



Produire du carburant par transformation thermochimique de la biomasse

Les compétences en thermohydraulique et en thermochimie, ainsi que dans la conduite et l'optimisation des procédés, acquises par les chercheurs du CEA peuvent être déterminantes pour assurer le développement des technologies nécessaires à la transformation thermochimique de la biomasse.



Artechnique/CEA

Analyse des gaz produits en sortie du réacteur expérimental, au CEA/Grenoble, d'étude de la gazéification à la vapeur de la biomasse sur lit fluidisé à haute température (entre 800 et 1 000 °C) pour la production de gaz de synthèse et de biocarburants. Ce réacteur permet de caractériser le rendement, d'acquérir des connaissances sur la conduite et le contrôle de ce type de dispositif et de tester des composants technologiques (alimentation en biomasse et filtration).

Au moment où la société industrielle commence à entrevoir la fin du pétrole relativement bon marché et où une prise de conscience collective se manifeste en faveur de la lutte contre l'**effet de serre** (encadré B, *Effet de serre et CO₂*, p. 20), l'utilisation de la **biomasse** et des déchets comme source d'énergie ou pour la fourniture d'**hydrogène** et de **biocarburants** constitue une alternative particulièrement attrayante et un enjeu majeur pour l'avenir. Les compétences disponibles au CEA dans les domaines de la **thermohydraulique**, de la **thermochimie** ainsi que de la conduite et de l'optimisation des procédés sont des atouts déterminants pour assurer le développement et le transfert à l'industrie des technologies requises.

Les enjeux

La biomasse est constituée de tous les végétaux qui se développent à la surface de la Terre. Elle effectue le captage et le stockage de l'énergie solaire qu'il est ensuite possible de restituer sous forme de **combustibles** ou de **carburants**, sans impact sur l'effet de serre, par des transformations plus ou moins efficaces aux plans énergétique et économique. Quatre voies principales sont envisageables :

La première, la **combustion** (ou l'incinération), produit essentiellement de la chaleur à un niveau de température limité, autour de 650 °C, par la présence dans

les fumées de l'azote introduit avec l'air et de vapeurs acides ou de goudrons⁽¹⁾ 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 conduit qu'à 30 % d'électricité et 70 % de chaleur, laquelle est un complément économiquement difficile à valoriser.

La deuxième voie 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 compliquée et restreinte 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 sucre) 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, de l'**éthanol** est obtenu par **distillation**. Le rendement global est pénalisé par la consommation élevée d'énergie associée à la culture des plantes et à l'opération de distillation.

(1) Goudrons : huileux, visqueux et de couleur brune ou noire, les goudrons sont des sous-produits de la distillation ou de la carbonisation de la houille ou du bois.

La *transformation thermochimique*, enfin, qui conduit à la gazéification des substances organiques et végétales, convient particulièrement bien à la valorisation des produits lignocellulosiques⁽²⁾ comme le bois ou les pailles. C'est cette filière qui présente le plus fort potentiel énergétique pour la fabrication de carburants. Pour la France métropolitaine, la ressource de biomasse lignocellulosique mobilisable pourrait fournir jusqu'à 10 % (20 Mtep/an) de la consommation actuelle d'énergie primaire. La ressource mobilisable comprend pour une partie des produits forestiers, mais aussi des produits agricoles, des cultures énergétiques dédiées et certains déchets (industriels banals, ménagers). Cela nécessiterait de récolter les résidus de l'exploitation forestière (rémanents) et d'exploiter les taillis aujourd'hui abandonnés et qui nuisent à la productivité des forêts. Il faudrait, par ailleurs, collecter les résidus agricoles (pailles) qui, pour l'instant, sont éliminés dans des proportions inutilement élevées, par enfouissement dans le sol. Il s'agirait encore d'imaginer la bonne façon de tirer profit des 15 % de la surface agricole inutilisés pour les productions alimentaires, en y cultivant des plantations énergétiques herbacées ou lignocellulosiques adaptées au type de terrain et au climat. Il serait enfin important d'améliorer la qualité du tri, pour mieux assurer la valorisation de la biomasse qui, en fin de cycle, revient sous forme de déchets (bois, papiers, cartons...). Ce double enjeu de production de carburants propres et de valorisation énergétique des déchets constitue un réel défi pour la société dans les prochaines décennies. Cela explique que le CEA ait jugé nécessaire d'engager ses compétences pour contribuer à la recherche des solutions les mieux adaptées (encadré 1).

Des verrous technologiques

Les verrous technologiques se situent à différents niveaux. La gazéification de la biomasse, ainsi d'ailleurs que celle du charbon, n'est pas une possibilité récente. Elle a notamment été pratiquée avant et pendant la Deuxième Guerre mondiale afin de compenser la pénurie des produits pétroliers. Mais elle a été abandonnée, dès que les carburants d'origine fossile sont redevenus disponibles à faible prix. Ce n'est donc pas la faisabilité de la gazéification qu'il s'agit aujourd'hui de démontrer mais plutôt l'amélioration de sa fiabilité et la progression de sa rentabilité économique, en s'appuyant sur de nouvelles bases qui sont la fin du pétrole relativement bon marché, la prise en compte de la lutte contre l'effet de serre et la nécessité de créer des emplois, en milieu rural particulièrement. Parmi les verrous sur lesquels les compétences du CEA peuvent s'exercer, trois apparaissent essentiels. Ils conditionnent le coût de fonctionnement d'une installation ou mettent en cause sa fiabilité. Le premier concerne le *prix de la matière première*, fortement influencé par les difficultés de collectage, de stockage et de transport dans les milieux agricoles et forestiers. Pour abaisser les coûts, il est possible de

(2) Produits lignocellulosiques : formés de lignine et de cellulose. La lignine est une substance organique complexe, constituant principal du bois, qui imprègne les cellules, les fibres et les vaisseaux conducteurs, les rendant imperméables, inextensibles et rigides. La cellulose est un produit macromoléculaire du groupe des glucides, polymère du glucose, composant essentiel et caractéristique de la paroi des cellules végétales.

Un réseau de collaborations étendu

1

Tout au long du programme, des collaborations seront établies avec un réseau étendu de partenaires nationaux ou européens. Dans le domaine des connaissances de base, des relations sont engagées avec plusieurs groupes de recherche publique et universitaire. L'analyse des goudrons est réalisée avec le Greca (Groupe de recherche sur l'environnement et la chimie atmosphérique) de l'Université Joseph Fourier de Grenoble. D'autres aspects sont abordés avec des unités du CNRS (pyrolyse et gazéification avec l'École des mines d'Albi, modélisation des lits fluidisés avec le Laboratoire de génie des procédés catalytiques de Lyon). Des industriels, susceptibles à terme de construire des installations, sont invités dès l'origine à apporter leur contribution dans la mise en place et le déroulement des programmes. Pour la prospection et la mise à disposition des ressources, les agriculteurs regroupés sous l'égide de l'Association générale des producteurs de blé (AGPB) et l'Institut technique des céréales et fourrages (ARVALIS) sont impliqués (voir "Point de Vue"). Enfin, pour ce qui concerne les ressources lignocellulosiques, les services dépendant du ministère de l'Agriculture et de la Forêt sont concernés au même titre que les grandes scieries. Des relations sont également engagées au niveau international, en particulier avec des industriels et des universitaires du Danemark, pays qui conduit une politique très volontariste dans le domaine des énergies renouvelables. Notons également une coopération avec le Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement).

relâcher les contraintes sur la nature et l'homogénéité des matériaux, notamment en acceptant de traiter simultanément de la biomasse "propre" et d'autre part, des déchets dont l'élimination est rentable. Il faut pour cela développer des technologies suffisamment flexibles et disposer d'une connaissance précise du comportement thermique et chimique des matières à transformer.

