

Si la planète veut un développement durable pour tous ses habitants, elle doit diminuer le recours aux énergies fossiles au bénéfice des énergies les moins polluantes et dévoreuses de ressources. Les énergies renouvelables et nucléaire sont les seules à offrir des perspectives suffisantes à cet égard.

Énergies d'aujourd'hui et de demain



Le site d'Olkiluoto (Finlande) avec au premier plan, en image de synthèse, le premier réacteur nucléaire européen de troisième génération (EPR), qui sera construit par Framatome-ANP (groupe Areva) et Siemens (pour l'îlot conventionnel), précédant la tête de série qu'EDF a décidé de construire à Flamanville (Manche). Au second plan figurent les deux réacteurs de deuxième génération actuellement exploités par TVO.

Que l'on considère la pente de l'augmentation de la température du globe sous l'effet des **gaz à effet de serre** (encadré B, *Effet de serre et CO₂*, p. 20), l'échéance des réserves d'énergies **fossiles** (tableau 1), ou l'évolution de la demande mondiale d'énergie, il devient urgent, après la prise de conscience de Kyoto en 1997, de développer les sources d'énergie les plus respectueuses de l'environnement et économes en ressources naturelles. Il faut parallèlement optimiser la consommation pour obtenir un service donné avec la quantité d'énergie minimale.

Une augmentation inéluctable de la demande

La consommation énergétique ne peut que croître, pour deux raisons : l'une est l'accroissement accéléré de la population, qui devrait atteindre 8 milliards d'individus en 2050, l'autre réside dans le fait que les pays en développement ne peuvent élever leur niveau de vie qu'en augmentant notablement leur consommation énergétique. Sur les 6 milliards d'habitants qui peuplent

charbon ⁽¹⁾	346
lignite (+ sous-bitumineux) ⁽¹⁾	155
pétrole ⁽¹⁾	156,7
gaz ⁽¹⁾	158,2
bitumes (schistes + sables) + pétroles extra-lourds ⁽²⁾	500
hydrates de méthane ⁽²⁾	2 800 à 6 900 000 ⁽⁴⁾
uranium (en réacteurs à neutrons lents) ⁽³⁾	39 ⁽⁵⁾
uranium (en réacteurs à neutrons rapides) ⁽³⁾	1 967 ⁽⁵⁾

Tableau 1.
Ordres de grandeur des réserves énergétiques en milliards de tonnes équivalent pétrole (Gtep). (Sources : (1) BP *Statistical Review 2004* ; (2) CME *2001 Survey of energy resources* ; (3) AEN, "Livres rouge 2001").
(4) Une faible part de ces réserves serait réellement récupérable, estimée à 180 000 Gtep dans l'étude CME ; (5) 1 tonne d'uranium = 10 000 tep en réacteur à neutrons lents et 500 000 tep en réacteurs à neutrons rapides.

notre planète, 2 milliards n'ont pas accès à l'électricité. La consommation électrique moyenne est de 2 000 kWh par habitant et par an mais avec de grandes disparités. Moins de 10 % de la population mondiale consomme plus de 7 000 kWh/an alors que 64 % utilisent moins de 1 000 kWh/an. Un Français consomme, en moyenne,



un peu plus de 8 000 kWh par habitant et par an. Or le taux de mortalité infantile augmente quand la consommation d'énergie baisse: il est multiplié par 70 pour les chiffres les plus bas et l'espérance de vie chute brusquement lorsque la puissance utilisée est inférieure à 1 600 kWh/an. Si ces situations ne sont pas la conséquence de la seule sous-consommation énergétique, celle-ci reflète la pauvreté d'une partie des humains: 2,8 milliards d'entre eux vivent avec moins de 2 € par jour.

