

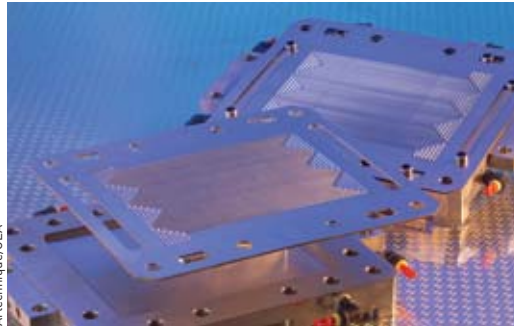
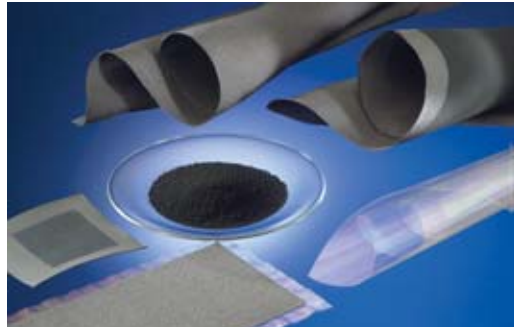
# La pile à combustible en questions

La pile à combustible convertit directement et en continu l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique, chaleur et eau. Si son principe paraît simple, sa mise en œuvre est complexe et onéreuse. Des efforts importants de recherche et développement sont conduits avec pour objectif d'amener ces technologies à un niveau de performances et de coûts acceptables.

La formation d'eau à partir de l'oxygène et de l'**hydrogène** produit de l'électricité. C'est sur ce principe, découvert il y a 165 ans, que repose la pile à combustible (encadré C, **Comment fonctionne une pile à combustible?**). Depuis, la pile à combustible s'est déclinée selon différentes filières technologiques : les piles "basse température" telles la pile à membrane échangeuse de **protons** (PEMFC) et sa variante à **méthanol** ou **éthanol** direct (DMFC ou DEFC), la pile à acide phosphorique (PAFC) ou la pile **alcaline** (AFC), et les piles "haute température" comme la pile à carbonate fondu (MCFC) ou la pile à oxyde solide (SOFC). Ces différents types de piles se distinguent essentiellement par leur température de fonctionnement, la nature de l'**électrolyte** et la nature des **combustibles** utilisés (tableau 1).

## Comment passer de la cellule au générateur ?

Toutefois, de la simple **cellule électrochimique** à un réel générateur d'électricité, différentes étapes sont indispensables. D'abord, pour obtenir la différence de potentiel demandée, un empilement en série du nombre de cellules nécessaires est réalisé. Un matériau d'interconnexion (plaque bipolaire) permet l'assemblage des cellules entre elles. Le module pile à combustible ainsi constitué est intégré au sein d'un système complet assurant la gestion des fluides (gaz réactifs, eau), de la chaleur et de l'électricité. Parmi les composants clés d'un tel système, il faut citer le stockage de combustible, le compresseur, les humidificateurs ou le convertisseur électrique. Enfin, un tel système se doit d'être intégré



Composants essentiels des piles à combustible PEMFC, les matériaux des ensembles électrodes-membrane et les plaques bipolaires. Un module est constitué d'ensembles électrodes-membrane assemblés entre eux par des plaques bipolaires. Chaque composant fait l'objet de nombreux travaux de recherche et développement.

Artechnique/CEA

dans son environnement en respectant l'ensemble des contraintes du cahier des charges, intégration dans un véhicule électrique, par exemple.

## À quoi sert une pile à combustible ?

Par son principe même, la pile à combustible affiche des **rendements de conversion** intéressants comparés à ceux des générateurs thermiques. Au plan environnemental,