Le deuxième verrou tient à l'efficacité de la transformation, qui fixe la quantité de matière à utiliser pour produire une quantité d'énergie donnée. L'optimisation du fonctionnement des installations nécessite des travaux expérimentaux permettant d'établir et de qualifier une modélisation de l'ensemble du procédé, qui aidera ultérieurement à la conception et au contrôle du fonctionnement d'unités performantes. Trois opérations essentielles doivent, dans ce but, être étudiées et analysées séparément (encadré 2) : la *thermolyse*, la *gazéification* et l'*élimination des goudrons et cendres*. C'est au prix d'une analyse fine et détaillée des différents matériaux utilisables et des multiples opérations thermochimiques à exécuter qu'il sera possible de concevoir les technologies adaptées puis d'optimiser et de contrôler les usines de gazéification qui permettront de produire les carburants renouvelables de demain.

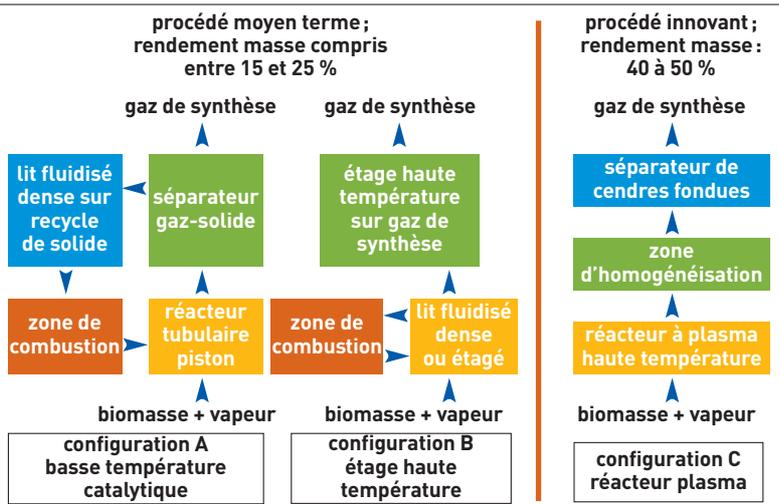


Figure 1. Procédés de gazéification de biomasse retenus en fin de l'étude menée par le CEA et l'IFP.

Un choix de procédés en collaboration avec l'IFP

Dans le cadre d'une collaboration engagée avec l'IFP en 2002, une analyse exhaustive des procédés existants a été faite et a débouché sur la proposition de procédés (figure 1) :

- un procédé pouvant être réalisé à court terme (environ dix ans) basé sur une technologie **lit fluidisé** à basse pression. L'énergie nécessaire à la transformation est produite par combustion d'une partie de la biomasse. Cette technologie permet d'obtenir un rendement masse⁽³⁾ de carburant de l'ordre de 15 %. Si l'on y ajoute un étage haute température, ce rendement pourra atteindre 20 à 25 %. Dans ce dernier cas, il faudra apporter de l'énergie de l'extérieur au niveau de l'étage haute température;

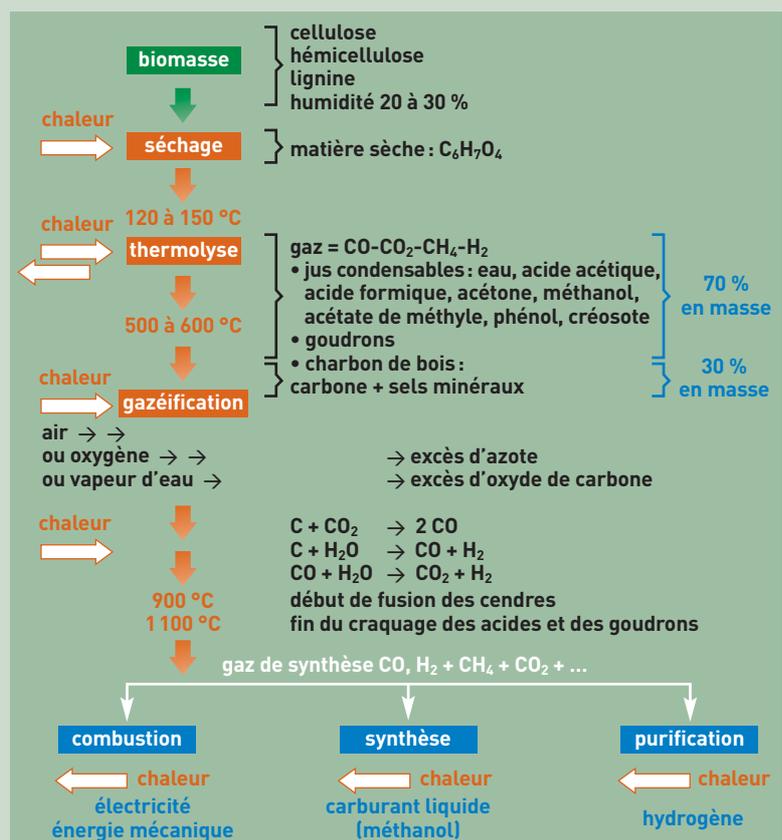
(3) Le rendement masse est défini ici comme la masse équivalente de pétrole produite par kg de biomasse sèche mise en entrée du procédé. Le rendement masse carburant se rapporte au carburant fabriqué selon ce procédé.

Une succession d'opérations lourdes et contrôlées

2

La filière thermo-chimique de **thermolyse** et de gazéification de la **biomasse** (figure) comporte une succession d'opérations qui nécessitent simultanément le transfert de grandes quantités de chaleur et le contrôle de la proportion et du temps de contact des réactifs en présence.

