

LA PRODUCTION DE CARBURANTS PAR TRANSFORMATION THERMOCHIMIQUE DE LA BIOMASSE.

Gérard CLAUDET

Conseiller Scientifique au Commissariat à l'Energie Atomique.

A l'aube du 21^{ème} 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 sur 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 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 est le produit de la photosynthèse du gaz carbonique et de l'eau, réalisée par le captage de l'énergie solaire par les plantes.

Le rendement de conversion de l'énergie solaire, par ce processus naturel, se situe, en moyenne annuelle, entre 0,5 et 1% et la production de matière qui en résulte, de nature majoritairement lignocellulosique, est essentiellement concentrée sur les continents, qui bénéficient, par rapport aux océans, des compléments nécessaires pour l'ancrage au sol des plantes et pour la fourniture des sels minéraux.

Pour situer les ordres de grandeur au niveau du globe, il est important de remarquer deux chiffres qui caractérisent la place de la biomasse dans notre écosystème (Chartier, 1980):

- - La production annuelle de biomasse est estimée à 172 milliards de tonnes de matière sèche, soit l'équivalent en énergie primaire de 15 fois l'énergie fossile consommée.
- - La quantité stockée sur l'ensemble du globe est de l'ordre de 1800 milliards de tonnes de matière sèche, représentant une énergie équivalente à celle des énergies fossiles connues.

Le premier chiffre représente le potentiel de l'énergie "renouvelable" utilisable annuellement.

Le deuxième chiffre fixe l'inventaire mondial qu'il faut maintenir constant pour éviter tout impact désagréable sur l'effet de serre et permet de prendre conscience des risques d'effet d'avalanche que pourrait engendrer un réchauffement rapide de notre planète.

La répartition terrestre du potentiel mobilisable des énergies renouvelables est représentée sur la figure 1 (B.Dessus, 1992), ou il apparaît, d'une part, que la biomasse, avec 2230 Mtep, dont 1600 Mtep d'origine forestière, représente très largement la première ressource, sur une capacité globale de 3365 Mtep, et, d'autre part, que sa distribution entre les différents continents est relativement équitable, avec cependant, un net avantage pour l'Amérique du sud.