type de pile	anode (catalyseur)	électrolyte	cathode (catalyseur)	température	applications
membrane échangeuse de protons (PEMFC)	$H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ (Pt)	<b>polymère perfluoré</b> ( $SO_3H^+$ )  $H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	60-90 °C	portable transport stationnaire
méthanol direct (DMFC)	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6 H^+ + 6 e^-$ (Pt)	polymère perfluoré ( $SO_3H^+$ )  $H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	60-90 °C	portable transport
acide phosphorique (PAFC)	$H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ (Pt)	$PO_4H_3$ (85-100 %)  $H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	160-220 °C	stationnaire
alcaline (AFC)	$H_2 + 2 OH^- \rightarrow 2 H_2O + 2 e^-$ (Pt, Ni)	KOH (8-12 N)  $\leftarrow OH^-$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2 e^- \rightarrow 2 OH^-$ (Pt-Au, Ag)	50-250 °C	spatial transport
carbonate fondu (MCFC)	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2 e^-$ (Ni + 10% Cr)	$Li_2CO_3/K_2CO_3/Na_2CO_3$  $\leftarrow CO_3^{2-}$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2 e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ ( $NiO_x + Li$ )	650 °C	stationnaire
oxyde solide (SOFC)	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2 e^-$ <b>[cermet Ni-ZrO<sub>2</sub>]</b>	$ZrO_2-Y_2O_3$  $\leftarrow O^{2-}$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- \rightarrow O^{2-}$ (perovskites $La_xSr_{1-x}MnO_3$ )	750-1050 °C	stationnaire <b>APU</b>

Tableau 1. Les différents types de piles à combustible.



Cinq piles à combustible de 200 kW fournissent toute la puissance électrique nécessaire au fonctionnement du centre principal de tri postal d'Anchorage en Alaska. Non polluante et silencieuse, pouvant se décliner dans une large gamme de puissance, la pile à combustible offre de nombreux avantages pour les applications stationnaires.



UTC Fuel Cells

ses impacts sont relativement réduits : grande discrétion acoustique, très faibles émissions de polluants. Du point de vue des rejets de **gaz à effet de serre**, l'intérêt de la pile à combustible est en revanche moins tranché car il est essentiellement lié à la nature du combustible utilisé et à sa source de production. C'est donc le cycle complet de l'hydrogène qu'il faut considérer (du "puits à la roue") pour évaluer l'impact de la pile à combustible. Cependant, les rejets de **dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)** restent inférieurs à ceux d'un moteur thermique. Ces caractéristiques désignent donc les piles à combustible comme candidates naturelles sur plusieurs grands domaines d'applications.

Les premières applications de la pile à combustible ont vu le jour dans les années 60, avec le développement du programme spatial américain. En particulier, des piles à combustible équipaient les modules Gemini et Apollo. De nos jours, les navettes spatiales sont toujours alimentées par des piles à combustible.

Depuis, suite à la prise de conscience des problèmes liés au réchauffement de la planète au début des années 90, la pile à combustible est apparue comme une alternative crédible aux **énergies fossiles**. Plus généralement, la dérégulation de l'industrie électrique a incité de nouveaux entrants à se positionner sur des moyens de production décentralisée, dont la pile à combustible est la forme la plus achevée. Ainsi, on a vu se développer des programmes visant à démontrer l'intérêt des piles à combustible pour les **applications stationnaires** de la fourniture d'électricité, que ce soit pour l'habitat individuel ou collectif ou pour les sites publics, industriels ou isolés, ou pour la

sécurisation électrique. De plus, pour de telles applications, la pile à combustible présente l'intérêt de pouvoir être utilisée en **cogénération** : la chaleur produite pouvant soit être directement employée pour le chauffage, soit être transformée en électricité par l'intermédiaire d'une turbine (**encadré 1**).

Les **applications transports** ne sont pas, bien sûr, en reste. Elles concernent principalement la traction électrique pour le transport en commun (bus, transport public urbain) et pour le véhicule individuel. Il convient aussi de citer les réalisations faites dans le cadre du développement des unités de puissance auxiliaires (APU) visant à doter un véhicule d'une source d'énergie électrique complémentaire et autonome pour alimenter les périphériques embarqués (climatisation...).



Asante

Les piles à combustible présentent un fort intérêt pour les applications transports, les transports en commun notamment. Ce bus Scania est équipé d'une pile à combustible alimentée en hydrogène.

Enfin, plus récemment, la pile à combustible est envisagée comme **alimentation des objets nomades et communicants** de demain (téléphones et ordinateurs portables...). Pour ces applications, un effort de recherche important est à faire afin de miniaturiser la technologie et la rendre compatible avec l'utilisation visée.

