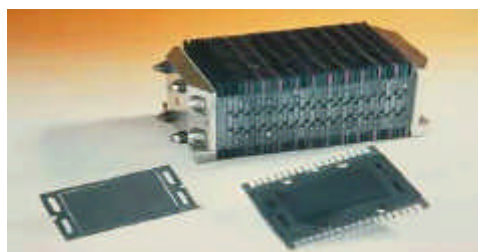
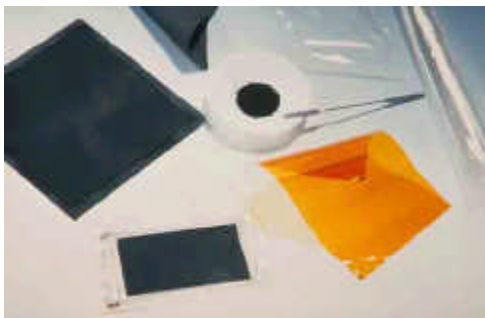


# Petit déjeuner de presse

14 juin 2001

## "L'hydrogène, nouveau vecteur énergétique pour le 21ème siècle ?"



### Contacts presse

Karine Deffis : ☎ 01 40 56 14 88  
Corinne Borel : ☎ 01 40 56 18 35

## INTERVENANTS

- Anne Falanga  
directeur des nouvelles technologies de l'Energie
- Pierre Serre-Combe  
chef du laboratoire Hydrogène et piles à combustible

## SOMMAIRE

- L'hydrogène, un vecteur énergétique pour le XXIème siècle
  
- Hydrogène et pile à combustible : le contexte international
  
- La filière hydrogène : production, stockage, distribution de l'hydrogène et sécurité associée : état de l'art
  
- Hydrogène et pile à combustible (PAC)
  
- Les programmes du CEA dans le domaine de l'hydrogène et des piles à combustibles

# L'hydrogène, un vecteur énergétique pour le XXI<sup>ème</sup> siècle

## Le contexte énergétique

L'Agence internationale de l'énergie estime<sup>1</sup> que la demande mondiale en énergie, principalement d'origine fossile, va augmenter de 57 % dans les vingt prochaines années. Cette forte croissance de la consommation d'énergie se fera dans un contexte où les ressources de gaz et de pétrole seront de plus en plus concentrées dans des zones d'incertitude géopolitique, ce qui est préoccupant pour la sécurité énergétique.

Cette perspective de forte croissance de la demande en énergie intervient alors que le phénomène du réchauffement climatique, dont il est désormais scientifiquement prouvé qu'il est la conséquence des activités humaines et notamment le résultat de l'utilisation des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon), impose une réduction de la production énergétique, tout au moins de sa composante la plus génératrice de gaz à effet de serre.

Comment alors résoudre ce paradoxe : augmenter la production d'énergie pour satisfaire la hausse de la demande, tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre?

Si l'on veut réduire ou tout au moins stabiliser les émissions de gaz à effet de serre, tout en continuant à consommer la même quantité d'énergie, et donc ne pas changer notre mode de vie, il est nécessaire de recourir à des modes de production d'énergie ne contribuant pas à l'effet de serre, comme le nucléaire, ou les énergies renouvelables.

Toutefois, en France, si 40.9 % de la consommation totale d'énergie primaire de

chaque Français proviennent d'électricité produite par le nucléaire et les autres énergies non productrices de gaz à effet de serre<sup>2</sup>, le besoin en énergie du secteur des transports, qui représente le quart de l'énergie consommée, est couvert à 95 % par le pétrole.

Comment remédier à cet accroissement de l'effet de serre, provoqué par les transports? La solution passe par la recherche d'un vecteur énergétique pouvant être produit à partir de différentes sources d'énergie primaire "propre", transportable, stockable et distribuable et qui serait facilement convertible dans les modes d'utilisation finale d'énergie.

## Les atouts de l'hydrogène

L'hydrogène répond à toutes ces conditions. Il est l'élément le plus abondant de notre planète, essentiellement présent sous forme d'eau. Il permet de stocker et de distribuer de façon souple l'énergie, tout en étant peu polluant, puisque sa combustion produit de l'eau. C'est un produit industriel couramment et massivement utilisé en France dans la pétrochimie et l'industrie chimique.

Cependant, l'hydrogène n'est pas directement disponible. La majorité des procédés industriels (95%) de production d'hydrogène font appel au reformage<sup>3</sup> des hydrocarbures. Dans ce cas, l'intérêt de l'hydrogène en tant que « combustible propre » est limité dans la mesure où ces filières de production ont recours à des sources fossiles, qui produisent,

<sup>1</sup> Déclaration publiée le 6 avril 2001, voir dépêche AFP du 6 avril à 19h02

<sup>2</sup> Grâce à cela, un Français émet 1.8 fois moins de gaz carbonique qu'un Allemand et 2.9 fois moins qu'un Américain.

<sup>3</sup> Opération chimique qui permet la transformation d'une molécule d'hydrocarbure ou d'alcool en ses composants majeurs.

simultanément à l'hydrogène, des gaz à effet de serre. Les deux seules sources d'hydrogène propre sont d'une part l'eau et d'autre part les hydrates de carbone contenus dans la biomasse<sup>4</sup>. Ces procédés de production n'ont pas encore atteint un niveau de rentabilité économique. Il faut donc étudier la possibilité de disposer d'un hydrogène économiquement compétitif, d'infrastructures permettant de le produire, de le stocker, de le distribuer et de l'utiliser en toute sécurité pour le consommateur et pour l'environnement.

## L'hydrogène et le CEA

Pour répondre à ces enjeux, le CEA a mis en place un programme hydrogène, largement ouvert aux collaborations et partenariats extérieurs, qui permettra d'étudier les conditions pour une utilisation de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique.

Pour la production, plusieurs filières sont envisageables, mais la plus intéressante en termes d'émission de gaz à effet de serre apparaît être l'électrolyse de l'eau. Une autre possibilité d'utilisation du nucléaire pour la production d'hydrogène fait appel à la chaleur produite par des réacteurs à haute température pour alimenter des réactions thermochimiques de craquage de l'eau. Outre le fait que les programmes du CEA relatifs à l'allongement de la durée de vie des centrales et à la conception de réacteurs du futur toujours plus performants concourent à la rentabilité de la production de l'hydrogène par la filière de l'électrolyse, le CEA mobilise également ses compétences sur les autres modes non polluants de production que sont les procédés biologiques basés sur les microorganismes ou les hydrogénases.

