

ANNEXE 9 RECHERCHES INFLUENÇANT LA PROSPECTIVE VECTEURS D'ENERGIE

L'évolution de la problématique "énergie environnement" dans les décennies à venir sera jalonnée par un certain nombre de clarifications dont nous avons évoqué quelques unes :

- L'aboutissement des études de stockage souterrain des déchets nucléaires
- Une confirmation des risques majeurs de l'effet de serre
- Une meilleure connaissance des possibilités de stockage du CO₂

Elle sera jalonnée, à plus long terme, par quelques dates clés, telles que

↓ Vers 2020 - 2030 :

- le début de déflation de production du pétrole
- Une meilleure prévisibilité de la consommation mondiale d'énergie après 2050
- Les voies technologiques susceptibles de déboucher pratiquement au-delà de 2050

↓ Vers 2050

- Une meilleure prévisibilité de début de déflation du gaz naturel
- La mise en œuvre de nouvelles technologies

L'examen de ces différentes dates incite à rester très modeste quant à notre capacité à prévoir l'avenir, même dans le domaine somme toute restreint de l'énergie. Il incite par contre à être extrêmement vigilant, et à tout faire pour identifier des "politiques de précaution" permettant d'éviter d'être surpris par des crises plus ou moins graves affectant le secteur énergétique.

L'horizon technologique est probablement celui où l'Académie des technologies peut essayer de porter quelque lumière en scrutant les recherches et développements en cours dans le domaine de l'énergie.

Nous classerons les R&D qui peuvent avoir une incidence majeure sur la réflexion prospective en quatre catégories :

L'exploitation des énergies primaires

Les vecteurs d'énergie

Les nouvelles utilisations de l'énergie (PAC,...)

Les nouvelles sources d'énergie (fusion, solaire satellitaire,...)

1. MEILLEURE EXPLOITATION DES ENERGIES PRIMAIRES

Dans ce domaine, les R&D qui peuvent amener des changements notables dans la prospective énergétique concernent essentiellement :

- La découverte de nouveaux gisements pétroliers et gaziers, et la surexploitation des anciens, à court terme
- La séquestration du CO₂, à moyen terme
- Les centrales à charbon à émission réduite, à moyen terme

Ces aspects ont été abordés dans le cours du rapport

2. LES VECTEURS D'ENERGIE

Nous considérons comme vecteur d'énergie une **forme d'énergie non primaire transportable, si possible stockable, utilisable en un lieu différent de sa production, ou sur un véhicule** (bien sûr certaines énergies primaires comme le pétrole, le gaz et le charbon sont en même temps des vecteurs, par leur transportabilité sur de longues distances).

2.1 LE VECTEUR ELECTRIQUE

L'énergie électrique se développe à un rythme supérieur à celui de toutes les autres formes d'énergie primaire, grâce à sa grande commodité et diversité d'emploi, c'est la forme la plus moderne de consommation d'énergie. Deux milliards d'hommes n'ont pas encore accès à cette forme d'énergie, et les statistiques de l'OMS indiquent que l'espérance de vie chez les populations n'ayant pas encore accès à l'électricité est fortement réduite

L'électricité est aujourd'hui le seul vecteur disponible pour les énergies renouvelables d'origine mécanique ou solaire ainsi que pour l'énergie nucléaire. Il en résulte que toute politique énergétique visant à limiter la part des énergies fossiles doit en même temps s'assurer que l'électricité produite pourra être utilisée.

L'énergie électrique est l'exemple type du vecteur d'énergie dont on connaît les immenses qualités, mais aussi son gros défaut : ne pas être stockable directement et économiquement, si ce n'est en pompant de l'eau dans des réservoirs en altitude, solution onéreuse et qui ne peut être utilisée que sur certains sites favorables. Le vecteur électrique se développerait encore plus rapidement, notamment comme source embarquée dans l'automobile, si les performances du stockage de l'électricité étaient très supérieures à celles des batteries actuelles (autonomie de 50 km pour 500 nécessaire, vitesse de recharge de 1 à 2 km par minute au lieu de 100 à 200 pour les hydrocarbures).

Le GT "stockage de l'énergie électrique" a fait le point sur ce problème. Cet axe de recherche continue à être important pour l'avenir à la fois en extrapolant les techniques d'aujourd'hui mais aussi en cherchant des idées en rupture.

