



La production d'hydrogène par transformation thermochimique de la biomasse

Gérard Claudet

Summary Thermochemical biomass conversion for clean hydrogen production

Biomass is the most available kind of renewable energy. By adding resources coming from forestry and from agriculture, France could produce up to 30 Mtoe without any negative impact against environment. Thermochemical conversion with successive steps of pyrolysis then gasification can provide syngas, made primarily of CO and H₂, from which clean hydrogen can be extracted in more attractive economical conditions than from water electrolysis.

Mots-clés Biohydrogène, biomasse, transformation thermochimique.

Key-words Clean hydrogen, biomass, thermochemical conversion.

A l'aube du XXI^e siècle, de nombreuses et importantes questions se posent à notre société qui doit se préparer à faire face à l'accroissement de la population mondiale et à l'amélioration générale du niveau de vie et du confort des 10 à 12 milliards d'individus que l'on annonce pour 2100.

Parmi les problèmes à résoudre, on sait que la production alimentaire devra être adaptée en proportion convenable et que certaines matières premières indispensables, parmi lesquelles l'eau douce, présenteront de sérieuses difficultés d'approvisionnement et de répartition.

Un autre paramètre clé du développement et du bien-être de l'humanité sera la disponibilité de l'énergie, en quantité et qualité suffisantes, pour assurer l'équilibre et la durée de notre fragile écosystème.

Au moment où notre société industrielle commence à entrevoir la fin du pétrole bon marché, et où la prise de conscience collective évolue en faveur de la lutte contre l'effet de serre, l'utilisation de la biomasse et des déchets comme source d'énergie constitue une alternative particulièrement attrayante et un enjeu majeur pour notre avenir.

Si par ailleurs, certains pays entendent réduire ou limiter l'utilisation de l'énergie nucléaire, le recours à des énergies de substitution n'en sera que plus indispensable ; ce qui explique l'engouement nouveau qui se répand en faveur des énergies dites renouvelables qui, sous une forme ou une autre, proviennent de l'énergie solaire.

Les enjeux

Parmi les énergies renouvelables, la plus utilisée dans l'hexagone est l'hydroélectricité dont on exploite déjà 90 % du potentiel pour produire, environ (et seulement), 6 % de nos besoins.

Beaucoup d'efforts sont déployés pour utiliser la force du vent dans des éoliennes, et pour capter l'énergie solaire, soit sous forme de chaleur, soit sous forme d'électricité, par des cellules photovoltaïques.

Ces solutions intéressantes présentent cependant des limites difficiles à franchir, tant au niveau de leur prix de revient, de 3 à 10 fois encore trop élevé, qu'au regard de leur capacité, finalement limitée, pour la France métropolitaine, vers environ 10 % de nos besoins globaux.

De plus, ces formes d'énergie sont surtout adaptées à la production de chaleur ou d'électricité de manière intermittente et aléatoire, et doivent être associées à des moyens de stockage et de régulation qui en accroissent notablement la complexité et donc le prix. Le problème le plus délicat se situe au niveau des transports qui représentent actuellement environ le quart de nos besoins et sont, presque exclusivement, alimentés à partir de réserves fossiles, c'est-à-dire sans aucune garantie d'indépendance nationale et avec les dangers que l'on connaît pour la pollution des villes et l'évolution du climat.

La biomasse, constituée de tous les végétaux qui se développent sur la planète, en réalisant le captage et le stockage de l'énergie solaire, représente une ressource locale et renouvelable considérable, appelée à jouer un rôle déterminant dans les prochaines décennies.

Le potentiel de la biomasse


La biomasse la plus abondante est constituée des plantes lignocellulosiques dont on peut distinguer trois origines principales :

- La biomasse forestière dont l'exploitation en bois d'œuvre s'élève vers 35 000 000 m³ alors que les 15 000 000 ha de la forêt française sont capables de produire annuellement près de 65 000 000 m³.