En ce qui concerne le transport et le stockage de l'hydrogène, le CEA compte accroître son effort de recherche qui a déjà conduit au développement de technologies permettant de stocker de l'hydrogène à 700 bars dans des conditions de sûreté et de sécurité démontrées.

La production d'électricité et de chaleur grâce à des piles à combustibles utilisant directement l'hydrogène est la voie préférentielle que le CEA veut suivre pour rester cohérent avec l'utilisation d'une électricité propre pour produire le combustible hydrogène.

Le CEA assure déjà, avec l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), l'animation du réseau de recherche et d'innovations "pile à combustible", mis en place en juin 1999.

Le CEA est également étroitement associé avec le centre national de recherche technologique de Belfort-Montbéliard-Nancy par l'intermédiaire de la convention spécifique signée avec l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard le 20 novembre 1999. Cet accord focalise la coopération de recherche sur la modélisation des piles et du système pile et interfaces.

Le CEA apporte également son concours au montage d'un programme régional sur les nouvelles technologies de l'énergie, dans la région Rhône-Alpes, l'objectif de ce programme étant de doter la région d'un véritable statut de « région pilote ».

---

<sup>4</sup> L'oxydation du bois, qu'elle soit naturelle ou provoquée lors d'une combustion génératrice d'énergie, émet la même quantité de gaz carbonique que celle utilisée par la plante lors de sa croissance. Il y a donc neutralité vis-à-vis de l'effet de serre.

## Hydrogène et pile à combustible : le contexte international

Les développements concernant les principaux acteurs internationaux du secteur ainsi que les exemples de partenariats associés sont étudiés dans la fiche "hydrogène et pile à combustible : les enjeux technologiques"

Cette fiche se concentre donc sur les cadres institutionnels mis en place, tant au niveau européen qu'au niveau national.

### Le cadre européen

Le programme-cadre de l'Union européenne supporte l'effort de recherche et développement technologique et de démonstration des piles à combustible depuis 1988. La Communauté reconnaît que l'utilisation des piles à combustible représente une solution qui pourrait contribuer au développement durable de l'Union et à l'aboutissement des objectifs de diverses politiques européennes essentiellement en matière d'énergie, d'environnement et de transport dans le court, moyen et long terme.

- Ce soutien s'est accru de 8 millions d'euros entre 1988 et 1992 pour atteindre 54 millions d'euros dans le quatrième PCRD (1994-1998). Depuis le début de la mise en œuvre du cinquième PCRD (1998-2002), la contribution européenne au développement des systèmes de piles à combustible est déjà sensiblement supérieure à 30 millions d'euros. En parallèle, des États membres de l'Union européenne mènent des programmes nationaux liés au développement et à l'application de cette nouvelle technologie.
- La coopération dans ce secteur entre les États membres et l'Union a débuté dès 1995 par l'établissement d'une stratégie européenne à dix ans qui fût révisée en 1998. Son objectif est de mieux coordonner la complémentarité entre les programmes nationaux et

celui de l'Union afin d'accroître l'efficacité de l'effort de recherche dans ce secteur. L'intérêt croissant de l'industrie et des milieux académiques a encouragé la Commission européenne à choisir le secteur des piles à combustible comme expérience pilote dans le processus de promotion d'un véritable Espace européen de la recherche prôné par la Commission et approuvé par le Conseil européen. Cette initiative est de surcroît supportée par le Parlement européen.

- Aujourd'hui, à partir des résultats obtenus lors des précédents appels à propositions dans le programme Energie, une nouvelle approche et de nouveaux axes de priorités ont été suggérés pour la mise en œuvre de ce programme au cours des deux dernières années du cinquième programme cadre.

Cette nouvelle approche intègre, entre autres, une action ciblée de recherche & développement technologique sur le court, moyen et long termes portant sur les systèmes de piles à combustible et technologies liées à l'utilisation de l'hydrogène.

Les nouvelles priorités se concentrent vers les applications stationnaires, mobiles et portables et incluent des activités de recherche socio-économiques et pré-normatives liées au développement de règles en matière de sécurité, de normalisation et de formation. Une part importante est de surcroît octroyée à l'encouragement aux initiatives de coopération avec les programmes nationaux et internationaux et notamment le programme Eureka.

Ce type d'action devrait servir à faciliter l'émergence de nouvelles solutions technologiques présentant un impact significatif mesurable et directement

pertinent dans leurs contributions aux objectifs des politiques européennes.

### **Le cadre national : le réseau PACo**

- Créé en juin 1999 à la demande du ministère de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie (MNRT) le réseau Piles à combustible et énergies renouvelables est une structure visant à organiser et harmoniser la R&D menée en France sur ces technologies afin d'assurer la réussite de leur industrialisation.
- Dans un premier temps, cette structure se concentre sur le développement des piles à combustible (PAC), d'où le nom actuel du réseau : PACo. Co-animé par le CEA et l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), le réseau PACo se compose d'un comité d'orientation d'une vingtaine de personnes, unissant à parts égales industriels et chercheurs, et d'un bureau où se retrouvent les organismes qui assurent le financement :

le ministère de la Recherche, le ministère chargé de l'Industrie, l'Ademe et l'Anvar (Agence de valorisation de la recherche).

- Depuis sa création, le réseau PACo a labellisé plus d'une vingtaine de projets portant pour moitié sur les piles à combustible (composants et système) et pour un quart sur les combustibles.

Les autres projets concernent des actions dites transversales comme la veille et les études technico-économiques ainsi que la sûreté. Par ailleurs, cette structure ayant, comme l'indique le terme de réseau, mission de créer des liens entre les équipes françaises concernées par les PAC, il est intéressant de constater qu'une centaine d'équipes contribuent au total à ces projets, provenant pour moitié de l'industrie et pour moitié des organismes publics de recherche.

Environ 20 millions d'euros ont été mis à disposition pour assurer le financement de ces projets pour la période 1999-2000.