2.2 LE VECTEUR HYDROGENE

La prise de conscience de la raréfaction prochaine des ressources pétrolières, et aussi de la nécessité de réduire rapidement les émissions de CO₂ donnent une grande ampleur aux recherches visant à utiliser l'hydrogène (ou des dérivés de l'hydrogène) comme carburant, ce qui génère des analyses techniques et économiques extensives sur les moyens de production, de transport, de stockage, de distribution et d'utilisation de l'hydrogène. Plusieurs congrès internationaux ont lieu chaque année sur l'"hydrogène-énergie", dont le dernier vient de se tenir à Grenoble en septembre 2003.

L'explosion des recherches est mondiale, assortie de budgets impressionnants et donne lieu à des accords de coopération internationale, dont le dernier en date en cours de négociation, IPHE est une proposition américaine de coopération mondiale pour accélérer l'entrée dans ce que certains appellent déjà "l'économie de l'hydrogène". On doit tout de même rappeler que, contrairement à la prédiction de Jules Verne¹³, l'hydrogène n'est pas une source d'énergie, mais seulement un vecteur d'énergie, celui dont on parle le plus comme vecteur énergétique du futur, utilisable pour une motorisation propre des véhicules ou pour la génération de chaleur et d'électricité résidentielle, soit en combustion directe, soit à travers des piles à combustibles, soit comme élément de base de la synthèse de carburants liquides. Est-ce un rêve ? Sa médiatisation n'est-elle pas excessive ? Cet attrait mérite d'en analyser un peu plus en détail le contexte :

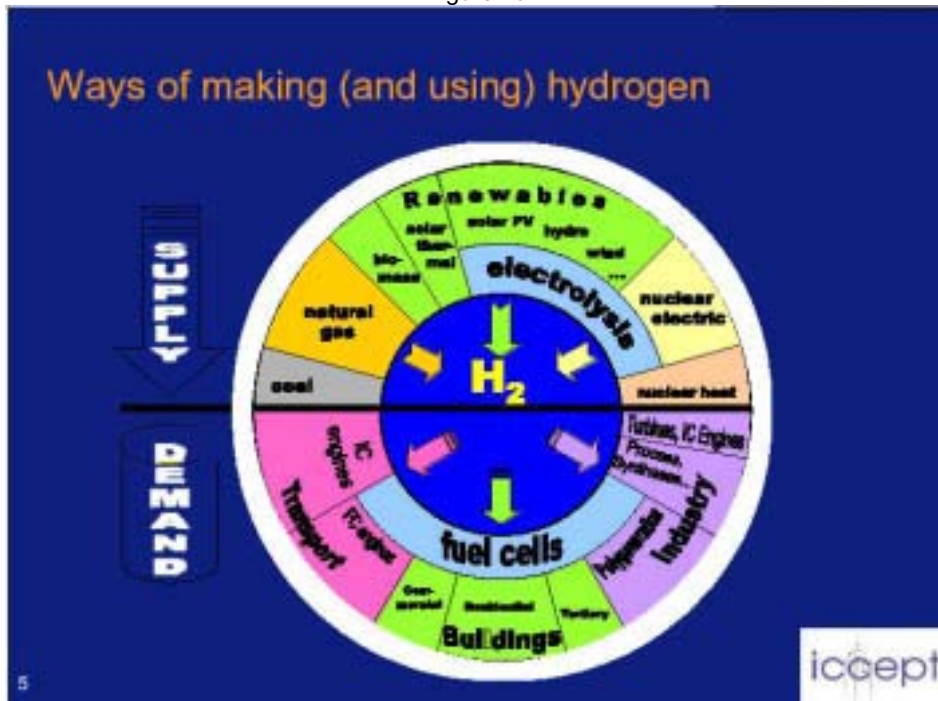
Comment produire l'hydrogène? L'hydrogène, bien que représentant 98% de la masse de l'univers, n'existe pas sur Terre sous sa forme simple, mais seulement sous forme combinée à d'autres éléments dont il faut l'extraire, principalement l'eau et les hydrocarbures. La production d'hydrogène n'est ni thermodynamiquement efficace, ni rentable ni écologique actuellement pour cet usage énergétique. L'hydrogène est produit actuellement pour 98% à partir d'hydrocarbures, pour l'usage de la sidérurgie, de la chimie et de l'industrie spatiale et à un coût par unité d'énergie de 2 à 5 fois celui des hydrocarbures de départ. Cette solution, trop coûteuse pour une utilisation énergétique de H₂, est en outre peu durable compte tenu de l'épuisement prochain des réserves fossiles, et émet en sous-produit du CO₂ qui contribue à l'effet de serre.