PRODUCTION

	Mm ³	Mtonnes
◆ Plaquettes forestières		
□ Rémanents (2)	4	
□ Éclaircies de plantation (2)	2	
□ Taillis (potentiel 50 Mm ³) (1)	10	
	<hr/> 16	8
◆ Déchets de 1ère et 2e transformation (1)		
□ Écorces, délignures, sciures non utilisés	7	
□ Copeaux, chutes, rebus mal utilisés	5	
	<hr/> 12	6
◆ Déchets industriels banals (3)		
□ 40 Mt dont 25% disponibles (bois en fin de cycle)		10
◆ Déchets ménagers (3)		
□ 20 Mt dont 60% disponibles		12
◆ Résidus agricoles (2),(4)		
□ Paille et tiges de céréales, maïs et oléagineux		
□ Taille, noyaux, coquilles... 43 Mt dont utilisables		19
◆ Cultures énergétiques (2),(4)		
□ Taillis à courte révolution (peupliers, eucalyptus, saules)		
□ Plantes herbacées (canne de Provence, céréales)		36
		<hr/> 91

 Soit équivalent à 30 Mtep
 ou 15 % de la consommation française

Encadré 1 - La biomasse : inventaire du potentiel national. Selon (1) Deglise X., Lede J., *Entropie*, 1980, n° 94 ; (2) Dumon R. ; (3) *Débat énergie et environnement*, Souvion, 1994 ; (4) *Rapport CEE*, octobre 1998.

L'exploitation des rémanents forestiers et des bois de taillis, ainsi que les résidus des industries de transformation, pourraient très largement contribuer à la production d'énergie.

- La biomasse agricole utilisable est constituée de sous-produits, comme les pailles largement excédentaires, mais aussi de plantations, non alimentaires, que l'on pourrait cultiver sur les 15 % de la superficie agricole dévolue à la jachère.

- Parmi les déchets, dont notre société a, par ailleurs, de grandes difficultés à se défaire, on peut envisager d'utiliser la biomasse qui revient en fin de cycle, comme les bois, papiers ou cartons usagés, mais aussi des résidus de l'industrie agroalimentaire comme les trop célèbres farines animales.

On estime que pour la France métropolitaine, la ressource de biomasse lignocellulosique mobilisable est la plus importante parmi les pays européens et

pourrait fournir 15 % (30 Mtep/an) de la consommation actuelle d'énergie primaire (voir encadré 1). En se limitant au seul potentiel de sa production annuelle, la biomasse représente donc bien la plus abondante source d'énergie renouvelable dans notre pays.

Aucune des énergies renouvelables ne sera, à elle seule, suffisante pour satisfaire nos besoins. On devra tout au mieux additionner leurs potentiels, en veillant soigneusement à privilégier pour chacune les applications les mieux appropriées.

Les filières de valorisation énergétique de la biomasse

Bien que se présentant sous des aspects relativement différents, les produits de la photosynthèse ont des compositions assez comparables, avec comme



constituants principaux le carbone, l'hydrogène et l'oxygène, dans des proportions équivalentes à $C_6H_9O_5$, fonction du degré hygrométrique.

L'énergie de la biomasse peut être récupérée selon les quatre principales voies suivantes :

- La plus courante, la **combustion** (ou incinération), produit essentiellement de la chaleur à un niveau de température qui est limité, vers $650\text{ }^\circ\text{C}$, par la présence dans les fumées de l'azote introduit avec l'air et de vapeurs acides ou de goudrons condensables qui donnent lieu à des phénomènes de corrosion.

Dans ces conditions, la cogénération d'électricité et de chaleur, au moyen d'un cycle à vapeur, ne permet d'obtenir que 30 % d'électricité et 70 % de chaleur, laquelle est un complément économiquement difficile à valoriser dans notre contexte national.

- La deuxième voie possible est la méthanisation, réalisée par la fermentation anaérobie, c'est-à-dire la décomposition par action bactérienne en absence d'air de substances très humides comme les algues, les déjections animales ou les déchets ménagers.

Il est ainsi possible d'obtenir un mélange gazeux de méthane (50 à 60 %) et de gaz carbonique (35 à 40 %) rendant son utilisation difficile et, en général, limitée à une combustion *in situ* pour la production de chaleur et d'électricité.

