

La fuite en avant technologique :

l'exemple de l'hydrogène

Benjamin Dessus
Président du Club « Énergie prospective et débats »
du Commissariat Général au Plan

Parmi « les ruptures technologiques » régulièrement évoquées pour résoudre définitivement la crise énergétique et environnementale que devra affronter à moyen terme l'humanité (du type fusion nucléaire, satellites solaires, stockage massif du gaz carbonique au fond des océans, géothermie profonde des roches sèches, ensemencement à grande échelle de l'océan de sels minéraux pour accélérer la croissance du plancton et piéger ainsi le CO₂, etc.), l'hydrogène est actuellement bien placé. Depuis quelques années, ses défenseurs mettent au service de leur cause la synergie profonde qui existerait entre le développement de ce vecteur énergétique, la pile à combustible et les énergies renouvelables. C'est pourquoi, à titre d'exemple, nous avons choisi d'examiner de plus près les conséquences que pourrait avoir une telle rupture technologique sur le développement des énergies renouvelables et plus généralement sur le développement durable.

Global Chance

En cette fin d'année 2001, l'hydrogène revient sur le devant de la scène. Ce n'est d'ailleurs pas la première fois, mais si l'on en reparle avec tant d'insistance, c'est sûrement parce qu'il s'est passé quelque chose de nouveau, une découverte inattendue, une rupture technologique, un nouveau concept ? Pourquoi, sinon le Commissariat au Plan et la Direction Générale de l'énergie et des matières premières du Secrétariat d'Etat à l'Industrie y auraient-ils consacré un séminaire le 28 novembre dernier et le Commissariat à l'Énergie Atomique une journée complète de colloque avec la présence de personnalités aussi prestigieuses que le ministre de la recherche, le secrétaire d'état à l'industrie français et le commissaire européen à la recherche ?

Tout simplement, semble-t-il, parce que l'hydrogène, associé ou non aux EnR, combine toutes les vertus : quoi de plus propre que ce gaz qui, quand on le fait brûler produit de l'eau comme déchet ?

Quoi de plus abondant et de plus naturel, puisque l'hydrogène est partout dans la nature, et qu'il « suffit » de le séparer de l'oxygène de l'eau ou du carbone des matières orga-

niques pour en disposer à satiété, pour refaire de l'eau en le brûlant, voire même pour servir de combustible à la fusion nucléaire contrôlée ?

Quoi de plus utile au développement des énergies renouvelables, bien handicapées par leur flux aléatoire et intermittent, puisque l'hydrogène permet de les « stocker » pour enfin déconnecter production et consommation d'énergie.

Quoi de plus séduisant enfin que la pile à combustible qui fonctionne à l'hydrogène avec un bon rendement à toutes les allures et pour toutes les puissances, qui ne fait pas de bruit, ne pollue pas et permet de faire tourner nos voitures et chauffer nos maisons en même temps qu'alimenter leurs appareils ménagers ?

C'est avec l'ensemble de ces préjugés favorables que sont bien souvent analysés les différents éléments du puzzle que constitue une telle filière, en rupture avec les filières traditionnelles. Et tout le monde ou presque de s'enthousiasmer, parfois avec quelques arrière-pensées financières, pour cette sortie de crise énergétique et environnementale par la haute technologie.

Quant à ceux qui émettent parfois quelques réserves sur de

tels enthousiasmes d'ingénieur, ce sont sans aucun doute des attardés qui ont peur du progrès comme nos arrière grands parents avaient peur du train ! Est-il permis, cependant, de prendre le risque d'y regarder d'un peu plus près, et d'essayer de faire la part des choses ?

L'hydrogène

Comme l'électricité c'est un vecteur énergétique et pas une ressource énergétique : on ne trouve pas dans la nature de gisements d'hydrogène directement utilisable, comme on trouve du charbon, du bois, du pétrole ou du gaz naturel.