## La filière Hydrogène

### Production, stockage, distribution de l'hydrogène et sécurité associée : état de l'art

Si l'hydrogène devait s'imposer à terme, comme vecteur énergétique, 4 défis restent à relever pour les chercheurs et ingénieurs : comment le produire, l'utiliser comme combustible, le stocker et le distribuer.

Il existe déjà des solutions puisque des centaines de km de gazoduc à hydrogène fonctionnent en Europe sans la moindre défaillance depuis plus de 70 ans et plus de 5 millions de tonnes d'hydrogène sont utilisés par an dans le monde, essentiellement dans l'industrie chimique. Il faut aussi rappeler que l'hydrogène entrait pour moitié dans la composition du gaz de ville au milieu du siècle dernier.

#### Comment produire de l'hydrogène ?

Si le gaz hydrogène (sous sa forme moléculaire) n'existe quasiment pas dans la nature, l'atome d'hydrogène est **extrêmement abondant sur notre terre**, ne serait-ce que dans l'eau des lacs, des rivières et des océans et évidemment dans les combustibles fossiles.

Aujourd'hui, 96 % de l'hydrogène produit et consommé dans le monde (essentiellement par les industries chimiques) proviennent de reformage du gaz naturel, c'est-à-dire d'une énergie fossile, qui émet du gaz carbonique. Dans une perspective de développement durable et de respect des engagements de réduction d'émission de gaz à effet de serre, il est nécessaire, à terme, de mettre en place des méthodes de production massive

d'hydrogène « propres » et indépendantes d'énergies fossiles<sup>1</sup>.

Trois grandes filières de production de l'hydrogène sont envisageables (et combinables entre elles) : **l'oxydation de gaz ou de produits organiques d'origine fossile ou végétale, l'électrolyse de l'eau et la production directe à partir de la biomasse**. Par ailleurs, l'étude des mécanismes de fabrication de l'hydrogène par des bactéries (enzymes hydrogénases) pourrait conduire à long terme à l'amélioration, voire à la conception de procédés industriels.

**La voie la plus intéressante apparaît être celle de l'électrolyse de l'eau**, sous réserve qu'elle soit économiquement compétitive et réalisée à partir de sources d'énergie électrique elles-mêmes non productrices de gaz à effet de serre. L'énergie nucléaire répond à ces conditions. On peut également noter qu'une autre méthode de production de l'hydrogène fait appel à la chaleur produite par des réacteurs nucléaires à haute température (HTR), fournissant des calories vers 900 °C, pour alimenter des réactions de craquage<sup>2</sup> de l'eau. Dans l'hypothèse d'un recours aux énergies solaires, stricto sensu ou au sens le plus large, le mode de production dépendra de la forme considérée. S'il s'agit d'énergie photovoltaïque ou éolienne,

<sup>1</sup> Sauf recours à des technologies de séquestration du CO<sub>2</sub>, non encore éprouvées.

<sup>2</sup> Craquage : procédé de raffinage par modification de la structure moléculaire, sous l'effet de la chaleur, de la pression et parfois d'un catalyseur.

l'électricité produite et non consommée directement sur le réseau produira, par électrolyse de l'eau, de l'hydrogène stocké sur place ou injecté dans un réseau spécifique.

## Utilisation de l'hydrogène comme combustible

Les besoins croissants en énergie, associés à une nécessité incontournable de remplacer le pétrole (il recouvre aujourd'hui 95 % des besoins dans les transports) nous conduisent à rechercher de nouveaux combustibles, utilisables notamment dans les grands secteurs de consommation, comme les transports.

L'hydrogène peut être utilisé comme combustible dans des systèmes déjà connus et maîtrisés, comme les moteurs thermiques, les turbines à gaz, les chaudières, etc., sous réserve de certaines modifications. Mais l'hydrogène peut aussi servir de carburant à de nouveaux convertisseurs d'énergie, comme la pile à combustible, technique la plus prometteuse pour la production d'électricité et de chaleur. Par ailleurs, des études sur la biomasse sont menées qui intéressent aussi bien la production de carburants de synthèse que d'hydrogène.

## Le stockage de l'hydrogène

**Si l'hydrogène est un combustible propre qui génère beaucoup moins de polluants chimiques qu'un moteur à explosion classique** par exemple, c'est aussi, comme tout combustible, **un gaz qui peut s'enflammer ou exploser en présence d'air dans certaines conditions de pression, températures, pureté, etc...** Toutefois, **comme il est plus léger que l'air** et qu'il diffuse très rapidement, **le risque de confinement, et donc d'explosion, s'en trouve réduit.**

Dès sa production, qu'elle soit centralisée ou décentralisée dans de petites unités (mobiles, voitures,...), la sûreté du stockage doit être prise en compte. La mise en œuvre sera très différente selon les masses en jeu et la durée, correspondant à chaque fois à des risques particuliers.

L'arrivée, dès 2005, des premières séries industrielles de piles à combustible dans le domaine du transport nécessite **d'évaluer rapidement ces conditions de stockage, et de mettre en place une réglementation adaptée.**

Les différentes possibilités de stockage de l'hydrogène consistent à **le transformer en un produit hydrogéné (comme un alcool).** Il peut aussi **être comprimé dans un réservoir naturel (souterrain) ou artificiel, fixe ou transportable.** Dans ce domaine, les travaux auxquels a participé le CEA ont notamment permis de développer **des technologies de stockage sûr de l'hydrogène à 700 bars.**

Toutefois, le stockage sous pression présente quelques inconvénients. En particulier, l'hydrogène peut diffuser dans les matériaux (métalliques ou non) et les fragiliser. Ce phénomène est lié au très faible rayon atomique de l'atome d'hydrogène (le plus faible de la nature).

Aussi, les chercheurs étudient des **techniques d'absorption de l'hydrogène, à faible pression, dans des matériaux ad hoc : les hydrures et les nanostructures de carbone (nanotubes)** apparaissent particulièrement séduisants. Ces dernières solutions présentent cependant des inconvénients en termes de coût, de poids pour les hydrures, de faisabilité et de disponibilité.

