



Les filières renouvelables en Europe

Dans un contexte général très volontariste, les différentes filières énergétiques renouvelables progressent selon des dynamiques différentes au sein de l'Union européenne.

Deux grands textes fixent le cadre des actions des pays membres en matière de développement des **énergies renouvelables** au sein de l'Union européenne. Le premier est le Livre blanc de la **Commission européenne** qui en 1997 introduisait l'objectif d'atteindre en 2010 une part de 12 % des consommations d'**énergie primaire**⁽¹⁾ à partir des filières renouvelables⁽²⁾. Cet objectif commun à l'ensemble des quinze pays membres ne se décline pas en objectifs nationaux. Le second texte, publié en 2001, est la directive européenne sur la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables⁽¹⁾. Celle-ci ambitionne de fixer la participation de ces filières à hauteur de 22 % de la

(1) La consommation d'énergie primaire correspond aux volumes d'énergies fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel), nucléaire ou renouvelables avant toute transformation en énergie utile (carburant, électricité, chaleur).

(2) Sans prendre en compte les installations hydrauliques de pompage-turbinage et d'incinération de déchets non organiques.

consommation brute d'électricité⁽³⁾ des 25 pays de l'Union à l'horizon 2010 (**figure 1**). Dans cette optique, chaque pays membre s'est vu attribuer un objectif national, celui de la France étant de 21 %.

Dans ce contexte général, chaque filière renouvelable a connu au sein de l'Union européenne des dynamiques différentes⁽⁴⁾.

L'exemple éolien

Au vu de ses excellents chiffres de croissance et de son succès économique, l'éolien est la filière à montrer en exemple en matière de développement des énergies renouvelables. Depuis 2000, il a maintenu un taux de croissance annuelle moyen de plus de 30 % pour s'établir à 29 067 MW fin 2003. Loin derrière les *leaders* européens que sont l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark, la France se lance lentement dans l'exploitation de son solide potentiel éolien (253 MW installés fin 2003). Notre pays mise beaucoup sur cette filière pour atteindre l'objectif de 21 % de sa consommation brute d'électricité à l'horizon 2010 (**figure 2**). Il a notamment lancé deux appels d'offres (500 MW chacun) pour le développement de grands parcs éoliens terrestres (de plus de 12 MW) et de parcs en mer. Cependant, le retard pris par la France sur ce secteur laisse présager les plus grandes difficultés pour atteindre le seuil des 21 %.

Le paradoxe photovoltaïque

Si l'on regarde les indicateurs de croissance de la filière **photovoltaïque** (PV) pour l'ensemble des pays de l'Union européenne, le constat est positif. Les chiffres 2003 font état d'une progression de 36,9 % pour la production de **cellules** et de **modules** PV et de 30,3 % pour la croissance des puissances installées. Mais si l'on détaille la dynamique de chaque pays, on constate qu'une nation, l'Allemagne, porte à elle seule une grosse partie du développement de cette filière. Ce pays représente notamment à lui seul plus de 70,5 % des puissances installées en 2003 au sein de l'Union. La dynamique de la filière reste donc fragile et largement dépendante des différents programmes de soutien nationaux.

Le renouveau du solaire thermique

Relancé dans la deuxième moitié des années 90, le solaire thermique marche à nouveau dans les traces qui étaient les siennes au lendemain des chocs pétroliers des années 70. L'impulsion a une nouvelle fois été donnée par l'Allemagne qui comptait, fin 2003, un parc de plus de 5 millions de m² de capteurs installés sur un