## Pourquoi n'en ai-je pas chez moi ?

Depuis les années 60, des avancées technologiques significatives ont été obtenues (la **densité de puissance** des piles à combustible a augmenté d'un facteur 10, la quantité de **catalyseur** a été divisée par 10) et de nombreux prototypes de piles à combustible ont été construits dans le monde. Plusieurs centaines sont en expérimentation avec des puissances unitaires dans la gamme de 200 kW à quelques MW pour des applications stationnaires. Plus de 300 véhicules prototypes ont vu le jour depuis les années 90. Des prototypes de piles à combustible miniatures sont également apparus récemment. Et pourtant, malgré ces multiples démonstrateurs, la pile à combustible n'est pas encore réellement disponible pour l'utilisateur. La barrière principale au développement industriel de la pile à combustible est le coût, même si des verrous technologiques doivent encore être levés.

L'un des principaux points durs est le **coût** actuel de la pile à combustible. En effet, aujourd'hui une pile coûte environ entre 6 000 et 8 000 €/kW alors que les prix du marché sont systématiquement inférieurs à 1 500 €/kW (750 à 1 500 €/kW pour les applications stationnaires, 150 €/kW pour les transports en commun, 30 à 50 €/kW pour le véhicule individuel). Un effort important de recherche et développement reste donc à accomplir



D. Michon-Artechnique/CEA

Les piles à combustible offrent de larges perspectives d'utilisation dans le domaine des applications portables.

La cogénération est la production combinée de chaleur et d'électricité à partir d'un même **combustible**. Elle utilise actuellement trois grandes technologies : turbines à vapeur, moteurs thermiques et turbines à combustion. La cogénération se caractérise par un excellent rendement énergétique car la chaleur formée est récupérée contrairement au cas des centrales thermiques. C'est un système de production d'énergie décentralisée situé au plus près des utilisateurs et qui permet ainsi d'éviter le coût de développement des réseaux électriques et les pertes en ligne. Il faut distinguer les applications industrielles (besoin de vapeur et d'électricité en continu) des applications tertiaires (bâtiments publics et privés, hôpitaux...) et collectives (réseaux de chaleur, immeubles HLM...).

### Une directive pour promouvoir la cogénération

En 1997, la **Commission européenne** a publié un objectif de doublement de la part de la cogénération dans la production d'électricité en Europe, entre 1994 et 2010 (de 9 à 18%). L'argument principal est que la cogénération permet d'éviter la formation de 500 kg de **CO<sub>2</sub>** par **MWh** par rapport à une production centralisée d'électricité et de chaleur.

Un décollage de la cogénération en France a été observé à partir de 1995 avec une puissance installée fin 1998 de 5323 **MW** pour un total de 948 installations<sup>(1)</sup>. Toutefois, sa part dans la production d'électricité reste mineure (environ 2,5%), surtout en comparaison d'autres pays comme le Danemark ou les Pays-Bas. En outre, la cogénération s'est fortement développée dans la gamme des puissances supérieures à 1 **MWe** pour des applications industrielles et de réseaux de chaleur, mais très peu pour des applications tertiaires et collectives et dans la gamme des puissances inférieures à 1 **MWe**. Ceci est dû en particulier aux coûts de raccordement et aux coûts élevés des technologies au regard des puissances installées. Néanmoins, il existe un marché potentiel très important dans la gamme des puissances inférieures à 1 **MWe**. Une directive européenne pour la promotion de la cogénération a été publiée le 11 février 2004. Elle définit le seuil d'entrée dans la catégorie de cogénération à un rendement global de l'ordre de 75 à 80 % et le seuil d'entrée dans la catégorie "à haut rendement" à des économies d'**énergie primaire** supérieures à 10% par rapport à une production séparée. Cette directive prend en compte les nouvelles technologies de cogénération que sont les moteurs Stirling<sup>(2)</sup>, les microturbines, les cycles de Rankine<sup>(3)</sup> et les piles à combustible.

### La pile à combustible : des atouts certains

La pile à combustible peut se placer comme un procédé de cogénération dont le rendement global et les coûts d'exploitation laissent espérer un gain important en comparaison des technologies classiques.

(1) Source DGEMP, Direction générale de l'énergie et des matières premières du ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie.

