

Les énergies alternatives

GCA (2S) Michel Asencio

Chercheur associé

(17 janvier 2006)

Introduction

Les recherches sur les énergies alternatives aux matières d'origine fossile et les économies sur la consommation sont très nombreuses et concernent tous les grands domaines du secteur civil, gourmands en énergie. Les réalisations pratiques à grande échelle, par contre, sont rares car les réserves naturelles sont encore importantes et les technologies nouvelles peuvent repousser la limite de leur extinction bien au-delà des dates avancées aujourd'hui. Les systèmes à énergie alternative sont en laboratoire ou en période probatoire avec des applications restreintes. Mais ils bénéficient de la part de tous les gouvernements de mesures de défiscalisation incitatives, ce qui a pour effet de promouvoir l'utilisation de ces énergies nouvelles dans le grand public.

Les technologies de l'énergie ont un caractère dual et avec la lutte contre la pollution et le réchauffement climatique, c'est essentiellement le secteur civil (99 % de la consommation nationale française), qui porte pratiquement toutes les évolutions dans ce domaine en défrichant la voie. S'agissant des énergies renouvelables, un kilowatt heure (KWh) « photo voltaïque » coûte aujourd'hui huit fois plus cher qu'un KWh « nucléaire » et l'éolien deux fois plus cher. On mesure donc à quel point les énergies renouvelables requièrent un effort de subvention très important pour s'imposer. Mais incontestablement, ces technologies innovantes déboucheront sur des applications à grande échelle dans les transports terrestres, maritimes ou aériens d'ici une vingtaine d'années mais peut-être avant, pour certaines d'entre-elles, si la demande se fait plus pressante.

Les procédés nouveaux produisant de l'électricité ou du chauffage sont à distinguer des procédés énergétiques permettant la locomotion des véhicules et les transports.

Depuis quelques années, des efforts de recherches très importants sont consentis dans deux axes principaux :

- La diversification des sources d'énergie en faveur des énergies renouvelables plus protectrices de l'environnement que les énergies fossiles.
- La recherche de sources d'énergie de remplacement capables à terme de se substituer, pour les véhicules, aux dérivés du pétrole.

La production d'électricité

Des réalisations sont déjà présentes dans les milieux les plus gourmands en énergie électrique et calorifique, c'est-à-dire dans les milieux domestique et industriel. Pour les besoins d'éclairage et de chauffage, des solutions techniques commencent à être au rendez-vous. Mais l'utilisation de ces technologies nouvelles est encore rare, surtout en milieu collectif et ne dépassent pas 10 % des installations malgré les subventions intéressantes proposées par les gouvernements. Totalement duales, toutes les avancées dans ce domaine peuvent, bien entendu, bénéficier aux armées.

Les initiatives en milieu industriel sont également très nombreuses et elles pointent du doigt un secteur pétrolier frileux et attentiste, tant ces technologies sont déjà banales dans d'autres industries. Les « pétroliers » ne lanceront de nouvelles filières, à grande échelle, qu'une fois assurés de la stabilité des cours du pétrole à un niveau élevé. Pour eux, on s'achemine plutôt vers une période de cinq ans de fortes fluctuations du marché avec un prix plancher à 50\$ et un prix plafond à 150\$. D'ailleurs aujourd'hui, le problème semble se situer plutôt au niveau des capacités de raffinage que de l'extraction ou de l'exploitation. Faute d'investissements, les installations vieillissantes deviennent obsolètes avec des rejets de pollutions importants et la production de produits non traités (désulfuration, par exemple).

Le renchérissement durable du prix du pétrole, l'épuisement des ressources de la mer du Nord et en ce début d'année 2006 la crise russo-ukrainienne sur le gaz ont relancé le débat sur la nécessité de renforcer l'indépendance énergétique de l'Europe.

