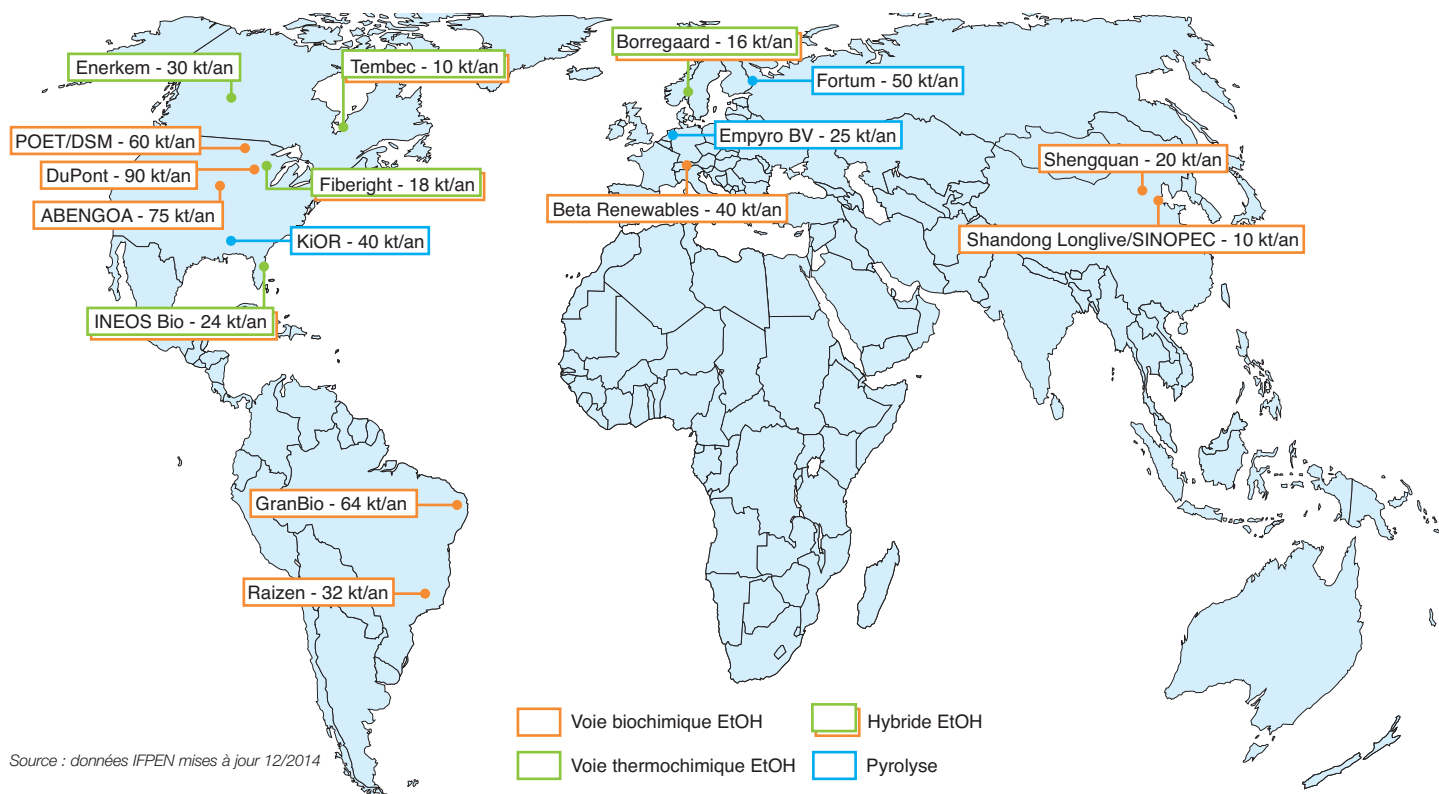
En ce qui concerne le projet français BioTfuel, porté par un groupement de six partenaires (Avril, Axens, CEA, IFPEN, Thyssenkrupp Industrial Solutions et Total), il progresse vers la construction des deux démonstrateurs. Ainsi, en novembre 2014, la société Bionext qui fédère tous les partenaires de ce programme a annoncé que la phase d'avant-projet détaillé était achevée et que le projet allait pouvoir aborder sa phase de démonstration. Pour cela, deux unités pré-industrielles vont être construites pour un

montant global du projet de 180 M€ d'investissement. Le site d'Avril à Venette (Picardie) abritera une installation de préparation de la biomasse de 12 M€ faisant appel au procédé de torréfaction. Le site Total de Dunkerque (établissement des Flandres) accueillera l'unité de gazéification qui constitue le cœur du procédé, ainsi que le procédé de synthèse Fischer-Tropsch développé par IFPEN. Il mobilise un investissement de près de 110 M€. En septembre 2014, les contrats de construction des principaux lots du site Total de Dunkerque ont été signés par Bionext avec Prosernat (pour le traitement du gaz de synthèse) et la PME RBL-REI (pour la préparation des charges) ainsi qu'avec ThyssenKrupp Industrial Solutions (pour l'unité de gazéification et l'intégration globale du site) avec un démarrage des travaux sur site prévu au premier trimestre 2015.

