

Les biofuels de seconde génération (2G) : un accélérateur de la transition énergétique vers une économie H₂ énergie

Le développement d'une bioéconomie, en particulier pour les transports, passe par le développement d'une filière biocarburant. Outre la voie biologique, la production de biocarburants de deuxième génération (2G) s'opère par la voie thermochimique, aussi appelée BtL (*Biomass to Liquids*). Les acteurs de la filière, dont Air Liquide, se mobilisent pour faire émerger une feuille de route technico-économique garantissant à terme la compétitivité de cette filière émergente.

Cette voie thermochimique, basée sur la gazéification de la biomasse, permet également d'obtenir de l'hydrogène à grande échelle. L'industrialisation de cette filière émergente et la production associée de bio-hydrogène à prix compétitifs constituent un levier majeur pour accélérer la transition vers des solutions de mobilité hydrogène.

Par **Olivier DELABROY***

* Directeur R&D, Air liquide.

BIOMASSE ET TRANSPORTS : LES BIOCARBURANTS

Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) [1], la part de la biomasse représente aujourd'hui environ 10 % de la demande totale d'énergie primaire. Selon les projections de l'AIE (jusqu'en 2035), sa part suivra l'augmentation de la demande globale en énergie dans les scénarios conservatifs, et cette contribution devrait excéder 15 % dans les scénarios limitant la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Au niveau global, les ressources potentielles de la biomasse sous ses différentes formes seraient largement suffisantes pour répondre à la demande attendue, sans forcément entrer en concurrence avec la production d'aliments et tout en garantissant un usage durable des terres mobilisées. Cependant, aux niveaux local et régional, des disparités entre production et demande sont avérées, entre autres pour des raisons sociologiques, climatiques ou réglementaires. Ainsi, il est prévisible que des régions importatrices nettes d'énergie (comme l'Europe ou le Japon) augmenteront de façon importante leurs importations de biomasse (à partir de régions comme l'Amérique du Sud ou l'Afrique).

Transports et biocarburants

En 2010, le secteur des transports a consommé environ 2 200 millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtep) [2] de produits pétroliers (kérosène, essence, gazole), un secteur représentant un quart des émissions mondiales de CO₂ et connaissant, ces dernières années, une croissance soutenue (plus forte dans les pays émergents) en particulier dans le transport de marchandises et le transport aérien.

Entraînés par des considérations liées aux objectifs de réduction des émissions de CO₂, d'indépendance énergétique et de développement économique rural, les biocarburants peuvent, aujourd'hui, remplacer partiellement les produits issus du pétrole dans le secteur des transports. La pénétration des biocarburants progresse, elle était de 1,11 million de barils d'équivalent pétrole (Mbep) en 2009, soit ~3 % des carburants mondiaux consommés. Et les projections des experts s'accordent pour reconnaître que cette substitution devrait atteindre les 8 % autour de 2030-2035. Dans le secteur de l'aviation, la substitution de biocarburants liquides au kérosène issu du pétrole est un enjeu majeur, car les contraintes imposées au carburant sont strictes et réduisent le nombre des alternatives possibles. Des expériences réalisées avec du bio-kérosène se sont avérées concluantes. C'est ainsi qu'une norme de l'*American Society for Testing and Materials* (ASTM) autorise des mélanges pouvant en

comporter jusqu'à concurrence de 50 %. En ce qui concerne le secteur du transport de marchandises par route ainsi que par bateau, le pétrole continuera à prédominer, mais les solutions alternatives pour une substitution partielle sont plus nombreuses : biocarburants, moteurs à gaz, électrification et recours à des piles à combustible.

