L'Europe est, avec l'Amérique du Nord et le Japon, un des pôles où se négocie le virage vers un recours plus marqué aux énergies renouvelables. Le volontarisme communautaire en la matière s'accompagne désormais de la définition d'une politique cohérente de soutien au développement des nouvelles technologies de l'énergie, notamment dans les filières hydrogène/piles à combustible et photovoltaïque.

L'Europe, les **NTE** et les énergies **renouvelables**

Phovoir

La coordination entre programmes nationaux et communautaires est une condition de l'efficacité européenne dans le domaine des nouvelles technologies de l'énergie.

Les soutiens financiers communautaires pour les NTE

Si l'Union européenne n'a que récemment affiché ses ambitions en matière de nouvelles technologies de l'énergie, son effort financier n'en est pas moins significatif.

Trois défis majeurs se posent à l'Europe dans le domaine énergétique : sécurité d'approvisionnement, réduction des émissions de **gaz à effet de serre** et réalisation du marché intérieur. Répondre à ces défis nécessitera des évolutions comportementales, législatives, réglementaires et fiscales mais surtout des innovations technologiques. Bien que des progrès significatifs aient été faits dans le développement de ces nouvelles technologies de l'énergie (NTE), il reste des barrières substantielles à lever, impliquant de lourds investissements.

En présentant ses objectifs stratégiques 2000-2005, la **Commission européenne** avait retenu l'énergie comme un facteur essentiel de la compétitivité et du développement économique de l'Europe. La dépendance énergétique externe de l'Union européenne (UE) est en croissance continue : elle importe aujourd'hui 50 % de ses besoins énergétiques. Si rien est fait, elle importera 70 % de son énergie en 2030.

Deux plates-formes technologiques

Or, ce n'est véritablement que depuis quelques mois que l'Europe donne une visibilité accrue aux NTE et affiche ses ambitions sur la scène internationale. Deux initiatives récentes sont à souligner. D'une part, ont été mises en place deux plates-formes technologiques européennes (**hydrogène**/**piles à combustible** et **photovoltaïque**) visant à focaliser l'action et les moyens européens en intégrant l'ensemble des acteurs publics

et privés concernés. D'autre part, les chefs d'État et de gouvernement de l'UE ont lancé, en novembre 2003, l'*Initiative européenne de croissance*, introduisant le programme *Quickstart* qui identifie dans cinq secteurs d'investissement, d'ici 2010, 56 projets-phare (*Lighthouse*) dont deux concernent l'hydrogène et les piles (3 milliards d'euros).
Ces décisions s'inscrivent dans l'*Espace européen de la recherche* dont l'objectif est de permettre à l'UE de résoudre ses faiblesses structurelles pour devenir « *l'économie de la connaissance la plus compétitive et la plus dynamique du monde* », telle que définie par le Conseil européen de Lisbonne en mars 2000.

Le levier du sixième programme-cadre

Face aux moyens américains et japonais, l'Union européenne plaide avec le 6e PCRDT (programme-cadre de recherche et développement technologique) pour une cohérence et une efficacité plus grandes des États membres en faveur des NTE (tableau).

États-Unis	Japon	Union européenne (États membres + 6e PCRDT)
1 410 M€	1 030 M€	950 M€

Tableau.
Comparaison des efforts financiers annuels de R&D publics sur les NTE (en millions d'euros 2003).
Source : Rapport Chambolle "*Nouvelles technologies de l'énergie*".

Une grande majorité d'Européens (85 %, selon l'enquête Eurobaromètre de mars 2003) ne connaissent pas les activités de R&D européennes liées à l'énergie. La multiplication des guichets accentue la complexité du système d'aide communautaire (certains recensent près de 200 programmes de financement).
La thématique NTE est clairement identifiée dans deux programmes pour 2002-2006 :
Avec 810 millions d'euros (M€), la priorité thématique 6.1 *Systèmes énergétiques durables* du 6e PCRDT offre un cofinancement aux activités de R&D consacrées aux NTE. À mi-parcours du programme, il convient de souligner que le premier et le second appels à propositions ont mobilisé des *consortia* de haut niveau (structures de recherche, industries, universités…), permettant un premier rapprochement des potentiels de R&D en Europe.
Le programme *Énergie intelligente pour l'Europe*, de son côté, soutient les activités de diffusion et de promotion de meilleures pratiques dans le domaine des NTE. Doté d'un budget de 250 M€, il cofinance des projets visant à l'utilisation rationnelle de l'énergie et la maîtrise de la demande, les énergies nouvelles et renouvelables, les aspects énergétiques des transports et la promotion internationale dans les domaines des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique.