La consommation d'énergie mondiale a été multipliée par 10 entre le début et la fin du vingtième siècle, ce qui a correspondu à une augmentation importante du niveau de vie. En France, la richesse d'un habitant a été ainsi multipliée par un facteur quatre en 50 ans, de 1950 à 2000, alors qu'elle n'avait été multipliée que par un facteur 2,3 entre 1400 et 1820, soit plus de 400 ans. Cette utilisation massive de l'énergie a permis des progrès qui se sont traduits, par exemple, par une augmentation notable de la longévité. Alors qu'à la fin du dix-septième siècle l'espérance de vie d'un Français était inférieure à 30 ans, elle est passée à une cinquantaine d'années au début du XX^e siècle et à plus de 75 ans à l'aube du XXI^e siècle.

Sources d'énergie épuisables et renouvelables

Les sources d'énergie non renouvelables (charbon, pétrole, gaz, uranium) s'épuisent au fur et à mesure de leur exploitation contrairement à l'hydraulique, au solaire, au vent, à la **biomasse**... qui seront disponibles pendant encore environ 5 milliards d'années, avant que notre planète ne soit engloutie par notre étoile, le Soleil. Or la consommation énergétique mondiale – de même que la production d'électricité – est largement dominée par les énergies fossiles (pétrole, **gaz naturel** et charbon) qui représentent plus de 85 % de l'**énergie primaire** (encadré A, *L'énergie dans tous ses états*, p. 9). Le gaz est devenu particulièrement compétitif avec les progrès des turbines à gaz et la technologie du "cycle combiné" qui ont permis de diminuer fortement le coût du kWh, dont 70 % res-

	hypothèse basse	hypothèse haute ⁽¹⁾
charbon	860	1 290
gaz naturel	480	780
hydraulique	4	18
nucléaire	8	59
éolien	11	75
solaire photovoltaïque	30	280
biomasse	0	116

(1) L'hypothèse haute correspond pour : le charbon, à une mauvaise qualité et un transport assez long; le gaz, aux fuites de CH₄ sur longue distance (cas de la Russie); l'hydraulique, à la production de CH₄ lors des mises en eau; le nucléaire, à l'enrichissement obtenu par de l'électricité à base de charbon (cas des États-Unis); l'éolien et le solaire photovoltaïque, à l'électricité à base de gaz naturel en complément à leur production intermittente; la biomasse, à l'absence de reboisement.

Tableau 2. Contenu en CO₂ équivalent par kWh produit (en g).

tent toutefois représentés par le gaz lui-même, ce qui ne permet pas d'assurer des prix stables sur une longue période.

Réserves finies et effet de serre

L'utilisation massive des énergies fossiles expose la planète à deux problèmes majeurs – accroissement de l'effet de serre à relativement court terme et épuisement des réserves à plus long terme – qui ne sont pas complètement dissociables. Ce sont, en effet, les atomes de carbone extraits sous forme de gaz naturel, pétrole ou charbon qui conduisent à la production inexorable de **gaz carbonique** (CO₂), les sources les plus **hydrogénées** étant celles qui en émettent le moins (tableau 2).

Nous vivons une période d'énergie abondante dont le prix reste inférieur à ce qu'il devrait être si nous avions une attitude responsable vis-à-vis des ressources naturelles et des générations futures. Dès la seconde moitié du XXI^e siècle, gaz et pétrole se feront plus rares et plus chers. Il faudra, à terme, les réserver à des utilisations plus nobles que la combustion, comme la chimie. Pour le charbon, les réserves devraient couvrir plusieurs siècles. Pour le **nucléaire**, elles peuvent se chiffrer en dizaines de milliers d'années si l'on utilise des *réacteurs à neutrons "rapides"*, qui permettent d'extraire la presque totalité de l'énergie du combustible alors que l'échelle de temps serait du même ordre de grandeur que pour les **hydrocarbures** avec des *réacteurs à neutrons "lents"*, qui n'en exploitent que 0,5 à 1 %. Il sera peut-être un jour rentable d'utiliser d'autres sources d'uranium, comme l'eau de mer ainsi que le thorium qui est encore plus abondant que l'uranium. L'intérêt de l'énergie nucléaire est la faible contribution du coût de l'uranium naturel dans le prix du kWh. Une augmentation du prix de l'uranium naturel d'un facteur 10 augmenterait de moins de 40 % le prix du kWh alors qu'il serait multiplié par 7 dans le cas du gaz.