Mais demain ? **L'hydrogène peut être produit à partir d'une multitude de sources, et par des procédés très variés** : charbon, gaz naturel, éthanol ou résidus pétroliers par reformage, eau par électrolyse ou par dissociation thermo-chimique, biomasse par pyrolyse ou par fermentation biochimique, éventuellement associées au solaire, nucléaire par dissociation de l'eau à haute température ou électrolyse à chaud, solaire...etc.

Dans beaucoup de ces filières, l'usage d'un catalyseur adéquat est nécessaire pour aider la thermodynamique en permettant des réactions chimiques à des températures plus facilement accessibles

La figure 23 résume les divers moyens de production et les diverses formes d'utilisation de l'hydrogène

Figure 23



¹³ "Je crois que l'eau sera un jour employée comme carburant, que l'hydrogène et l'oxygène qui la constituent, utilisés seuls ou ensemble, fourniront une source inépuisable de chaleur et de lumière..." *L'île mystérieuse* Jules Verne 1874

Aucune filière n'est totalement exempte d'émission de CO₂. Toutes les filières partant d'hydrocarbures rejettent du CO₂. La seule voie n'utilisant pas de produits carbonés est celle de l'eau, soit par électrolyse, soit par dissociation thermique, mais pour être "verte", cette voie doit utiliser une énergie elle-même "verte" pour fournir l'énergie électrique ou thermique nécessaire pour casser la liaison moléculaire de l'eau¹⁴.

Une tendance forte est de chercher à produire l'hydrogène à partir d'énergies renouvelables, on rêve de compenser l'imprévisibilité de fonctionnement des éoliennes en stockant l'énergie électrique produite lorsqu'elle n'est pas demandée sous forme d'hydrogène, ce qui pousse au développement de moyens décentralisés de petites unités de production (par électrolyse dans ce cas) dont la rentabilité est encore plus difficile.

L'électrolyse de l'eau, plus efficace à chaud, exige de disposer d'une source massive d'électricité bon marché et n'émettant pas de CO₂ : nucléaire?, ou grand hydraulique africain?, en Islande, on développe cet hydrogène "vert" à partir de la géothermie par électrolyse d'eau chaude, une partie de l'énergie de dissociation de la molécule d'eau étant apportée gratuitement par la chaleur souterraine.

La dissociation thermo-chimique de l'eau exige de disposer d'une source massive de calories bon marché. Les réacteurs nucléaires VHTR pourront-ils être une solution?

On doit en outre noter que pour les applications en pile à combustible PEMFC et en stockage sur hydrures, une très grande pureté de l'hydrogène est nécessaire pour permettre une durée de vie suffisante des catalyseurs ou un nombre de cyclages acceptable des hydrures. Tous les moyens de production ne permettent pas cette pureté

Comment transporter l'hydrogène?

Outre les problèmes de sécurité que pose l'hydrogène par son caractère explosif en présence d'air (oxygène) et de source de chaleur, l'hydrogène est handicapé par ses propriétés physiques : La médiocrité de son pouvoir énergétique volumique (1/3 de celui du gaz naturel) handicape son transport sous forme de gaz comprimé par canalisation (transport environ 3 fois plus cher que le gaz, 15 fois plus cher que le pétrole, par unité d'énergie). Une autre propriété physique regrettable de l'hydrogène est de fragiliser les métaux.

Des réseaux régionaux de distribution d'hydrogène existent pourtant déjà dans le nord de la France et en Belgique, entre usines sidérurgiques et chimiques. La création d'un vaste réseau de transport et distribution d'hydrogène pose vis à vis du développement de l'hydrogène dans les transports routiers le problème de la poule et l'œuf : l'un ne pourra se développer qu'à partir de l'émergence de l'autre, c'est pourquoi la première étape d'application des piles à combustibles aux véhicules routiers ne se fera probablement pas en utilisant de l'hydrogène distribué en station service, mais à partir d'hydrocarbures du réseau de distribution classique, par reformage embarqué. Pour la distribution par réseau, des étapes intermédiaires seront nécessaires, il est envisagé d'utiliser le réseau de gaz naturel en y introduisant des proportions croissantes d'hydrogène.

