Les gisements d'économies d'énergie **restent importants**

Les principaux secteurs de consommation d'énergie en France sont l'industrie, le résidentiel-tertiaire et les transports. Ces vingt dernières années, si le poids relatif de la consommation d'énergie dans l'industrie a diminué, les autres secteurs ont connu une croissance marquée des consommations énergétiques. Le CEA mène d'importants travaux visant à augmenter l'efficacité énergétique des procédés dans ces différents secteurs, où le potentiel d'économies d'énergie demeure significatif.

A. Gonin/CEA

Plaque haricot, système innovant dans le domaine des échanges thermiques. L'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie passe par une optimisation des transferts de chaleur dans les échangeurs thermiques.

Sur la période 1973-2002, la consommation finale d'énergie pour les différents secteurs (figure 1) a augmenté de 21 % (soit 28,6 **Mtep**). Dans l'industrie, la consommation a baissé de 21 % (10,3 Mtep) alors que la consommation du secteur résidentiel-tertiaire s'est accrue de 25 % (14,1 Mtep) et que celle des transports s'est élevée de 93 % (24,6 Mtep). Si l'évolution de consommation reste inchangée, la consommation finale en énergie pourrait augmenter de 40,6 Mtep d'ici 2020, principalement tirée par le résidentiel-tertiaire et les transports.

Les objectifs de réduction des émissions de **dioxyde de carbone (CO_2)** dans le cadre du protocole de Kyoto et des engagements communautaires de la France (encadré B, ***Effet de serre et CO_2***, p. 20) supposent, à côté du développement des sources d'**énergie renouvelable**, un effort très significatif d'accroissement de l'efficacité énergétique dans le résidentiel-tertiaire et une poursuite des efforts menés depuis de nombreuses années dans l'industrie.

Efficacité énergétique dans le résidentiel

La France compte 29,6 millions de logements, dont 65 % ont été construits avant 1975. Le parc de logements est donc relativement ancien et un grand nombre d'entre eux présentent une faible isolation thermique. Le taux de renouvellement de ce parc est de l'ordre de 1 %, ce qui suppose que sa remise à niveau ne pourra être réalisée qu'après 2050.

Les usages de l'énergie dans le résidentiel sont largement dominés par les besoins de *chauffage* (figure 2). En effet, 75 % de la consommation totale d'énergie (électricité, gaz, fioul, bois) et 34 % de la consommation électrique des logements sont dus au chauffage. Grâce au renouvellement du parc de logements et aux efforts d'isolation thermique des bâtiments

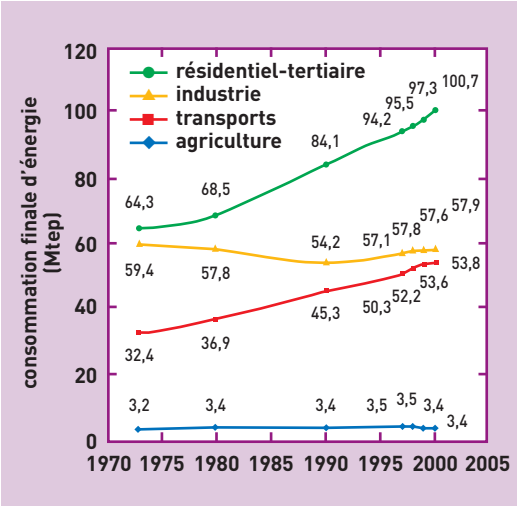


Figure 1.
Consommation finale d'énergie par secteur en France.

Olivier Sébart/Ademe 2003

Cette maison située en Haute-Savoie est équipée en toiture de 22 m² de capteurs photovoltaïques et de 6 m² de capteurs thermiques pour la production d'eau chaude sanitaire. L'une des solutions pour améliorer l'efficacité énergétique dans l'habitat consiste à développer des systèmes énergétiques valorisant les énergies renouvelables comme le solaire.