LES FILIÈRES BIOCARBURANTS

La pénétration des biocarburants dits de première génération (éthanol obtenu à partir de sucres ou d'amidon, ou biodiesel issu des huiles végétales) a été facilitée par leur bonne compatibilité avec les produits pétroliers, permettant ainsi l'utilisation des infrastructures existantes. Cependant, ces mêmes plantes peuvent également être utilisées pour l'alimentation humaine. Leurs méthodes de culture posent la question de leur impact sur la disponibilité des terres, sur la biodiversité et sur la déforestation, leur bilan global doit inclure ces externalités. Toutefois, dans certains pays qui possèdent des disponibilités locales importantes et un climat approprié, des considérations relatives à l'indépendance énergétique (voire de coût) soutiennent toujours des investissements industriels.

Les biocarburants de deuxième génération

Les filières des biocarburants de deuxième génération (2G) utilisent comme matière première la plante entière, et en particulier les déchets agricoles et sylvicoles, élargissant ainsi considérablement la ressource disponible, cela sans même concurrencer les usages alimentaires. Elles permettent une réduction bien plus significative (allant de 60 à 120 %) des émissions de gaz à effet de serre du puits à la roue, par rapport aux carburants fossiles de référence [3].

Deux grandes filières de production de biocarburants 2G se sont ainsi développées :

- une voie biologique, qui permet de transformer les composants celluloseux et hémicelluloseux de la biomasse en sucres fermentescibles, puis en éthanol. Elle a comme étapes principales un prétraitement, une hydrolyse enzymatique, une fermentation des sucres hydrolysés, une séparation de l'éthanol produit et, enfin, une déshydratation ;
- une voie thermo-chimique, aussi appelée BtL (pour *Biomass to Liquids*), dont les étapes principales sont la préparation de la biomasse, suivie d'une gazéification et d'une épuration du gaz de synthèse produit, puis d'une synthèse catalytique Fischer-Tropsch (FT), elle-même suivie d'un hydrotraitement, le tout pour produire du biodiesel ou du bio-kérosène de synthèse.

D'autres voies (en cours de mise au point), comme la production d'huiles à partir d'algues, nécessitent des avancées de la recherche fondamentale pour arriver à des ordres de grandeur de compétitivité qui soient acceptables pour le marché de gros des carburants. Des voies de biologie de synthèse avancées pour obtenir des carburants liquides à partir de sucres affichent des avancées spectaculaires, mais leur adaptation à l'utilisation d'un éventail de substrat plus élargi est nécessaire pour afficher des performances environnementales probantes.

Les biocarburants 2G ne sont pas encore compétitifs

Aujourd'hui, ces filières n'en sont encore qu'au stade de la démonstration technologique. Pour qu'elles puissent devenir des filières industrielles de production de carburants à grande échelle, leur compétitivité en termes de coût et de capacité à mobiliser des volumes de ressources à la hauteur de l'enjeu doit encore être améliorée.

Le coût de production des biocarburants 2G est aujourd'hui considérablement plus élevé que celui des carburants fossiles (voir la figure 2 de la page suivante). Des avancées technologiques au niveau des procédés (qui se traduisent en des gains d'efficacité, d'échelle et de productivité) et des approvisionnements optimisés en biomasse (dont l'exploitation rationnelle et élargie devrait permettre de minimiser les coûts

pour de gros volumes) doivent être mises en œuvre simultanément, afin de réduire ces coûts.

L'élaboration de la courbe d'apprentissage industriel nécessite la construction et le retour d'expérience de premières unités de développement et de démonstration, dans un cadre législatif et économique privilégié. Ensuite, un cadre incitatif durable s'appuyant sur une feuille de route industrielle pourra favoriser l'effet d'échelle et un déploiement conséquent permettant à terme l'instauration d'une filière compétitive.

LA FILIÈRE THERMOCHIMIQUE

(BTL – *BIOMASS TO LIQUID*) : LA GAZÉIFICATION DE LA BIOMASSE

L'approche thermochimique est basée sur la déconstruction thermique de la biomasse à haute température en présence d'un oxydant (tel que la vapeur et/ou l'oxygène), produisant un gaz de synthèse composé majoritairement d'hydrogène (H₂), de monoxyde de carbone (CO), de gaz carbonique (CO₂) et de vapeur d'eau.