(2) Moteur Stirling : moteur à combustion externe dont le fluide de travail fonctionne sous circuit fermé (son chauffage et son refroidissement sont réalisés par une source froide et une source chaude externe).

(3) Cycle de Rankine : cycle de production de vapeur "via chaudière, turbine, condenseur et pompe" faisant appel à un fluide organique comme fluide caloporteur.

Les **technologies de piles à combustible haute température** présentent des rendements électriques élevés et des niveaux de température autorisant une valorisation aisée de la chaleur sous toutes ses formes (vapeur, eau chaude surchauffée, réseau de chaleur, eau chaude sanitaire et froid). Elles permettent également d'envisager une diversification énergétique par l'emploi de combustibles liquides, tels l'**éthanol** et les **biocombustibles**, ou gazeux, comme le **biogaz**, même si à court terme le **gaz naturel** et donc l'utilisation d'un **reformage** interne (production d'**hydrogène** à partir d'un combustible carboné) semblent indispensables. Néanmoins, dans le cas de la cogénération, la diminution de rendement induit par la mise en œuvre d'un reformeur peut être compensée, au moins partiellement, par la valorisation de la chaleur du système.



Bruno Clergue - photothèque Dalkia

Installation de cogénération à Freyming-Merlebach (Moselle) permettant d'alimenter le réseau de chaleur.

Les **technologies de piles à combustible basse température** peuvent être utilisées comme moyen de cogénération avec une valorisation basse température de la chaleur (eau chaude sanitaire et chauffage basse température pour le collectif et le tertiaire, par exemple). Par ailleurs, les développements pour les applications mobiles de membranes fonctionnant au-delà de 100 °C permettent d'envisager une généralisation pour le chauffage des bâtiments.

Il est nécessaire de démontrer sur le terrain les atouts des technologies de piles à combustible. Dalkia France et son centre de recherche (CReeD, Centre de recherches pour l'environnement, l'énergie et le déchet) se sont ainsi engagés dans un vaste programme de démonstration orienté autour des technologies basse et haute température. Leurs objectifs sont de valider les performances, de définir les conditions et contraintes d'exploitation et de maintenance sur des sites réels ([voir l'encadré Le projet Gecopac](#), p. 88).

➤ **David Guichardot**  
Dalkia France

afin de rendre la technologie compatible avec les exigences des marchés visés.

Il est aussi essentiel d'*augmenter les performances* actuelles des piles à combustible, en particulier la durée de vie, la robustesse et la fiabilité. Dans un certain nombre de cas, cela nécessite d'identifier et de valider de réelles ruptures technologiques, comme par exemple pour les piles miniatures destinées aux objets nomades et communicants.

Le combustible d'une pile étant de l'hydrogène, il est impératif d'*assurer la sûreté d'utilisation* de systèmes piles à combustible. Cela passe par la démonstration de solutions technologiques optimisées sur le plan de la sécurité mais également par la définition de normes et de réglementations liées à l'usage de l'hydrogène comme vecteur énergétique.

Enfin, le développement des piles à combustible étant en grande partie motivé par la *protection de l'environnement*,





il est indispensable d'en contrôler l'impact sur l'environnement. Cela passe par le choix judicieux de la filière de production du combustible mais aussi par la prise en compte de l'ensemble du cycle de vie d'une pile à combustible, notamment sa recyclabilité.

D'ici 2005, des piles de type PEMFC devraient néanmoins être mises sur le marché, vraisemblablement destinées aux applications portables et au marché de la sécurisation électrique. Suivront ensuite les marchés

de niche comme les applications stationnaires dans la gamme des 5 kW ou les APU, et les applications dans les bus ou les transports publics.

À l'horizon 2010-2015, les applications automobiles pourraient démarrer (encadré 2).

➤ **Françoise Barbier\*** et **Thierry Priem\*\***

Direction de la recherche technologique

\*CEA centre de Fontenay-aux-Roses

\*\*CEA centre de Grenoble

## La pile à combustible vue par un constructeur automobile

2

Enfin le moteur à eau! Enfin presque! La pile à combustible fabrique de l'eau au lieu d'en consommer. Elle produit aussi, et surtout, de l'électricité. C'est ce qui intéresse les constructeurs automobiles, et PSA Peugeot Citroën en particulier.