Sa fabrication

Il faut donc le fabriquer à partir d'une matière première qui en contient. Il existe deux sources principales :

- L'eau (H_2O), dont la décomposition en hydrogène et oxygène peut s'obtenir en pratique soit par électrolyse soit par réaction thermochimique à haute température ($> 800\text{ }^\circ\text{C}$) ; on notera au passage que le « *cracking* » cassant la molécule d'eau n'intervient que vers $2500\text{ }^\circ\text{C}$, ce qui rend bien peu probable son utilisation pratique en matière énergétique.
- Les hydrocarbures et la biomasse ; il faut séparer par voie chimique l'hydrogène qui est lié au carbone et souvent à l'oxygène dans ces molécules plus complexes mais généralement moins stables que l'eau. C'est le « reformage ».

Dans tous les cas, il faut dépenser de l'énergie pour produire et isoler l'hydrogène. Toutes les sources, y compris le char-

bon, peuvent être candidates. Les deux sources d'hydrogène sont accessibles aux énergies renouvelables : l'électrolyse de l'eau si on utilise de l'électricité renouvelable, par exemple de l'électricité hydraulique ou éolienne et le reformage si l'on utilise de la biomasse.

Quelle que soit la matière première utilisée (eau, hydrocarbure fossile ou biomasse) et quelle que soit la filière d'extraction retenue (chimique ou électrique) cette opération ne se fait pas sans coût énergétique (le rendement de l'opération) sans coût écologique (les émissions et rejets de l'ensemble des opérations), ni sans coût économique (investissement et fonctionnement des machines pour extraire l'hydrogène de la matière première).

Coûts énergétiques, écologiques et économiques de la fabrication de l'hydrogène

Dans les meilleures conditions technico-économiques actuelles (pression, température et densité de courant élevées) l'électrolyse de l'eau produit de l'hydrogène avec un rendement de l'ordre de 50 à 55%. Les cycles thermochimiques fonctionnant à haute température pourraient atteindre 40% de rendement. Le reformage des hydrocarbures produit de l'hydrogène avec des rendements de 70% à 80 % selon la taille et la sophistication des installations.

Du point de vue écologique, l'électricité nécessaire à l'électrolyse provoque des émissions

de gaz à effet de serre si elle est d'origine fossile, des déchets nucléaires si elle est d'origine nucléaire. L'électricité renouvelable échappe à ces critiques de pollution mais peut aussi engendrer des problèmes environnementaux divers.

Quant à la transformation des matières premières fossiles et de la biomasse pour en extraire l'hydrogène elle consomme de l'énergie thermique et conduit dans la plupart des cas à des émissions significatives de gaz à effet de serre (sauf si on utilise aussi de la biomasse pour fournir l'énergie thermique nécessaire).

Du point de vue économique, la fabrication de l'hydrogène par électrolyse entraîne aujourd'hui des surcoûts importants par rapport à la production d'un carburant traditionnel. EDF a calculé un coût à la tep de l'ordre de 1500 à 1700 Euros pour l'hydrogène électrolytique fabriqué avec de l'électricité nucléaire d'heures creuses, 10 fois environ le coût d'un carburant pétrolier sortie de raffinerie. Même avec un rendement potentiel de pile à combustible deux fois supérieur à celui des moteurs thermiques, il manque encore un facteur 5 environ pour atteindre la compétitivité.

Le reformage des hydrocarbures, en pratique aujourd'hui le CH_4 qui constitue le gaz naturel, est plus abordable et produit de l'hydrogène à des coûts de l'ordre de 500 à 600 Euros la tep, mais produit du CO_2 , gaz à effet de serre. La transformation de la biomasse permettrait d'échapper à cette

fatalité, à condition que l'énergie nécessaire au reformage soit également renouvelable, mais à des coûts actuellement nettement plus élevés que pour le reformage du CH₄.

Transport et stockage

Le transport de l'hydrogène par gazoducs ne pose pas de problèmes insurmontables : il est déjà réalisé pour les applications chimiques de l'hydrogène. Des précautions spéciales, notamment le choix des aciers spéciaux que l'hydrogène fragilise, doivent être prises. Avec quelques précautions supplémentaires on envisage d'utiliser les gazoducs à gaz naturel pour effectuer son transport (soit dans un premier temps en mélange avec le gaz naturel, soit pur à plus long terme).

Son stockage massif peut s'envisager dans des cavités salines ou des aquifères comme pour le gaz naturel au prix d'un surcoût actuellement estimé à 150 à 170 Euros par tep.