Comme l'étape de synthèse catalytique de carburant (Fischer-Tropsch, ou FT) opère à des pressions supérieures à 30 bars, l'optimisation économique veut que la gazéification opère également à pression élevée et que la quantité de gaz inerte en amont de l'étape FT soit minimale, ce qui implique une utilisation majoritaire de l'oxygène comme oxydant à la place de l'air.

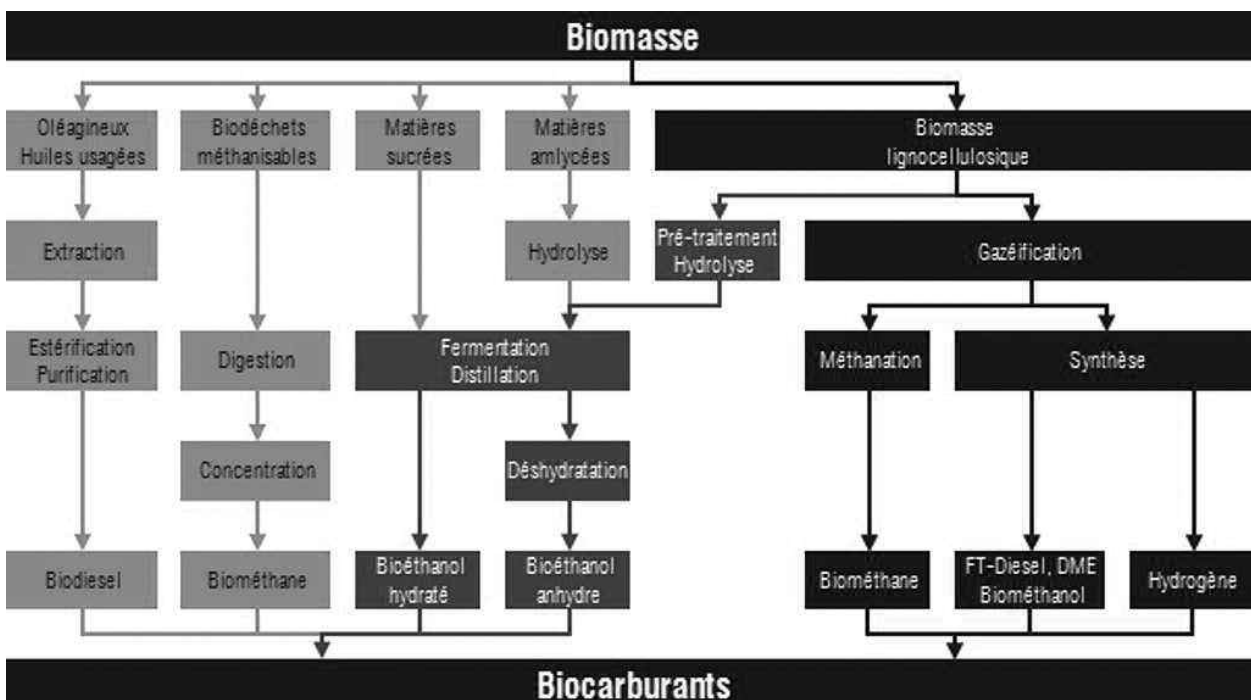


Figure 1 : Arborescence des processus industriels de transformation de la biomasse en biocarburants.