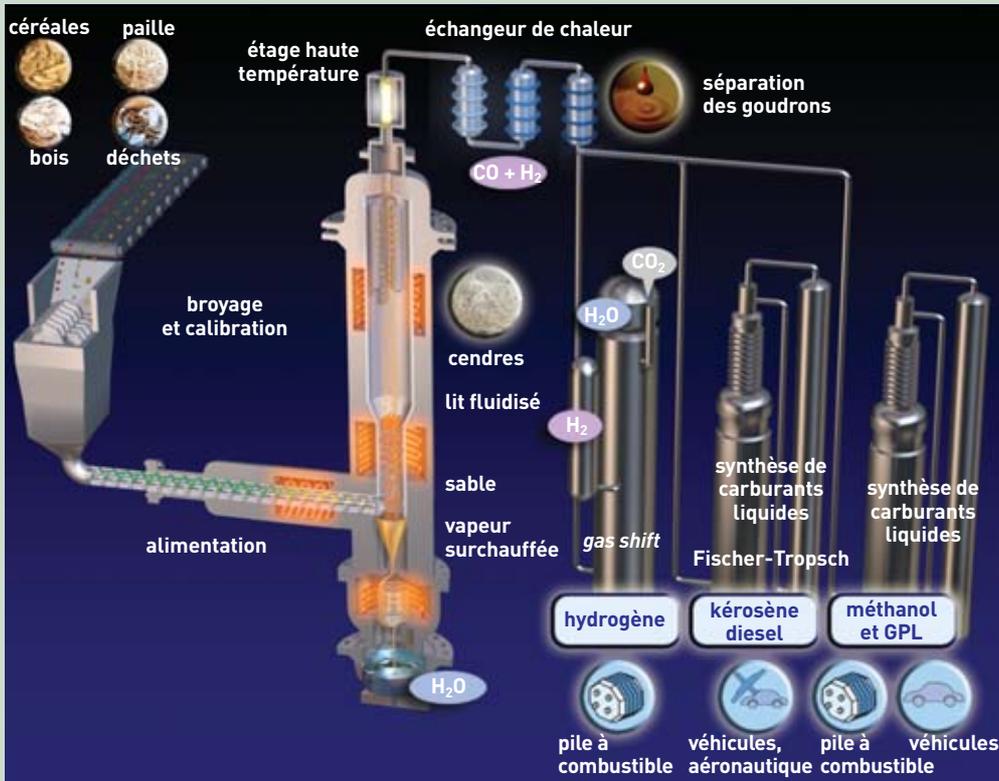
Après l'opération de séchage, très **endothermique**, la thermolyse consiste en la dégradation thermique des produits qui aux alentours de 600 °C ont perdu 70 % de leur masse devenue gazeuse alors que 30 % de la masse d'origine demeure solide et représente le charbon de bois, essentiellement constitué de carbone (C). La gazéification du carbone se poursuit jusqu'à vers 900 ou 1000 °C à l'aide d'un réactif comme l'air, l'oxygène (O₂) ou la vapeur d'eau (H₂O), qui réalise une oxydation plus ou moins complète du carbone en monoxyde de carbone (CO) ou en **gaz carbonique** (CO₂). L'utilisation d'air, à ce stade, est peu coûteuse mais introduit dans le produit final de l'azote indésirable. L'oxygène, provenant de la **distillation** de l'air, est cher et dangereux. L'utilisation d'oxygène ou d'air favorise la formation d'oxyde de carbone. Avec la vapeur d'eau en tant que réactif, une quantité supplémentaire d'**hydrogène** (H₂) est récupérée. Toutefois, un moyen de chauffage annexe doit être employé, par exemple par combustion de carbone ou de gaz de purge résiduels ou encore un apport d'énergie externe. L'obtention d'un gaz de bonne qualité et non corrosif nécessite l'élimination des acides et des goudrons résultant de la thermolyse. Il faut pour cela porter ces produits aux environs de 1200 ou 1300 °C (étage haute température) afin de réaliser leur dégradation thermique (**craquage**) ou effectuer vers 800 à 900 °C une réaction **catalysée** qui permet d'éviter la fusion des cendres et la création de mâchefers⁽¹⁾ constatées entre 900 et 1000 °C. L'utilisation d'un étage haute température permet aussi de réaliser simultanément le **réformage** du **méthane** (CH₄) résiduel en CO et H₂. Le gaz obtenu 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** (diesels



Fischer-Tropsch, **méthanol**, **diméthyl-éther**...) utilisables directement comme **carburant** liquide, **combustible** ou **vecteur d'énergie** ou encore matière première chimique. Il est possible, enfin, de raffiner le gaz de biomasse pour en extraire l'hydrogène qui deviendra par cette filière le combustible propre et renouvelable dont les **piles à combustible** auront besoin.

Il est important de remarquer que la même quantité de gaz carbonique est émise par oxydation lente du bois abandonné à l'air libre (poussissement) ou par oxydation rapide lors d'une (bonne) combustion génératrice d'énergie. Cette quantité de gaz carbonique étant celle que la plante a utilisée pour sa croissance, il en résulte une parfaite neutralité pour l'environnement et l'impact sur l'**effet de serre**.

(1) Mâchefer: résidu de combustion, notamment de la houille et du bois, résultant de la fusion et de la solidification des sels minéraux qui composent les cendres.



CEA/www.numicom.com

Le procédé thermo-chimique à lit fluidisé de transformation de la biomasse en carburant étudié au CEA/Grenoble.

Dans un réacteur à **lit fluidisé**, la gazéification à la vapeur des résidus solides de la **thermo-lyse**, essentiellement du carbone (C) et 5 à 10 % de sels minéraux, s'effectue vers 800 à 900 °C dans des conditions bien contrôlées d'homogénéité de température et de concentration des réactifs. La réaction **endothermique**, dite du gaz à l'eau, entre le carbone et la vapeur d'eau H₂O produit un mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'**hydrogène** (H₂), appelé **gaz de synthèse**. La chaleur de réaction est fournie par un fluide caloporteur mis en circulation à co- ou à contre-courant entre le réacteur de gazéification, où il est dispersé pour réaliser un apport de chaleur homogène, et un four de chauffage à lit entraîné, où il est porté à environ 900 °C par combustion

à l'air de résidus extraits du procédé (poussières et particules solides non gazéifiées ou gaz de purge comme, par exemple, du monoxyde de carbone en excès ou du **méthane**). La température maximale de 900 °C permet d'éviter la fusion des cendres et la formation des mâchefers⁽¹⁾ qui risqueraient d'entraver les mouvements des particules. Le choix en tant que caloporteur d'un matériau riche en calcium et en magnésium, tel le sable de dolomite, procure un effet bénéfique de **catalyse** des réactions de gazéification et d'élimination des goudrons⁽¹⁾, ainsi produites soit en un temps plus court, soit à des températures plus basses.

(1) Voir note encadré 2.

• un procédé nécessitant des développements technologiques plus importants, basé sur une technologie de four plasma ou arc. L'énergie nécessaire serait alors entièrement apportée de l'extérieur. On peut alors obtenir des rendements masse élevés, compris entre 30 et 40 %.