C'est pourquoi les **deux voies de stockage haute et basse pression sont étudiées.**

Le CEA, qui étudie la faisabilité des différentes formules, participe à l'évaluation d'infrastructures adaptées, à l'élaboration des normes et, d'une façon générale, à l'analyse de la sûreté des installations mettant en œuvre l'hydrogène comme combustible.

### **Stockage haute pression**

Les études sur le stockage haute pression de l'hydrogène sont essentiellement menées sur les matériaux se trouvant directement en contact avec le gaz.

Le CEA, qui possède des années d'expérience sur la sûreté du stockage haute pression (plusieurs centaines de bars) de l'hydrogène et de ses isotopes, a acquis une compétence sur le comportement de nombreux matériaux, métalliques ou non, en présence d'hydrogène. Le choix s'est ainsi porté sur certains types d'aciers et alliages d'aluminium, pour lesquels des conditions d'élaboration et de mise en forme garantissent la sûreté d'utilisation. Ces matériaux métalliques conduisent néanmoins à des réservoirs de stockage relativement coûteux et lourds (capacité massique, c'est à dire rapport entre la masse de gaz stockée et la masse de réservoir, faible, de l'ordre de 3 %).

Le remplacement de matériaux métalliques en matériaux polymères, éventuellement renforcés par des fibres de carbone, est étudié au CEA, et pourrait permettre une capacité massique plus importante et des coûts moins élevés, tout en préservant la sûreté.

Pour le futur, une autre technique de stockage haute pression est envisagée au CEA : les microballons en verre, développés par le CEA dans le cadre des expériences sur les lasers de puissance (laser Megajoule). Avec des tailles très inférieures au millimètre, ces microballons, une fois remplis d'hydrogène, peuvent supporter des pressions très élevées (plusieurs centaines de bars). La sécurité de ce type de micro-réservoirs est assurée car la quantité totale de gaz est renfermée dans des millions de microballons, réduisant ainsi les risques d'explosion.

### **Stockage basse pression**

Une alternative à l'utilisation de réservoirs sous pression gazeuse consiste à stocker

l'hydrogène sous forme **d'hydrures métalliques**. Ces composés, obtenus par réaction directe de certains métaux ou alliages métalliques avec l'hydrogène, sont **capables d'absorber l'hydrogène et de le restituer lorsque cela est nécessaire**. Ces matériaux sont très étudiés depuis plusieurs années et la palette de performances accessibles est aujourd'hui très large. Les critères de sélection d'un hydrure métallique pour le stockage de l'hydrogène dépendent bien entendu de l'application envisagée (mobile : transports, objets portatifs..., stationnaire ou fixe) et de son environnement (thermique...).

Ce mode de stockage offre deux avantages très significatifs : la **sûreté**, résultant de la mise en œuvre de pressions faibles, et la **compacité**, la grande majorité des hydrures métalliques possédant par ailleurs des capacités volumiques d'absorption élevées (rapport entre le volume d'hydrogène stocké et le volume de métal employé). À titre d'exemple, il est possible de stocker l'équivalent d'un réservoir d'hydrogène de 7 litres (7 000 cm<sup>3</sup>) rempli à la pression atmosphérique dans un petit cube de palladium de 27 cm<sup>3</sup> et sous une pression d'hydrogène dix fois moindre. Toutefois, ce moyen de stockage présente une limitation majeure : un poids trop important, en particulier pour les applications mobiles, et un coût relativement important, de l'ordre de 20 euros/kg de matériau.

De nombreux travaux de recherche sont actuellement menés au CEA et à travers le monde pour optimiser les performances des hydrures métalliques pour le stockage de l'hydrogène.

La découverte en 1991 des nanotubes de carbone par le Japonais Sumio Iijima a ouvert de nouvelles perspectives pour la mise au point de dispositifs de stockage de l'hydrogène à la fois sûrs et fiables. Ces matériaux, constitués de plans graphitiques organisés en tubes concentriques de diamètre nanométrique, semblent dotés de propriétés exceptionnelles en terme d'absorption de l'hydrogène. L'activité de recherche est actuellement en pleine effervescence sur ce sujet, tant au niveau

des procédés d'élaboration pour améliorer le rendement de production (rapport entre la quantité de nanotubes synthétisée et la quantité de carbone utilisée initialement) et la pureté du matériau obtenu qu'au niveau théorique pour expliquer l'aptitude étonnante de ces nanostructures carbonées pour le stockage de l'hydrogène. Outre la confirmation de ces propriétés, l'enjeu porte sur la faisabilité à terme d'une production en masse de ces matériaux, aujourd'hui limitée à quelques grammes permettant l'expertise en laboratoire.

### ***Vers des solutions plus polyvalentes***

Il apparaît clairement que le mode idéal de stockage de l'hydrogène n'existe pas encore et que chacune des filières détaillées ci-dessus serait adaptée, en fonction de son niveau de performances, à certains types d'applications. **Si le stockage haute pression possède aujourd'hui de sérieux atouts pour les applications mobiles, le stockage sous forme d'hydrures métalliques apporte quant à lui un niveau de sûreté et une grande modularité pour les applications stationnaires.** Enfin, les perspectives d'améliorations dans ce domaine restent importantes. **Si le mode de stockage sous pression peut être considéré comme étant à ce jour une solution arrivée à maturité du point de vue technologique, le stockage dans les nanostructures carbonées** et, dans une moindre mesure, celui sous forme d'hydrures métalliques **font l'objet de recherches soutenues qui devraient, à terme, permettre l'obtention d'un moyen de stockage à la fois sûr et efficace pour une palette d'applications la plus large possible.**

### ***Des essais pour évaluer les risques et des normes***

Industriels de l'automobile, Air liquide, l'Ineris (Institut national de l'environnement industriel et des risques) et le CEA collaborent ensemble à l'évaluation de la sûreté du stockage (en particulier pour les transports), notamment dans le cadre de projets européens.

Des prototypes de réservoirs sous pression et l'évaluation du risque associé (collisions, chutes, incendie...) sont en cours de réalisation. Les premières bouteilles testées se sont très bien comportées dans tous les essais standardisés réglementaires.

Ces résultats encourageants devraient faire progresser les techniques de stockage de l'hydrogène et l'acceptation du principe même de ce stockage.