Source : Plateforme biocarburants Suisse

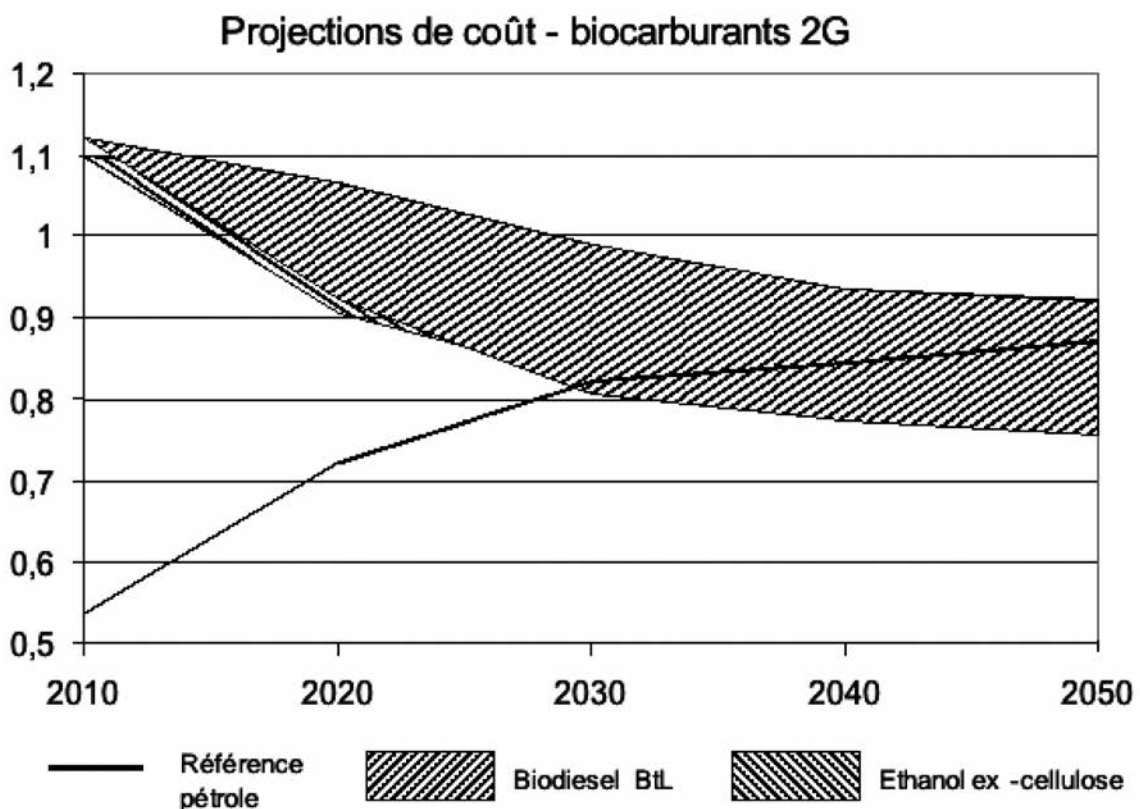


Figure 2 : Projection (jusqu'en 2050) des coûts du biodiesel BtL et de l'éthanol obtenu à partir de cellulose (on remarquera qu'en raison de l'augmentation du prix du pétrole, le biodiesel BtL et l'éthanol deviennent compétitifs dès 2030).
Source : IEA - Biofuels for transport 2011 [3].

Les technologies de gazéification à lit entraîné à haute pression utilisant l'oxygène comme oxydant sont matures pour des combustibles fossiles (charbon, résidus pétroliers ou gaz naturel). Ces réacteurs opèrent à des pressions élevées (allant jusqu'au-delà de 60 bars) et à de hautes températures (de 1 200 à 1 500°C), et permettent d'atteindre des productivités très élevées grâce à des temps de résidence réduits à quelques secondes seulement. Par contre, leur fonctionnement nécessite un débit fiable du combustible, avec pour les combustibles solides, une granulométrie contrôlée autour de 100 microns, ce qui, dans le cas de la biomasse, représente un verrou technologique. En effet, le broyage du bois ou des plantes herbacées est difficile et gourmand en énergie. De plus, une fois broyée, la biomasse a tendance à s'agglomérer, ce qui rend difficile son introduction dans un réacteur sous pression.