Sur la base d'un inventaire de biomasse annuellement renouvelable de l'ordre de 50 millions de tonnes, ce dernier procédé permettrait de produire l'équivalent de 15 à 20 Mtep, soit de 30 à 40 % des carburants pour le transport consommés en France et produits à partir de pétrole importé. Dans une certaine limite on peut utiliser un appoint d'énergie fossile, mais lorsqu'il s'agit de doubler le rendement masse, l'énergie extérieure apportée ne peut, bien sûr, pas être d'origine fossile. La seule énergie massivement disponible et ne donnant pas lieu à l'effet de serre est l'énergie nucléaire.

Les coûts de production estimés varient de 0,40 € à 0,70 €/litre équivalent diesel, selon le procédé retenu, la taille des installations, le coût de la matière première et celui de l'énergie additionnelle nécessaire.

Des compétences dans les domaines essentiels

Le CEA et l'IFP disposent de compétences et de moyens expérimentaux dans les domaines essentiels que sont le traitement thermique des matériaux et des déchets végétaux ou organiques ainsi que la conception, la modélisation et l'optimisation d'unités et de procédés industriels mettant en œuvre la chimie, la thermique et la thermohydraulique.

Depuis la mi-2001, des campagnes de caractérisation sont menées sur le site de Cadarache. Dans un premier



temps, elles ont porté sur la thermolyse de bois, de paille ou de grains de céréales mais aussi de farines animales et de boues de stations d'épuration des eaux urbaines ou encore de papiers et de cartons ou autres résidus non recyclables. Les équipes en charge de l'étude des réacteurs nucléaires mobilisent pour leur part, sur le site de Grenoble, en collaboration avec les équipes de l'IFP installées à Solaize, leur compétence dans l'analyse et la modélisation des processus thermiques et thermohydrauliques, afin d'améliorer la compréhension et la connaissance des procédés de base, tels que la gazéification en lit fluidisé (encadré 3) et à la vapeur des résidus carbonés.

Une source d'hydrogène abondante pour les piles à combustible

Trois objectifs principaux ont été fixés pour les prochaines années. Le premier concerne l'étude et la maîtrise du composant clé que constitue le *réacteur à lit fluidisé* ou à *plasma*. Le deuxième, plus global, a pour objet la *modélisation de l'ensemble du procédé* dans le but de se doter d'outils pouvant servir à la fois d'aide à la décision quant aux choix des produits à gazéifier, ou de moyens de conception ou d'optimisation des futures installations. Le troisième sera de démontrer la faisabilité des procédés sur une *plate-forme expérimentale* permettant de transformer quelques centaines de kilogrammes de biomasse par heure.

La biomasse, forme d'énergie solaire transformée, est capable de couvrir une part importante de la consommation énergétique d'un pays comme la France de manière durable ("Point de vue"). L'énergie nécessaire pour obtenir une **mole** d'hydrogène à partir de biomasse est de l'ordre de 60 kJ. Cette énergie est comparable à celle nécessaire pour le **vaporeformage** du méthane (~ 40 kJ) et est très inférieure à l'énergie nécessaire pour dissocier une molécule d'eau en hydrogène et oxygène (~ 280 kJ). La biomasse constitue donc une source intéressante pour la production d'hydrogène. Le CEA participe au projet *Green Fuel Cell* de l'Union européenne et testera, dans ce cadre, la possibilité d'utilisation d'un **gaz de synthèse** issu de la biomasse pour alimenter une **pile à combustible** SOFC.

> Gérard Claudet

Conseiller scientifique
Direction de l'énergie nucléaire
CEA centre de Grenoble

> Éric Marty

Responsable du pôle biomasse
Division développements
IFP Lyon (Rhône)

> Jean-Marie Seiler

Directeur de Recherche au CEA
Direction de l'énergie nucléaire
CEA centre de Grenoble

Point de vue

Une chance historique aux yeux des producteurs de blé

Produire des carburants à partir de la biomasse agricole constitue "une chance historique", estime l'Association générale des producteurs de blé (AGPB).

Le domaine agricole français dispose actuellement d'une réserve de terres "au repos" de 1,5 million d'hectares. Cette superficie pourrait doubler dans les cinq ans malgré l'inflation des surfaces urbanisées et autres emprises croissantes étrangères à la production de biomasse, estime l'Association générale des producteurs de blé (AGPB). Pour Pierre Gatel, chargé de mission à l'AGPB, « le développement d'applications énergétiques de la biomasse agricole est actuellement limité. À terme de cinq années, cultiver ces terres de façon raisonnée permettrait de passer d'une couverture en **biocarburants** de moins de 1% en 2003 à 5,75% de la consommation d'énergie pour le transport ». Cet objectif est celui proposé par les gouvernements européens dans le cadre de deux directives européennes dont la première, en faveur de la promotion des biocarburants, est déjà adoptée, et la seconde, relative à leur fiscalité spécifique, en voie de l'être. « De tous les carburants alternatifs (GPL, GNV,

électricité, etc.), les biocarburants sont de ceux qui reçoivent, par unité d'énergie consommée, le soutien public le plus bas », ajoute l'AGPB, pour qui « l'éthanol utilisé sous forme d'**ETBE** carburant supporte en 2003, par gigajoule, une fiscalité comparable à celle du gazole ; soit plus de 4 fois celle du GPL ou du gaz naturel véhicule. » Pour Pierre Gatel, « les motivations qui ont fait "bouger" l'Europe sur les biocarburants sont de deux ordres : la lutte contre le changement climatique et la recherche d'une moindre dépendance. Les mêmes motivations interviennent maintenant dans le choix d'une nouvelle politique nationale favorisant la transformation des ressources renouvelables d'origine locale. Cette option est d'une part nécessaire pour la mise en œuvre de carburants renouvelables à usage immédiat. D'autre part, dans une perspective de choix ciblés de recherche pour améliorer l'efficacité économique d'une production de biocomposants utilisables en carburant, il importe de donner la priorité à une orientation dont les travaux

en cours du CEA, de l'IFP et d'Arvalis-l'Institut du Végétal sont la première étape concrète. L'existence d'une agriculture aux ressources facilement accessibles, apte à répondre de façon souple à la double demande alimentaire et énergétique, est une opportunité relativement récente. Cette chance est renforcée par la disponibilité, également immédiate, des collaborations et compétences pluridisciplinaires (génétique, agronomie, énergétique...) qu'exige cette valorisation de la biomasse. Il est donc à souhaiter que les voies de recherche innovantes comme celles qu'explore le CEA soient en mesure de séduire les décideurs. Elles permettront de sortir très progressivement de la dépendance absolue des importations pétrolières en matière de transport. Le faire en alliant la lutte contre l'effet de serre à la valorisation du sol national est une opportunité historique, comme a pu l'être il y a 40 ans celle qui a conduit le pays à développer son programme électronucléaire et débouché, déjà, sur d'avantage d'indépendance. »

A L'énergie dans tous ses états

« Rien ne se perd, rien ne se crée », écrivait en son temps Lavoisier, père de la chimie moderne. Cet adage vrai pour les espèces chimiques l'est tout aussi pour l'énergie. En effet, l'énergie est une entité multiforme qui peut se transformer sous de très divers aspects. Toutefois, les **énergies primaires** directement accessibles dans la nature sont en nombre limité : ce sont les **énergies fossiles** (charbon, pétrole, gaz), l'**énergie nucléaire** et les **énergies renouvelables** (hydraulique, biomasse, solaire, éolien, géothermie, énergie des marées). Ces énergies primaires constituent ce que l'on appelle le *mix* ou le *bouquet énergétique* (figure 1).

