



L'Europe et la France entre libéralisation énergétique et durcissement **écologique**

La situation énergétique en Europe est marquée par la libéralisation progressive du secteur et un renforcement des mesures de protection de l'environnement. Un double mouvement qui amène la France à effectuer des choix cruciaux.



Ligne à haute tension exploitée par RTE. Le marché français est aujourd'hui ouvert à hauteur de 37% pour le gaz et l'électricité, conformément aux objectifs communautaires.

À l'origine du mouvement actuel de libéralisation et de dérégulation des marchés du gaz et de l'électricité en Europe se trouve la volonté d'élaborer des règles communes pour le marché intérieur de l'énergie. Celle-ci s'est traduite dans deux textes fondateurs, la directive du 19 décembre 1996 sur l'électricité et celle du 22 juin 1998 sur le gaz. Leur philosophie repose sur le libre choix du fournisseur par les clients les plus gros consommateurs, dits "éligibles", le seuil d'éligibilité s'abaissant progressivement par paliers (Point de vue, p. 12). Le 26 juin 2003 ont été adoptées deux nouvelles directives concernant des règles communes pour le

marché intérieur du gaz et de l'électricité qui prévoient essentiellement l'ouverture aux clients non résidentiels dès le 1^{er} juillet 2004, et à tous les clients dès le 1^{er} juillet 2007, et qui complètent celles de 1996 et 1998. À côté de ces textes qui organisent la libéralisation du secteur de l'énergie, la directive du 27 septembre 2001 relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'**énergie renouvelables** fixe des objectifs indicatifs pays par pays et vise à faire passer la part d'électricité d'origine renouvelable dans l'Union européenne de 13% actuellement à 22% en 2010. Dans le domaine environnemental, des directives fixant des

plafonds d'émission pour les grandes installations de combustion ont également été adoptées, ainsi que des plafonds nationaux d'émission pour certains polluants atmosphériques.

Enfin ont été publiées la directive du 11 février 2004 sur la promotion de la **cogénération** sur la base de la demande de chaleur utile et celle du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments.

La spécificité française

La France est dans une situation spécifique caractérisée par l'importance de l'énergie nucléaire parmi les sources de production d'électricité. En 2003, la France a produit 567 TWh d'électricité, dont 441 d'origine nucléaire. La part des énergies renouvelables, de l'ordre de 16 %, en fait de la France le premier producteur européen, mais ceci est essentiellement dû à l'énergie hydraulique. Pour s'adapter aux règles nouvelles et atteindre les objectifs européens, des outils réglementaires ont été mis en place.

La loi du 10 février 2000 sur le service public de l'électricité a installé le dispositif permettant à la France de transposer la directive de 1996, en ouvrant à la concurrence le marché des clients éligibles (consommateurs de plus de 16 GWh dans un premier temps, puis de plus de 7 GWh, enfin tous les professionnels à compter du 1^{er} juillet 2004) et en prévoyant un mécanisme d'obligation d'achat par EDF et les distributeurs non nationalisés de l'électricité produite par les sources d'énergie dont le développement est souhaité. La loi a organisé la répartition des compétences entre les acteurs du système électrique et institué, en anticipation de la directive de 2003, une commission de régulation de l'énergie et des tarifs réglementés pour les réseaux. Elle a également établi une programmation pluriannuelle des investissements de production d'électricité, appliquée pour la première fois par un arrêté du 7 mars 2003 qui détermine les objectifs par filière énergétique à l'horizon 2007. Dans ce cadre seront lancés des appels d'offres afin de développer des moyens de production par des centrales éoliennes, en mer et à terre, et utilisant la **biomasse**. Ce mécanisme doit permettre d'assurer au mieux la réalisation des objectifs de politique énergétique qui figurent dans la directive sur les énergies renouvelables et la programmation pluriannuelle des investissements. Enfin la loi du 3 janvier 2003 sur le service public de l'énergie a ouvert le marché du gaz aux clients éligibles et transposé la directive du 22 juin 1998, tout en précisant et amendant la loi du 10 février 2000 sur l'électricité.

Les suites du grand débat national sur les énergies

Un grand débat national sur les énergies, organisé par le gouvernement au premier trimestre 2003, a dégagé cinq principes pour guider une politique énergétique viable : contribuer à la compétitivité économique, renforcer l'indépendance énergétique, assurer le respect de l'environnement, garantir un droit à l'énergie à un prix compétitif et s'inscrire dans la coordination internationale. Ses conclusions ont servi à l'élaboration d'une loi d'orientation sur les énergies votée, en première lecture, par le Parlement en juin 2004. Ce texte réaffirme les grands objectifs de la politique énergétique

française : garantir l'indépendance énergétique, préserver l'environnement, garantir un prix compétitif de l'énergie et la cohésion sociale et territoriale en assurant l'accès de tous à l'énergie. Il transpose plusieurs directives européennes relatives notamment aux énergies renouvelables et à la performance énergétique des bâtiments et institue un marché des certificats d'économie d'énergie. Il maintient l'option nucléaire ouverte et prévoit la construction d'un démonstrateur industriel de réacteur de type EPR. Enfin, il fixe des objectifs quantifiés (baisse de l'intensité énergétique, des émissions de **gaz à effet de serre**, amélioration de la performance des bâtiments neufs...).