Peugeot/Direction de la Communication

Le démonstrateur H<sub>2</sub>O est un véhicule électrique à batteries muni d'un générateur électrique constitué d'une pile à combustible (5,5 kW). Ce véhicule propose une nouvelle utilisation de la pile à combustible. Dans le cas présent, l'hydrogène est produit à bord à partir d'une solution aqueuse de borohydrure de sodium et d'un catalyseur.

### Quel intérêt pour un constructeur automobile ?

La disponibilité du **carburant** et la réduction des émissions des véhicules sont au cœur des préoccupations du Groupe. C'est pour y répondre que PSA Peugeot Citroën travaille aujourd'hui de nombreuses technologies visant à améliorer la performance environnementale de ses véhicules tout en garantissant un bon niveau de prestations au client à un coût acceptable par celui-ci. Disponible en série depuis un peu moins de dix ans, le véhicule électrique, dont PSA Peugeot Citroën est le premier constructeur mondial, est une des technologies travaillées. D'autres voies sont explorées, certaines déjà commercialisées ou sur le point de l'être. Pour le long terme, les espoirs se portent aujourd'hui sur les véhicules à pile à combustible.

### Quels sont les avantages ?

Les avantages de la pile à combustible sont nombreux. Outre la réduction des émissions de **CO<sub>2</sub>**, participant à la maîtrise de l'**effet de serre** (encadré B, *Effet de serre et CO<sub>2</sub>*), la pile à combustible aide à l'amélioration de la qualité de vie en ville, grâce au silence des véhicules à pile à combustible et à la suppression des émissions polluantes locales (**NOx**, particules...). Les véhicules à pile à combustible sont des véhicules zéro émission (ZEV), comme les véhicules électriques à batteries.

La pile à combustible contribuera à la diversification des sources d'**énergies primaires** utilisées dans les transports individuels dépendant à 95 % du pétrole.

### La problématique automobile

Il s'agit de traiter un problème sociétal qui n'a que peu de poids dans la décision d'achat (réduction des émissions de CO<sub>2</sub>), sans diminuer les prestations et le plaisir de conduire, ni augmenter le coût d'achat ou d'usage.

L'**autonomie** est un point crucial. Les technologies actuelles de stockage d'**hydrogène** à bord des véhicules ne permettent pas de dépasser 300 km d'autonomie sans compromettre l'habitabilité du véhicule. C'est encore insuffisant. Des progrès sont donc à réaliser sur ce point. L'autonomie est également liée au **rendement de conversion** de l'énergie contenue dans l'hydrogène en énergie électrique puis mécanique. Ce rendement doit être le plus élevé possible. La pile à combustible permet d'atteindre théoriquement des rendements très élevés. En pratique, il faut veiller à ne pas dégrader ce bon rendement tout en respectant les contraintes d'intégration dans le véhicule comme la masse et le volume. Les rendements sont particulièrement bons en usage urbain lorsque la pile débite peu de puissance.

Enfin, le **refroidissement** et le **démarrage à froid** sont également des points durs. Une pile produit de l'eau pure ; son démarrage par des températures inférieures à 0 °C est par conséquent problématique. Le refroidissement est principalement une question de taille de radiateur liée à la température du fluide de refroidissement et à la puissance à dissiper. La pile à combustible PEMFC est "handicapée" par sa faible température de fonctionnement, ce qui nous contraint à prévoir des radiateurs très grands, peu compatibles avec leur implantation dans un véhicule. Une voie de recherche consiste à élever la température de fonctionnement, mais on se heurte alors à un problème technologique de tenue en température du cœur de la pile à combustible. Le problème est complexe, et les paramètres sont tous plus ou moins couplés entre eux. La solution ne peut être trouvée qu'en adoptant une approche d'ingénierie système qui prend en compte tous les aspects techniques et économiques. La recherche doit être tirée par la problématique du système pile à combustible et du stockage d'hydrogène.