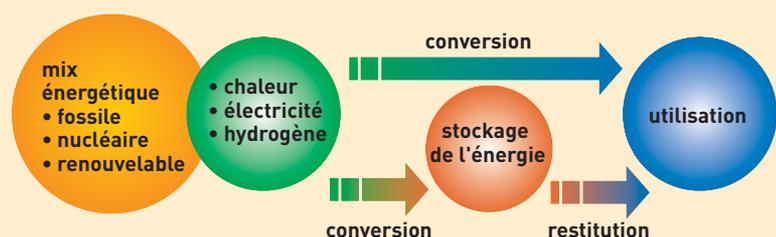


Figure 1. Le schéma énergétique.

Pour la plupart des applications, il est nécessaire de **convertir** l'énergie afin de la rendre compatible avec l'usage envisagé. Bien évidemment la nature, très ingénieuse, a mis au point les tout premiers **convertisseurs énergétiques** que sont les êtres vivants. Les plantes, par la **photosynthèse**, assurent la conversion de l'énergie rayonnante de la lumière en énergie chimique. Le corps humain lui-même permet, en particulier, de convertir l'énergie chimique en énergie mécanique *via* le système musculaire. Par la suite, l'homme a inventé de très nombreux convertisseurs (figure 2). Le premier en date est tout simplement le feu qui convertit de l'énergie chimique (combustion) en lumière et chaleur. Plus récemment un poste de télévision assure la conversion de l'électricité en énergies lumineuse (images) et mécanique (sons). En fait, de nombreux systèmes énergétiques sont l'association de plusieurs convertisseurs, comme par exemple une centrale nucléaire qui réalise la conversion de l'énergie nucléaire en énergie thermique (réacteur) puis en énergie mécanique (turbine) et enfin en énergie électrique (alternateur). Malheureusement, le **second principe de la thermodynamique** nous enseigne que toute transformation de l'énergie a

un coût : une partie plus ou moins importante de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur inutilisable (le frottement dans un système mécanique par exemple). Dans le cas d'une centrale nucléaire de la génération actuelle, l'énergie électrique produite ne représente qu'environ un tiers de l'énergie nucléaire initiale contenue au sein du combustible. Mais il serait bien évidemment trop simple que l'énergie puisse être consommée au fur et à mesure sur le lieu même de sa production. Dans de très nombreux cas, les sites de consommation de l'énergie peuvent être très éloignés du site de production, cette dernière et la demande correspondante n'étant

pas de plus toujours concomitantes (électricité photovoltaïque la nuit, par exemple). Une bonne gestion de l'énergie demande donc la mise en place à la fois d'un **réseau de distribution** et de capacités de **stockage de l'énergie**. Le **transport de l'énergie** est assuré par l'intermédiaire d'un **vecteur éner-**

gétique. À l'heure actuelle, les deux principaux vecteurs sont l'**électricité** et la **chaleur**. Mais demain un nouveau vecteur pourrait devenir prépondérant : l'**hydrogène** qui serait converti en électricité et chaleur grâce aux **piles à combustible**.

Enfin, pour que l'énergie puisse être disponible à tout moment il est indispensable de pouvoir la stocker : la "mettre en conserve" pourrait-on dire. Ce **stockage** peut se décliner sous diverses formes. L'énergie peut être stockée sous forme **mécanique** (*énergie potentielle* dans le cas d'une retenue d'eau d'un barrage hydroélectrique ou *énergie cinétique* dans un volant d'inertie), **thermique** (ballon d'eau chaude), **chimique** (réservoir d'essence, piles et **accumulateurs**), voire **magnétique** (bobine **supraconductrice**).

La gestion de l'énergie est donc un art subtil qui associe production, transformation, transport et stockage. Dans le contexte actuel du débat énergétique, il apparaît de plus en plus évident que demain les réseaux énergétiques vont se développer et se multiplier selon une approche multimodale (gestion simultanée de plusieurs réseaux associant des sources d'énergies diversifiées). Les **nouvelles technologies de l'énergie** sont donc appelées à y jouer un rôle essentiel.

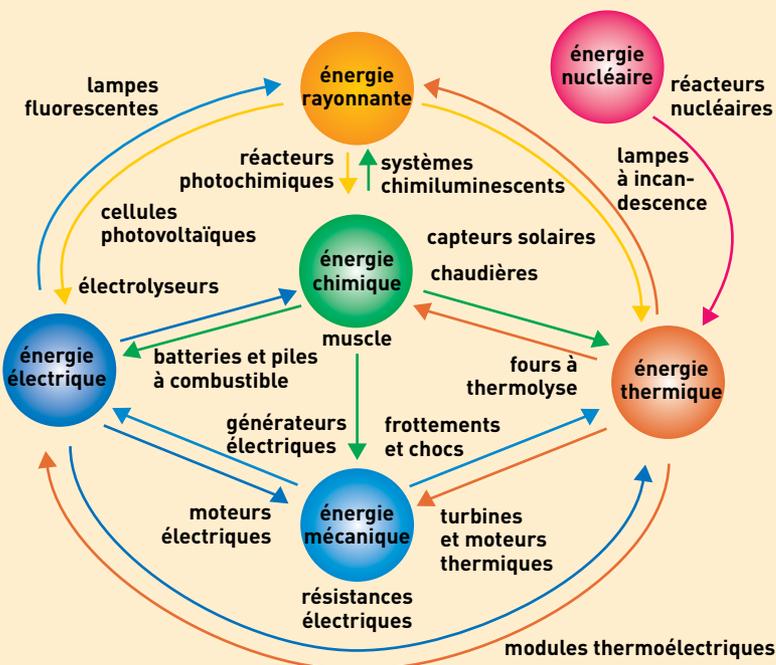


Figure 2. Conversions des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie.

B Effet de serre et CO₂

L'énergie solaire qui parvient au sol réchauffe la Terre et se transforme en **rayons infrarouges**. Comme les vitres d'une serre – d'où le nom donné à ce mécanisme – des gaz présents dans l'atmosphère piègent une partie de ces rayons qui tendent à la réchauffer. Ainsi, en termes de puissance, la Terre reçoit en moyenne un peu plus de 240 **watts/m²**. Sans **effet de serre**, la température moyenne sur la Terre serait de - 18 °C et peu d'eau serait sous forme liquide. Cet effet a donc une influence bénéfique puisqu'il permet à notre planète d'avoir une température moyenne de 15 °C.