- Une troisième voie, la **fermentation alcoolique**, est adaptée aux produits saccharifères (contenant du

sucré), comme la betterave ou la canne à sucre, ou amylacés (comportant de l'amidon), telles les céréales.

Après hydrolyse et préparation d'une solution sucrée soumise à la fermentation, on obtient une solution titrant moins de 15 % d'alcool, dont l'éthanol peut être extrait par distillation.

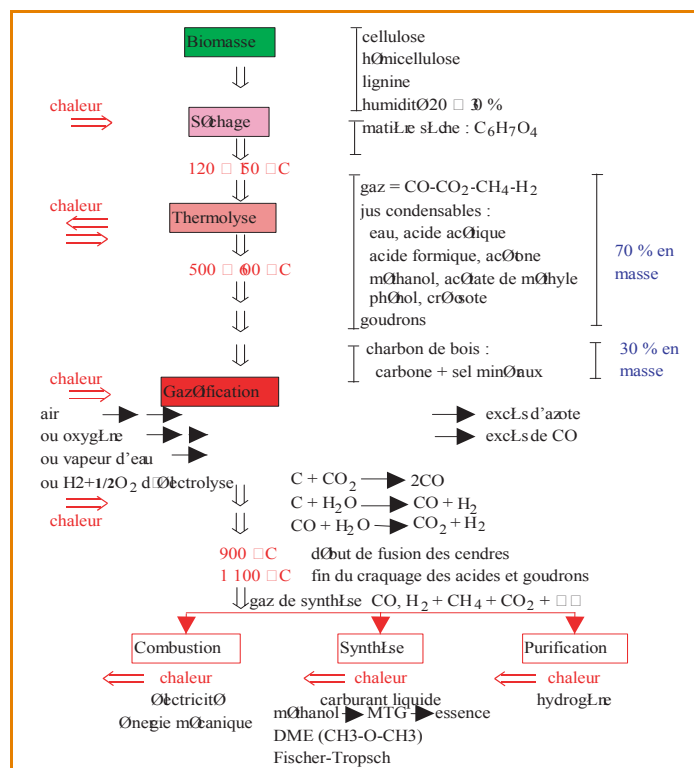
Le rendement global est largement pénalisé par la consommation d'énergie, associée partiellement à la culture des plantes et surtout, à l'opération de distillation, qui limite la production à environ 1,4 kWh pour 1 kWh consommé.

- La **transformation thermochimique**, enfin, qui conduit à la gazéification des substances organiques et végétales, convient particulièrement bien à la valorisation des produits lignocellulosiques comme le bois ou les pailles.

C'est cette filière qui présente le plus fort potentiel énergétique pour la production de carburants avec un taux de 2,5 à 3 kWh produits pour 1 kWh consommé.

Cette dernière solution, actuellement la moins utilisée, est pourtant celle qui présente les plus grandes possibilités, à condition qu'un effort de recherche suffisant lui soit consacré.

Comme l'illustre l'encadré 2, la transformation thermochimique de la biomasse comporte une succession d'opérations qui nécessitent le transfert



Encadré 2 - Filière thermochimique de thermolyse et gazéification.



PRODUCTION

de grandes quantités de chaleur simultanément au contrôle de la proportion et du temps de contact des réactifs en présence.

Après l'opération de séchage, très endothermique, la thermolyse consiste en la dégradation thermique des produits qui vers 600 °C ont perdu 70 % de leur masse devenue gazeuse, alors que 30 % de la masse d'origine demeure solide et représente le charbon de bois, essentiellement constitué de carbone. La gazéification du carbone se poursuit jusque vers 900 ou 1 000 °C au moyen d'un réactif comme l'air, l'oxygène ou la vapeur d'eau, qui réalise une oxydation plus ou moins complète du carbone en monoxyde de carbone ou gaz carbonique. L'utilisation d'air, à ce stade, est peu coûteuse mais introduit dans le produit final de l'azote indésirable. L'oxygène, résultant de la distillation de l'air, est cher et dangereux et favorise la production de gaz carbonique.

Avec la vapeur d'eau comme réactif, on récupère une quantité supplémentaire d'hydrogène, mais un moyen de chauffage annexe doit alors être utilisé, par exemple, par combustion de carbone ou de gaz de purge résiduels.