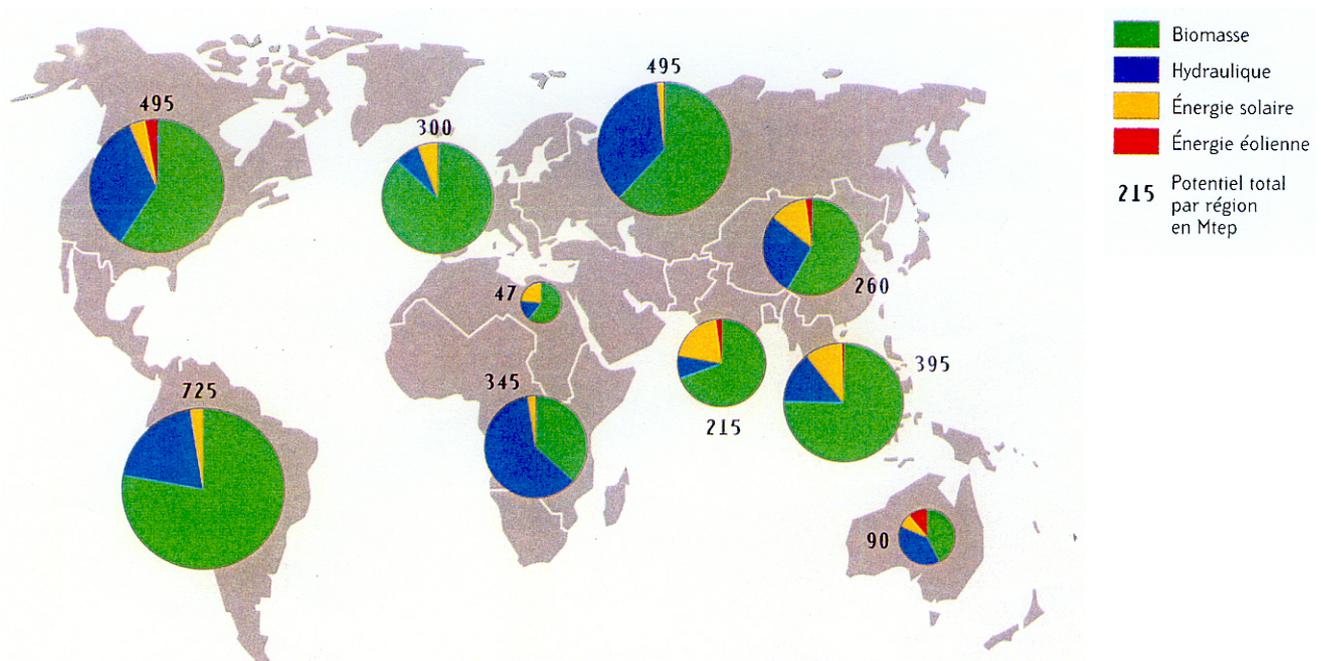


Figure Erreur ! Signet non défini.

LES POTENTIELS D'ÉNERGIES RENOUVELABLES DES ANNÉES 90

Les potentiels annuels des différentes énergies renouvelables réellement accessibles dans les années qui viennent sont importants. Les énergies du soleil, du vent, de la biomasse et l'hydraulique représentent un potentiel raisonnablement mobilisable de plus de 40 % des besoins actuels d'énergie du monde, 25 % pour les pays industrialisés, 30 % dans les pays de l'Est, plus de 80 % dans les pays du Sud. La contribution principale pourrait provenir du bois avec 1600 Mtep mobilisables sans risque de déforestation, puis de l'hydraulique encore très peu mis en œuvre en Afrique, en Amérique latine et en ex-URSS. Le solaire et l'éolien offrent une contribution plus faible au bilan global mais sont essentiels pour le développement de plus de deux milliards d'individus qui n'ont pratiquement aucun espoir d'être raccordés au réseau électrique. Source, B. Dessus, B. Devin, E. Pharabod; « Le potentiel mondial des énergies renouvelables », La Houille blanche, 1992.

Pour l'ensemble de la Communauté Européenne, une étude réalisée en 1998 (Kaltschmitt, 1998), et illustrée par la figure 2, indique pour chaque pays, la capacité annuelle de production forestière et agricole.

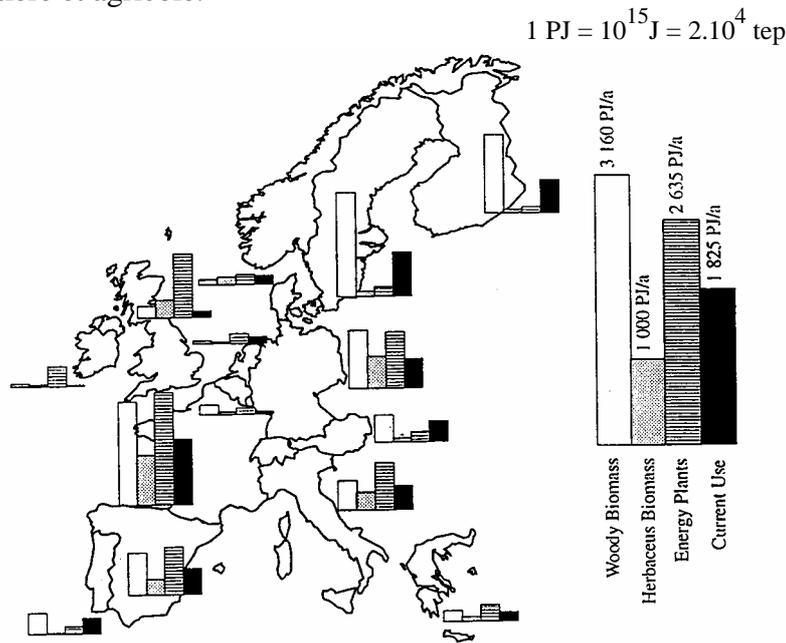


Figure 2

DISTRIBUTION OF UNUSED POTENTIALS OF WOOD, STRAW, AND ENERGY PLANTS, AND THE TOTAL AMOUNT OF ALREADY USED BIOMASS IN EUROPE

SOURCE : Biomass gasification in EUROPE. EUR 18224 EN – ISBN 92.828. 4157 – X (1998)

Par rapport à une consommation courante de 1825.10¹⁵ J/an (38 Mtep), la capacité totale de production est estimée à 8625.10¹⁵ J/an (180 Mtep), ce qui, avec une progression d'un facteur voisin de 5, permettrait de couvrir 12% des besoins d'énergie primaire de la communauté.