Le dernier élément à prendre en compte, et non des moindres, est le **coût**. Pour que cette technologie ait un impact sur notre environnement, il faut qu'elle se vende ! Elle doit donc être produite à des coûts compétitifs avec les moteurs à combustion interne. La technologie pile à combustible a un fort potentiel d'évolution. Elle doit cependant relever de nombreux défis techniques et économiques avant d'être commercialisée. Au-delà du coût lié à la production de la pile elle-même et du stockage d'hydrogène, de nombreuses difficultés techniques restent à surmonter, par exemple le démarrage à froid (gel), le refroidissement, la compacité et la durée de vie à bord du véhicule. De plus, la mise en place d'un système de distribution d'hydrogène nécessitera des investissements très importants. Pour toutes ces raisons, PSA Peugeot Citroën prévoit une introduction progressive dans l'automobile avec une possibilité de production en série à l'horizon 2020.

Le Groupe s'est donc engagé dans une démarche pragmatique de recherche à moyen et long terme afin d'explorer puis maîtriser les différentes technologies qui permettront de faire "sauter les verrous" qui s'opposent encore à l'introduction dans des conditions économiques acceptables de la pile à combustible dans l'automobile.

➤ **Franck Michalak**  
PSA Peugeot Citroën

# 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).

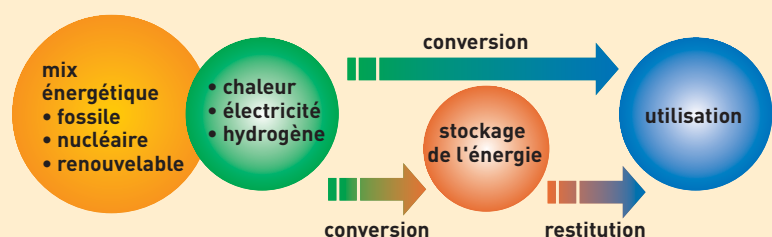


Figure 1. Le schéma énergétique.

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.

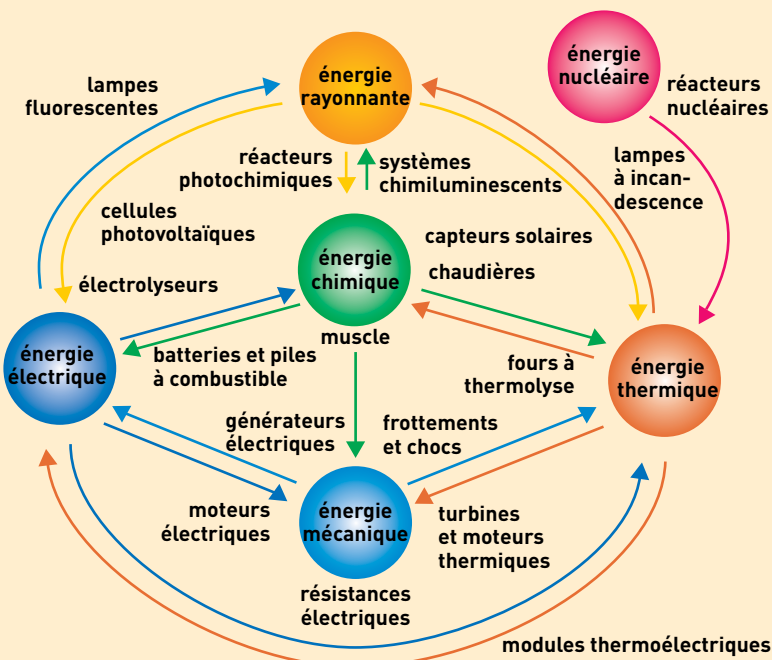
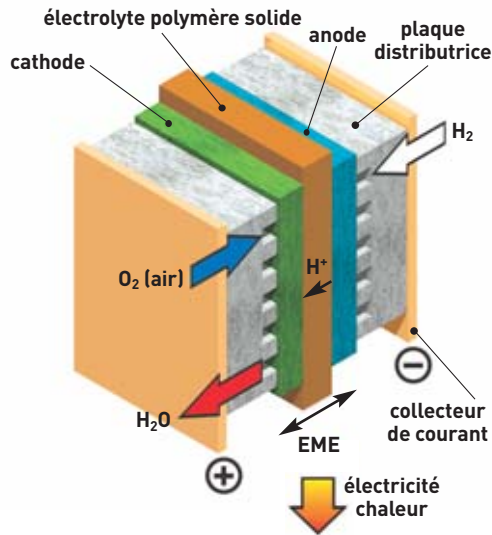


Figure 2. Conversions des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie.