Les prétraitements de la biomasse

Nécessaires, des prétraitements de la biomasse ont donc été proposés, notamment :

- la torréfaction qui est un traitement thermique réalisé en absence d'oxygène, à une température modérée (200-300°C), pendant un temps long

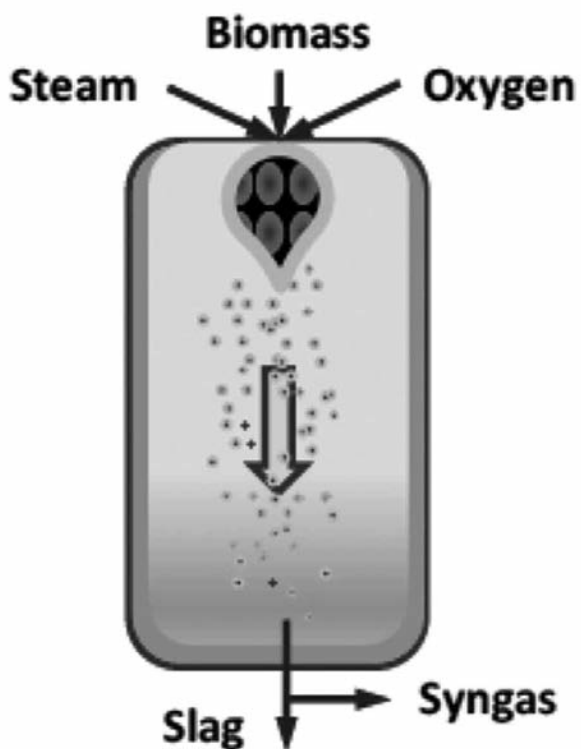


Figure 3 : Schéma de la synthèse du biogaz à partir de biomasse, d'oxygène et de vapeur, avec élimination de scories.



(15-60 minutes) et à la pression atmosphérique. Ce procédé est relativement efficace (85-95 % de rendement) et délivre une matière plus friable (dont le broyat peut être comparé à celui du charbon) ;

– la pyrolyse rapide, qui est un autre traitement thermique consistant à chauffer à des températures moyennes (400-500°C) et très rapidement (en quelques secondes) la biomasse, avec à la clef la production d'un gaz. La majeure partie de ce gaz est condensée sous la forme d'une « huile de pyrolyse ». Afin d'atteindre de bonnes efficacités énergétiques (85-90 %), la phase solide résultante peut être remélangée à cette huile, formant ainsi une *bio-slurry*, une suspension liquide présentant une densité énergétique élevée. Cette *bio-slurry* peut ensuite être portée à haute pression par un simple pompage, pour être ensuite introduite dans le gazéifieur.

Ces procédés et leur intégration dans une chaîne délivrant le gaz de synthèse sont en cours de développement et des pilotes ont été ou sont en train d'être construits.

Les procédés aval

L'aval du gazéifieur profite directement des technologies et procédés éprouvés pour les combustibles fossiles. Une adaptation aux spécificités et à la taille des unités BtL est néanmoins nécessaire à l'échelle de démonstrateurs industriels.

À la sortie du gazéifieur, le gaz de synthèse généré doit être refroidi, lavé, nettoyé et purifié avant de pouvoir être introduit dans des réacteurs, en présence de catalyseurs. En effet, les catalyseurs utilisés dans la réaction FT peuvent être facilement empoisonnés par des impuretés (telles que des métaux alcalins, des halogénures, des composés soufrés ou azotés, du CO₂, etc.) et à des concentrations de l'ordre des parties pour mille (ppm), voire des parties pour un milliard (ppb) pour certains composés.

Le ratio H₂/CO dans le gaz de synthèse est souvent déséquilibré en faveur du CO et doit donc être ajusté en amont du réacteur FT pour obtenir une conversion optimale. Cet ajustement peut se faire soit lors d'une étape de conversion catalytique de CO en H₂ à la vapeur d'eau, soit par l'ajout d'H₂ extérieur, un ajustement qui permet d'augmenter la productivité de l'unité BtL.