Le CEA est par ailleurs impliqué dans la préparation des futures normes internationales, qui représentent une garantie pour l'utilisateur en termes de qualité et de sécurité.

L'International Standard Organisation (iso), organisation internationale de normalisation, a créé en 1990 un comité technique pour pallier l'absence de normes internationales dans le domaine des "technologies de l'hydrogène". Ce travail a permis la publication en 1999 de deux premières normes iso.

## Hydrogène et pile à combustible (PAC)

La pile à combustible est un excellent convertisseur d'énergie (électricité et chaleur), le plus efficace en terme de rendement comparativement aux turbines ou générateurs électro-diesels. Même dans le cas du transport, le rendement d'un générateur à PAC et celui d'un moteur diesel sont comparables (autour de 35 %).

Promise à des applications qui ne se bornent pas au véhicule électrique, ses limitations sont actuellement d'ordre économique.

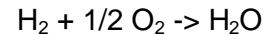
D'abord limité à des applications où le coût était un facteur secondaire, ce type de pile peut désormais viser des marchés quantitativement significatifs, comme des installations fixes pour la production d'électricité et de chaleur. Par ailleurs, l'alimentation de véhicules électriques, qui commence à devenir une réalité pour le transport en commun, demandera encore des efforts de recherche et de développement pour se justifier économiquement pour le véhicule individuel.

L'objectif général du CEA et de ses partenaires de l'industrie et de la recherche est de baisser fortement les coûts et d'augmenter la fiabilité des systèmes – stationnaires ou mobiles – pouvant être construits autour d'une telle pile. Pour cela, il s'agit, pour les filières les plus prometteuses, de lever certains verrous scientifiques et technologiques. Les avancées enregistrées pourront également être mises à profit pour l'alimentation des appareils portables, dont le marché explose.

### Principe de fonctionnement d'une pile à combustible :

Le principe de la pile à combustible a été démontré par l'Anglais William Grove, en 1839 : il est généralement décrit comme l'inverse de celui de l'électrolyse. Plus précisément, il s'agit d'une combustion électrochimique et contrôlée d'hydrogène

et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale universellement connue :



Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux **électrodes** (l'anode et la cathode) séparées par un **électrolyte**<sup>1</sup> ; elle peut intervenir dans une large gamme de températures, de 70 à 1 000 °C (voir tableau). Selon le niveau de température retenu, la nature de l'électrolyte et des électrodes, les réactions chimiques intermédiaires mises en jeu varient mais le principe général est inchangé.

Bien que le principe de base soit toujours le même, les techniques et les composants utilisés pour concevoir les piles sont variés. Par exemple, l'électrolyte peut être liquide (ex : pile alcaline) ou solide.

Pour des raisons essentiellement liées à la fiabilité et à des contraintes d'industrialisation en grande série, le concept d'électrolyte solide est plus attractif que l'électrolyte liquide. C'est la raison pour laquelle se dessine aujourd'hui un consensus international pour privilégier deux filières, celle des **piles à combustible électrolyte solide polymère** (à membrane échangeuse de protons, en anglais **PEMFC** pour *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) et celle des **piles à électrolyte en céramique (SOFC, pour Solide Oxide Fuel Cell)**. C'est aussi le choix que le CEA a fait dans ses programmes de R&D.

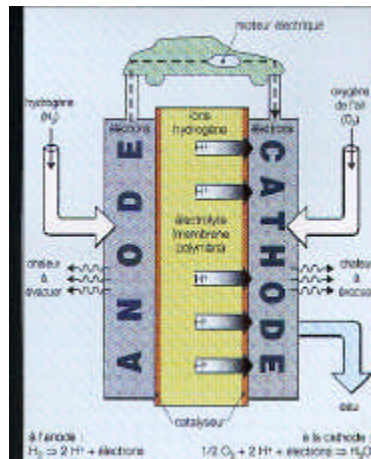
Le type d'électrolyte détermine la température de fonctionnement de la pile : les PEMFC fonctionnent à « basse » température (80°C) et les SOFC à haute température (environ 1000°C)

<sup>1</sup> Electrolyte : composé liquide ou solide permettant le déplacement des ions entre les électrodes

Les différents types de piles à combustible

Type de pile	Electrolyte	Température (°C)	Domaine d'utilisation et gamme de puissance
alcaline (AFC)	potasse (liquide)	80	Espace - transport 1 - 100 kW
Acide polymère (PEMFC)	Polymère (solide)	80	Portable, transports, stationnaire 1W - 10 MW
Acide phosphorique (PAFC)	Acide phosphorique (liquide)	200	Stationnaire, transports 200 kW - 10 MW
Carbonate fondu (MCFC)	Sels fondus (liquide)	650	Stationnaire 500 kW - 10 MW
Oxyde solide (SOFC)	Céramique (solide)	700 à 1 000	Stationnaire, transports 100 kW - 10 MW

Principe de la pile à combustible



Les composants du cœur d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons

Module de pile à combustible PEMFC de 1 kW



## Les piles « basse » température : PEMFC

Parmi les différents types de piles à combustible couramment développées, c'est la filière dite "acide à électrolyte polymère solide" qui a **été retenue par presque tous les acteurs de programmes automobiles dans le monde**. Généralement appelée PEMFC, elle intéresse également les industriels pour des applications stationnaires (jusqu'au mégawatt), portables (moins de 100 W) et transportables (moins de 5 kW).

Cette technologie retient l'attention pour trois raisons essentielles :

- Sa **température de fonctionnement, relativement basse** ( de l'ambient à 100 °C), laisse envisager une technologie simplifiée pour assurer un démarrage rapide et une évacuation aisée de la chaleur produite à température ambiante; ce premier point est essentiel pour l'application automobile.
- Elle est, ensuite, **insensible à la présence de CO<sub>2</sub> dans l'air**, contrairement à la filière alcaline.
- Enfin elle est **de technologie tout solide** et peut donc prétendre à la fois à des **durées de vie sensiblement supérieures** aux filières à électrolyte liquide, ainsi qu'à une industrialisation plus aisée de la filière : ceci permet d'envisager un coût accessible pour le marché visé, d'autant qu'elle offre une compacité sensiblement supérieure à celle des autres filières.