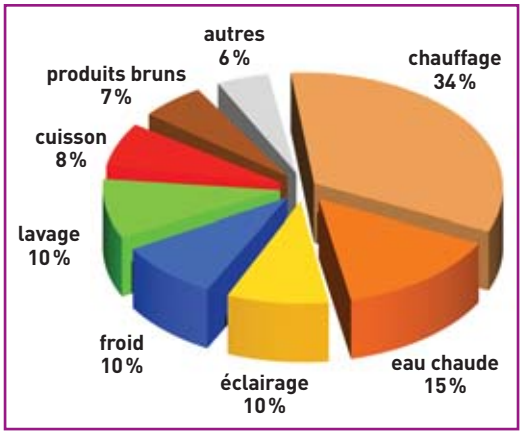


Figure 2.
Répartition des consommations d'énergie électrique par usage dans les logements. Les produits bruns regroupent les équipements électroménagers, les télévisions, les chaînes hi-fi...

existants, la consommation unitaire moyenne de chauffage a baissé entre 1973 et 2000 de 323 à 180 **kWh**/m²/an. Des résidences nouvelles peuvent atteindre aujourd'hui une consommation de chauffage de 110 kWh/m²/an et les constructeurs réalisent, dès à présent, des habitats présentant des consommations inférieures à 50 kWh/m²/an.
Les usages liés aux *équipements électrodomestiques* (froid ménager, équipements électroménagers) et le développement des *nouvelles technologies utilisant l'électronique* (télévision, ordinateurs…) ont favorisé une augmentation nette entre 1973 et 1998 de 18 à 321 kWh par logement.
Les usages émergents d'*équipements destinés à améliorer le confort*, en particulier la climatisation et le conditionnement d'air, restent marginaux dans notre pays. Toutefois, une pénétration significative de la climatisation dans le secteur résidentiel est prévisible et pourra générer un accroissement marqué de la consommation énergétique.
Des gains d'efficacité énergétique sont indispensables dans ce secteur, pour lequel le gisement d'économies d'énergie est évalué à 200 **TWh**/an.
L'amélioration de l'indice d'efficacité énergétique des logements sera favorisée par la mise en place de réglementations sur l'habitat neuf et ancien mais également par le développement et la diffusion de technologies performantes (voir *La maîtrise de l'énergie dans l'habitat*, p. 149) telles que :
• les *dispositifs de production thermique performants* pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, comme les pompes à chaleur à haute efficacité utilisant des fluides sans **effet de serre**, les chaudières à bois ou à

Cellier des Templiers

Installation de climatisation solaire utilisée par la coopérative Le Cellier des Templiers pour climatiser ses caves de vieillissement du vin. 134 m² de capteurs solaires sous vide situés sur le toit alimentent une machine à absorption d'une puissance "froid" de 50 kW.

Banc où sont testés de nouveaux concepts d'échangeurs-réacteurs, appareils basés sur des technologies reconnues ou innovantes du domaine des échangeurs et adaptées au domaine de la chimie. Le développement de systèmes intégrant plusieurs fonctions est une des techniques pour améliorer l'efficacité énergétique.

CEA

gaz à haute efficacité, les récupérateurs thermiques, le stockage thermique à MCP (matériau à changement de phase)…

- les *systèmes énergétiques valorisant les ressources thermiques renouvelables* solaires ou géothermiques à bas niveau de température, tels que les pompes à chaleur à capteurs enterrés, les capteurs solaires…
- l'*intégration* dans l'habitat neuf et ancien *de sources d'énergie électrique*, comme les capteurs **photovoltaïques**;
- des *dispositifs performants de suivi et de gestion de la consommation énergétique* associant capteurs à haute technologie et électronique pour le traitement des données.

Efficacité énergétique dans l'industrie

La part de l'industrie dans la consommation énergétique a constamment décru depuis trente ans et atteint un niveau de 24 % de la consommation finale d'énergie en 2001. La consommation finale d'énergie par branche révèle la prépondérance de trois secteurs: chimie, métaux primaires et minerais, agroalimentaire (figure 3). Les gisements d'économies d'énergie restent importants. Ils sont évalués à 12 Mtep. La figure 4 montre le gisement exploitable des opérations relatives au ***process*** en fonction du surcoût de la mesure. Ainsi, si les industriels acceptent un investissement de 1 000 € pour économiser 1 tep, alors l'économie d'énergie cumulée serait, selon la figure 4, de 5,5 Mtep.