À plus long terme, la **fusion thermonucléaire** pourrait fournir de l'énergie pendant des milliers d'années si l'on utilise la fusion deutérium-tritium (D-T), pendant toute la durée de vie de la Terre si l'homme arrive un jour à maîtriser la fusion deutérium-deutérium. Loin d'être industriellement maîtrisée, la fusion D-T fait l'objet de recherches intensives dans le cadre de



Train 1 de la nouvelle centrale à cycle combiné Dunkerque 6 que Gaz de France doit mettre en service en 2005 à proximité de l'usine sidérurgique d'Arcelor. C'est la première grosse installation à turbine à gaz et cycle combiné construite dans l'Hexagone, avec une capacité de production électrique de deux fois 400 MWe.

l'association Euratom-CEA et de la préparation du projet international ITER. Enfin les réserves de la planète en **hydrates de méthane**, supérieures à celles du charbon, du pétrole et du gaz réunies, seront peut-être exploitables dans l'avenir.

Renouvelables mais pas encore compétitives

Un regain d'intérêt se manifeste pour les énergies renouvelables *a priori* inépuisables et perturbant moins l'environnement que les énergies fossiles. Ce sont celles qui ont été utilisées depuis que l'homme a maîtrisé le feu, il y a sans doute environ 500 000 ans, jusqu'à la révolution industrielle, il y a moins de 200 ans. Depuis, leur part a largement décliné. Leur avantage majeur? Une contribution négligeable à l'accroissement de l'effet de serre. Leurs inconvénients? Elles sont diluées, pas toujours disponibles et, pour la plupart, pas encore compétitives dans la majorité des situations. Seule l'hydraulique, qui permet d'obtenir de l'électricité bon marché au prix de coûteux investissements, est utilisée à grande échelle. Cela peut entraîner des nuisances, des perturbations de l'environnement⁽¹⁾ voire des accidents. La rupture du barrage de Morvi (Inde) en 1979 n'a-t-elle pas fait 5 000 morts? En France, deux accidents, en 1895 au Bouvet et en 1959 à Malpasset, ont fait respectivement 100 et 421 morts. Première source d'électricité en France en 1960 (56%), l'énergie hydraulique n'en représentait plus que 12% en 2000. Le prix de son kWh n'en reste pas moins particulièrement bas, l'investissement étant fait. Elle a un fort potentiel en Asie, en Amérique du Sud et dans l'ex-Union soviétique. L'hydraulique, c'est aussi l'énergie des marées, celle des vagues (1 **watt** au mètre carré) et, avec un potentiel cent fois plus important, la très coûteuse énergie thermique des océans.

La plupart des énergies renouvelables et des combustibles fossiles ont pour origine celle du Soleil. Le solaire au sens large recouvre toutes les formes d'énergies à l'œuvre dans la machine atmosphérique terrestre: le solaire proprement dit, l'éolien, l'hydraulique, la **photosynthèse** et l'énergie des vagues. Il n'inclut ni l'énergie marémotrice, due aux mouvements lunaires, ni l'énergie géothermique, qui provient essentiellement de la **radioactivité** terrestre et représente 0,06 watt au m² (environ 3 500 fois moins que le flux solaire). La Terre reçoit du Soleil une puissance totale de 170 000 **TW**: plus de 2 500 fois, au niveau des seuls continents, la consommation mondiale d'électricité! Mais si les énergies renouvelables sont "gratuites", leur récupération ne l'est pas!