En parallèle, l'ouverture du marché a été entérinée par les décrets du 18 mai (gaz) et 23 juin (électricité) 2004 qui rendent éligibles tous les clients professionnels, soit près de 3,5 millions de sites. Enfin, la loi du 9 août 2004 relative au service public de l'électricité et du gaz et aux entreprises électriques et gazières permet la transformation du statut d'EDF et de GDF en sociétés anonymes tout en définissant leurs missions de service public, transpose les directives de juin 2003 (séparation juridique du transport et séparation managériale de la distribution) et pérennise le système de financement des retraites des agents des industries électriques et gazières.

La politique énergétique des prochaines décennies devra en effet permettre à la France de faire face à trois défis majeurs : la lutte contre l'**effet de serre**, l'épuisement progressif du pétrole et du gaz face à une demande mondiale croissante et la résorption des inégalités de consommation entre le Nord et le Sud.

La politique française doit en conséquence se fixer des objectifs clairs et chiffrés, comme la division par quatre des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. Elle doit s'appuyer sur la relance d'une véritable politique de maîtrise et d'efficacité énergétique. Les gisements d'économie ont déjà été partiellement exploités, notamment par l'industrie, seul secteur dont la consommation a diminué depuis 1990. Des mesures sectorielles, visant les biens les plus consommateurs (réglementation thermique dans l'habitat, étiquetage énergétique des appareils, accords volontaires de limitation de consommation des automobiles...) ont également permis de limiter l'accroissement des consommations. Il faut désormais inventer de nouveaux outils pour poursuivre l'exploitation des gisements d'économies plus diffus. L'objectif de long terme ne peut être atteint qu'à travers des ruptures technologiques importantes qu'il faudra encourager en favorisant et développant la recherche. L'innovation a un rôle fondamental à jouer. Elle doit pour cela se focaliser sur la recherche de ruptures technologiques dans la production et la consommation d'énergie, et sur la mise à disposition des nouvelles technologies de l'énergie (voir *Un effort public soutenu en faveur des nouvelles technologies de l'énergie*, p.13).

Enfin, le constat s'impose que la sécurité d'approvisionnement du pays ne peut reposer que sur un "bouquet énergétique" largement diversifié, tant en termes de types d'énergie que d'origine des approvisionnements.

➤ **Jean-Claude Hulot**
Ministère délégué à l'industrie
Paris

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).

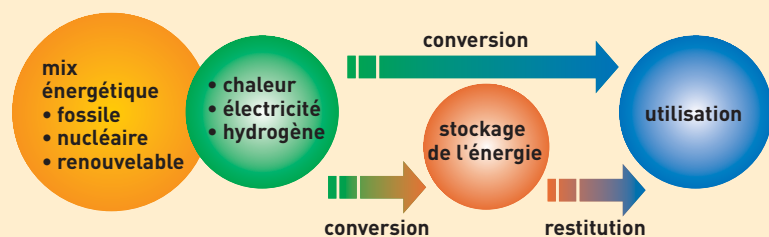


Figure 1. Le schéma énergétique.

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.

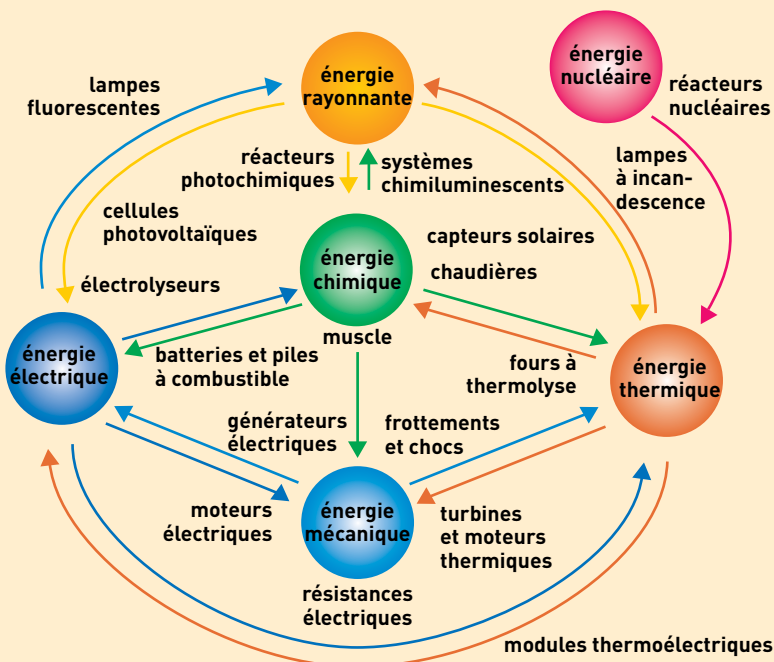


Figure 2. Conversions des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie.