AIR LIQUIDE, PARTIE PRENANTE DE LA FILIÈRE BTL

Air Liquide, en partenariat avec le Karlsruhe Institute of Technology (KIT), développe une chaîne technologique, BtL (*bioliq*[®]), qui transforme la biomasse cel-

lulosique en carburants de synthèse. L'unité pilote d'une puissance de 500 kg/h opère une pyrolyse de la biomasse pour produire un *bio-slurry* liquide, il s'agit de la première étape de cette chaîne (*bioliq* 1). Le pilote, d'une capacité d'une tonne horaire correspondant à la deuxième étape (*bioliq* 2), celle de la gazéification en lit entraîné de la *bio-slurry*, a été démarré en 2012. Ces deux projets sont fortement soutenus par les pouvoirs publics allemands (BMELV-FNR) (*Das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz – Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe*).

En plus des technologies de production d'oxygène, Air Liquide possède également les technologies nécessaires pour l'aval de la chaîne :

– le nettoyage et la purification du gaz de synthèse (Rectisol) ;

– la conversion catalytique par vapeur d'eau, ainsi que le portefeuille complet de production d'hydrogène afin d'ajuster le ratio H₂/CO ;

– la technologie avancée de synthèse Fischer-Tropsch (GTL.F1) basée sur un catalyseur à base de cobalt en phase *slurry* (démontrée avec succès en Afrique du Sud).

L'ensemble de ces briques technologiques permet à Air Liquide de proposer des chaînes complètes et optimisées permettant la production des biocarburants 2G de demain.

LES TECHNOLOGIES BTL POUR LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE « VERT »

Pour la filière BtL, l'effet d'échelle est fondamental pour atteindre des performances économiques ; cela impose une réflexion sur les moyens d'assurer une mobilisation massive de la ressource biomasse. Un projet commercial type (200 000 tonnes de biocarburant par an) mobiliserait, par an, environ 700 000 tonnes de biomasse sèche.

Les premières étapes de la chaîne de production BtL visant à produire des biocarburants à grande échelle dans le futur seront directement applicables pour produire de l'hydrogène à partir de biomasse. En effet, une fois le gaz de synthèse obtenu et purifié, les technologies existent à l'échelle industrielle pour une conversion catalytique approfondie (à la vapeur) du CO en H₂, puis pour en séparer un produit H₂ pur, typiquement par adsorption.

Ainsi, si les technologies associées à une filière biocarburants BtL deviennent matures, et si la filière devient compétitive et déployable à grande échelle, les bases compétitives seront posées pour une production d'hydrogène « vert » à des volumes importants. Le projet évoqué ci-dessus permettrait une production de 103 000 normaux mètres cubes par heure (Nm³/h) d'hydrogène.

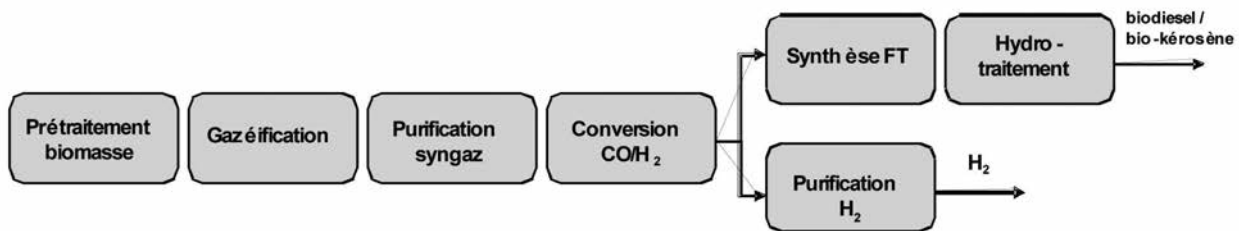


Figure 4 : Enchaînement des processus industriels conduisant de la biomasse à la production d'hydrogène pur ou à la production de biodiesel au moyen d'une synthèse de Fisher-Tropsch.