L'obtention d'un gaz de bonne qualité, et non corrosif, nécessite l'élimination des acides et goudrons résultant de la thermolyse. On doit pour cela porter ces produits vers 1 000 à 1 100 °C pour réaliser leur dégradation thermique ou effectuer vers 800 à 900 °C une réaction catalysée qui permet d'éviter la fusion des cendres et la création de mâchefers que l'on constate entre 900 et 1 000 °C et qui risquent de nuire au bon fonctionnement du gazogène. Le gaz obtenu, mélange d'oxyde de carbone et d'hydrogène, peut être brûlé dans un moteur ou une turbine à gaz pour produire de l'énergie mécanique ou de l'électricité. Il peut aussi conduire à la synthèse d'hydrocarbures liquides, comme le méthanol, utilisables directement comme combustible ou comme vecteur d'énergie, ou encore comme matière première de l'industrie chimique.

Le gaz de biomasse peut enfin être raffiné pour extraire l'hydrogène, qui deviendra par cette filière le combustible propre et renouvelable dont les futurs moteurs non polluants, en cours de développement, auront besoin.

Parmi les solutions envisagées pour la réalisation des véhicules d'avenir, ainsi que pour le chauffage et l'éclairage des habitations, le développement des piles à combustible présente un enjeu considérable. La pile à combustible est un transformateur d'énergie chimique en énergie électrique qui réalise l'opération inverse de l'électrolyse. Dans l'électrolyse, un courant électrique permet de

dissocier la molécule d'eau, en émettant séparément ses constituants que sont l'hydrogène et l'oxygène. Dans la pile à combustible, alimentée par de l'hydrogène et de l'oxygène (en fait, de l'air), la réaction inverse produit du courant électrique en reconstituant de l'eau.

On peut mesurer tout l'intérêt qu'il y aura à disposer d'un tel générateur, parfaitement propre, capable de mouvoir un véhicule ou de chauffer et éclairer un bâtiment sans aucune nuisance pour l'environnement. Il reste cependant à vérifier que le combustible hydrogène pourra lui-même être obtenu de manière propre et renouvelable, aux conditions économiques les plus favorables.

C'est bien en le retirant de la biomasse que l'ensemble de ces conditions seront le plus facilement satisfaites comme le montre l'encadré 3 extrait de l'étude du TÜV Bayern group : *Hydrogen the energy carrier*. Cette étude montre que l'hydrogène extrait de la biomasse est seul capable de concurrencer le reformage à la vapeur du gaz naturel, en restant largement plus économique que les filières où l'électrolyse de l'eau est réalisée à des coûts en proportion avec le prix de l'électricité utilisée.

Des thèmes de recherche bien orientés ouvrent un nouvel essor pour l'agriculture et la forêt

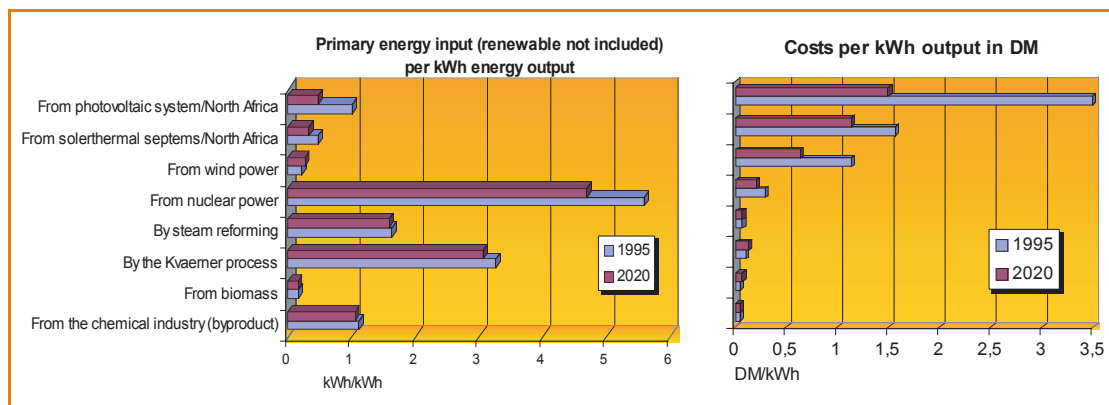
Face à une perspective aussi prometteuse, le Commissariat à l'Énergie Atomique, parmi d'autres, a mobilisé des compétences acquises dans d'autres secteurs de la production d'énergie et s'est engagé résolument dans la recherche et le développement des « nouvelles technologies de l'énergie » destinées à procurer à l'humanité les moyens de poursuivre son évolution en disposant de sources d'énergie propres et renouvelables qui conditionneront son développement durable dès les prochaines décennies. Pour de plus amples renseignements, le lecteur pourra se reporter à la revue *Clefs CEA*, n° 44, hiver 2000-2001, *Nouvelles Technologies de l'Énergie*.