La même figure 2 montre, par ailleurs, que la France est le pays européen qui possède la ressource la plus importante, avec une part prépondérante du gisement agricole par rapport à un gisement forestier déjà important et équivalent à celui de la Suède ou de la Finlande.

Pour la France, la biomasse la plus abondante est constituée des plantes lignocellulosiques dont on peut distinguer trois origines principales, (voir figure 3):

- 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.

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.
- -
- -
- -

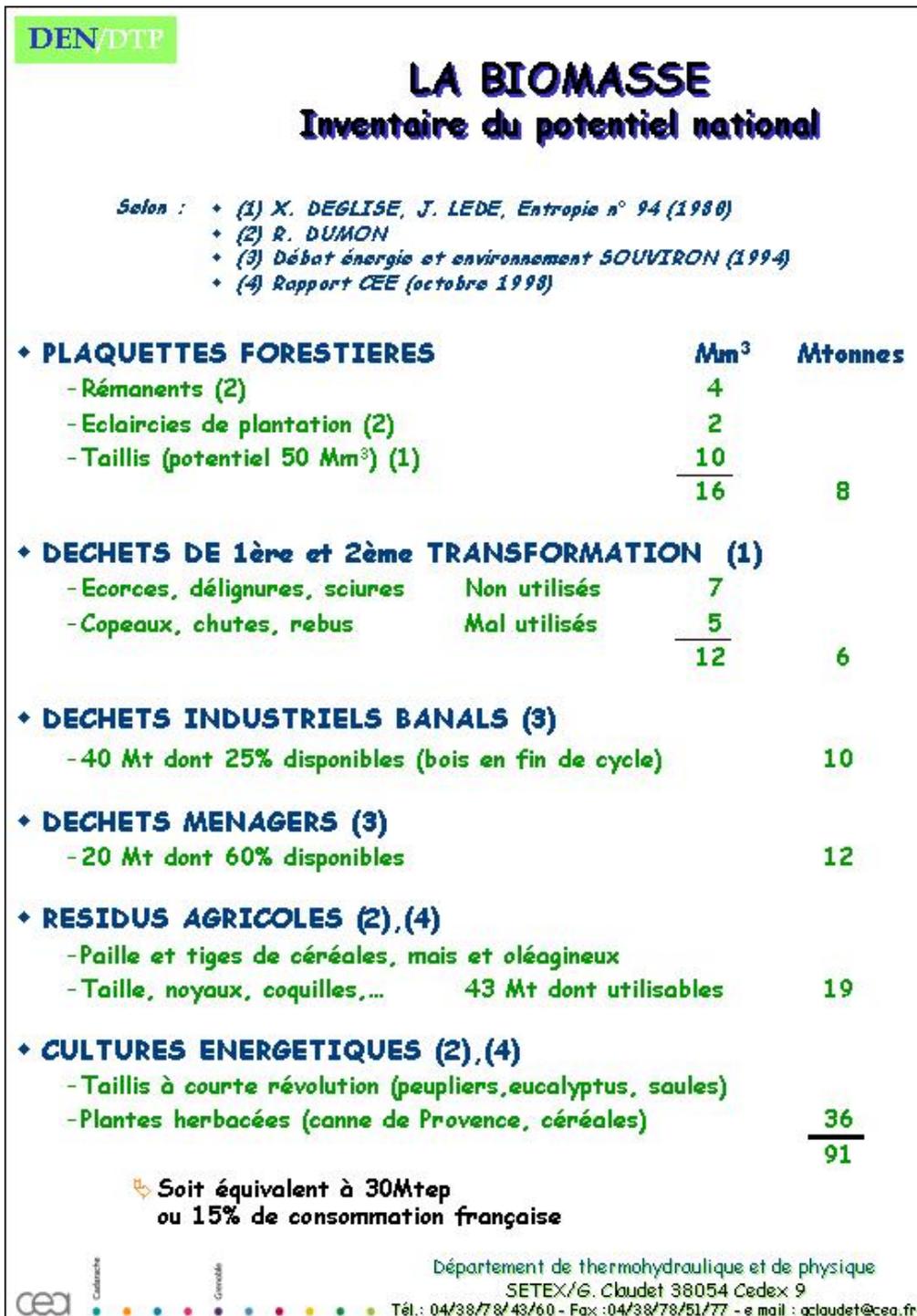


Figure Erreur ! Signet non défini.