La production décentralisée aux stations de distribution semblant pour le moment la plus attractive, il est aussi envisagé le transport "électrique" de l'hydrogène, en le produisant localement dans les stations service au moyen de petits électrolyseurs. En ce cas, le transport de l'hydrogène est remplacé par le transport de l'électricité, et la puissance supplémentaire à investir sous forme électrique serait considérable.

Comment distribuer l'hydrogène?

La distribution au véhicule en toute sécurité et en un temps acceptable pose des problèmes complexes, que ce soit sous forme de gaz comprimé à 350 ou 700 bar (CGH₂), ou sous forme liquéfiée à -253°C (LH₂). Compte tenu de la très haute pression, de la dangerosité des fuites, ou de la très basse température, des automates de raccordement entre le véhicule et le poste de distribution sont indispensables. La commodité et la durée du remplissage en sont affectés. Dans le cas du CGH₂, un remplissage en 3 minutes ne doit pas faire monter la température du réservoir de plus de 85°C, et une surpression de remplissage par rapport à la valeur nominale, nécessaire pour compenser le refroidissement ultérieur ne doit pas excéder 50 à 70 bar.

Compte tenu des incertitudes sur la forme sous laquelle sera distribuée l'hydrogène dans le futur, il est envisagé en période intermédiaire des stations de distribution mixtes (CGH₂ et LH₂). Actuellement, il n'existe qu'une quarantaine de stations de distribution d'hydrogène liquide dans le monde (Munich, Berlin, Tokyo, Yokohama, Reykjavik...).

Comment stocker l'hydrogène?

Pour le stockage à bord du véhicule, la faible masse d'hydrogène stocké par rapport à la masse ou au volume du réservoir nécessaire (quelques % pour l'hydrogène comprimé) handicape son implantation à bord, quelle que soit la forme du stockage envisagé, CGH₂ ou LH₂. Sous forme liquide, l'hydrogène présente l'attrait d'une densité énergétique très supérieure, le réservoir n'est pas sous pression, mais l'isolation thermique nécessaire conduit aussi à un faible rapport entre le volume d'hydrogène stocké et celui du réservoir. L'évaporation de l'hydrogène pendant les périodes longues de parking pose un problème supplémentaire, obligeant à prévoir soit une combustion catalytique de ces fuites, soit les utiliser dans une pile à combustible pour réinjecter l'énergie électrique produite sur le réseau

D'autres formes de stockages sont imaginées : solide par fixation chimique réversible de l'hydrogène sur des hydrures ou des nitrures, ou fixation physique par adsorption sur des nanotubes de carbone ou des microsphères de verre. Les hydrures semblent actuellement les plus prometteurs.

¹⁴ L'électrolyse de l'eau à partir de l'électricité européenne moyenne émet 4,5 kg CO₂/Nm³ d'hydrogène, alors que le reformage chimique du gaz naturel n'en émet que 1 kg CO₂/Nm³

Qu'en pensent les constructeurs automobiles?

La plupart des constructeurs automobiles ont déjà réalisé des démonstrateurs, avec des choix diversifiés de formes de carburant : CGH₂ pour General Motors, LH₂ pour BMW, ou issu de reformage embarqué pour Renault Nissan, ou fixé sur hydrures pour PSA, ainsi que de motorisation : à combustion interne pour BMW, ou pile à combustible pour tous les autres.

Une voie prometteuse pourrait être la synthèse de combustible liquide à partir d'hydrogène légèrement recarboné. Cette voie ferait disparaître les handicaps physiques de l'hydrogène pour les transports terrestres.

Les premières applications de l'hydrogène aux transports terrestres concerneront probablement les autobus circulant en ville. Beaucoup de projets sont en cours de réalisation, dont IRISBUS (75 kW PEM FC) fonctionnant à l'hydrogène comprimé à 350 bar, à Paris, Madrid et Turin

En ce qui concerne les applications au transport aérien, L'hydrogène liquide, déjà utilisé pour la propulsion des fusées, pourrait-il être le carburant des avions ? Il s'agirait certes d'une niche importante, mais qui reste limitée.