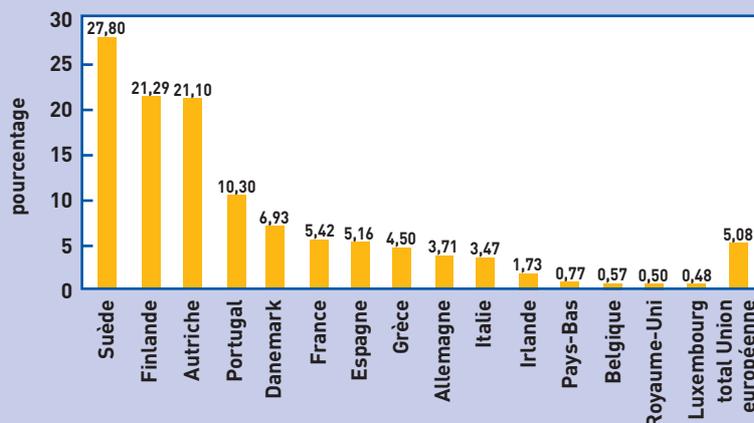


Figure 1. Classement des pays de l'Union européenne suivant la part des énergies renouvelables dans leur consommation d'énergie primaire en 2002 (Source : Observ'ER 2004).

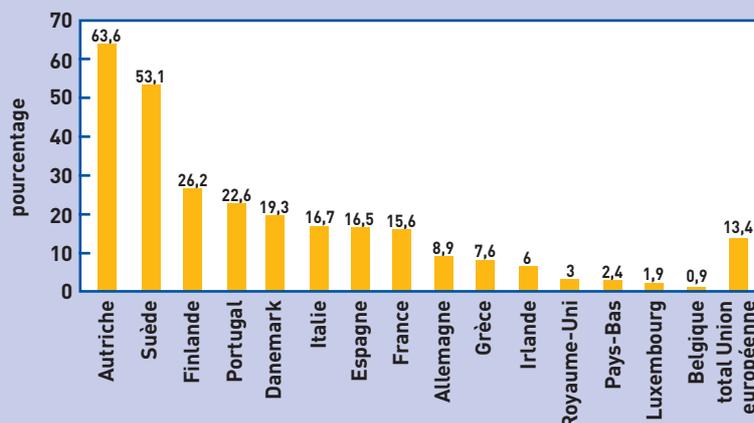


Figure 2. Classement des pays de l'Union européenne suivant la part des énergies renouvelables dans leur consommation brute d'électricité en 2002 (Source : Observ'ER2004).

(3) La consommation brute d'électricité correspond à la production nationale d'électricité augmentée des importations et diminuée des exportations.

(4) Les chiffres présentés dans ce texte s'appliquent à l'Union européenne des 15.

total de 13 millions pour l'ensemble de l'Union. La France, forte d'un plan national de promotion lancé en 2000 (le Plan Soleil), a su créer une dynamique qui révèle le solaire thermique comme l'une des filières renouvelables les plus populaires. Malgré ces constats positifs, son rythme de progression actuel ne sera pas suffisant pour atteindre les 100 millions de m² fixés par le Livre blanc.

La géothermie dans le bon rythme

Le terme géothermie renvoie à un ensemble d'applications très différentes les unes des autres. Cela peut aller des sites de production d'électricité de plusieurs MW de puissance unitaire aux pompes à chaleur pour habitation individuelle. Dans l'Union européenne, ce sont surtout les applications thermiques (sur réseaux ou individuelles) qui sont développées, notamment en Italie et en France. Globalement, le rythme de croissance de la filière devrait permettre d'atteindre les objectifs à 2010 du Livre blanc, à savoir 1 000 MW de puissance électrique et 5 000 MW pour la production de chaleur.

L'énergie hydraulique, la base de l'électricité renouvelable

La *grande hydraulique* (installations de plus de 10 MW) est connue pour ne plus présenter de potentiel de croissance dans l'Union européenne. Quasiment tous les sites qui peuvent être exploités le sont et les 109 000 MW installés (dont 23 470 MW en France) sont à l'origine de 70 % de la production d'électricité renouvelable de l'Union. En revanche, la *petite hydraulique* (installations de 10 MW et moins) possède encore un potentiel exploitable à condition de dépasser les oppositions locales qui rendent difficiles la mise en place de toute nouvelle unité.