- *Le pétrole et le gaz*

Depuis une trentaine d'années, les estimations des réserves pétrolières ont été revues à la hausse grâce à l'amélioration des performances des machines, de l'électronique et des nouveaux matériaux. Actuellement ces réserves sont estimées à 50 ans pour le pétrole et 60 ans pour le gaz. Il est vraisemblable qu'avec les prochaines avancées technologiques, les réserves seront encore réévaluées. Reste à savoir s'il est encore raisonnable de s'acharner à soutirer toujours plus difficilement l'or noir du sous-sol au détriment de solutions plus innovantes et en définitive économiquement moins coûteuses.

- Le charbon

Les réserves de charbon sont estimées à 100 ans et les coûts d'investissement encore très faibles (1,5€/KW contre 2 à 3€ pour le KW « fission »). Aux États-Unis et même en Allemagne, pays européen très en avance sur le plan « écologique » et les énergies alternatives, la valorisation de la filière charbon, pourtant très polluante, est d'actualité (le charbon participe à 25 % de la consommation énergétique allemande alors que les énergies renouvelables ne représentent que 4 %). Mais les investissements pour la filière charbon risquent de s'alourdir avec les obligations d'enfouissement des émissions polluantes. D'autre part, plusieurs expérimentations en cours montrent la faisabilité technique de l'exploitation des hydrocarbures lourds comme les sables asphaltiques ou les schistes bitumineux (USA, Canada) mais leurs coûts sont encore élevés même si, avec le prix actuel du baril, ils frôlent la viabilité économique.

- Le nucléaire

Les crises répétitives sur le pétrole et maintenant le gaz ont relancé le débat sur le renforcement de l'indépendance énergétique de l'Europe. La France, dont le bilan énergétique dépend à 76 % du nucléaire, n'a jamais eu l'idée d'abandonner cette filière d'électricité, la Grande-Bretagne se pose la question de la rénovation de ses centrales et les accords gouvernementaux allemands prévoyant la fermeture de toutes les centrales nucléaires au plus tard en 2021 sont remis en discussion. Il faut noter que 25 kg d'uranium fournissent 1 GigaW d'électricité et que pour l'arrêt d'une centrale nucléaire, il faut brûler 2,7 millions de tonnes de charbon pour produire la même quantité d'électricité tout en rejetant 8 millions de tonnes de CO₂ dans l'atmosphère. Les 25 kg de déchets nucléaires seront traités avec toute l'attention requise alors que des millions de tonnes de CO₂ sont jetés sans scrupules dans l'atmosphère.

En 2005, la France a pris l'initiative de lancer le démonstrateur du réacteur européen à eau pressurisée (EPR) de 3^{ème} génération destiné à remplacer les centrales les plus anciennes. Une dizaine de pays vont opter bientôt pour un prototype de réacteur de la 4^{ème} génération pour une entrée en service dans une quarantaine d'années. Le choix se portera sur un réacteur à très haute température refroidi au gaz (VHTR) ou sur un réacteur à neutrons rapides refroidi au gaz ou au sodium.

D'autres initiatives à l'échelon mondial concernent la filière fusion nucléaire (ITER) et elles laissent présager une « civilisation de l'hydrogène » dans quatre ou cinq décennies vraisemblablement. La fusion des atomes, avec des ressources en combustibles illimitées (deutérium – tritium), pas de risque d'emballement du type Tchernobyl et des déchets à faible radio toxicité et à périodes courtes, est appelée à prendre la relève de la fission pour la fourniture de l'électricité mais aussi pour la production d'hydrogène nécessaire aux transports. Il faut noter que si la France, fidèle à sa politique sur le développement de l'énergie nucléaire, accueillera le réacteur ITER, c'est la moitié des pays de la planète qui ont investi dans cette filière de recherche. Les experts estiment à 95 % les chances d'aboutir

dans les temps à la validation et à l'optimisation de la filière fusion par confinement, le défi économique quant à lui sera plus difficile à relever. Les investissements de la filière « fusion ITER » s'élèverait au terme industriel à 8€ le KW, soit plus du double de l'investissement nécessaire pour 1 KW « fission ».