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/cm<sup>2</sup>. 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<sup>(1)</sup>, 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

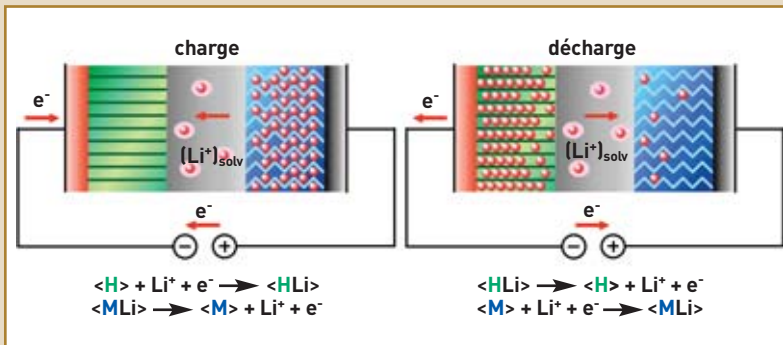
solution de potasse concentrée, a permis d'atteindre une densité d'énergie massique de 70 à 80 Wh/kg. La seconde filière avait déjà fait l'objet de travaux vers la fin des années soixante-dix, dans la perspective de trouver des couples électrochimiques présentant de meilleures performances que les accumulateurs 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**  $\text{Li}^+$  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  $\text{Li}^+$  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.



## Le projet Gecopac

Le projet Gecopac (Génération d'énergie combinée par pile à combustible), qui associe la Région Centre, le CEA, l'académie d'Orléans-Tours et les partenaires industriels Dalkia et Snecma Moteurs, consiste à mettre au point le premier système français complet prototype de **cogénération**, intégrant une pile à combustible SOFC. Celle-ci sera conçue, développée et réalisée par le CEA. D'une puissance de 5 kW, ce système sera alimenté par le réseau de **gaz naturel** et sera couplé au réseau électrique du lieu d'implantation, un lycée choisi par le rectorat. Le projet Gecopac comprendra un cœur de pile, une unité de traitement du **combustible**, développée par la société N-Ghy, une unité de conversion de puissance et contrôle commande, développée par la société Ainelec, ainsi que les modules nécessaires à la gestion thermique interne et externe du système. Les partenaires du projet réaliseront dans un premier temps une maquette de 1 kW qui comportera les mêmes sous-systèmes que le futur prototype. Un premier bilan sera fait après 6 mois de tests afin de décider du lancement de la fabrication et de la mise en place du prototype de 5 kW.

Objet de recherche et développement, le projet Gecopac apportera support technique et financier, notamment sur le cœur de pile pour le CEA. Il offrira également la possibilité d'avoir un premier retour d'expérience sur un système complet de cogénération intéressant Dalkia, en tant qu'utilisateur, et Snecma Moteurs, comme potentiel ensemble. De plus, l'intégration dès le début du projet d'un partenariat avec le rectorat d'Orléans-Tours permettra de développer les filières pédagogiques nécessaires à la formation des professionnels qui participeront à l'intégration de ces systèmes dans le paysage énergétique futur.

Le marché de la cogénération, estimé en France à environ 10 000 MW dans les années à venir va probablement s'ouvrir à partir de 2005, en raison de l'application de directives européennes sur la cogénération (voir l'encadré *La cogénération par pile à combustible*, p. 67). La pile à combustible serait très concurrentielle sur le marché résidentiel de la cogénération (1 à 100 kW), par rapport aux autres technologies de cogénération (microturbines à gaz par exemple). Le prototype de 5 kW constituera une excellente expérience sur la future "brique de base" de ces futurs systèmes modulaires.

Le projet Gecopac est essentiel pour la mise à niveau d'une activité SOFC en France. Il doit permettre de maîtriser les technologies clés des systèmes SOFC. Il favorisera la création d'un centre de compétences et d'excellence ouvert au Ripault et destiné à s'intégrer dans une plate-forme européenne de premier plan.