L'**énergie solaire** *stricto sensu* peut être utilisée directement (thermique) ou transformée en électricité (**photovoltaïque**). Son problème? Un coût du kWh, pour du raccordé au réseau, encore dix fois plus élevé que celui obtenu avec le gaz ou le nucléaire. En autonome, elle est encore plus chère (de l'ordre de 1,50 € le kWh car il faut des **batteries** pour stocker l'énergie pour la nuit). D'un grand intérêt pour les sites isolés (économie du raccordement), elle n'est pas appropriée pour fournir de grosses puissances. Diminuer fortement le coût des cellules photovoltaïques nécessite des

ruptures technologiques comme la réalisation de couches minces minérales ou organiques, une piste notamment suivie dans une collaboration entre le CEA et le **CNRS**. L'**éolien**, qui correspond à la transformation en énergie mécanique de 1% de l'énergie reçue sur Terre, est en plein essor, mais produit un kWh dont le prix reste 2 à 4 fois supérieur à celui du nucléaire ou du gaz. Une éolienne fournit une puissance proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Une installation de 750 kW fournit cette puissance pour un vent de 15 m/s (force 7) n'en délivre plus qu'une trentaine pour un vent de 5 m/s (force 3), et... zéro les jours sans vent: un site bien venté peut fournir de 20 à 30% de la puissance *installée*. Les éoliennes peuvent être placées en mer (*offshore*) où les vents sont plus forts et réguliers. Leurs inconvénients (surface occupée, nuisances visuelle et sonore) sont mieux connus que les avantages comme l'effet de haie, favorable à l'agriculture.

La **biomasse** est un bon moyen de stocker l'énergie solaire, diffuse et intermittente, mais avec un rendement faible: 1% ou moins dans les zones tempérées. Les plantes consomment du gaz carbonique, ce qui compense en partie celui émis lors de leur combustion. Pour le bois, par exemple, le bilan CO₂ est 7 à 12 fois inférieur à celui du gaz. Mais il convient d'améliorer les méthodes de combustion de la biomasse à la faible densité énergétique: le CEA et l'**IFP** y travaillent. Comme pour les autres sources, il est important de faire un bilan global avant de parler de rendement: il faut par exemple, dépenser l'équivalent de 1 litre de carburant fossile pour produire 1,5 litre de **bioéthanol** ou 2 litres d'**ester de colza**. Mais il est possible de mieux utiliser les sous-produits. Enfin, bien que l'objectif soit avant tout de les détruire, les réduire ou les rendre inertes, les **déchets** peuvent représenter une source d'énergie d'appoint (au mieux 1% de la consommation en France pour les déchets ménagers).

Le cas difficile des transports

Le pétrole est aujourd'hui irremplaçable dans les transports, dont il couvre 95% des besoins. La consommation d'énergie du secteur représente en France le quart de la

consommation totale et augmente plus vite qu'elle. La technologie actuelle ne pourra perdurer très longtemps à cause de sa contribution à l'effet de serre (une voiture relâche dans l'atmosphère environ 1 tonne de CO₂ tous les 5 000 km), de la raréfaction et du renchérissement des énergies fossiles.

Pour l'automobile, une évolution probable est le **véhicule hybride** doté à la fois d'un moteur thermique et d'un moteur électrique couplé à une batterie. À plus long terme, l'hydrogène pourrait être utilisé avec des **piles à combustible**. Il reste néanmoins de gros obstacles techniques et économiques à résoudre et le CEA travaille activement sur ces sujets (*voir le chapitre I*). Par exemple, l'hydrogène propre, produit par **électrolyse** vaut 3 fois plus cher que celui produit par le gaz. D'autre part, les piles à combustible pour véhicules particuliers coûtent près de cent fois plus cher qu'un moteur à explosion de performances comparables.



Véhicule hybride de type Scenic construit par Renault, doté à la fois d'un moteur thermique et de batteries électriques. Cette formule constitue une phase d'évolution probable vers l'automobile équipée, à plus long terme, d'une pile à combustible alimentée en hydrogène.

(1) Il faut rappeler parmi ses effets bénéfiques la régulation du réseau fluvial.



L'hydrogène, vecteur énergétique de l'avenir

L'hydrogène pourrait s'imposer comme un nouveau **vecteur énergétique** après l'électricité et la chaleur. Le CEA, conscient de ces perspectives, accroît ses recherches dans ce domaine ainsi que dans celui des piles à combustible, qui peuvent avoir de multiples utilisations dans les transports et dans le domaine du **stationnaire**, comme source d'électricité et de chaleur, ou dans celui du portable pour l'alimentation d'appareils "nomades" (téléphones, ordinateurs, outils de jardin, camping...).