On peut également envisager de le stocker sous pression ou sous forme liquide. C'est d'autant plus nécessaire que la densité énergétique de l'hydrogène est modeste par rapport à ses concurrents : à volume égal, sous forme gazeuse, il a une capacité calorifique trois fois inférieure à celle du gaz naturel, et à l'état liquide (la liquéfaction se produit à -253 degrés et consomme de 30 à 50% de l'énergie contenue dans l'hydrogène) il a une capacité calorifique 4 fois inférieure à celle de l'essence. La meilleure solution actuelle est de le comprimer à des pressions d'au

moins 300 bars (on envisage 700 bars). C'est pourquoi la recherche s'oriente vers l'emploi de matériaux de stockage (carbones hydrurés, hydrures métalliques) qui permettraient de réduire de telles pressions de stockage qui posent à la fois des problèmes de sécurité et de dépenses énergétiques (la mise en pression).

Le transport et le stockage de l'hydrogène sous forme décentralisée, posent encore de nombreux problèmes technologiques et entraînent des dépenses énergétiques significatives qui viennent grever les coûts globaux de la filière.

L'usage final de l'hydrogène

C'est là que les principaux avantages de l'utilisation de l'hydrogène apparaissent. Il peut en effet être utilisé comme carburant en substitution aux carburants traditionnels dans un moteur thermique, ou actionner une pile à combustible. Dans les deux cas, il ne produit en principe comme rejet à l'utilisation que de la vapeur d'eau. Il faut toutefois noter que la flamme d'hydrogène a une température nettement plus élevée que celle des hydrocarbures et que sa combustion produit spontanément davantage d'oxydes d'azote NOx.

Les perspectives les plus intéressantes sont celles de l'usage des piles à combustible de différentes technologies qui présentent toutes des rendements bien meilleurs que les moteurs thermiques classiques.

Les piles à combustible

Il en existe plusieurs types, qui ont en commun :

- De présenter de bons rendements de production d'électricité (de 40 à 60% selon les technologies) dans une gamme de puissance de quelques dizaines de Watts à plusieurs centaines de kW et ce avec une sensibilité réduite au régime qu'on leur impose.
- De ne présenter aucune partie tournante et donc d'être très silencieuses (auxiliaires mis à part).
- De ne pas polluer localement, sauf si la préparation sur place du combustible (hydrogène via reformage par exemple) produit elle-même des polluants.

Enfin leur rendement global peut être fortement amélioré par l'utilisation locale de la chaleur qu'elles produisent en même temps que l'électricité. Ces différentes caractéristiques expliquent largement l'intérêt que suscitent ces nouveaux transformateurs d'énergie. Mais pour passer du rêve à la réalité, il faut s'assurer que l'ensemble de la chaîne énergétique, depuis la ressource primaire jusqu'au service rendu, a des chances de cumuler des avantages énergétiques et/ou environnementaux et économiques sur ses concurrents traditionnels ; il faut aussi avoir à l'esprit que le progrès technique s'applique, non seulement aux nouvelles filières, mais aussi aux filières plus traditionnelles qui ne cessent pas de faire des progrès. Enfin, il faut garder à l'esprit que la liaison « pile à combustible - éco-

nomie de l'hydrogène» présentée souvent comme allant de soi n'a rien d'inéluctable puisque les piles à combustibles peuvent utiliser comme carburant, plus ou moins directement selon les technologies, le gaz naturel, les biogaz, le méthanol, ou des carburants pétroliers divers.

Donnons en un exemple, celui des transports automobiles avec une comparaison des performances des diverses motorisations envisageables pour les automobiles en usage routier. (Tableau 1).

On voit par exemple immédiatement que, malgré les performances qu'on peut espérer au niveau de la pile, il faut atteindre des performances très élevées de rendement de raffinage et reformage du carburant en amont de la pile, de l'ordre de 70 à 75%, ce qui n'est pas acquis aujourd'hui, pour égaler ou dépasser la filière hybride essence. On voit aussi que la filière hydrogène électrolytique est très handicapée par son rendement global.