**La technologie PEMFC concentre actuellement le plus gros effort de recherche et développement dans le monde.** Les recherches visent essentiellement à augmenter les performances (en terme de rendement, compacité et masse) et à diminuer le coût (d'un facteur 5 à 100 selon le type d'application).

Le CEA s'y est engagé depuis les années 1990 et travaille à la préparation d'une technologie commercialement viable (démonstrateurs de 50 kW pour le stationnaire et le transport), à échéance variable selon le type d'application.

À la demande des industriels français de l'automobile, le CEA s'intéresse avant tout au développement de nouveaux modules<sup>2</sup> de pile à combustible et à l'amélioration de leur performance électrochimique.

Les solutions qu'il propose portent essentiellement sur le **développement de nouveaux matériaux** (nature, mise en œuvre et intégration) pour les composants critiques d'une PEMFC. Ces travaux ont conduit **le CEA à déposer une quinzaine de brevets depuis 1996**.



Il convient de souligner qu'un module de pile à combustible doit, pour fonctionner, être associé à des équipements auxiliaires qui assurent l'approvisionnement des réactifs (hydrogène et air), leur conditionnement (pression, débit), la gestion des produits de la réaction (eau, chaleur, électricité).

Ces annexes peuvent représenter jusqu'à 60 % en masse et en volume du système et une dépense énergétique de l'ordre de 20 %. Parmi elles, le stockage du combustible constitue un verrou technologique majeur.

Il est raisonnable d'envisager les **premières applications industrielles avant trois ans essentiellement sur certains marchés** dit de niches (**transport en commun**, exploration sous-marine).

Pour s'introduire dans ces marchés, la PEMFC devra apporter la preuve de sa robustesse et de sa capacité à compenser les coûts encore élevés de cette technologie par une diminution notable des frais d'exploitation.

<sup>2</sup> Lieu de conversion de l'énergie de combustion du combustible hydrogène en énergie électrique directement utilisable.

## Les piles haute température SOFC

Reconnue comme potentiellement très intéressante, la technologie des SOFC est pourtant l'une des moins avancées techniquement et économiquement. Ainsi sur le marché des applications de génération électrique ou de cogénération, une autre filière (la filière PAFC à électrolyte liquide en acide phosphorique : *Phosphoric Acid Fuel Cell*) est déjà au stade commercial, et a profité avec la filière MCFC, à électrolyte liquide en sels fondus (*Molten Carbonate Fuel Cell*) d'investissements considérables pour la R&D et la réalisation de prototypes (l'équivalent de plus d'un milliard d'euros).

### La technologie

Les SOFC intéressent les industriels pour une raison principale : ils fonctionnent à haute température (dans une gamme de 700 à 1 000 °C) et sont très efficaces en terme de rendement.

Cette haute température présente un double avantage :

- Elle permet d'abord l'utilisation directe d'hydrocarbures, notamment le gaz naturel, qui pourront être facilement reformés en se passant de catalyseurs à base de métaux nobles.
- Elle assure d'autre part la fourniture d'une chaleur élevée facilement exploitable en cogénération<sup>3</sup> avec ou sans turbine à gaz : le rendement global peut ainsi augmenter jusqu'à atteindre 80 %, par exemple. Cependant, la mise en température est longue pour une utilisation nécessitant des cycles marche-arrêt répétitifs.

Pour ces raisons, la technologie SOFC se prête particulièrement bien à la production d'électricité décentralisée et à la cogénération (domaines couvrant des puissances allant de 1 kW électrique à quelques dizaines de MW électrique). Grâce à son fort rendement et à sa capacité potentielle à fonctionner directement avec des hydrocarbures liquides, elle trouvera également un débouché dans la propulsion navale, voire terrestre (trains, camions...).

<sup>3</sup> Production simultanée d'électricité et de chaleur.

La mise au point de ce type de pile implique la résolution des problèmes de tenue de matériaux assez complexes, ainsi que d'assemblage et d'étanchéité. Comme dans d'autres filières, la durée de vie sur plusieurs dizaines de milliers d'heures sans perte significative de performances est un paramètre important. D'où l'accent mis sur les études des phénomènes de vieillissement des matériaux des SOFC dans des environnements oxydants ou réducteurs, afin de s'assurer de la stabilité chimique et physique des matériaux choisis.

Enfin, comme pour toutes les piles à combustible, une forte diminution des coûts est indispensable à la percée des SOFC. Ceci pèse de façon particulièrement importante sur la conception de la pile et sur le choix de procédés de mise en forme de matériaux qui soient adaptés aux objectifs économiques.

### Les différents acteurs

- La société Siemens-Westinghouse, leader incontesté des SOFC, qui a investi 200 millions d'euros sur cette technologie, souhaite proposer une pile SOFC en 2003 pour des générateurs de 250 kW de puissance à des prix avoisinant les 1 000-1 500 euros le kW électrique. Plusieurs prototypes ont été testés sur une longue durée. Le plus récent, un démonstrateur de 105 kW électrique installé à Nuon (Pays-Bas), a fourni un rendement global de 76 % et fonctionné sans incident pendant 4000 heures.
- Les Japonais, soutenus par le NEDO (*New Energy Development Organization*), développent également cette technologie en mettant l'accent sur la diminution des coûts par le choix de matériaux appropriés (la qualité de la recherche japonaise sur les céramiques est connue) en visant la gamme de puissance 1-100 MW électrique.
- Le nombre et l'implication des acteurs de R&D sur ce sujet est un peu moins important en Europe. Toutefois des industriels - les compagnies de gaz

(GDF, British Gas), d'électricité (EDF), Alstom, BMW et Renault - manifestent un intérêt certain pour l'utilisation des SOFC.

- La situation française se caractérise par des travaux de R&D de qualité sur des aspects bien précis de tel ou tel phénomène physique comme la catalyse et le matériau céramique. Déjà impliqué dans ces thématiques pour les applications nucléaires, le CEA, qui maîtrise les principaux procédés de mise en forme de certains matériaux, participe depuis 1999 au développement de la filière SOFC, en partenariat avec les universités. La réalisation d'un prototype (en association avec GDF notamment) à l'horizon 2003 sera la première en France d'une pile SOFC. La R&D menée par le CEA porte également sur la recherche d'un électrolyte fonctionnant à relativement "basse" température (600 à 700 °C), qui pourrait permettre d'augmenter la durée de vie de la pile, en diminuant les réactions de dégradation aux interfaces, et de faire baisser fortement son prix, par l'emploi de matériaux moins coûteux (ex : métaux à la place de céramiques chères).