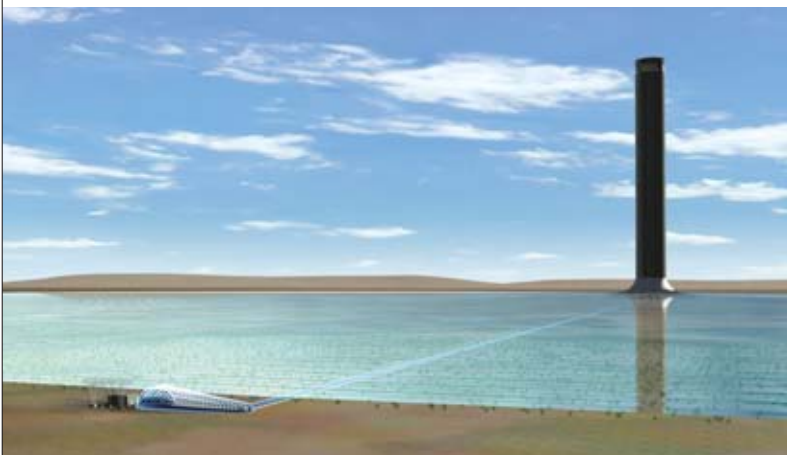
Les besoins en électricité et ceux associés à la production d'hydrogène (par exemple par électrolyse de l'eau) demanderont des quantités d'énergie considérables. Il serait rationnel d'utiliser le nucléaire, qui n'accroît pas l'effet de serre, pour en fabriquer une grande partie. Pour produire, par électrolyse, l'hydrogène nécessaire pour faire fonctionner autant de véhicules qu'aujourd'hui, il faudrait, en France, 450 **TWh** par an, soit à peu près la quantité d'électricité consommée actuellement. Ceci représente une soixantaine de réacteurs nucléaires de 1 000 **MWe** ou 300 000 éoliennes de 750 **kW**. Proposer des procédés de production à haut rendement et propres constitue un des objectifs des travaux menés dans ce domaine par le CEA. De plus, le stockage de l'hydrogène par compression ou liquéfaction demande aussi de l'énergie et son transport est beaucoup moins efficace (énergie transportée par unité de volume) que celui du pétrole (15 fois) ou du gaz (3 fois).

Le nucléaire du futur

Outre son prix très compétitif, surtout aux heures creuses (moins de 3 centimes d'euro le kWh), et l'indépendance qu'il procure, le nucléaire génère une grande part de sa valeur ajoutée dans le pays utilisateur. Aussi sa contribution dans le cadre d'un développement durable devrait-elle rester significative.

Le nucléaire du futur devra satisfaire à cinq conditions, dont celle de produire un kWh à un prix inférieur ou égal aux autres sources d'énergie. Il devra être encore plus sûr, même si la plupart des filières précédentes ont un niveau de sûreté très satisfaisant, et produire plus d'énergie avec la même quantité de combustible. Il devra générer moins de déchets, surtout à vie longue⁽²⁾, être capable de brûler une partie de ceux des réacteurs plus anciens et ne pas être militairement utilisable.

Vue d'artiste du projet Solar Tower d'EnviroMission qui doit voir s'élever une cheminée haute de 1 km dans le désert australien en 2008. À sa base, 32 turbines seront entraînées par un tirage d'air généré, grâce à la différence de température entre l'air ambiant et celui réchauffé par l'effet de serre créé sous des panneaux translucides installés près du sol. La construction doit démarrer en 2005.



RMIT University/Interactive Information Institute, Melbourne (Australia)/EnviroMission Ltd



Earth-vision.biz/Wave Dragon

Parmi les nouvelles sources d'énergie dont la faisabilité technique et surtout économique reste à démontrer figure l'énergie des vagues, qui fait depuis 2003 l'objet d'une expérimentation dans le fjord danois de Nissum Bredning dans le cadre du projet Wave Dragon.