Le bois énergie, première filière renouvelable

Dans l'Union européenne, on estime que 51 % de l'énergie primaire fournie par les différentes filières renouvelables proviennent du bois-énergie (41,8 millions de tep sur 81,2 en 2002). La France fait partie des pays qui exploitent le plus cette filière (9,1 millions de tep en 2002), principalement pour la production de chaleur dans les secteurs industriel, tertiaire et résidentiel. Le potentiel européen est cependant encore important et il faudra encore beaucoup d'efforts pour atteindre l'objectif des 100 millions de tep que la Commission s'est fixé pour 2010.

Le biogaz, une croissance modérée mais régulière

Le développement de la filière est caractérisé en Europe par une croissance modérée mais régulière d'environ 9 à 10 % par an. En 2002, 2,8 millions de tep de **biogaz** ont été produites au sein des quinze pays membres avec un poids particulier pour la Grande-Bretagne (952 000 tep). Notons que seule une partie de cette production sera ensuite effectivement valorisée sous forme d'énergie finale (électricité, chaleur, carburant). En effet, faute de débouchés économiques rentables, environ la moitié du biogaz produit dans l'Union



Photo

La Commission européenne s'est fixé pour 2010 un objectif ambitieux de 100 millions de tep pour l'utilisation énergétique du bois.

européenne est brûlée en torchère car le **méthane** est un gaz particulièrement nuisible en matière d'**effet de serre**. Pour le futur, le Livre blanc ambitionne d'atteindre 15 millions de tep en 2010, soit 5 fois plus que la production actuelle.

Les biocarburants

Le secteur des **biocarburants** est composé de deux filières distinctes; l'**éthanol** qui après transformation en **ETBE** (éthyl-tertio-butyl-éther) sert d'additif pour les moteurs essence et le biodiesel qui sert d'additif pour les moteurs diesel. En 2003, la production européenne d'éthanol a été de 309 500 tonnes et de 1 434 000 tonnes pour le biodiesel. Longtemps *leader* sur les deux filières, la France est aujourd'hui dépassée par l'Allemagne en ce qui concerne le biodiesel, et par l'Espagne pour l'éthanol. Une directive européenne adoptée en 2003 a fixé des objectifs précis concernant l'introduction de l'ensemble de ces biocarburants d'ici à 2010: 2% en 2005 et 5,75% d'ici à 2010. Actuellement, le taux est inférieur à 1%.

> Frédéric Tuillé

Observatoire des énergies renouvelables
(Observ'ER)
Paris

■ Pour en savoir plus : www.energies-renouvelables.org

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).

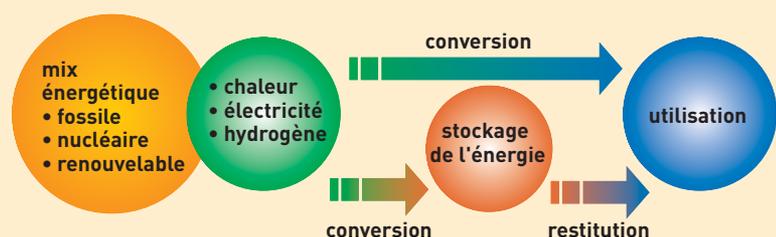


Figure 1. Le schéma énergétique.

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.