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

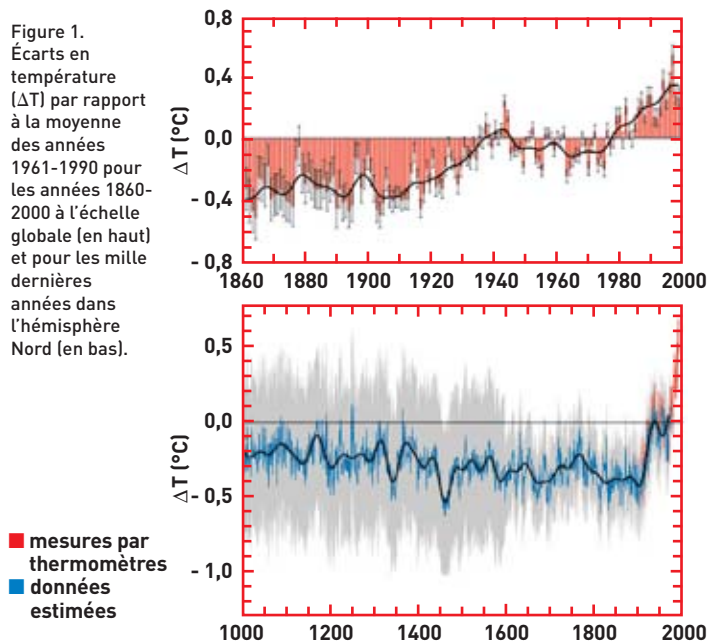
a contribué à l'augmentation de la température moyenne de notre planète d'environ 0,5 °C, observée au cours du vingtième siècle (**figure 1**). Si rien n'est fait pour réduire ces émissions, la concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère (**figure 2**) pourrait doubler d'ici 2100. À partir de la 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 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 (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)

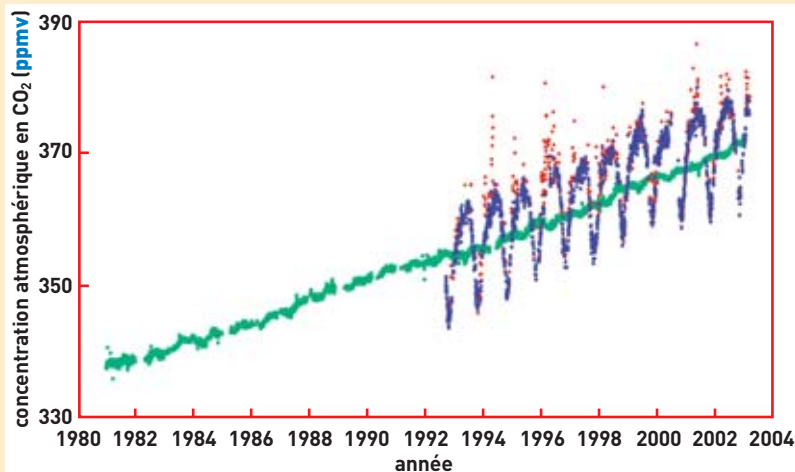


Figure 2.

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



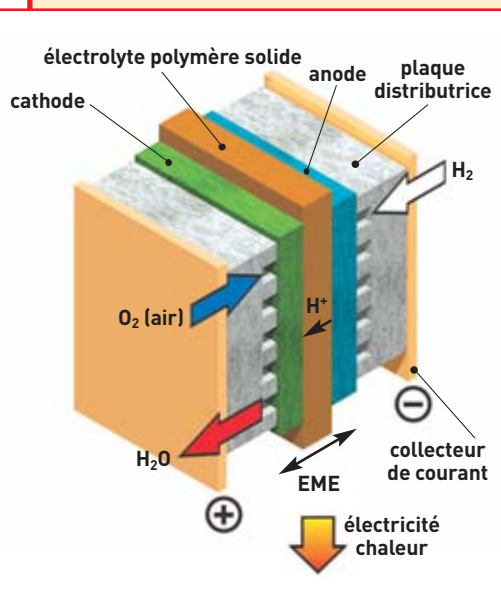
National University of Ireland

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^{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

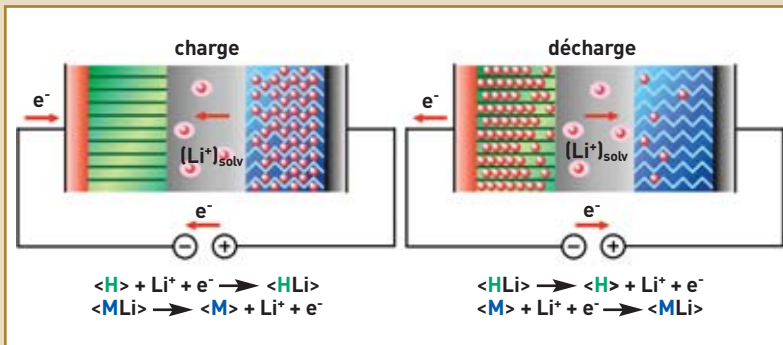
solution de potasse concentrée, a permis d'atteindre une densité d'énergie massique de 70 à 80 Wh/kg. La seconde filière avait déjà fait l'objet de travaux vers la fin des années soixante-dix, dans la perspective de trouver des couples électrochimiques présentant de meilleures performances que les accumulateurs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