- **Les sources d'énergie renouvelables**

Pour fournir de l'électricité, on fait appel à l'hydraulique, au solaire, à l'éolien, à la biomasse mais aussi à l'énergie des vagues.

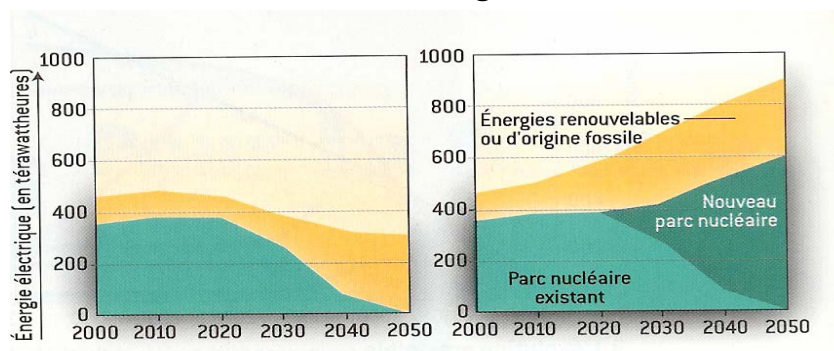
L'hydroélectricité est la source d'énergie renouvelable la plus importante en Europe mais elle est malheureusement exploitée à son maximum.

Le solaire mérite une attention particulière : des résultats très importants sont obtenus pour les cellules solaires, en améliorant le rendement, en réduisant les coûts, en facilitant la mise en œuvre. Les progrès ont été obtenus sur des cellules rigides et flexibles, organiques, à la fois meilleur marché et adaptables à n'importe quel support. L'énergie solaire est certainement avec le nucléaire, la source qui permettra d'attendre l'avènement de l'ère de l'hydrogène.

Les recherches sur l'énergie éolienne et sur celle des vagues ont déjà des applications pratiques mais ces deux types de sources ne peuvent être considérés comme principales. Comme appoint elles sont quelquefois non négligeable puisqu'en Écosse 20 % de l'électricité est fournie par des champs de transformateurs implantés en mer en utilisant l'énergie des vagues (Pelamis).

Des initiatives locales ont commencé à populariser la biomasse, les recherches s'intensifient autour de la fabrication de biocarburants à partir du bois et des tiges des plantes et sur l'utilisation du biogaz dans les piles à combustible.

Mais il est peu probable, que ces diverses sources d'énergie puissent remplacer un jour les centrales thermiques ou nucléaires pour répondre à la consommation toujours croissante. Il se dessine vers 2050, deux scénarios pour la production globale d'électricité. Le premier, économe, avec une production de 300 TéraWatt-heure (moins qu'aujourd'hui ?) où la part d'énergie nucléaire se situerait entre 200 TWh et zéro. Le second, situe la production globale d'électricité à 900 TWh où la part du nucléaire augmenterait jusqu'à 600 TWh, les 300 restants revenant aux énergies d'origine fossile ou renouvelable. Voir figure¹.



¹ Benjamin Dessus, *Pour la Science*, Janvier 2006.

Les transports

Dans le domaine de la fourniture d'énergie pour les véhicules et les transports, les recherches concernent essentiellement les piles à combustible et l'hydrogène.

- Les piles à combustible

C'est actuellement dans le domaine des piles à combustible utilisant l'hydrogène que les avancées technologiques sont les plus nombreuses, qu'il s'agisse des modes de production (hydrocarbures, éthanol ou à partir de la biomasse), des modes de stockage (complexes organométalliques) ou de la membrane échangeuse d'ions qui représente à elle seule 35 % du coût de la pile.

On peut raisonnablement conjecturer que lorsque l'hydrogène se sera suffisamment imposé comme vecteur d'énergie *non polluant*, les piles à combustible auront fait les progrès décisifs permettant d'éviter tout recours à un moteur thermique. Il faut compter une dizaine d'années avant de voir les applications pratiques se généraliser.