On estime que, pour la France métropolitaine, la ressource de biomasse lignocellulosique mobilisable est la plus importante parmi les pays européens et pourrait fournir 14% (30 Mtep/an) de la consommation actuelle d'énergie primaire.

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 FILIERES DE VALORISATION ENERGETIQUE 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 $C_6 H_9 O_5$, fonction du degré hygrométrique.

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

- La plus courante, la combustion (ou l'incinération) produit essentiellement de la chaleur à un niveau de température qui est limité, vers $650^{\circ}C$, 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 à la valorisation des produits saccharifères, contenant du sucre comme la betterave ou la canne à sucre, ou amylicés, 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 de l'opération 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

Sur le plan du bilan énergétique, cette filière est relativement comparable à la voie, conduisant à la préparation du "diester", qui utilise l'huile des plantes oléagineuses pour produire l'Esther Méthylque d'Huile Végétale (EMHV).

L'EMHV nécessite une estérification réalisée en utilisant du méthanol, actuellement, d'origine fossile.

Avec l'éthanol, de blé ou de betterave, on produit l'Ethyl-Tertio-Buthyl-Ether (ETBE) en incorporant 53 % d'isobutylène résultant des coupes pétrolières.

Dans les deux cas, seule une fraction, de l'ordre de 50% de la plante, est utilisée pour la production de carburant.

- 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, mais peut aussi être appliquée aux plantes citées précédemment, comme les céréales ou les oléagineux, en utilisant la plante entière.

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.