Par ailleurs, le CEA a inauguré en octobre 2014 la plateforme de prétraitement par broyage de la biomasse à Bure-Saudron de son projet Syndièse.

Ces procédés thermochimiques ne nécessitent pas de sélectivité dans leurs procédés de transformation (étape de prétraitement moins complexe), ce qui représente un avantage par rapport à la voie biochimique. Néanmoins, ces voies de conversion de la biomasse rencontrent encore des verrous techniques majeurs

Fig. 5 – Unités commerciales de biocarburants 2G en construction ou en production (capacité >10 000 t/an)



Biocarburants de deuxième génération : une nouvelle étape est franchie

(qualité des produits notamment, présence d'impuretés, etc.) et économiques (coûts élevés) et il n'existe pas encore d'unité de production opérationnelle à l'échelle industrielle.

La valorisation par la voie hybride

La voie hybride combine la voie thermochimique et la voie biochimique. Obtenu par une étape de gazéification de la biomasse, le gaz de synthèse est ensuite fermenté en alcools notamment. La société américaine IneosBio ainsi que la start-up néo-zélandaise LanzaTech sont positionnées sur cette voie. IneosBio a démarré une unité de ce type en Floride. LanzaTech prévoit de démarrer son unité en 2016 aux États-Unis.

Les capacités existantes et en projet de biocarburants 2G

Le nombre d'unités commerciales de production d'éthanol lignocellulosique a fortement progressé au cours de ces deux dernières années. Leur capacité totale atteint 350 000 t/an à fin 2014 (fig. 5).

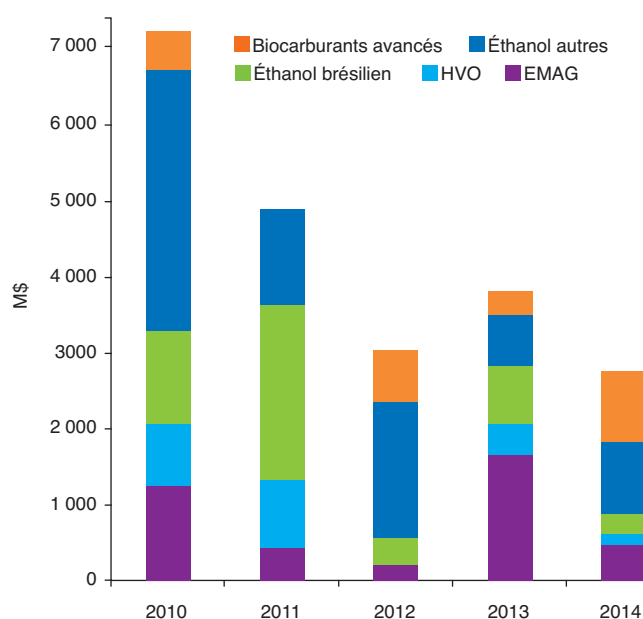
Plusieurs autres unités sont en cours de développement et représentent une capacité supplémentaire de 137 000 t/an à court terme.

Des investissements en forte hausse

Les biocarburants 2G (biodiesel et bioéthanol principalement), ainsi que les nouvelles technologies comme la production de diesel synthétique de type hydrogénation des huiles végétales (HHV) sont en plein essor. Le nombre d'unités de production d'éthanol à l'échelle commerciale a progressé très fortement, notamment en 2013 et 2014 (démarrage de deux unités aux États-Unis, une en Europe et une en Amérique latine). Au Brésil, la nécessité d'augmenter la production de biocarburant, du fait des nouvelles obligations d'incorporation pour le biodiesel et l'éthanol a contribué à cet accroissement des investissements.

Si les nouveaux investisseurs restent prudents sur le court terme, on compte déjà plusieurs projets chez les acteurs existants (éthanol 2G) et des développements majeurs sont aussi attendus dans les filières biodiesel avec la mise en service de projets pilotes (fig. 6).

Fig. 6 – Investissements mondiaux dans la production de biocarburants 2G



Source : FO-Licht 2014

De manière générale un contexte réglementaire plus favorable et stable sera nécessaire pour soutenir les investissements dans le domaine des biocarburants.

Aux États-Unis, les incertitudes sur la prochaine proposition du *Renewable Fuel Standard* porté par l'*Environmental Protection Agency* relative à la compatibilité des mandats biocarburants, ainsi que la fin des crédits pour les *blenders* depuis fin 2013, sont deux facteurs qui pourraient limiter la consommation du biodiesel dans les années à venir, et donc le volume des investissements alloués au développement de ce biocarburant.

En Europe, les atermoiements sur les nouveaux objectifs d'incorporation de biocarburants dans la RED et l'absence actuelle d'objectifs quantitatifs au-delà de 2020 ne favorisent pas non plus le développement de nouvelles filières.

Enfin, la rentabilité des projets de production de biocarburants 2G nécessitera à la fois une remontée du prix du pétrole et la prise en compte renforcée des problématiques CO₂ dans les transports.

Charlène Sagnes – charlene.sagnes@ifpen.fr

Marie-Françoise Chabrelie – marie-francoise.chabrelie@ifpen.fr

Manuscrit remis en janvier 2015