Deux axes complémentaires de travaux ont été programmés et sont conduits en partenariat avec d'autres organismes de recherche et en relation avec l'industrie :

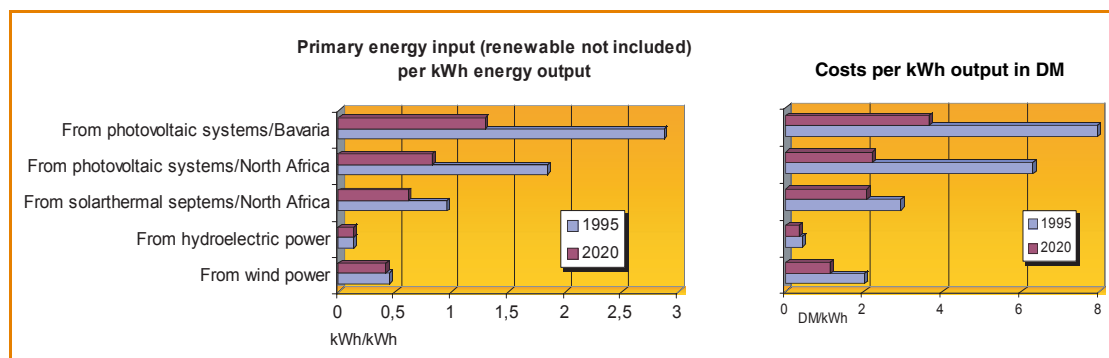
- Les piles à combustible fonctionnent déjà de façon satisfaisante, mais elles restent encore perfectibles. Le principal obstacle qui reste à franchir consiste à en abaisser sensiblement le prix de revient.
- La production d'hydrogène par transformation thermo-chimique de la biomasse est une voie



Production d'hydrogène gazeux (GH₂)



Production d'hydrogène liquéfié (LH₂)



Encadré 3 - Coûts de l'hydrogène selon la filière de production.
Source : *Hydrogen the Energy Carrier*, TÜV Bayern group.

d'avenir qui bénéficiera des nombreux travaux en cours dans les laboratoires, pour produire un gaz de plus en plus pur (exempt de goudrons et de poussières), avec des rendements de plus en plus élevés (optimisation des procédés et réduction des pertes thermiques). Là-encore, le succès de la filière dépendra de sa compétitivité économique, largement conditionnée par la capacité des producteurs à collecter, conditionner et distribuer la matière première, en quantité suffisante et à des prix acceptables. A titre indicatif, c'est en-dessous de 300 francs par tonne de matière sèche que se situe l'objectif à atteindre pour des quantités, toutes ressources confondues, de l'ordre de 100 000 tonnes par an et par unité de traitement.

Il faudra 5 à 10 ans pour la mise au point de techniques de transformation adaptées, mais

l'organisation et la mise en place progressive des filières de production de la ressource demanderont des délais du même ordre.

Il est donc temps pour les professionnels de la forêt et de l'agriculture désireux de préparer et d'organiser une nouvelle ère dont ils seront les acteurs essentiels, de prendre les initiatives qui s'imposent.



Gérard Claudet

est directeur de recherche au CEA de Grenoble*.

* DTP-SETEX, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex 9.
Tél. : 04 38 78 43 60. Fax : 04 38 78 51 77.
E-mail : gclaudet@cea.fr