Les économies d'énergie : les "négawatts"

Il est tout aussi important d'utiliser au mieux l'énergie produite. L'optimisation des dispositifs, s'appuyant sur la modélisation numérique et des systèmes programmés et intelligents, permet d'obtenir le même service avec moins d'énergie. Il reste beaucoup à faire dans le domaine des économies d'énergie où le CEA a déjà acquis une longue expérience. La microélectronique fournit le plus bel exemple de réduction de la consommation d'énergie (et de prix) assortie d'une augmentation fantastique des performances. La diminution de la consommation contribue à créer des *négawatts* (watts non consommés) sans diminution du service rendu et du niveau de confort.

Une partie du futur énergétique

Le CEA a fortement contribué à mettre en place la filière nucléaire qui fournit actuellement 78 % de l'électricité française à un prix qui restera longtemps stable. Grâce aux compétences développées, il s'est très tôt investi dans des domaines comme l'optimisation des systèmes énergétiques ou le photovoltaïque. Il contribue aux recherches visant à diminuer le coût trop élevé des énergies renouvelables. Il accentue ses efforts dans le développement des nouveaux vecteurs et **convertisseurs d'énergie**, en travaillant sur la production et le stockage de l'hydrogène, sur les piles à combustible afin d'en baisser fortement les coûts et en augmenter la fiabilité ainsi que sur les batteries pour en améliorer la capacité et la longévité, et sur les technologies qui permettent de consommer moins d'énergie. Les pages qui suivent situent les travaux, hors nucléaire, pour réaliser certaines des ruptures nécessaires et préparer une partie du futur énergétique.

> Christian Ngô

Délégué général de l'Association Ecrin
Paris
Directeur scientifique auprès
du Haut-commissaire à l'énergie atomique
CEA (Paris)

(2) Ces déchets sont parfaitement localisés alors que la pollution des gaz à effet de serre est planétaire. À noter aussi que même une centrale thermique au charbon a, en fonctionnement normal, des rejets radioactifs bien supérieurs à ceux d'une centrale nucléaire. En moyenne, une centrale à charbon émet autant de radioactivité dans l'atmosphère que 100 centrales nucléaires.

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).

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

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.

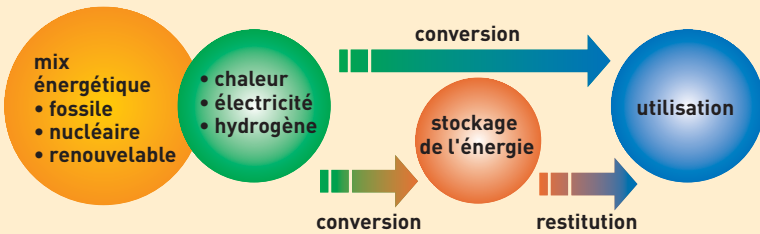


Figure 1. Le schéma énergétique.