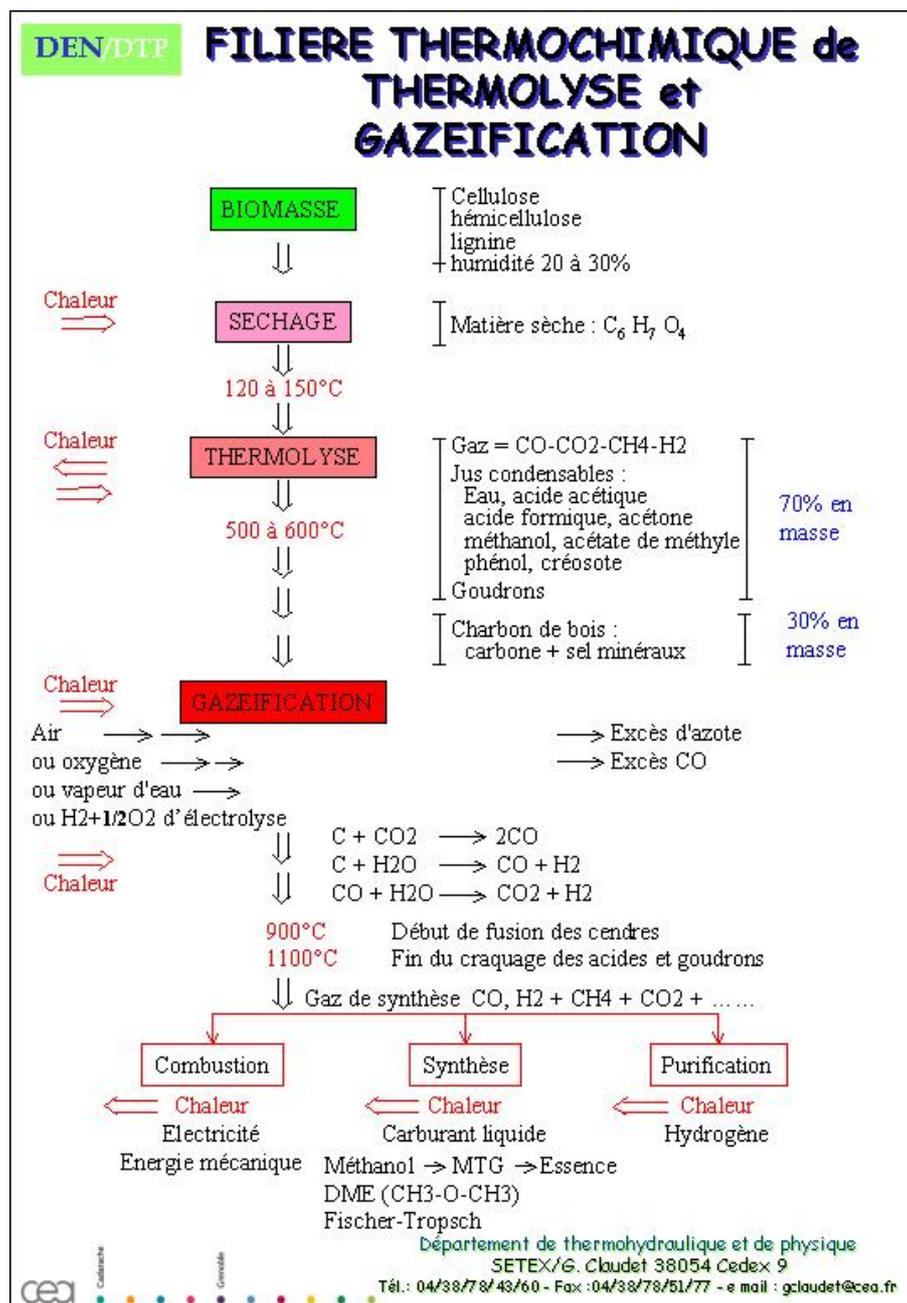


Figure Erreur ! Signet non défini.

Filière thermochimique de thermolyse et gazéification

Comme illustré sur la figure 4 la transformation thermochimique de la biomasse comporte une succession d'opérations qui nécessitent le transfert de grandes quantités de chaleur, simultanément au contrôle de la proportion et du temps de contact des réactifs en présence (Voir figure 4).

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 1000°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 1000 à 1100°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 1000°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 (voir chapitre **).

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.

Coûts de production estimés de l'hydrogène renouvelable

- Selon référence : M.K. Mann, P.L. Spath, W.A. Amos. NREL
Technoeconomic analysis of different options for the production of hydrogen from sunlight, wind and biomass
Proceedings of the 1998 U.S.DOE hydrogen program review
NREL/CP-570-25315
- Ordres de grandeurs :
16J = 277.8 kWh
1 litre essence ordinaire = 31.35 MJ = 8.71kWh
Production H₂ ex biomasse = 70 kg/t matière sèche
Rendement énergétique biomasse avec valorisation chaleur = 79.2 %

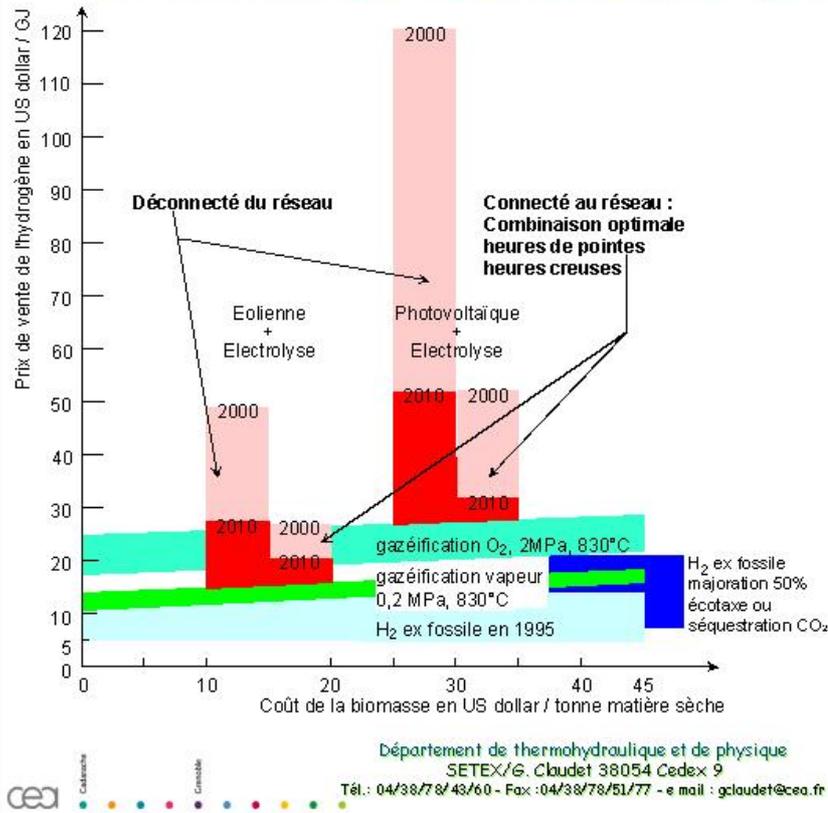


Figure Erreur ! Signet non défini.