- Le stockage d'énergie

Grâce aux nanotechnologies, les batteries au lithium font l'objet de nombreuses améliorations en devenant super compactes, légères et performantes pour répondre à la mobilité des applications mais aussi pour faciliter celle du combattant. On notera également les innovations qui se poursuivent dans le domaine des micro batteries (1 mm de diamètre) et des condensateurs avec des performances (taille et capacité) très intéressantes.

- L'hydrogène

Le stockage de l'hydrogène pour améliorer l'autonomie des véhicules et leur sécurité sont également un domaine d'intérêt soutenu pour la recherche. La distribution est également un problème majeur à résoudre avant la généralisation du véhicule à hydrogène qui a incontestablement emprunté une route semée d'obstacles² techniques et financiers.

Une première difficulté est le manque d'autonomie et une capacité des réservoirs réduite. Cinq à sept kg suffiraient pour assurer une autonomie supérieure à 500 km mais les prototypes actuels ne stockent que 2,5 à 3,5 kg d'hydrogène et personne ne sait comment stocker deux fois cette quantité sous un volume et une pression raisonnables.

Il faudrait aussi que les constructeurs divisent par 100 le prix des moteurs à piles et qu'ils multiplient par cinq la durée de vie des systèmes de production électrique. Le coût prohibitif de la technique des membranes échangeuses de protons est l'une des principales difficultés. La puissance devra être nettement accrue pour équiper les véhicules lourds.

² Article de Thomas Ashley, revue *Pour la Science*, avril 2005.

Le stockage et le manque d'infrastructures de distribution d'hydrogène aussi étendue que le réseau actuel de stations-service sont également des obstacles majeurs. Le lancement de ce type de distribution est bloqué par le défaut de demande et les énormes investissements nécessaires pour établir les infrastructures.

On sait déjà produire et manipuler industriellement l'hydrogène. Toutefois, son extraction à partir du méthane, la méthode la plus utilisée aujourd'hui, produit du dioxyde de carbone, l'un des principaux gaz à effet de serre. Différents procédés de production de l'hydrogène sont à l'étude pour obtenir des rendements satisfaisants. Le meilleur résultat jamais obtenu est de 50 %. Enfin, cet hydrogène industriel devra être débarrassé de ses impuretés qui sont la cause principale des problèmes rencontrés dans les piles à combustibles.

- Vers une « économie de l'hydrogène » ?

La transition vers une « économie de l'hydrogène » n'aura pas lieu avant des décennies car comme on vient de le voir, la difficulté est de produire, stocker et distribuer cet hydrogène en quantités suffisantes et à un coût raisonnable sans relâcher dans l'atmosphère des gaz à effet de serre. La filière hydrogène atteindra un stade d'utilisation généralisé suivant la rapidité avec laquelle les obstacles techniques et économiques qui la bloquent aujourd'hui seront surmontés. Les progrès des infrastructures nécessaires seront alors significatifs. On assistera à l'avènement de cette filière vraisemblablement dans les 10 ou 20 ans qui viennent. Mais tout comme les « pétroliers », les constructeurs hésitent à franchir le pas entre les véhicules hybrides et le véhicule à hydrogène.

L'application aux systèmes d'armes

Les moyens de transports terrestres militaires seront les héritiers directs des progrès réalisés par l'industrie automobile civile. Les applications pour les véhicules lourds, intéressantes pour l'armée de Terre, sont loin d'être matures aujourd'hui.

Pour la Marine nationale, le prochain défi à relever sera le navire tout électrique. Ce concept ne pourra pas être appliqué tant que des progrès notables ne seront pas réalisés dans le domaine des matériaux et des équipements supra conducteurs. Compte tenu des coûts d'exploitation faibles des moteurs diesels, la propulsion thermique a encore une belle existence programmée. Des besoins nouveaux comme le combat naval près du littoral vont demander des propulsions à temps de réponse rapide et des machines électriques. Il est probable que là aussi ce type de propulsion mixte sera la première réponse en attendant le renouveau d'une propulsion à base de petites turbo machines nucléaires et l'arrivée de la génération de l'hydrogène.