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

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-**

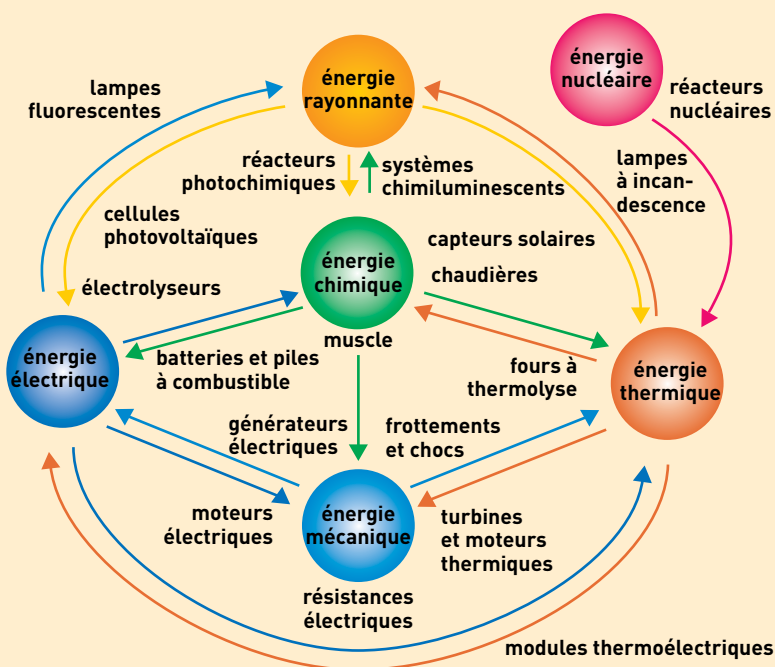


Figure 2. Conversions des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie.

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

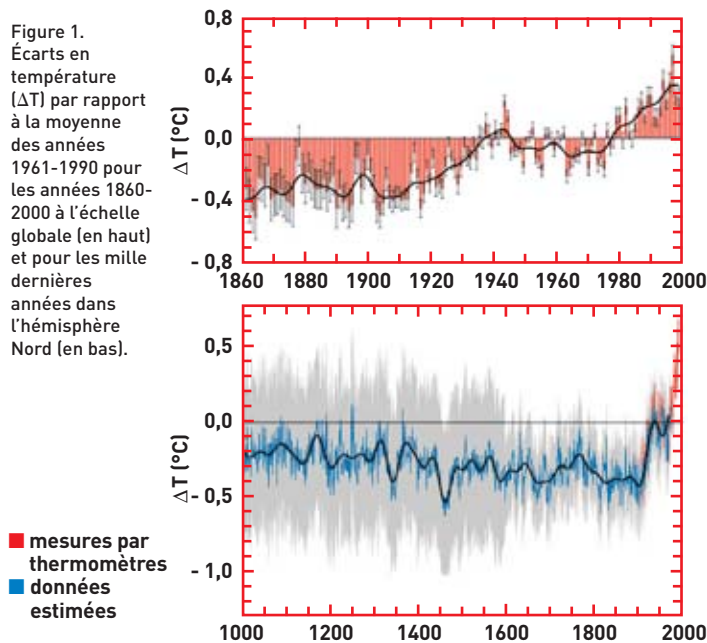
a contribué à l'augmentation de la température moyenne de notre planète d'environ 0,5 °C, observée au cours du vingtième siècle (**figure 1**). Si rien n'est fait pour réduire ces émissions, la concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère (**figure 2**) pourrait doubler d'ici 2100. À partir de la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

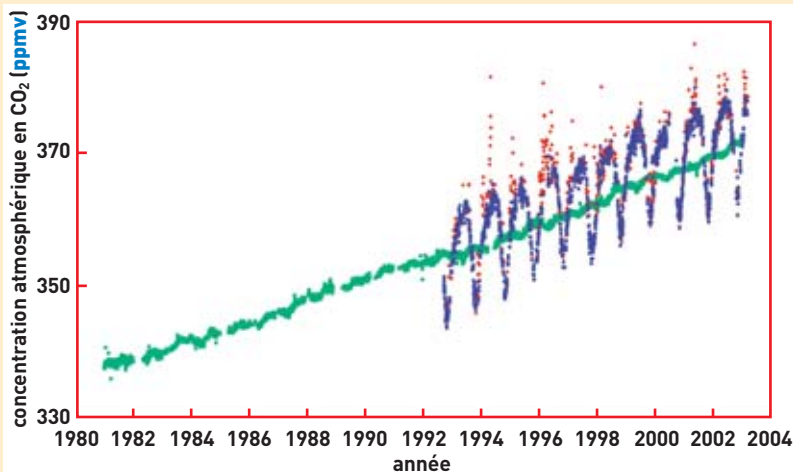


Figure 2.