Il est hasardeux de tenter une conclusion aujourd'hui. On doit noter que la France développe moins d'activité de R&D dans ce domaine de l'hydrogène que la plupart des autres pays développés. En ce qui concerne les applications au transport routier et compte tenu de la complexité de son usage, il n'est pas aujourd'hui certain que l'hydrogène pur puisse jouer un rôle important dans l'avenir. Sous forme recarbonée liquide, son avenir serait plus facilement assuré, surtout si des moyens de stockage du CO₂ voient le jour, car il permettrait d'utiliser les circuits et moyen techniques de transport et distribution actuels. Un expert¹⁵ envisage pour les 4 Gtep estimés nécessaires aux transports routiers en 2100 le partage suivant entre les carburants pourrait être: 1/4 pétrole conventionnel, 1/4 pétrole de synthèse classique à partir de charbon ou gaz, 1/4 hydrogène nucléaire recarboné liquide, 1/4 électrique hybride. L'idée générale est là aussi d'une plus grande variété dans le « bouquet énergétique » par rapport à la solution d'aujourd'hui dominée par l'essence et le diesel.

La raréfaction prochaine des ressources pétrolières, et la nécessité de réduire rapidement les émissions de CO₂ donnent une ampleur considérable aux recherches visant à utiliser l'hydrogène (ou des dérivés de l'hydrogène) comme carburant, ce qui appelle des analyses techniques et économiques extensives sur les moyens de production, de transport, de stockage, de distribution et d'utilisation de l'hydrogène. L'explosion des recherches est mondiale, assortie de budgets impressionnants et à des accords de coopération dont le dernier en date, IPHE est une proposition américaine de coopération mondiale pour accélérer l'entrée dans ce que certains appellent déjà "l'économie de l'hydrogène". L'hydrogène se présente donc actuellement comme le candidat dont on parle le plus comme vecteur énergétique possible dans le futur, utilisé soit en combustion directe, soit à travers des piles à combustibles.

Les handicaps physiques de l'hydrogène pour les transports terrestres

- La médiocrité de son pouvoir énergétique volumique (1/3 de celui du gaz naturel) handicape son transport par canalisation (transport environ 3 fois plus cher que le gaz, 15 fois plus cher que le pétrole, par unité d'énergie)
- La faible masse d'hydrogène stocké par rapport à la masse du réservoir nécessaire (quelques % pour l'hydrogène comprimé) handicape son implantation à bord d'un véhicule terrestre, quelle que soit la forme du stockage envisagé (comprimé à 350 ou 700 bars, chimiquement combiné en hydrures ou adsorbé sur nanotubes de carbone)

Une voie prometteuse pourrait être la synthèse de combustible liquide à partir d'hydrogène légèrement recarboné. Cette voie ferait disparaître les handicaps physiques de l'hydrogène pour les transports terrestres.

La plupart des constructeurs automobiles ont déjà réalisé des démonstrateurs, avec des choix diversifiés de formes de carburant (hydrogène comprimé-GM-, ou liquide-BMW-, ou issu de reformage embarqué-Renault Nissan-, ou fixé sur hydrures-PSA-), et de motorisation (à combustion interne-BMW- ou pile à combustible-les autres-)

L'hydrogène liquide, déjà utilisé pour la propulsion des fusées, pourrait-il servir de carburant pour les avions ? Il s'agirait certes d'une niche importante, mais qui reste limitée.

Le transport et la distribution de l'hydrogène sont également étudiés sous les formes gazeuse et liquide, à partir de productions massives centralisées ou de petites productions décentralisées utilisant préférentiellement des énergies renouvelables. Il n'existe aujourd'hui qu'une quarantaine de stations de distribution dans le monde (Munich, Berlin, Tokyo, Yokohama, Reykjavik...). La production décentralisée aux stations de distribution semble pour le moment la plus attractive, souvent par électrolyse; en ce cas, le transport de l'hydrogène est remplacé par le transport de l'électricité, et une forte augmentation de la consommation d'électricité est à envisager.

¹⁵ P-R Bauquis, intervention au Congrès Européen sur l'Hydrogène Energie, septembre 03^{GR}

2.3 LE VECTEUR CHALEUR ?

D'une manière générale, la chaleur résulte d'une transformation d'énergie chimique (combustion) ou électromagnétique (solaire thermique) ou cinétique (nucléaire). On cherche dans ces transformations à obtenir une chaleur de la plus haute enthalpie possible (haute température T1), qui mise en communication avec une source froide T2 permet d'extraire une énergie mécanique utilisable soit directement soit pour produire de l'électricité ? mais le principe de Carnot fait qu'une partie seulement de l'énergie thermique de la source chaude T1 peut être transformée en énergie mécanique, dans le rapport $(T1-T2)/T1$, le reste étant dissipé sous forme de **chaleur basse température** à la source froide. Dans les centrales thermiques et nucléaires dont les puissances électriques sont de l'ordre du GW, l'énergie thermique ainsi perdue par dissipation dans l'eau ou l'air est de l'ordre du double (2 GW), très au delà des besoins de chauffage locaux, et peut donner le sentiment d'un énorme gâchis. La cogénération, qui permet de récupérer une partie de cette chaleur pour du chauffage urbain ou des process industriels n'est utilisée que pour des puissances plus réduites, de la dizaine ou la centaine de MW.