Cependant, depuis le début de l'ère industrielle, soit plus d'une centaine d'années, l'homme a rejeté dans l'atmosphère des gaz (**gaz carbonique**, **méthane**, oxydes d'azote, etc.) qui augmentent artificiellement l'effet de serre. Depuis 1750, cette augmentation, pour ce qui est des gaz "bien mélangés", a été de 2,43 W/m². Avec un "forçage radiatif supplémentaire" de 1,46 W/m², le **gaz carbonique** (CO₂) compte pour plus de la moitié de cet "effet de serre additionnel", loin devant le méthane (0,48 W/m²), les **halocarbures** (chlorofluorocarbures **CFC**, hydrochlorofluorocarbures **HCFC** et hydrofluorocarbures **HFC**) avec 0,34 W/m² et le dioxyde d'azote avec 0,15 W/m². En outre, l'**ozone** troposphérique présente un forçage radiatif positif de 0,35 W/m² (mais on estime que l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique constaté entre 1979 et 2000 a entraîné un forçage radiatif négatif de 0,15 W/m²).

Cet ajout à l'effet de serre naturel (155 W/m²) est faible, correspondant à un accroissement de l'ordre de 1%. Néanmoins, il est presque certain qu'il

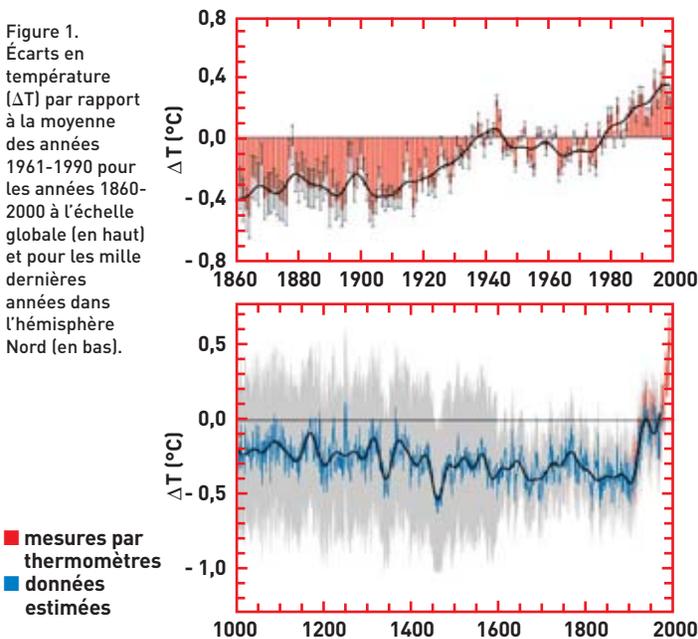
a contribué à l'augmentation de la température moyenne de notre planète d'environ 0,5 °C, observée au cours du vingtième siècle (**figure 1**). Si rien n'est fait pour réduire ces émissions, la concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère (**figure 2**) pourrait doubler d'ici 2100. À partir de la consommation mondiale actuelle⁽¹⁾ de combustibles **fossiles** (7700 Mtep), il est aisé de calculer la masse de CO₂ actuellement produite : 20 milliards de tonnes par an ! Cela pourrait conduire à une augmentation substantielle de l'effet de serre et mener, par des effets amplificateurs non linéaires, à de profondes altérations du climat. La plupart des modèles prévoient que le double de la concentration de gaz

carbonique actuelle conduirait, à la fin du vingt et unième siècle, à une élévation de la température de l'ordre de 2 à 3 °C. Certains donnent même une fourchette entre 1,5 et 4,5 °C, laissant prévoir des conséquences dramatiques sur l'environnement, comme la montée notable du niveau de la mer.

Ces chiffres peuvent sembler petits et n'avoir que de faibles conséquences sur le climat ; il n'en est rien. Pour s'en convaincre, il faut se rappeler que lors du "petit âge glaciaire", entre 1450 et 1880, la température moyenne ne s'est abaissée en France que de 1 °C en moyenne. Il y a 6 000 à 8 000 ans, alors que l'Europe occidentale a connu une période plus chaude avec une température moyenne supérieure de 2 °C à 3 °C à celle d'aujourd'hui, le Sahara n'était

(1) CEE DG XVII (1996), scénario "Sagesse traditionnelle".

Figure 1. Écarts en température (ΔT) par rapport à la moyenne des années 1961-1990 pour les années 1860-2000 à l'échelle globale (en haut) et pour les mille dernières années dans l'hémisphère Nord (en bas).



B (suite)

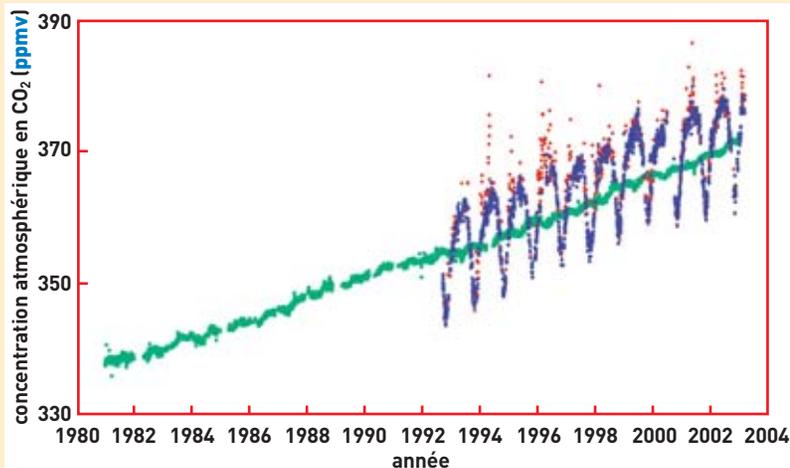


Figure 2.

Évolution de la concentration atmosphérique en CO₂ depuis 1980 telle qu'elle est mesurée quotidiennement par les stations automatiques du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), depuis 1981 sur l'île d'Amsterdam (Océan indien) et depuis 1992 à Mace Head sur la côte ouest de l'Irlande.

Les mesures de l'île d'Amsterdam (en vert), loin de toute perturbation anthropique directe, mettent essentiellement en évidence l'augmentation continue de la concentration. Le site de Mace Head mesure essentiellement l'air océanique (régime normal de vents d'ouest; mesures en bleu). Quand le régime des vents s'inverse, il reçoit une atmosphère continentale, avec un fort excès de CO₂ (mesures en rouge) par rapport à l'atmosphère océanique. À l'augmentation moyenne de la concentration de CO₂ se superpose une forte modulation saisonnière due au cycle végétatif (photosynthèse chlorophyllienne) des plantes, émetteur de CO₂ en hiver et absorbeur en été.

pas un désert mais le siège de pluies abondantes. C'est moins l'augmentation de la température qui est préoccupante que sa variation rapide (en un siècle). Les grandes variations déjà observées dans la nature se sont produites sur des échelles de temps beaucoup plus longues, au moins pour celles qui ont un caractère global. Ainsi, la dernière glaciation a duré 100 000 ans et la déglaciation correspondante 10 000 ans. La variation rapide que nous sommes en train de vivre peut induire des perturbations importantes et inattendues du climat et de l'écosystème, qui n'aura pas toujours le temps de s'adapter.