### Les applications : trois grands domaines d'application

Les marchés potentiels des piles à combustible apparaissent aujourd'hui multiples : ils sont généralement classés en trois grandes familles d'applications : "portable", "stationnaire" et "transport".

#### **Les applications "portable"**

Cette famille inclut essentiellement le téléphone mobile et l'ordinateur. Ces deux applications connaissent une très forte croissance, mais sont de plus en plus handicapées par l'autonomie de leur batterie. La plus performante, la batterie lithium-ion, atteint aujourd'hui une énergie spécifique de l'ordre de 160 Wh/kg qui laisse classiquement quelques jours d'autonomie à un téléphone et environ 3

heures à un ordinateur portable. Or les clients demandent aujourd'hui 3 à 5 fois mieux. Pour donner une idée de l'enjeu, il suffit de considérer le marché des "portables" : 300 millions d'unités vendues pour les téléphones mobiles fin 1999 dans le monde et 640 millions prévus en 2005 ; 18 millions d'ordinateurs portables vendus en 1999 et 40 millions prévus en 2005.

La solution, qui fait l'objet de recherches importantes, essentiellement aux Etats-Unis, est une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux la fourniture d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie ne sera alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur rechargera son portable comme il recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes, et chaque recharge donnera 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle... pour le même encombrement! Des prototypes existent et les premiers produits commerciaux sont annoncés à l'horizon de trois à quatre ans. La technologie qui sera utilisée est la PEMFC du fait de sa température de fonctionnement basse et de sa technologie "tout solide" alimentée soit directement en hydrogène, soit en méthanol. En terme de coût, la référence est celle de la meilleure batterie actuelle (lithium-ion), soit 1 euro/Wh.

Le CEA a engagé un travail d'analyse de la valeur sur certains projets de piles à combustible qui constitue une aide précieuse aux choix qu'il faut faire entre les diverses solutions techniques qui s'offrent aux acteurs de la R&D. Depuis début 2000, il a commencé un programme de recherche sur une nouvelle filière de pile à combustible pour le portable (micropiles) en utilisant les techniques de microélectronique développées au CEA-Leti, afin d'essayer de diminuer les coûts et d'atteindre les objectifs techniques. Pour ce qui concerne les applications "portable", les critères économiques seront probablement d'une importance moindre que pour les autres domaines d'applications, dans la mesure où la qualité du nouveau service rendu justifiera – au moins dans un premier temps – un

surcoût par rapport à la solution de référence.

### **Les applications "stationnaire"**

Compte tenu des nouvelles lois sur la déréglementation du secteur électrique et des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur commence à intéresser de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (200 kW à quelques MW) et la production individuelle ou domestique (2 à 7 kW).

### **Les partenariats dans le domaine de la production collective**

- Deux pôles industriels se sont créés autour d'une filiale du canadien Ballard
  - ◆ un pôle européen avec Alstom
  - ◆ un pôle asiatique avec le Japonais Ebara.
  - ◆ Cet ensemble s'est donné pour objectif la diffusion de co-générateurs (électrique-thermique) de type PEMFC<sup>4</sup> (d'une puissance de 250 kW électrique et 230 kW thermique). Un exemplaire est en cours d'expérimentation à Treptow, dans la banlieue de Berlin, dans le cadre d'un projet européen avec EDF et quatre partenaires allemands : Bewag, HEW, Preussen Elektra et VEA.
- L'année 2000 a aussi vu la réalisation d'un prototype de 250 kW électrique à Waziers (Nord) dans le cadre d'un projet européen Thermie avec côté français Air Liquide, Schneider Electric et le CEA, et côté italien, Nora, autour d'une technologie PEMFC.
- De son côté, l'Américain ONSI Corp. commercialise depuis plusieurs années (près de 200 unités vendues) la pile de technologie PAFC<sup>5</sup> (PC 25) de 200 kW électrique (qui fournit en cogénération 200 kW thermique), Un premier modèle a été démarré en

France début 2000 par EDF pour l'alimentation d'un groupe HLM à Chelles (Seine-et-Marne).

- D'autres technologies font l'objet de tests mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation proche. La MCFC<sup>6</sup> fait ainsi l'objet de plusieurs démonstrations : 1 MW électrique avec l'Allemand MTU, 250 kW électrique avec l'Américain M-C Power Generation, 1 MW électrique avec le Japonais Hitachi. La SOFC est testée par Siemens-Westinghouse au niveau de 100 kW électrique.

### **Les partenariats dans le domaine de la production individuelle**

Plusieurs projets sont en cours de réalisation.

- Associée à General Electric (GE MicroGen), la société américaine Plug Power LLC lance un générateur de 7 kW (HomeGen 7000). Des tests sont en cours avec une dizaine de prototypes en situation réelle et la commercialisation est prévue vers 2002 avec un coût annoncé de 50-60 centimes/kWh électrique. La société Vaillant est associée à Plug Power pour commercialiser ce système en Europe
- Des programmes de même nature mais de moindre ampleur ont été engagés avec les Américains Northwest Power Systems (devenu Idatech) et Avista Labs, ainsi qu'avec DAIS Analytic. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent électricité et chaleur à 60 °C (chauffage et eau chaude). Ils sont alimentés par des combustibles classiques : un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène.
- Une voie SOFC, développée par Sulzer Hexis (suisse) visant à proposer en Europe aux particuliers une "chaudière" fournissant électricité (1 kW) et chaleur, le tout connecté au réseau électrique.