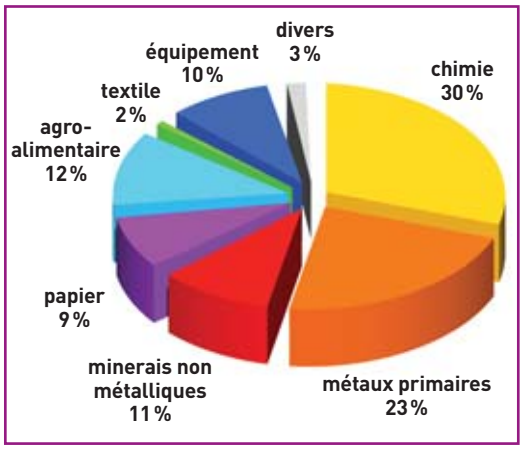


Figure 3.
Consommation finale d'énergie dans le secteur de l'industrie par branche en 2000.

Les deux tiers des gisements pourraient être atteints par la mise en œuvre de techniques économes au niveau du *process* (voir *La maîtrise de l'énergie dans l'industrie*, p. 144) telles que:

- l'*amélioration de l'efficacité des échangeurs thermiques*, qui reste un axe majeur d'accroissement des performances du *process* (encadré);
- l'*intégration de plusieurs fonctions dans un même équipement*, comme cela est le cas avec les échangeurs-réacteurs qui combinent les fonctions transferts thermiques et réaction chimique dans un même dispositif. Le gain d'efficacité attendu est associé à une réduction de la production des déchets et un accroissement de la sûreté du dispositif;
- le *développement d'outils de diagnostic* permettant d'anticiper les opérations de maintenance et de limiter les pertes d'efficacité des équipements et des systèmes comme, par exemple, les sondes d'encrassement.

Le tiers restant peut être obtenu par des mesures touchant les "utilités" tels la production de froid, la transmission de fluide caloporteur ou frigoporteur (voir *Les nouvelles technologies du froid*, p. 152), le chauffage et l'éclairage des locaux…

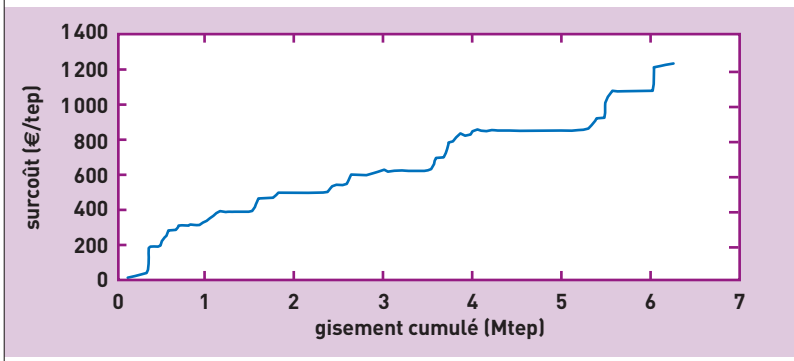


Figure 4.
Gisements d'économies d'énergie cumulés pour l'industrie en fonction du surcoût de la mesure.

> **Christophe Marvillet**
Direction de la recherche technologique
CEA centre de Grenoble