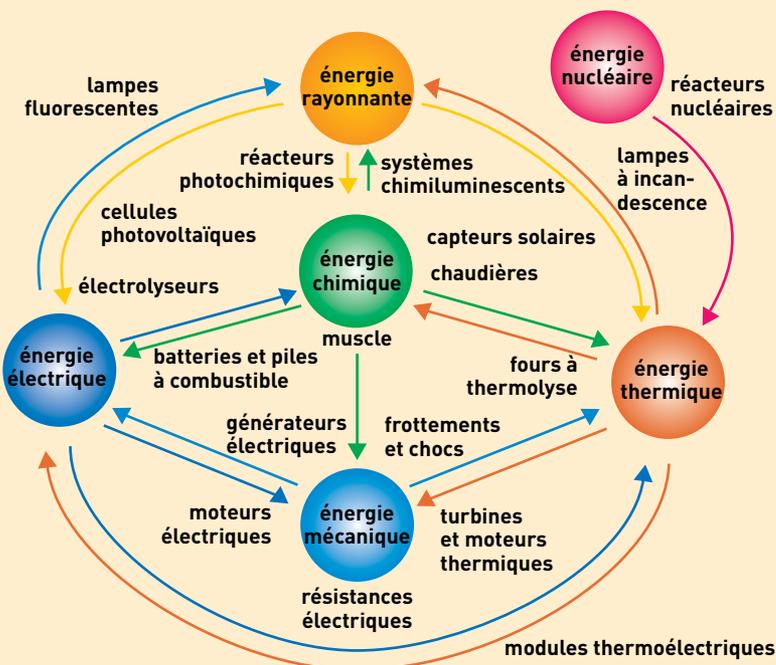


Figure 2. Conversions des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie.

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

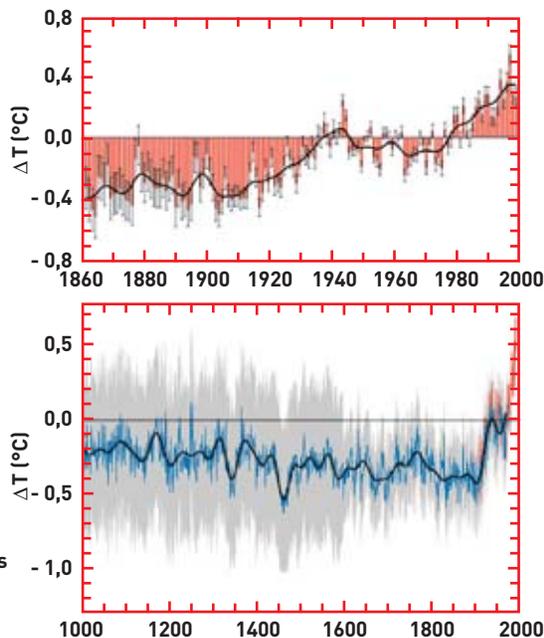
carbonique actuelle conduirait, à la fin du vingt et unième siècle, à une élévation de la température de l'ordre de 2 à 3 °C. Certains donnent même une fourchette entre 1,5 et 4,5 °C, laissant prévoir des conséquences dramatiques sur l'environnement, comme la montée notable du niveau de la mer.

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).

■ mesures par thermomètres
■ données estimées



B (suite)

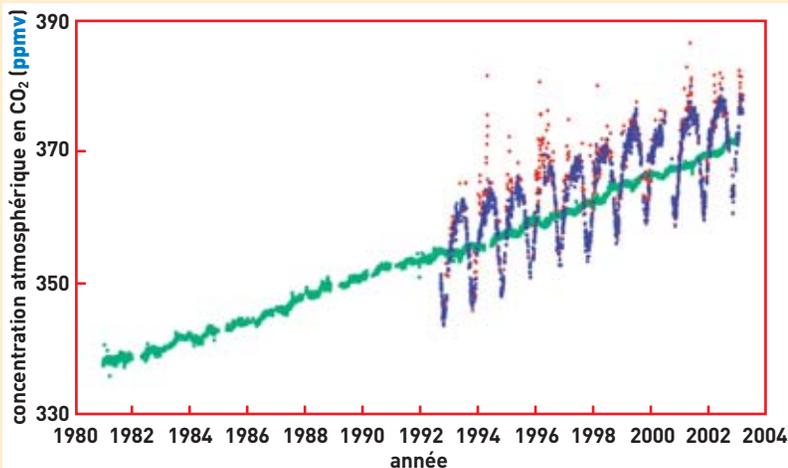


Figure 2.