Une nouvelle approche

Outre ces deux sources de financement clairement identifiées NTE, il convient de souligner que le 6e PCRDT introduit une nouvelle approche de la recherche dans le domaine de l'énergie, en encourageant les liens entre les priorités thématiques et les programmes de recherches horizontaux. Ainsi, les applications énergétiques peuvent être soutenues au titre des priorités 2 (société de l'information) et 3 (nanotechnologies, matériaux et nouveaux procédés de production). Parmi ces programmes horizontaux, citons en particulier le programme *Soutien aux politiques et anticipation des besoins scientifiques et technologiques de l'UE* dont un axe de recherche est consacré à l'énergie durable. De même, parmi les actions ciblées du programme *Mesures spécifiques destinées à encourager la coopération internationale* figurent les énergies renouvelables. Mais le cœur du financement de la coopération internationale repose sur des programmes d'assistance spécifiques, hors PCRDT. À côté des 2,16 milliards d'euros prévus pour les projets énergie (Phare, Tacis, Cards) avec les pays d'Europe centrale et orientale, les programmes (PVD-ALA, MEDA, FED…) peuvent financer des projets dans le domaine des NTE par appels d'offres.
D'autres programmes du 6e PCRDT ne finançant pas des thématiques de recherche prédéfinies offrent des opportunités de cofinancement : les programmes *PME, Infrastructures, Ressources humaines et mobilité, Recherche et innovation*. De plus, avec le programme Cost, la coopération européenne entre chercheurs est favorisée dans tous les domaines de la recherche scientifique et technique.

D'autres financements

Outre ces financements destinés aux activités de R&D, l'effort financier mobilisé par le 6e PCRDT pour la coordination des activités de recherche et d'innovation est de 320 M€ sur la période 2003-2006. Un soutien a été accordé à la coordination et à l'ouverture réciproque des programmes nationaux sur l'hydrogène et les piles à combustible. Sont attendues des propositions sur la préparation et la mise en œuvre d'activités communautaires relatives à la nouvelle génération de centrales électriques à faibles émissions, au stockage, au transport et à la distribution d'énergie.
La promotion d'un développement régional durable est aussi dépendante d'un secteur énergétique efficace, compétitif et diversifié. Or, les financements associés au développement régional (le tiers du budget communautaire) ne sont pas pleinement exploités : les programmes d'initiative nationale (94 % des ressources),

Recopol

Cofinancé par l'Union européenne, le projet Recopol (pour *Reduction of CO_2 emission by means of CO_2 storage in coal seams in the Silesian Coal Basin of Poland*) vise à étudier la faisabilité de la séquestration définitive du CO_2 dans des veines de charbon.

Cute/Shell

Le programme européen Cute pour le transport propre en Europe donne lieu à la plus importante expérimentation – ici au Luxembourg – d'autobus équipés de piles à combustible au monde.

les programmes d'initiative communautaire (ou PIC, représentant 5,4 %) et les actions innovatrices et d'assistance technique (0,6 %). La politique régionale européenne par l'intermédiaire des fonds structurels a consacré un budget de 487 M€ sur la période 2000-2003 pour le déploiement des sources d'énergie renouvelables pour les régions européennes les plus prometteuses. Pour la France, les orientations prioritaires assignées aux Fonds structurels visent en particulier, en liaison avec le contrat de Plan État-Région à créer les conditions de base pour la compétitivité régionale en proposant des mesures en faveur de l'énergie, de la recherche, du développement technologique et de l'innovation. Il convient de noter que la France a défini, au titre de l'objectif 3 du fonds social européen, un axe 4, *Adaptation des travailleurs, esprit d'entreprise, recherche, innovation, technologie,* qui englobe la création d'activités et le développement du potentiel humain en matière de recherche, sciences et technologie. Cet axe représente 22,5 % de l'enveloppe nationale totale avec comme objectifs de moderniser les organisations du travail et de développer les compétences, de favoriser l'innovation, la recherche et la technologie, la créativité et les actions à l'international en développant l'investissement en compétences.