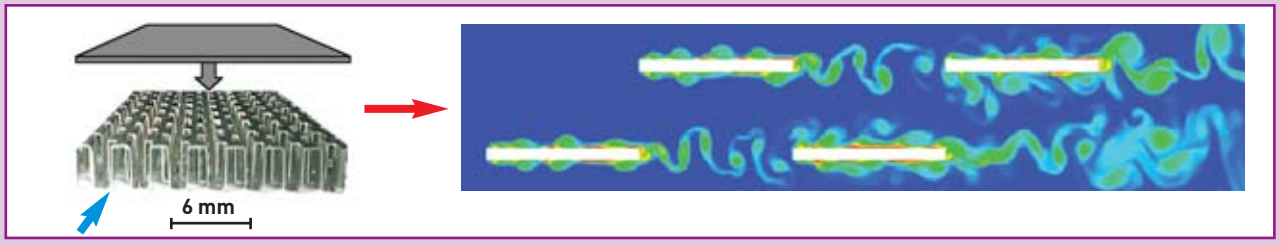
La modélisation des écoulements

Dans le domaine des échangeurs thermiques, la connaissance précise des écoulements est devenue un facteur critique pour la conception et l'optimisation. En effet, rendre l'écoulement **turbulent** ou **diphasique** est la meilleure manière pour augmenter les transferts de chaleur entre un fluide et une paroi. C'est pourquoi ces écoulements complexes sont présents dans la majorité des procédés industriels. Par exemple, dans le cas des échangeurs compacts, le caractère fluctuant, tridimensionnel et à large spectre d'énergie de la turbulence est recherché pour l'optimisation des performances. Cependant, ces trois aspects rendent difficiles les mesures expérimentales et la généralisation des modèles physiques. Jusqu'à il y a cinq ans environ, l'utilisation de moyens numériques pour analyser ce type d'écoulement était réservée aux scientifiques et chercheurs très avertis, et souvent limitée à des géométries simples. Depuis quelques années, le développement des moyens informatiques et la vulgarisation des logiciels de mécanique des fluides rendent les **modélisations** numériques accessibles à tous. Ces méthodes ouvrent un nouveau champ d'investigation en proposant un saut important dans nos capacités à prédire les transferts de chaleur. Malgré tout, un grand fossé subsiste encore entre les travaux académiques et la réalité industrielle. Il manque notamment des validations intensives sur des problèmes industriels réalistes.

Face à cette situation, l'action du GRETh est double. Elle consiste, d'une part, à réaliser la validation industrielle des modèles avancés de simulation thermique sur des problèmes liés aux échangeurs de chaleur, et d'autre part, à rendre accessibles les modèles et leur domaine de validité à son club d'industriels à travers le concept de plate-forme logiciels.

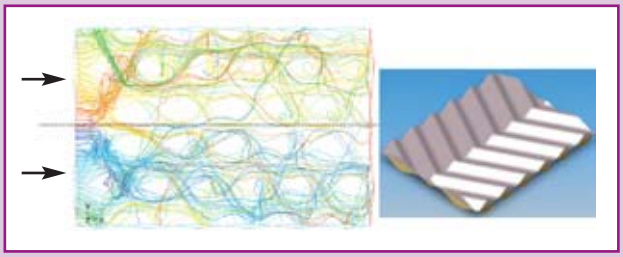
Pour illustrer cette action, il faut citer un travail de fond qui a été réalisé avec l'aide de l'**Ademe** dans le domaine de l'étude des écoulements turbulents au sein des échangeurs de chaleur compacts[1]. En menant une étude systématique de la mise en œuvre de différents modèles de turbulence et de logiciels tels que Trio_U du CEA, FLUENT et STAR-CD[2], il a été démontré, par comparaison avec des résultats expérimentaux, que grâce à une utilisation avertie de modèles de turbulence avancés, de type LES[3], il était possible de disposer d'un outil de prédimensionnement et d'optimisation fiable pour les échangeurs compacts (figures 1 et 2). Un guide de recommandations, destiné aux adhérents du GRETh, a été rédigé, de façon à préciser la meilleure manière d'aborder un problème de modélisation d'écoulements turbulents industriels. Dans la continuité, le GRETh a démarré en 2004 une action sur la modélisation des écoulements diphasiques industriels, en collaboration avec les équipes de thermo-hydraulique de la Direction de l'énergie nucléaire (CEA/DEN).