## B Effet de serre et CO<sub>2</sub>

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/m<sup>2</sup>**. 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/m<sup>2</sup>. Avec un "forçage radiatif supplémentaire" de 1,46 W/m<sup>2</sup>, le **gaz carbonique** (CO<sub>2</sub>) compte pour plus de la moitié de cet "effet de serre additionnel", loin devant le méthane (0,48 W/m<sup>2</sup>), les **halocarbures** (chlorofluorocarbures **CFC**, hydrochlorofluorocarbures **HCFC** et hydrofluorocarbures **HFC**) avec 0,34 W/m<sup>2</sup> et le dioxyde d'azote avec 0,15 W/m<sup>2</sup>. En outre, l'**ozone** troposphérique présente un forçage radiatif positif de 0,35 W/m<sup>2</sup> (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/m<sup>2</sup>).

Cet ajout à l'effet de serre naturel (155 W/m<sup>2</sup>) 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<sup>(1)</sup> de combustibles **fossiles** (7700 Mtep), il est aisé de calculer la masse de CO<sub>2</sub> 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

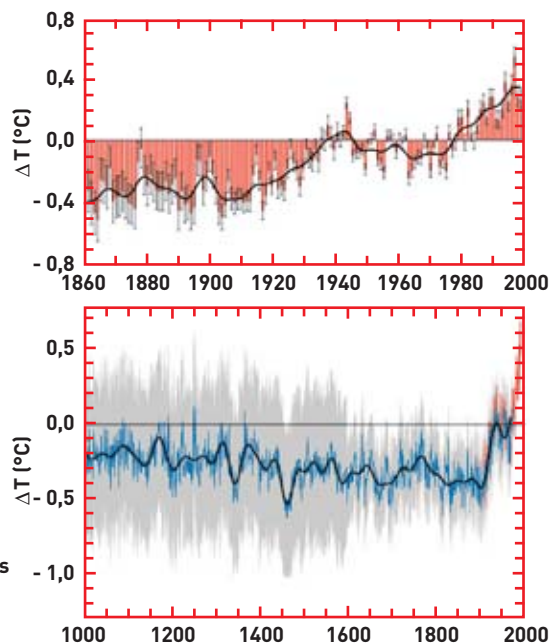
carbonique actuelle conduirait, à la fin du vingt et unième siècle, à une élévation de la température de l'ordre de 2 à 3 °C. Certains donnent même une fourchette entre 1,5 et 4,5 °C, laissant prévoir des conséquences dramatiques sur l'environnement, comme la montée notable du niveau de la mer.

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 6000 à 8000 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 ( $\Delta T$ ) 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).

■ mesures par thermomètres  
■ données estimées



## B (suite)

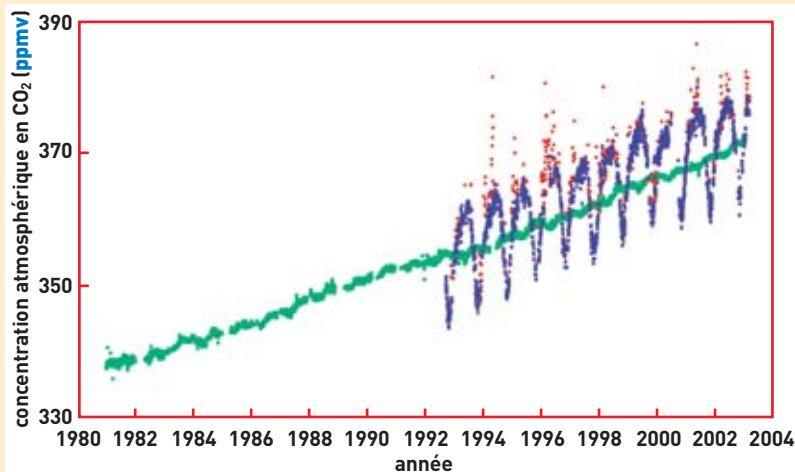


Figure 2.

Évolution de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> (mesures en rouge) par rapport à l'atmosphère océanique. À l'augmentation moyenne de la concentration de CO<sub>2</sub> se superpose une forte modulation saisonnière due au cycle végétatif (photosynthèse chlorophyllienne) des plantes, émetteur de CO<sub>2</sub> 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



National University of Ireland

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<sup>er</sup> janvier 2000 et étendu la réglementation à d'autres produits (dont les HCFC), de **Copenhague** (1992), **Montréal** (1997) et **Pékin** (1999).