Ensuite, grâce à la versatilité du gaz de synthèse, et selon le profil du projet et la demande de produits, des logiques d'optimisation multi-produits (biocarburants, hydrogène, bioénergie, produits chimiques) peuvent être envisagées pour un même site.

L'ÉCONOMIE « HYDROGÈNE ÉNERGIE »

L'hydrogène est massivement utilisé comme produit de base dans l'industrie chimique et dans le raffinage. Il est très majoritairement produit par reformage de gaz naturel (Air Liquide a produit plus de 10 milliards de normaux mètres cubes (Nm³) d'hydrogène en 2011).

L'économie Hydrogène Énergie est fondée sur l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique et sur sa valorisation en électricité *via* des piles à combustible, qui présentent des atouts certains par rapport à des systèmes thermomécaniques classiques, en raison :

- d'un rendement électrique élevé (~50 %),
- d'un rendement énergétique global (électricité et chaleur) supérieur à 80 %,
- de l'absence d'émission de gaz à effet de serre au point d'utilisation (les piles à combustible ne dégagent que de la vapeur d'eau),
- d'un fonctionnement n'émettant aucun bruit.

De plus, l'hydrogène permet de stocker l'énergie électrique renouvelable sur de longues périodes, et il fait le lien entre la production d'électricité renouvelable et les transports électriques décarbonés.

Depuis dix ans, les progrès technologiques réalisés en matière de piles à combustible ont été significatifs et de nombreux projets de démonstration de leurs performances ont été lancés. Ils ont permis aux acteurs de la filière de définir une feuille de route technico-économique ambitieuse, mais réaliste, pour la décennie à venir.

Air Liquide participe à travers le monde à un grand nombre de projets visant à accompagner le déploiement de cette technologie et à favoriser l'acceptation sociétale de cette filière innovante.

Des marchés précoces

Les avantages de l'hydrogène et des piles à combustible leur permettent d'ores et déjà d'être compétitifs sur des marchés précoces. Les plateformes logistiques aux Etats-Unis et en Europe en sont un parfait exemple, avec plus de 2 000 chariots élévateurs équipés d'une pile à combustible permettant un gain d'efficacité de 10 % par rapport à leurs homologues à batterie électrique classique. D'autres applications commerciales incluent la fourniture combinée d'électricité et de chaleur pour répondre à des besoins résidentiels (près de 10 000 références installées au Japon) et pour la fourniture d'électricité à des sites isolés (notamment l'alimentation d'antennes de télécommunications, en Europe).

De premières références commerciales de déploiement du stockage d'énergie électrique renouvelable au moyen de stockages d'hydrogène de grande capacité sont envisagées pour les années 2020, elles seront associées à des électrolyseurs de grande taille (100-300 mégawatts). Des projets de démonstration sont en cours de démarrage en Allemagne. En parallèle, des unités émergent qui sont destinées à des stockages d'énergie décentralisés en vue de répondre à des besoins locaux.

Mobilité

Dans le domaine des transports, en particulier pour les véhicules légers, la volonté de diminuer les émissions de CO₂ conduira à une électrification progressive du parc automobile et à une utilisation accrue de sources d'énergie renouvelables. À court et à moyen termes, cela se traduira par le recours aux biocarburants et à des véhicules électriques à batterie, puis, à moyen-long terme, par l'utilisation de véhicules électriques à pile à combustible, et roulant de fait à l'hydrogène.

Ces motorisations électriques à pile à combustible présentent dès aujourd'hui des performances remarquables, et des objectifs d'amélioration ont d'ores et déjà été identifiés et balisés :

- consommation : 1 kg d'hydrogène pour 100 km,
- autonomie : supérieure à 500 km, avec des réservoirs en composite contenant de 5 à 6 kg d'hydrogène gazeux à la pression de 700 bars,
- durée de vie de la pile : plus de 2 500 heures (en 2012), avec pour objectif 5 000 heures à l'horizon 2020,
- une température de démarrage pouvant descendre jusqu'à -30°C.