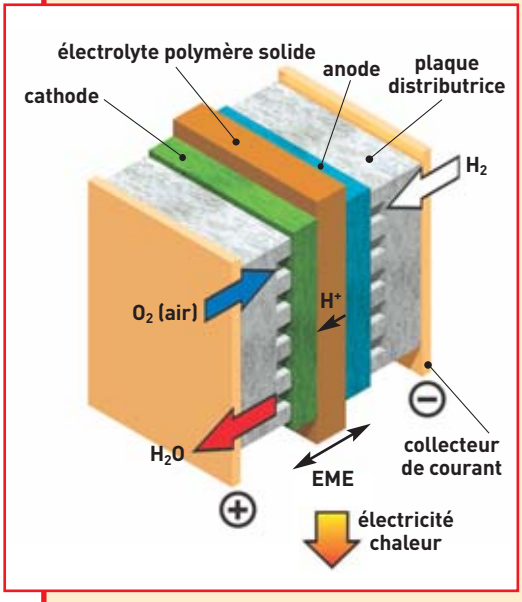
À ces programmes s'ajoutent les PIC, représentant un montant total en crédits d'engagement de 10,4 milliards d'euros. Parmi les quatre PIC mis en œuvre, trois soutiennent des actions se rapportant directement ou non à l'énergie durable. Interreg III cofinance des actions en faveur de l'amélioration du rendement énergétique, du développement des sources d'énergie renouvelables, des systèmes hybrides et énergétiques de transports ou des projets de promotion des énergies renouvelables. Leader + vise à faire émerger des « *stratégies territoriales de développement rural intégrées, de caractère pilote, s'appuyant sur l'approche ascendante et le partenariat horizontal* ». C'est dans ce cadre que l'installation d'un système de chauffage combiné **biomasse-solaire** à l'échelle d'un village a été financée en Autriche. Enfin, parmi les six priorités d'actions du programme Urban II, deux traitent l'énergie durable : la réduction de la consommation en **hydrocarbures**, notamment à travers la promotion de la réduction de la consommation d'énergie et des énergies renouvelables et le développement de transports publics intégrés utilisant des véhicules de transport public consommant peu d'énergie.

En outre, chaque fonds peut financer à hauteur de 1 % de son budget des actions novatrices directement retenues par la Commission en vertu de l'article 10 du Feder et de l'article 6 du FSE (ex. projet pilote rôle de l'énergie dans l'aménagement du territoire urbain – effets d'entraînement pour mieux valoriser un site).

Face aux investissements consentis par les États-Unis et le Japon, l'Europe doit accentuer son effort financier, mais surtout améliorer de manière substantielle l'organisation et la coordination de sa recherche dans l'énergie : seuls 5 % de la R&D sont effectués au niveau européen. Des économies d'échelle sont à réaliser en Europe : étendre le label **Eurêka** aux NTE, mettre en place un article 169 (collaboration entre organismes nationaux, par décision du Conseil) ou un article 171 (entreprise commune type Galileo) font partie des pistes de réflexion. Alors que pour Jean Monnet « *coordonner, c'est s'assurer que l'on va discuter* », le problème auquel va se heurter l'Europe dans les années à venir, si elle veut avoir un poids sur la scène internationale, est de s'assurer qu'elle va décider et mettre en œuvre concrètement ces décisions.

> Françoise Hacque
Direction des relations internationales
CEA Siège (Paris)

C Comment fonctionne une pile à combustible ?



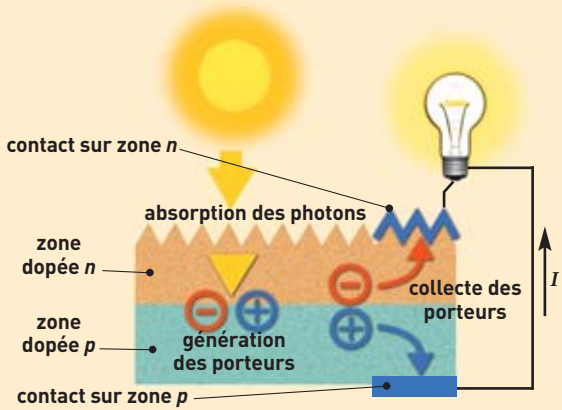
Principe de fonctionnement de la pile à combustible. Exemple de la pile à membrane échangeuse de protons. EME représente l'ensemble électrodes-membrane.

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.

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.

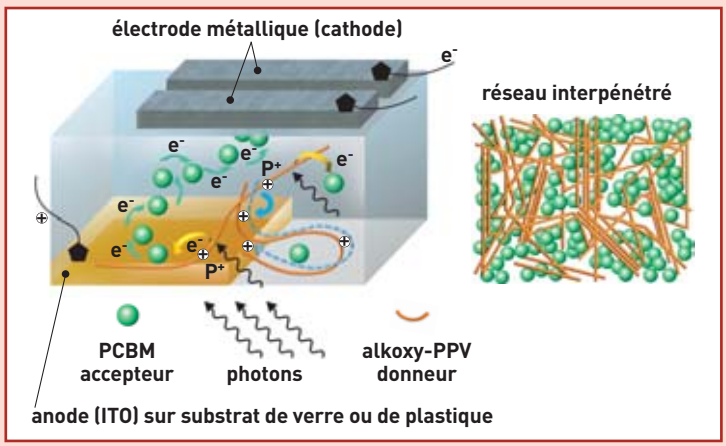


Figure tirée d'une présentation de S. Sariciftci (www.lios.at)

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