De Rio à Kyoto : les grandes conférences sur l'environnement

L'évolution de l'environnement global a suscité l'organisation d'importantes conférences, depuis la dernière décennie du vingtième siècle.

Au Sommet de la Terre de **Rio de Janeiro** (juin 1992) a été signée la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques qui adopta l'objectif d'une stabilisation des émissions de **gaz à effet de serre** (entrée en vigueur le 21 mars 1994).

À la conférence de Kyoto (décembre 1997) a été signé le protocole de réduction

globale des émissions de ces gaz, de 5,2% en moyenne en 2008-2012 par rapport à 1990, pour les pays de l'OCDE et les pays de l'Europe de l'Est (dont la Russie). Les objectifs de réduction pour l'Union européenne et la France sont de respectivement 8% et 0%. Les moyens de les atteindre ont été débattus sans succès en novembre 2000 à **La Haye**. Les conférences suivantes, tenues à **Marrakech** (2001), **Johannesbourg** (Sommet de la Terre en août-septembre 2002), **New-Delhi** (octobre 2002), **Moscou** (septembre-octobre 2003) et **Milan** (décembre 2003) n'ont pas permis la mise en application dès 2004 du **protocole de Kyoto**, enfin intervenue en 2005, grâce à sa récente ratification par la Russie. Sous l'impulsion du programme des Nations unies pour l'environnement (**PNUE**), les problèmes posés par les substances appauvrissant la couche d'ozone atmosphérique ont été traités à **Vienne** (1985) et surtout à **Montréal** (septembre 1987) où a été signé le protocole imposant une réduction de la production et de l'utilisation des chlorofluorocarbures

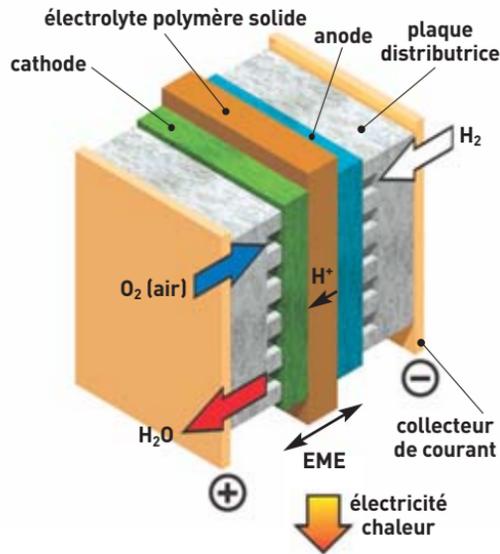


La station de mesure de Mace Head, en Irlande.

(CFC). Ce protocole a fait l'objet des amendements de **Londres** (1990), qui a imposé l'abandon des CFC au 1^{er} janvier 2000 et étendu la réglementation à d'autres produits (dont les HCFC), de **Copenhague** (1992), **Montréal** (1997) et **Pékin** (1999).

C

Comment fonctionne une pile à combustible ?



Principe de fonctionnement de la pile à combustible. Exemple de la pile à membrane échangeuse de protons. EME représente l'ensemble électrodes-membrane.

La pile à combustible repose sur un principe fort ancien, puisque c'est en 1839 que Sir William Grove construisit la première cellule électrochimique fonctionnant avec de l'**hydrogène** comme carburant, mettant ainsi en évidence la possibilité de produire du courant électrique par conversion directe de l'énergie chimique du **combustible**. La pile à combustible ayant la particularité d'utiliser deux gaz – l'hydrogène H_2 et l'oxygène O_2 – comme couple électrochimique, les réactions d'**oxydo-réduction** qui s'opèrent dans la pile sont donc particulièrement simples. La réaction se produit au sein d'une structure (la **cellule électrochimique élémentaire**) essentiellement composée de deux **électrodes** (l'**anode** et la **cathode**) séparées par un **électrolyte**, matériau permettant le passage des **ions**. Les électrodes mettent en jeu des **catalyseurs** pour activer d'un côté, la

réaction d'**oxydation** de l'hydrogène, et de l'autre côté, la réaction de **réduction** de l'oxygène.

Dans le cas d'une pile à électrolyte acide (ou pile à membrane échangeuse de **protons**), l'hydrogène de l'anode est dissocié en protons (ou ions hydrogène H^+) et en **électrons**, suivant la réaction d'oxydation : $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$. À la cathode, l'oxygène, les électrons et les protons se recombinent pour former de l'eau : $2 H^+ + 1/2 O_2 + 2 e^- \rightarrow H_2O$. Le principe de la pile à combustible est donc inverse à celui de l'**électrolyse** de l'eau. La tension thermodynamique d'une telle cellule électrochimique est de 1,23 volt (V). Toutefois, en pratique, la pile présente une différence de potentiel de l'ordre de 0,6 V pour des **densités de courant** de 0,6 à 0,8 A/cm². Le rendement d'une telle cellule est donc d'environ 50%, l'énergie dissipée l'étant bien évidemment sous forme de chaleur.

E Accumulateurs, piles et batteries : des performances en constante amélioration

Les **accumulateurs** et les **piles** sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie. Ceux-ci restituent sous forme d'énergie électrique, exprimée en wattheure (**Wh**), l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques. Ces réactions sont activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux **électrodes** baignant dans un **électrolyte** lorsqu'une charge, un moteur électrique par exemple, est branchée à ses bornes. L'accumulateur est basé sur un système électrochimique réversible. Il est rechargeable par opposition à une pile qui ne l'est pas. Le terme **batterie** est alors utilisé pour caractériser un assemblage de cellules élémentaires (en général rechargeables).

Un accumulateur, quelle que soit la technologie utilisée, est pour l'essentiel défini par trois grandeurs. Sa **densité d'énergie massique** (ou **volumique**), en wattheure par kilogramme, Wh/kg (ou en wattheure par litre, Wh/l), correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (ou de volume) d'accumulateur. Sa **densité de puissance massique**, en watt par kilogramme (W/kg), représente la puissance (énergie électrique fournie par unité de temps) que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur. Sa **cyclabilité**, exprimée en nombre de cycles⁽¹⁾, caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer un niveau d'énergie supérieur à 80 % de son énergie nominale, cette valeur étant la valeur la plus souvent demandée pour les applications portables.