Mais surtout, au-delà des fourchettes de chiffres présentés qui peuvent évoluer selon les filières avec des percées techniques, ce tableau a pour fonction de montrer l'importance qu'il y a à envisager l'ensemble de la filière pour juger de ses performances.

Et les énergies renouvelables dans tout cela ?

La rapide analyse précédente nous engage à nuancer fortement le ton quelque peu « Perrette et le pot au lait » du discours des tenants inconditionnels de l'hydrogène associé aux piles à combustible. On se rend bien compte que, pour l'un comme pour l'autre, les perspectives de développement doivent être replacées dans un ensemble plus vaste, en tenant compte d'autres technologies émergentes, du développement des technologies traditionnelles et en intégrant dans l'analyse l'ensemble des filières jusqu'à l'énergie utile. Quand

on s'astreint à cette discipline, on constate que la pile à combustible présente des perspectives intéressantes dans des niches de marché spécifiques souvent liées aux préoccupations d'environnement local (en particulier urbain), mais se trouve en concurrence à la fois avec des technologies émergentes (véhicule hybride et micro-turbines à gaz par exemple dans les transports et l'habitat) et parfois plus traditionnelles (comme le diesel « *common rail* » par ex.), ou moins médiatiques comme les moteurs Stirling dont on continue de parler, sans que des avantages clairs puissent se dégager au niveau de l'environnement global, du bilan énergétique et du bilan économique par rapport à ces autres solutions.

C'est tout au moins le cas quand les ressources primaires utilisées sont des ressources fissiles ou fossiles. Les perspectives de développement massif du vecteur

Tableau 1 : Rendement global des différentes filières de propulsion automobile

Filière	Rendement de la filière carburant ou électricité	Rendement du groupe moteur	Rendement total
Essence injection (normes 2005)	0,81	0,25	0,2
Diesel common rail (normes 2005)	0,84	30 à 35%	25 à 29%
PAC à hydrogène électrolytique	18 à 20%	0,55	10 à 11%
PAC à gaz naturel ou à pétrole	60 à 75%	50 à 55%	32 à 41%
Hybride série essence (normes 2005)	0,81	38 à 45%	31 à 36%
Véhicule électrique (électricité de centrale à gaz à cycle combiné)	52 à 56%	70 à 75% (1)	36 à 42%

(1) compte tenu du rendement de charge et décharge des batteries.

Note. La première colonne décrit le rendement d'obtention du carburant utilisé par le moteur de la voiture (raffinage, reformage, etc.) pour des normes d'environnement données (ici les normes européennes 2005). La deuxième décrit le rendement du groupe motopropulseur lui-même pour chacune des filières. La dernière présente la résultante de ces deux rendements.

hydrogène sont au moins aussi nuancées.

Est-ce que cette situation risque d'être bouleversée par l'introduction des renouvelables sous leurs différentes formes ? Ou réciproquement l'hydrogène et ou la pile à combustible présentent-ils une opportunité unique pour le développement des énergies renouvelables ?

Il est vrai que, tout au moins en principe, l'hydrogène et les piles à combustible libèrent les énergies renouvelables de trois de leurs contraintes majeures : leur faible concentration géographique, leur caractère irrégulier, la difficulté de leur stockage, sans provoquer d'émissions de gaz à effet de serre supplémentaires ni de pollution locale.

Examinons ces différents points pour les diverses filières renouvelables.

Filières d'électricité primaire (hydraulique, éolien, photovoltaïque)

Il est bien vrai qu'à travers le transport d'électricité primaire renouvelable décentralisée, l'électrolyse industrielle et le stockage de l'hydrogène dans des cavités ou dans des aquifères, on peut s'affranchir des problèmes de fluctuation et de faible densité géographique de la ressource puisqu'on peut concentrer et stocker ainsi de l'énergie dans des conditions assez analogues à celles du gaz naturel.

Mais cela suppose un transport d'électricité loin de son lieu de captation vers quelques sites de stockage à

partir des quels il faudra redistribuer l'hydrogène vers les lieux de consommation, ce qui risque d'entraîner des coûts économiques et des pertes significatifs.