Au-delà des développements technologiques sur les véhicules eux-mêmes, il est nécessaire de développer et de déployer l'infrastructure de distribution et d'approvisionnement en hydrogène (les stations service). La technologie de remplissage des réservoirs d'hydrogène à haute pression commence à être déployée : les temps moyens de remplissage du réservoir d'un véhicule sont de l'ordre de 3 à 5 minutes. Cette technologie est mise en œuvre dans plusieurs dizaines de stations service à travers le monde, avec l'objectif d'un déploiement de plusieurs centaines de stations service fournissant de l'hydrogène en 2020.

L'approvisionnement en hydrogène décarboné : un enjeu pour la filière

Le bilan carbone au kilomètre parcouru pour un véhicule roulant à l'hydrogène d'origine fossile (obtenu par reformage de gaz naturel) est déjà inférieur d'environ 20 % à celui d'un véhicule à essence. La production d'hydrogène à partir d'énergie décarbonée permettra de réduire encore plus drastiquement l'empreinte carbone de ces véhicules.

Pour les marchés précoces évoqués précédemment, le reformage de biogaz et l'électrolyse de l'eau à partir d'électricité renouvelable peuvent fournir les volumes d'hydrogène nécessaires. De surcroît, la production d'hydrogène à partir d'électrolyse permettra, demain, de stocker de l'électricité renouvelable et de contribuer ainsi à l'équilibrage du réseau électrique. Cet hydrogène sera valorisé dans des applications mobilité (véhicules électriques à pile à combustible) ou dans des applications stationnaires (comme la génération combinée de chaleur et d'électricité).

Pour des marchés de masse comme celui de la mobilité, le volume d'hydrogène requis exigera de surcroît un changement d'échelle des moyens de production d'hydrogène « vert ». En plus des électrolyseurs de grande taille (actuellement en cours développement), une technologie de gazéification de la biomasse amenée au stade industriel peut contribuer à fournir les

volumes requis. En effet, le projet de gazéification de l'exemple cité précédemment peut fournir l'hydrogène nécessaire pour alimenter plus de 500 000 véhicules électrique à pile à combustible. Les avancées requises pour que la filière BtL devienne compétitive conduiraient à des coûts de production d'hydrogène fortement avantageux. Les retombées de la filière BtL seraient ainsi décuplées tant en termes d'efforts de développement que de coûts d'opération et d'investissement.

CONCLUSION

Le développement d'une bioéconomie doit inclure la production des biocarburants avancés pour permettre de faire face à l'accroissement du volume des transports, contribuant ainsi à obtenir une certaine indépendance énergétique nationale et une meilleure préservation de l'environnement.

Ce secteur particulier de la bioéconomie cible la production de grands volumes de biocarburants à partir de ressources somme toute finies. Sa compétitivité doit être améliorée grâce à des solutions technologiques avancées et à une exploitation rationnelle et élargie de la ressource. Son développement et son déploiement doivent être favorisés par un cadre incitatif durable devant permettre l'établissement d'une filière compétitive à terme.

L'économie Hydrogène Énergie, qui est basée sur l'hydrogène comme vecteur énergétique, possède des atouts certains en termes d'efficacité et de respect de l'environnement. Cette filière est d'ores et déjà une réalité pour certains marchés spécifiques.

L'industrialisation massive de certaines technologies de production de biocarburants avancés permettra de produire du bio-hydrogène à des prix compétitifs. La levée de ce verrou, accompagnée de la réalisation des infrastructures adaptées, accélérera la transition énergétique vers des solutions de mobilité H₂.

[Remerciements : L'auteur remercie chaleureusement Denis Cieutat et Ivan Sanchez Molinero pour leur expertise et leur forte contribution à cet article].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] IEA (2012) – *World Energy Outlook*, 2012.
- [2] IEA (2012) – *Key World Energy Statistics*, 2012.
- [3] IEA (2011) – *Biofuels for transport*.