Rendre ces méthodes accessibles aux industriels est également la préoccupation du GRETh. Cela consiste à travailler en collaboration avec le partenaire industriel en lui ouvrant les moyens disponibles et en l'associant étroitement à la mise en œuvre des outils. Les industriels, qui font appel au GRETh pour des développements technologiques en rupture, ont bien compris l'intérêt qu'ils ont à s'associer à un laboratoire qui essaie d'aller plus loin qu'une simple démonstration des potentialités des nouvelles méthodes.



CEA

Figure 1.
Image instantanée de champ de température de l'air à un instant donné au sein d'un échangeur compact, obtenue à l'aide du logiciel Trio_U. La plaque grise correspond à une des plaques placées de part et d'autre des ailettes, et qui constituent un canal. La flèche bleue représente l'écoulement perpendiculairement à ces ailettes, ce qui se traduit sur la figure de droite par un écoulement de la gauche vers la droite, l'image représentant une coupe horizontale à mi-hauteur d'ailette.



CEA

Figure 2.
Image de l'écoulement d'un fluide au sein d'un échangeur à plaques et joints, obtenue à l'aide du logiciel FLUENT. Dans l'exemple considéré, le pas des chevrons est d'environ 10 mm. Les flèches correspondent au sens de l'écoulement.

Le **GRETh** (Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques), Association loi 1901, a pour mission de diffuser les résultats scientifiques et techniques des recherches menées dans le domaine des échangeurs de chaleur et de permettre la valorisation de ses résultats dans l'industrie. Pour ce faire, le Club des industriels du GRETh s'appuie sur des laboratoires du CEA (le **Grethe** – Service Système multi-énergies et gestion de l'énergie), du CNRS et de l'Université (le LEGI – Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels), et a des liens privilégiés avec les centres d'enseignement des métiers de la thermique comme l'IUT Génie thermique et énergie de Grenoble. L'Association s'est ouverte à l'Europe en mettant notamment en place en tant que coordinateur de programme le projet européen SHERHPA (*Sustainable Heat and Energy Research for Heat Pump Applications*).

> Patrice Tochon
Direction de la recherche technologique
CEA centre de Grenoble

(1) Thèse de F. Michel soutenue fin 2003.

(2) FLUENT et STAR-CD : il s'agit de logiciels de mécanique des fluides, commercialisés par Fluent et CD adapco Group.

(3) LES (*Large Eddy Simulation*) : simulation des grandes échelles, technique prometteuse pour prédire et analyser les écoulements turbulents. À l'inverse de la simulation directe, qui représente toutes les échelles sans aucune approximation, elle repose sur une séparation d'échelles. Ainsi, les échelles d'une taille supérieure à une limite arbitrairement fixée sont déterminées directement par le calcul, alors que les autres sont prises en compte au moyen d'un modèle statistique appelé modèle sous-maille.

B Effet de serre et CO_2

L'énergie solaire qui parvient au sol réchauffe la Terre et se transforme en rayons infrarouges. Comme les vitres d'une serre – d'où le nom donné à ce mécanisme – des gaz présents dans l'atmosphère piègent une partie de ces rayons qui tendent à la réchauffer. Ainsi, en termes de puissance, la Terre reçoit en moyenne un peu plus de 240 watts/m^2. Sans effet de serre, la température moyenne sur la Terre serait de - 18 °C et peu d'eau serait sous forme liquide. Cet effet a donc une influence bénéfique puisqu'il permet à notre planète d'avoir une température moyenne de 15 °C.

Cependant, depuis le début de l'ère industrielle, soit plus d'une centaine d'années, l'homme a rejeté dans l'atmosphère des gaz (gaz carbonique, méthane, oxydes d'azote, etc.) qui augmentent artificiellement l'effet de serre. Depuis 1750, cette augmentation, pour ce qui est des gaz "bien mélangés", a été de 2,43 W/m^2. Avec un "forçage radiatif supplémentaire" de 1,46 W/m^2, le gaz carbonique (CO_2) compte pour plus de la moitié de cet "effet de serre additionnel", loin devant le méthane (0,48 W/m^2), les halocarbures (chlorofluorocarbures CFC, hydrochlorofluorocarbures HCFC et hydrofluorocarbures HFC) avec 0,34 W/m^2 et le dioxyde d'azote avec 0,15 W/m^2. En outre, l'ozone troposphérique présente un forçage radiatif *positif* de 0,35 W/m^2 (mais on estime que l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique constaté entre 1979 et 2000 a entraîné un forçage radiatif *négatif* de 0,15 W/m^2).