Mais surtout on a vu plus haut que même avec une production déjà centralisée et régulière d'électricité très bon marché nucléaire ou hydraulique d'heures creuses, le coût de l'hydrogène produit reste encore d'un ordre de grandeur trop élevé. Ce surcoût risque d'être renforcé si l'on met en œuvre des énergies plus diluées et plus fluctuantes comme l'éolien. Quant au photovoltaïque l'ordre de grandeur de son coût actuel et prévisible dans les deux décennies qui viennent (40 à 45 centimes d'Euro par kWh aujourd'hui et potentiellement 0,15 centimes en 2020) l'exclut pratiquement de la compétition. Dans l'ensemble de ces cas c'est donc le coût de l'opération de passage au vecteur hydrogène qui risque de maintenir pour longtemps cette solution dans la confidentialité.

Filières biomasse

On peut aussi envisager de fabriquer l'hydrogène à partir de la biomasse en passant par des techniques de pyrolyse, de gazéification ou divers procédés biologiques utilisant plus ou moins directement l'énergie solaire. Le CO₂ émis pendant ces opérations étant réabsorbé au cours du renouvellement de la biomasse utilisée n'a plus à être pris en compte, au

moins au premier ordre. Mais dans ce cas l'aspect stockage et densification énergétique devient moins important dans la mesure où le bois par exemple présente à la fois une densité énergétique non négligeable de l'ordre de 0,3 tep par m³ de bois sec, bien supérieure à celle de l'hydrogène. L'intérêt principal est alors de disposer d'un carburant ou d'un combustible plus faciles à utiliser dans certaines applications, par exemple les automobiles. Mais c'est alors aux carburants issus de la biomasse (alcools, huiles végétales, méthanol, etc.) et à leur utilisation purs ou en mélange dans des moteurs traditionnels ou dans des hybrides qu'il faut comparer la solution hydrogène et pile à combustible.

Si l'on admet dans les deux cas que l'hypothèque du CO₂ est levée, ce sont les considérations économiques qui risquent de discriminer les solutions envisageables, dans des conditions très analogues à ce que nous avons exposé pour les filières fossiles.

A l'issue de cette rapide discussion, on peut donc raisonnablement dire que si les filières hydrogène associées aux piles à combustible présentent des synergies manifestement positives vis-à-vis des renouvelables, elles ne peuvent pas se présenter comme des éléments déterminants de leur pénétration, non plus d'ailleurs que les énergies renouvelables ne représentent une chance

unique pour l'hydrogène et les photopiles. Cela est d'autant plus vrai que l'addition des difficultés inhérentes au développement de technologies non matures à la fois pour les renouvelables, les piles à combustible et l'hydrogène ont toutes chances de se traduire par des surcoûts importants dans toute la période de transition.

En guise de conclusion

Le tour d'horizon que nous avons tenté de faire sur les bilans énergétiques, écologiques et économiques actuels et prospectifs des différentes filières hydrogène et piles à combustibles ne prétend pas à l'exhaustivité ni à une grande précision. Il peut être également remis en cause par des percées technologiques inattendues.

Il n'en reste pas moins que dans l'état actuel de nos connaissances sur l'évolution probable des caractéristiques techniques et économiques des différentes composantes des filières envisagées, il ne se dégage pas d'avantage assez significatif dans aucun des domaines cités (ressources énergétiques, environnement global, économie) pour justifier un

discours résolument optimiste sur l'émergence d'une « Civilisation de l'hydrogène adossée sur l'emploi des ressources renouvelables », capable de résoudre à la fois les problèmes de ressources énergétiques et d'environnement global (effet de serre en particulier) dans des conditions économiques particulièrement favorables à moyen terme (une vingtaine d'années).

Il n'en demeure pas moins que la pile à combustible présente des avantages probablement irremplaçables sur le plan de la pollution locale, en particulier en milieu urbain, avantages qui devraient lui ouvrir des niches importantes de marché.

Cela devrait se voir notamment dans le domaine des transports collectifs urbains, enjeu complexe et soumis à de nombreuses autres influences, en gardant à l'esprit les espoirs parallèles fondés sur les autres modes de stockage d'énergie (en particulier les accumulateurs d'électricité).