<sup>4</sup> PEMC : pile à membrane échangeuse d'ions (électrolyte solide)

<sup>5</sup> PAFC : pile à électrolyte liquide en acide phosphorique

<sup>6</sup> MCFC : pile à électrolyte liquide en sels fondus

Le marché mondial des piles à combustible (pour le seul stationnaire) potentiel est estimé à 45 milliards d'euros à l'horizon 2030. Quant au coût objectif, il se situe autour de 1 000 euros par kW installé pour le système complet. Il correspond au niveau actuel de développement de cette technologie, ce qui explique les délais proches (à partir de 2002) généralement annoncés par les divers constructeurs (essentiellement américains jusqu'à maintenant) déjà engagés sur ce marché. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie "pile à combustible".

### **Les applications "transport"**

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible à partir du début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteurs thermiques), mature et performante, il faut distinguer deux sous-familles assez différentes dans leurs cahiers des charges, suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3 000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou de marchandises) exige une durée de fonctionnement 100 fois plus longue. Il est évident que la technologie et la durée d'amortissement – donc les coûts admissibles – ne seront pas du tout les mêmes.

### **Les véhicules légers : une myriade de projets**

Dans ce domaine, de nombreux prototypes ont vu le jour depuis 1993.

- L'Allemand DaimlerChrysler, qui s'équipe en piles à combustible chez Ballard, a montré quatre prototypes Nekar, dont le plus récent (Nekar 4 alimentée en hydrogène liquide), présenté en 99, est construit sur une base Class A. La Nekar 5, modèle de pré-série équipé d'un reformeur

alimenté en méthanol, a vu le jour en novembre 2000.

- Les Américains ont également présenté des prototypes : General Motors un véhicule sur une base Opel Zafira équipée d'une pile Ballard de 75 kW ainsi qu'un Precept équipé d'une pile "maison" de 75 kW et Ford plusieurs Think FC5.
- Les Japonais ne sont pas en reste : Toyota avec ses deux prototypes RAV-4, Nissan avec son R'nessa, Mitsubishi, Honda, Daihatsu et Mazda avec son Demio FCEV.
- Le Français Renault a quant à lui présenté, à la mi-98, son prototype Laguna équipé d'une pile de Nora de 30 kW, associé à Air Liquide dans le cadre d'un programme européen Joule.
- D'autres prototypes devraient être prochainement annoncés, en particulier un prototype français sur une base Partner de PSA. Ce projet, auquel le CEA a participé, s'inscrit dans le cadre d'un programme "Hydro-Gen".

Tous ces constructeurs prévoient des pré-séries à partir de 2004-2005. Malgré l'existence de plusieurs prototypes présentés avec de l'hydrogène stocké à bord (sous forme liquide, gazeuse ou absorbé dans un hydrure), le combustible utilisé dans une première phase sera très probablement – pour des raisons de sûreté, de réglementation et de logistique de distribution – un combustible hydrogéné (méthanol ou gaz naturel) alimentant un reformeur embarqué.

Au cours de la période 2005-2010, les constructeurs vendront probablement à perte pour ouvrir le marché et emmagasiner de l'expérience, comme aujourd'hui Toyota avec le véhicule hybride thermique Prius. La technologie ne deviendrait financièrement rentable qu'à partir de 2010. Dans cette période 2005-2010, DaimlerChrysler prévoit de construire entre 50 000 et 100 000 véhicules à pile à combustible. À l'horizon 2030, ce sera le marché mondial qui sera visé, avec une production annuelle supérieure à 50 millions de véhicules, soit 10 % du marché global.

La technologie utilisée dans ces applications sera essentiellement de type PEMFC, même si quelques expériences utilisent l'AFC (par la société anglaise ZeTek) ou la PAFC (Université de Georgetown, USA). Le coût objectif de cette filière est de 100 euros par kW pour l'ensemble de la chaîne de traction, dont environ un tiers pour la pile seule.

### **Une solution déjà viable pour les véhicules lourds**

Plusieurs prototypes de bus ont été construits à partir de 1993.

- Le Canadien Ballard a fait office de pionnier avec six bus (pile de 200 kW), qui ont aujourd'hui achevé leurs tests en service régulier à Vancouver et à Chicago, et annonce une commercialisation dès l'an 2002.
- L'Allemand DaimlerChrysler, sur la base de la même technologie Ballard, a présenté en 1997 le prototype Nebus et annoncé le lancement d'une pré-série de 30 bus (projet Citaro) pour 2003, en vue d'une mise en service dans plusieurs villes d'Europe.
- Compte tenu de la durée de vie attendue, la situation économique de cette application est la même que pour le "stationnaire", donc commercialement viable dès maintenant, ce qui explique l'optimisme des deux derniers constructeurs cités.
- À côté de ces applications routières, certains constructeurs (les Français RVI et Irisbus en particulier) pensent à un tramway propre et sans caténaire, utilisant une pile à combustible.
- Il faut enfin noter un intérêt croissant de constructeurs de navires pour la pile SOFC, au niveau du MW ou plus, pour une propulsion plus propre, plus efficace et plus discrète, en particulier pour des applications militaires.



## Les programmes du CEA dans le domaine des nouvelles technologies de l'énergie

Dans son contrat pluriannuel Etat-CEA 2001-2004, signé récemment, le CEA s'est engagé à soutenir l'essor des nouvelles technologies pour l'énergie. Il s'agit de constituer, en partenariat étroit avec les industriels, un moteur de l'innovation technologique et de la compétitivité économique pour répondre à la demande de diversification énergétique.

L'hydrogène et les piles à combustible (en particulier les PEMFC et SOFC) sont l'un des trois axes prioritaires définis dans ce programme « nouvelles technologies pour l'énergie ».

Les deux autres axes sont le photovoltaïque et le stockage de l'énergie, et l'efficacité énergétique.

**Le budget total de l'ensemble du programme nouvelles technologies pour l'énergie, établi à 118 MF pour l'année 2000 est en progression forte en 2001 puisqu'il est d'un montant de 171 MF (+53 MF soit une progression de 44%).**

La part consacré à l'hydrogène et les piles à combustibles s'élève à 91 MF pour l'année 2001.

Environ 200 ingénieurs et techniciens du CEA sont impliqués dans le programme nouvelles technologies pour l'énergie en 2001 (100 en 2000), dont la moitié des effectifs travaillent sur l'hydrogène et les piles à combustibles. Ces chiffres devraient atteindre respectivement 300 et 175 personnes en 2004.