Cet ajout à l'effet de serre naturel (155 W/m^2) 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 (7 700 Mtep), il est aisé de calculer la masse de CO_2 actuellement produite : 20 milliards de tonnes par an ! Cela pourrait conduire à une augmentation substantielle de l'effet de serre et mener, par des effets amplificateurs non linéaires, à de profondes altérations du climat. La plupart des modèles prévoient que le double de la concentration de gaz carbonique actuelle conduirait, à la fin du vingt et unième siècle, à une élévation de la température de l'ordre de 2 à 3 °C. Certains donnent même une fourchette entre 1,5 et 4,5 °C, laissant prévoir des conséquences dramatiques sur l'environnement, comme la montée notable du niveau de la mer.

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

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

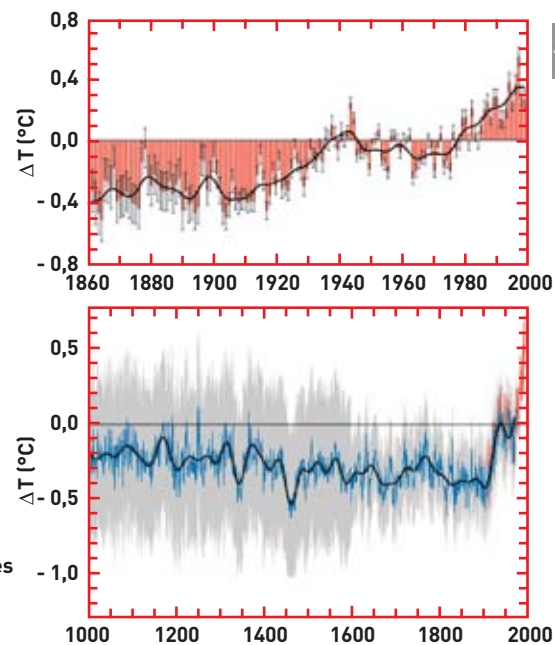


Figure 1. Écarts en température (ΔT) par rapport à la moyenne des années 1961-1990 pour les années 1860-2000 à l'échelle globale (en haut) et pour les mille dernières années dans l'hémisphère Nord (en bas).