En ce qui concerne la propulsion aéronautique, les avions de transport seront motorisés encore longtemps avec des moteurs à hélices profilées et

des turboréacteurs alimentés par du kérosène issu comme aujourd'hui du pétrole et demain du charbon ou du pétrole de synthèse.

Le système de propulsion hypersonique à base de super statoréacteurs (scramjet) fonctionnant à l'hydrogène et utilisant l'oxygène de l'air est en cours d'essai sur les démonstrateurs X47 américains mais il reste à trouver le moteur mixte qui permettra à un même vecteur, de décoller et d'accélérer avant d'entamer le vol hypersonique. Le dernier essai d'un scramjet en vol a utilisé du kérosène avion.

Conclusions

Le basculement irréversible vers des sources d'énergies nouvelles ne se fera que lorsque le prix du baril de pétrole atteindra et stagnera durablement à des niveaux compris entre 80 et 100\$. Avec les niveaux de prix déjà atteints, les problèmes de pollution et de réchauffement climatique, le virage est pris même si certains gouvernements de pays industrialisés ne s'y engagent encore que timidement. Les énergies innovantes deviendront de plus en plus concurrentielles et ne demanderont plus de subventions. Elles ne seront pas pour autant moins chères car il sera toujours plus difficile d'extraire du carburant du charbon ou des huiles lourdes que de l'extraire aujourd'hui du pétrole.

Pour l'Europe, réduire sa dépendance énergétique est une nécessité impérieuse. Elle doit investir dans les domaines énergétiques disponibles sur son sol, c'est-à-dire le nucléaire, le charbon certainement mais avec moins de pollution et le solaire. Elle est également en mesure de jouer la carte de l'accélération des économies d'énergie. Une tonne d'acier demande 3 fois plus d'énergie en Russie qu'en France ou en Allemagne mais dans le domaine du chauffage, 15 à 20% de la facture s'échappe encore par les toitures non isolées. Dans un avenir même lointain, aucun scénario ne fait allusion à une source unique d'énergie et aucune ne s'impose comme une panacée. Il y aura, pour longtemps encore, une cohabitation du pétrole, du gaz, de la fission, de la fusion et de l'hydrogène mais aussi des énergies renouvelables.

Pour les armées, les recherches sur les énergies alternatives ne sont pas en mesure d'apporter des parades immédiates à une pénurie sévère de produits pétroliers. Ces recherches, cantonnées surtout dans le domaine civil, ont cependant le mérite d'exister, de concerner tous les compartiments de l'énergie et tous les continents. Des réalisations pratiques sont en cours de test et intéressent tous les grands milieux consommateurs : domestique, industriel, transports et applications spécifiques militaires. Elles préparent la voie de la grande diffusion et elles attendent le franchissement du seuil de viabilité avec un prix du baril se stabilisant durablement au-dessus de 80\$, d'après les spécialistes.

Il faudra vraisemblablement attendre quatre ou cinq décennies avant de connaître une civilisation de l'hydrogène, une énergie plus propre, abondante mais peut-être pas moins chère. Pendant cette phase de transition, les produits pétroliers proviendront encore des combustibles

fossiles y compris du charbon encore très abondant. Deux quasi certitudes dans ce domaine : l'énergie est devenue, si elle ne l'était déjà, une arme stratégique pour qui la possède. Après le Moyen-Orient, la Russie vient d'en faire la démonstration à l'Ukraine, voire à l'Europe. Avec la demande asiatique et la raréfaction grandissante des ressources naturelles, il est à craindre que l'ère de l'énergie bon marché soit définitivement révolue.

Les opinions exprimées ici n'engagent que la responsabilité de leur auteur