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



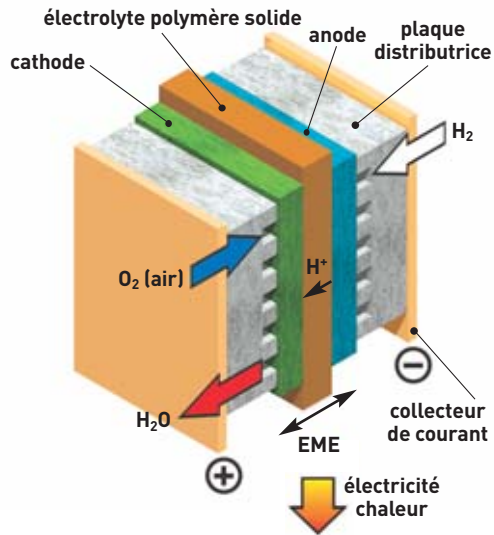
National University of Ireland

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

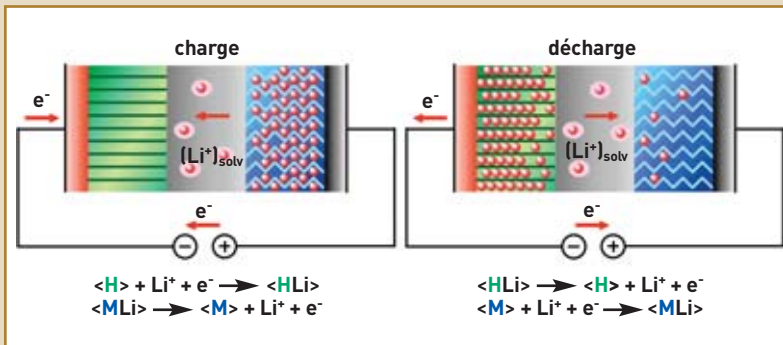
solution de potasse concentrée, a permis d'atteindre une densité d'énergie massique de 70 à 80 Wh/kg. La seconde filière avait déjà fait l'objet de travaux vers la fin des années soixante-dix, dans la perspective de trouver des couples électrochimiques présentant de meilleures performances que les accumulateurs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



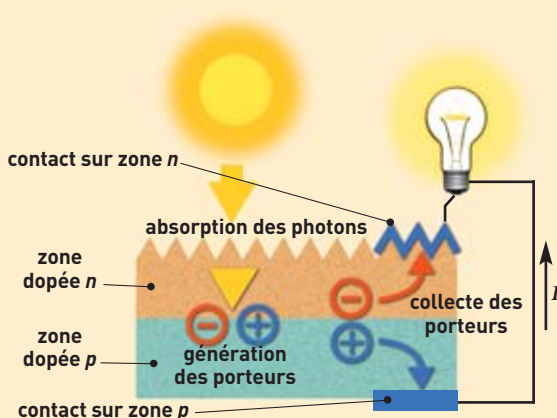
160 Wh/kg et 400 Wh/l), supérieures en moyenne de plus de 50 % à celles des batteries conventionnelles.

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.

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.

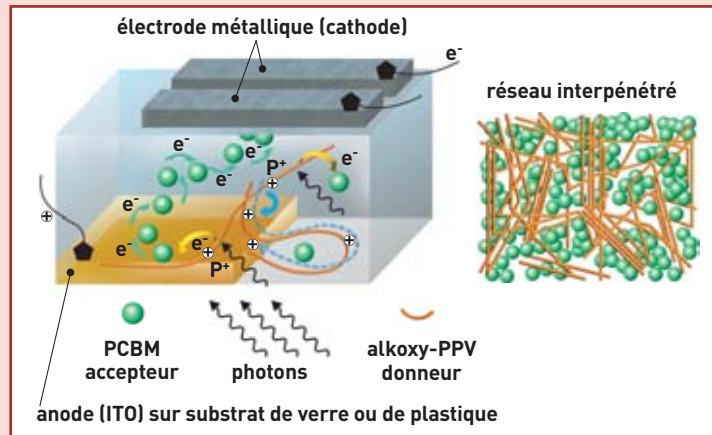


Figure tirée d'une présentation de S. Sarriciffici (www.ios.at)

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