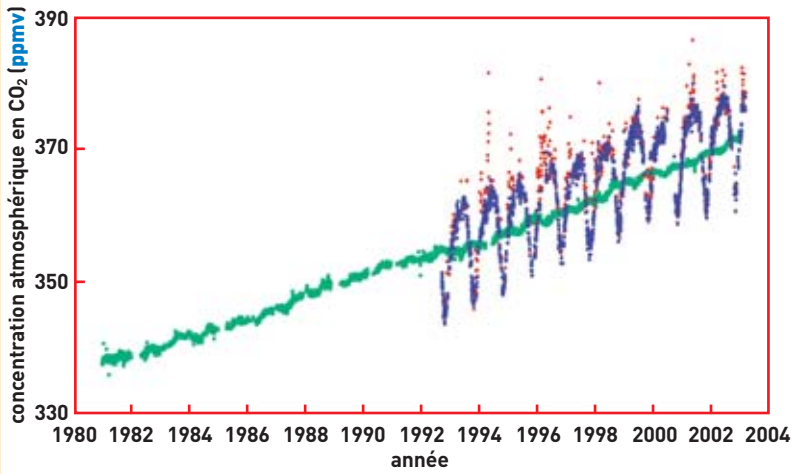


Figure 2.
Évolution de la concentration atmosphérique en CO_2 depuis 1980 telle qu'elle est mesurée quotidiennement par les stations automatiques du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), depuis 1981 sur l'Île d'Amsterdam (Océan indien) et depuis 1992 à Mace Head sur la côte ouest de l'Irlande.
Les mesures à l'Île d'Amsterdam (en vert), loin de toute perturbation anthropique directe, mettent essentiellement en évidence l'augmentation continue de la concentration. Le site de Mace Head mesure essentiellement l'air océanique (régime normal de vents d'ouest ; mesures en bleu). Quand le régime des vents s'inverse, il reçoit une atmosphère continentale, avec un fort excès de CO_2 (mesures en rouge) par rapport à l'atmosphère océanique. À l'augmentation moyenne de la concentration de CO_2 se superpose une forte modulation saisonnière due au cycle végétatif (photosynthèse chlorophyllienne) des plantes, émetteur de CO_2 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 1er janvier 2000 et étendu la réglementation à d'autres produits (dont les HCFC), de **Copenhague** (1992), **Montréal** (1997) et **Pékin** (1999).

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).

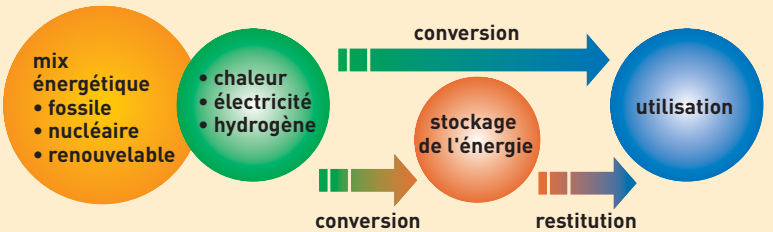


Figure 1.
Le schéma énergétique.

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

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

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

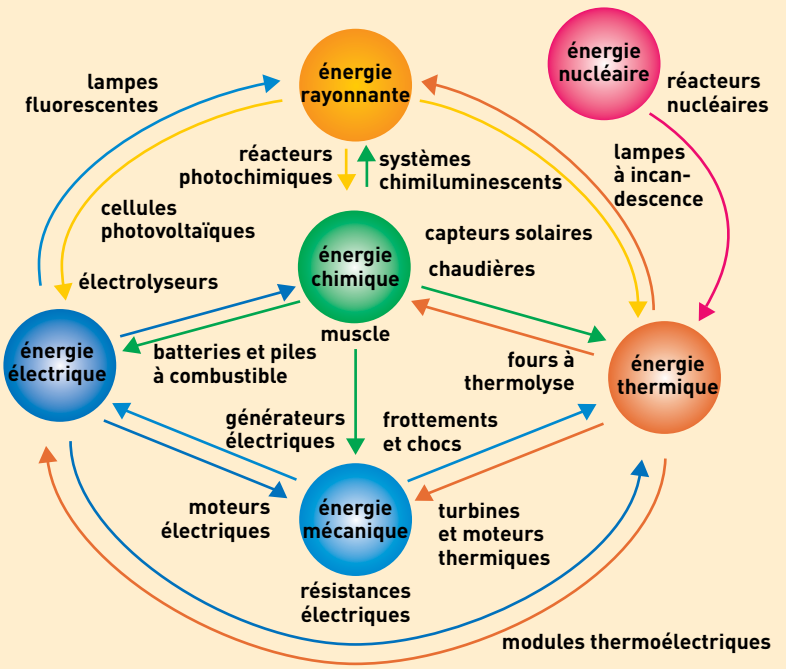
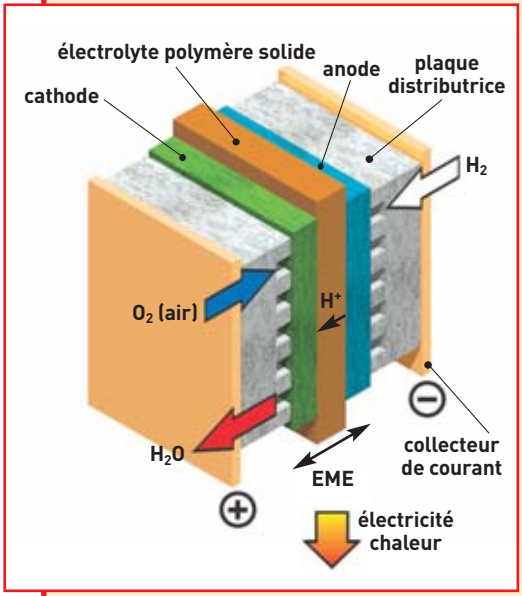


Figure 2.
Conversions des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie.