La chaleur basse température mérite-t-elle la dénomination de vecteur énergétique ? C'est généralement une forme d'énergie non primaire (mise à part la géothermie) transportable, mais seulement sur de faibles distances, peu stockable, utilisable en un lieu différent de sa production seulement si ce lieu en est assez proche. C'est donc un vecteur assez médiocre, de proximité, dédié surtout au chauffage urbain sous forme de réseau de chaleur.

Les besoins en énergie de chauffage, dont on a vu qu'ils représentent le tiers de l'énergie consommée en France, sont malheureusement des besoins très dispersés sur le territoire. Ce n'est que dans les zones d'habitat très dense que des réseaux de chaleur peuvent s'implanter avec intérêt. Environ 400 réseaux existent dans 350 villes de France, ils couvrent 5 à 6% de l'énergie de chauffage.

Dans les pays à climat froid comme la Russie, les besoins de chauffage s'étendent sur 9 à 10 mois par an ; l'utilisation de chauffage urbain alimentée par des centrales de cogénération au gaz naturel est la solution qui s'impose économiquement.

3. LES NOUVELLES UTILISATIONS DE L'ENERGIE

3.1 LA PILE A COMBUSTIBLE

Une forme nouvelle et attendue de génération d'électricité (et en même temps de chaleur) est la pile à combustible, en utilisation fixe pour l'alimentation électrique et thermique d'immeubles en cogénération, et en utilisation sur véhicule automobile pour l'alimentation électrique de sa motorisation et/ou de ses auxiliaires.

La pile à combustible utilise basiquement l'hydrogène comme carburant, dont la réaction avec l'oxygène de l'air dans un dispositif approprié utilisant généralement un catalyseur et des membranes produit de l'électricité et de la chaleur, avec comme seul résidu non polluant de l'eau, d'où son intérêt majeur pour les transports.

Le coût est le problème essentiel, le niveau actuel étant environ 10 fois trop élevé

Parmi les objectifs de coûts pour 2010, on peut retenir :

- 150 à 200 €/kW pour les transports en commun
- 60 €/kW pour les voitures particulières

Le couple H2/PAC pour les usages fixes semble assez problématique. Le rendement thermodynamique global de la chaîne énergie primaire/transport et stockage de H2/PAC est en effet très mauvais, et la concurrence du gaz naturel en cycle combiné sera forte. Il faudrait que le coût de l'énergie primaire (verte) servant à produire l'hydrogène soit très bas, que celui des procédés de fabrication de H2 chute fortement, et que le prix du gaz augmente fortement, pour que ce créneau apparaisse. Si les économies d'énergie et l'utilisation des énergies renouvelables se développent fortement dans le bâtiment, la chaleur dégagée par la pile à combustible verra sa valeur réduite, ce qui handicapera encore plus sa pénétration.

Le cas des usages mobiles peut être différent, la PAC étant alors en concurrence avec le moteur à combustion interne brûlant directement de l'hydrogène, ou un carburant liquide de synthèse dérivé de l'hydrogène.

Le GT « pile à combustible » a établi l'état de l'art pour les différentes filières de PAC en cours de développement, la palette des puissances possibles, les objectifs d'application, les combustibles utilisables aux étapes successives de l'entrée de ces PAC sur le marché, les bilans énergétiques et l'impact écologique selon ces combustibles.

4. LES NOUVELLES SOURCES D'ENERGIE

- La fusion nucléaire contrôlée, pour laquelle une activité de recherche mondiale centrée sur le projet ITER est réactivée par la rentrée des Etats-Unis dans le projet en 2002, pourra-t-elle jouer un rôle dans la seconde moitié du siècle, ou seulement au suivant ? Cette filière se situe un peu au-delà de l'horizon de cette analyse.
- L'exploitation des ressources non conventionnelles de méthane, notamment des hydrates de méthane, à long terme
- L'énergie solaire satellitaire, utopique ? Ou sur un très long terme