Jusqu'à la fin des années quatre-vingt, les deux principales technologies répandues sur le marché étaient les accumulateurs au **plomb** (pour le démarrage de véhicules, l'alimentation de secours de centraux téléphoniques...) et les accumulateurs **nickel-cadmium** (outillage portable, jouets, éclairage de secours...). La technologie au plomb, connue plus communément sous

le nom de batterie au plomb, est également qualifiée de système au plomb-acide. En effet, les réactions chimiques mises en jeu impliquent l'oxyde de plomb constituant l'électrode positive (improprement appelée cathode) et le plomb de l'électrode négative (anode), toutes deux plongées dans une solution d'acide sulfurique qui constitue l'électrolyte. Ces réactions tendent à convertir le plomb et l'oxyde de plomb en sulfate de plomb, avec formation d'eau. Pour recharger la batterie, ces réactions doivent être inversées par la circulation d'un courant électrique imposé. Les inconvénients relevés sur la technologie au plomb (poids, fragilité, utilisation d'un liquide corrosif) ont conduit au développement d'accumulateurs alcalins, de plus grande capacité (quantité d'électricité restituée à la décharge) mais développant une force électromotrice moindre (différence de potentiel aux bornes du système en circuit ouvert). Leurs électrodes sont soit à base de nickel et de cadmium (accumulateur nickel-cadmium), soit à base d'oxyde de nickel et de zinc (accumulateur zinc-nickel), soit à base d'oxyde d'argent couplé à du zinc, du cadmium ou du fer (accumulateurs à l'oxyde d'argent). Toutes ces technologies utilisent une solution de potasse comme électrolyte. Les technologies au plomb, comme les accumulateurs alcalins, se caractérisent par une grande fiabilité, mais leurs densités d'énergie massiques restent relativement faibles (30 Wh/kg pour le plomb, 50 Wh/kg pour le nickel-cadmium).

Au début des années quatre-vingt-dix, avec la croissance du marché des équipements portables, deux filières technologiques nouvelles ont émergé : les accumulateurs **nickel-métal hydrure** et les accumulateurs au **lithium** (voir l'[encadré Principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium](#), p. 131). La première filière, mettant en jeu une électrode positive à base de nickel et une électrode négative – constituée d'un alliage absorbant l'hydrogène – plongeant dans une

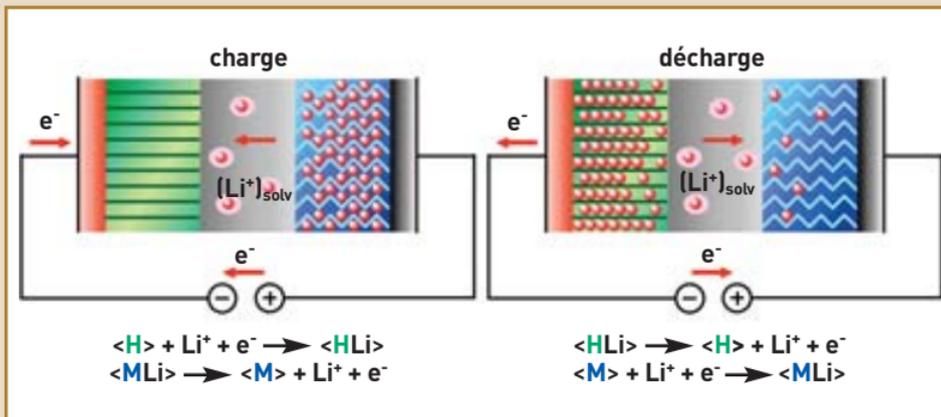
solution de potasse concentrée, a permis d'atteindre une densité d'énergie massique de 70 à 80 Wh/kg. La seconde filière avait déjà fait l'objet de travaux vers la fin des années soixante-dix, dans la perspective de trouver des couples électrochimiques présentant de meilleures performances que les accumulateurs au plomb ou au nickel-cadmium employés jusque-là. Les premiers modèles ont ainsi été conçus avec une électrode négative à base de lithium métallique (filiale **lithium-métal**). Cependant, cette technologie s'est heurtée à des problèmes liés à une mauvaise reconstitution de l'électrode négative de lithium au cours des charges successives. C'est pourquoi, vers le début des années quatre-vingt, des recherches ont été entreprises sur un nouveau type d'électrode négative à base de carbone, utilisé comme composé d'insertion du lithium. La filière **lithium-ion** était née. Les industriels japonais se sont rapidement imposés en tant que *leaders* dans le domaine. Déjà fabricants d'équipements portables, ils ont considéré la source d'énergie comme faisant partie des composants stratégiques de ces équipements. C'est ainsi que Sony, qui n'était pas à l'origine fabricant d'accumulateurs, a décidé de mobiliser au cours des années quatre-vingt des ressources considérables afin de faire progresser la technologie et de la rendre industrialisable. En février 1992, Sony annonçait à la surprise générale le lancement immédiat de la fabrication industrielle d'accumulateurs lithium-ion. Ces premiers accumulateurs offraient des performances limitées (90 Wh/kg). Depuis, celles-ci se sont notablement améliorées (de 160 à plus de 180 Wh/kg en 2004), grâce d'une part aux progrès technologiques réalisés (diminution de la part inutile dans le poids et le volume des accumulateurs) et d'autre part à l'optimisation des performances des matériaux. Des densités d'énergie massiques de plus de 200 Wh/kg sont escomptées vers 2005.

(1) Un cycle correspond à une charge et une décharge.

Principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium

1

En cours d'utilisation, donc lors de la décharge de l'**accumulateur**, le lithium relâché par l'**électrode négative** (matériau d'intercalation hôte <H>) sous forme **ionique** Li^+ migre à travers l'**électrolyte** conducteur ionique et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'**électrode positive** (composé d'insertion du lithium de type oxyde métallique <Mli>). Le passage de chaque ion Li^+ dans le circuit interne de l'accumulateur est exactement compensé par le passage d'un **électron** dans le circuit externe, générant ainsi un courant électrique. La **densité d'énergie massique** libérée par ces réactions est à la fois proportionnelle à la différence de potentiel entre les deux électrodes et à la quantité de lithium qui se sera intercalé dans le matériau d'insertion. Elle est également inversement proportionnelle à la masse totale du système. Or le lithium est en même temps le plus léger (avec une masse molaire atomique de 6,94 g) et le plus **réducteur** des métaux : les systèmes électrochimiques qui l'emploient peuvent atteindre des tensions de 4 V, contre 1,5 V pour les autres systèmes. Il permet ainsi aux batteries au lithium d'offrir les plus importantes densités d'énergie massique et volumique (typiquement plus de



160 Wh/kg et 400 Wh/l), supérieures en moyenne de plus de 50 % à celles des batteries conventionnelles.

Le principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium est le même selon qu'est utilisée une électrode négative de lithium métallique ou à base de carbone. Dans ce deuxième cas, la filière technologique est appelée *lithium-ion*, car le lithium n'est jamais sous forme métallique dans l'accumulateur, et fait "yo-yo" entre les deux composés d'insertion du lithium contenus dans les électrodes positive et négative à chaque charge ou décharge de l'accumulateur.