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

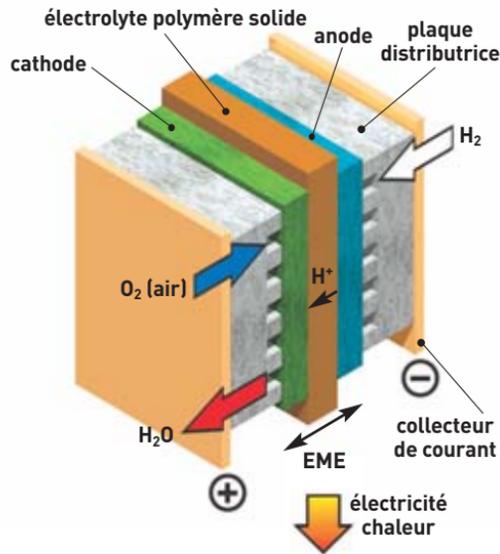


La station de mesure de Mace Head, en Irlande.

(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

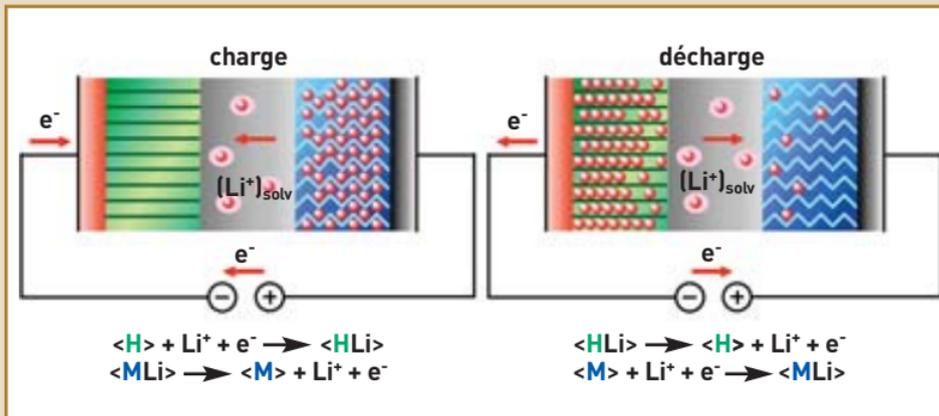
solution de potasse concentrée, a permis d'atteindre une densité d'énergie massique de 70 à 80 Wh/kg. La seconde filière avait déjà fait l'objet de travaux vers la fin des années soixante-dix, dans la perspective de trouver des couples électrochimiques présentant de meilleures performances que les accumulateurs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



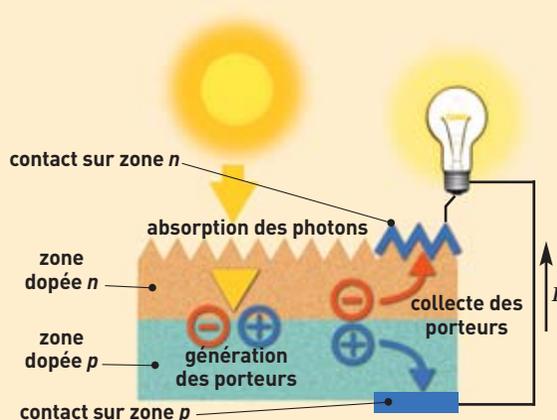
160 Wh/kg et 400 Wh/l), supérieures en moyenne de plus de 50 % à celles des batteries conventionnelles.

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.

D Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque ?

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites

respectivement *dopée de type n* et *dopée de type p*. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau *n* diffusent dans le matériau *p*. La zone initialement dopée *n* devient chargée positivement, et la zone initialement dopée *p* chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone *n* et les trous vers la zone *p*. Une **jonction** (dite *p-n*) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones *n* et *p*, une **diode** est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les **photons** d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la **bande interdite** communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la **bande de valence** dans la **bande de conduction** et laisse aussi



un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une **paire électron-trou**. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone *n* rejoignent les trous de la zone *p* via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule (figure).