C Comment fonctionne une pile à combustible ?



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

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

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

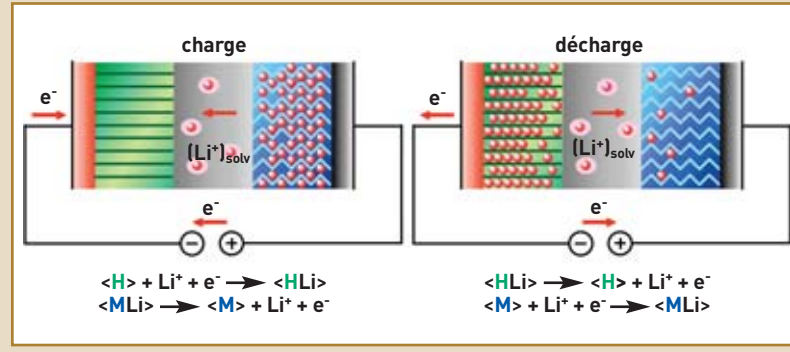
Un accumulateur, quelle que soit la technologie utilisée, est pour l'essentiel défini par trois grandeurs. Sa **densité d'énergie massique** (ou **volumique**), en wattheure par kilogramme, Wh/kg (ou en wattheure par litre, Wh/l), correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (ou de volume) 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 (filière **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/lkg 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

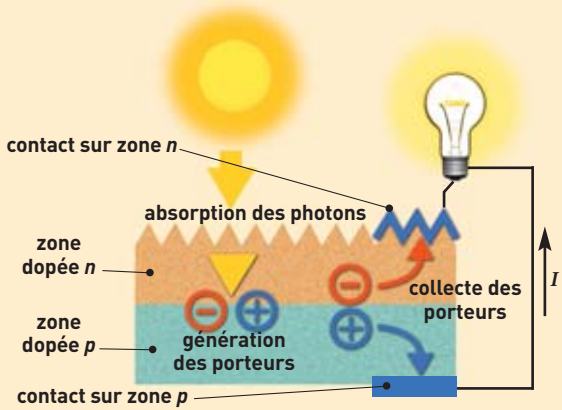


En cours d'utilisation, donc lors de la décharge de l'**accumulateur**, le lithium relâché par l'**électrode négative** (matériau d'intercalation hôte <H>) sous forme **ionique** Li^+ migre à travers l'**électrolyte** conducteur ionique et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif 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.

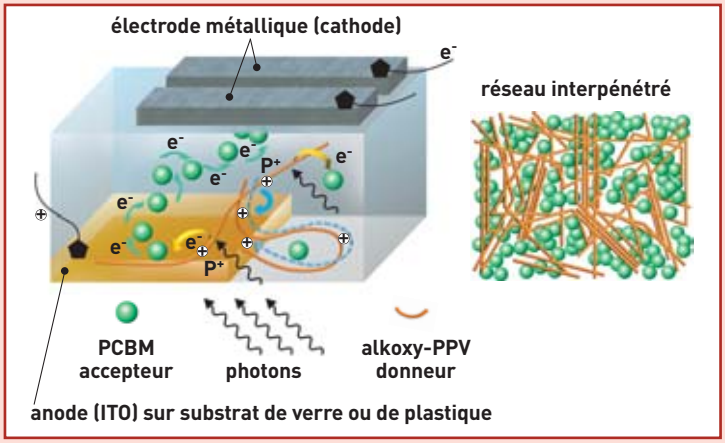


Figure tirée d'une présentation de S. Sariciftci (www.lios.at)

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