Coûts de la production d'hydrogène par les énergies renouvelables

C'est bien en le retirant de la biomasse que l'ensemble de ces conditions seront le plus facilement satisfaites comme le montre la figure 5, construit à partir d'une étude faite par le "National Renewable Energy Laboratory" aux Etats-Unis.

Cette étude (Mann 1998) montre que l'hydrogène extrait de la biomasse est seul capable de concurrencer le réformage à la vapeur du gaz naturel:

- La gazéification à la vapeur est la voie la plus prometteuse pour devenir compétitive dès que le coût des énergies fossiles sera révisé à la hausse soit en fonction de leur raréfaction soit pour tenir compte de leur impact sur l'environnement.
- Les filières, basées sur l'électrolyse de l'eau, à partir d'électricité renouvelable, ne peuvent atteindre leur optimum économique qu'en étant couplées au réseau pour bénéficier des effets tarifaires correspondant aux "heures creuses" et "heures de pointe".
- Même dans ces conditions, elles conduisent à un coût de production de l'hydrogène nettement supérieur à celui que l'on peut extraire de la biomasse.

DES THEMES DE RECHERCHE BIEN ORIENTES OUVERT UN NOUVEL ESSOR POUR L'AGRICULTURE ET LA FORÊT:

En face d'une perspective aussi prometteuse et compte tenu des directives européennes qui ne se limitent plus à promouvoir la seule production d'électricité et de chaleur par voie renouvelable, mais qui, désormais, marquent une incitation forte au développement des biocarburants, de nombreuses initiatives s'organisent, au niveau national d'abord puis, prochainement, dans le cadre européen du 6^{ème} Plan Communautaire de Recherche et Développement (PCRD).

Avec le soutien des ministères, notamment, de l'agriculture, de l'industrie, de l'environnement et de la recherche, un effort national se met en place et pourrait être organisé et coordonné sous l'égide de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME).

Il devrait concerner des organismes de recherche publique pluridisciplinaire et, notamment, le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) et l'Institut Français du Pétrole (IFP) ainsi que le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et les universités.

Des unités plus spécialisées comme l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) ou le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) y seront associés au même titre que les industriels susceptibles soit de construire ou d'exploiter les unités de transformation, soit de contribuer à la mobilisation de la ressource.

Il s'agit de s'engager, résolument, dans la recherche et le développement des "Nouvelles Technologies de l'Energie" destinées à procurer à l'humanité les moyens de poursuivre son évolution en disposant des sources d'énergie, propres et renouvelables, qui conditionneront son développement durable dès les prochaines décennies.

Dans le domaine de l'énergie et des biocarburants, deux axes complémentaires de travaux ont été programmés et sont conduits en partenariat entre les organismes de recherche et l'industrie:

- Les piles à combustible, qui fonctionnent déjà de façon satisfaisante mais 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 thermochimique de la biomasse est une voie 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).

La 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 des 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.

Illustrations jointes:

Figure 1: 1.1 La biomasse dans le monde, 1.2 La biomasse en Europe.

Encadré 1 : Inventaire du potentiel national.

Encadré 2 : Filière thermo-chimique de thermolyse et gazéification.

Encadré 3 : Coûts de production estimés de l'hydrogène renouvelable.

Références:

Ph. Chartier, S.Mériaux.

L'énergie de la biomasse. La Recherche N° 113. Juillet, Août 1980 –pp 766, 776.

B. Dessus.

Atlas des énergies pour un monde vivable. Syros. 1994. ISBN: 2 86738 995 X.

M.Kaltschmitt, C.Rösch, L.Dinkelbach.

Biomass gasification in Europe. EUR 18224 EN. ISBN 92.828.4157-X (1998).

M.K. Mann, P.L. Spath, W.A. Amos.

Technoeconomic analysis of different options for the production of hydrogen from sunlight, wind and biomass.

Proceedings of the 1998 US.DOE Hydrogen Program Review. NREL/CP-570-25315.

CLEFS CEA N°44. Hiver 2000-2001. Nouvelles technologies de l'Energie. ISSN 0298-6248.