L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la **conductivité**. Le **silicium** employé aujourd'hui dans la plupart des cellules a été choisi pour la présence de quatre électrons de **valence** sur sa couche périphérique [colonne IV du tableau de Mendeleïev]. Dans le silicium solide, chaque atome – dit tétravalent – est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons. Si un atome de silicium est

remplacé par un atome de la colonne V (phosphore par exemple), un de ses cinq électrons de valence ne participe pas aux liaisons ; par agitation thermique, il va très vite passer dans la bande de conduction et ainsi devenir libre de se déplacer dans le cristal, laissant derrière lui un trou fixe lié à l'atome de dopant. Il y a conduction par un électron, et le semi-conducteur dit *dopé de type n*. Si au contraire un atome de silicium est remplacé par

un atome de la colonne III (bore par exemple) à trois électrons de valence, il en manque un pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut rapidement venir combler ce manque et occuper l'orbitale vacante par agitation thermique. Il en résulte un trou dans la bande de valence, qui va contribuer à la conduction, et le semi-conducteur est dit *dopé de type p*. Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont donc des dopants du silicium. Les cellules photovoltaïques sont assemblées pour former des **modules**.

N.B. Voir dans *Les cellules photovoltaïques organiques : vers le tout polymère...* le principe des cellules photovoltaïques organiques ([encadré, p. 122](#)).

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique

Après absorption des **photons** par le **polymère**, des **paires électron-trou** liées (excitons) sont générées, puis dissociées. Compte tenu des limitations propres aux matériaux organiques (durée de vie des excitons, faible mobilité des charges), seule une faible fraction des paires électron-trou générées par les photons contribue effectivement au photocourant. L'une des idées majeures est de distribuer en volume les sites de photogénération pour améliorer la dissociation des excitons. Cette démarche est basée sur l'augmentation de la surface de la **jonction**, grâce à la mise en œuvre d'un réseau interpénétré de type donneur/accepteur (D/A) assurant le transport des trous (P^+) vers l'**anode** (ITO) et le transport des électrons (e^-) vers la **cathode** métallique (en aluminium Al, par exemple). Si le rendement quantique de séparation des charges photo-induites des systèmes associant un polymère **semi-conducteur** (de type PPV ou polythiophène) à un dérivé du fullerène (PCBM) est ainsi proche de l'unité, l'enjeu est désormais de limiter les phénomènes de recombinaison et de piégeage qui limitent le transport et la collection des charges aux électrodes, afin d'augmenter l'efficacité globale des dispositifs qui demeure encore aujourd'hui faible (inférieure à 5%). L'essor de la filière est également très fortement conditionné par la maîtrise et la compréhension des mécanismes de vieillissement des cellules mais aussi par la maîtrise des technologies en couches minces pour la protection des dispositifs vis-à-vis de l'oxygène et de la vapeur d'eau atmosphériques.

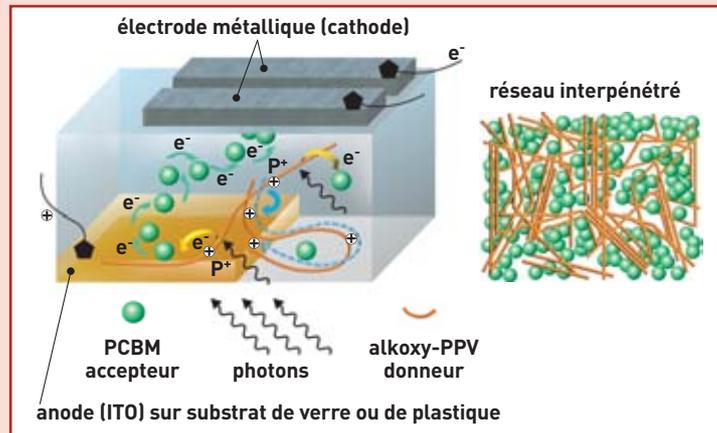


Figure tirée d'une présentation de S. Sarricifici (www.lios.at)

La ligne bleue en pointillés correspond au parcours des trous dans le matériau.