

## L'hydrogène, PAC'te pour l'avenir! <sup>1</sup>

par Jérôme Moizard

Boudé, décrié, condamné dans les années 2000, l'hydrogène en tant que vecteur énergétique s'est imposé aujourd'hui en 2050 comme le substitut incontesté aux énergies fossiles post peak-oil... Retour sur un destin jonché d'embûches...

### Des balbutiements aux levées des verrous technologiques...

A l'instar des propos tenus par Bill GATES en 1981 : « 640 kB ought to be enough for anyone », il semble qu'Anthony PERL, alors professeur à HARVARD, se soit fourvoyé lorsqu'en 2010 il déclarait « Hydrogen has no future as a fuel substitute ». Et pour cause, bien malin qui aurait pu prédire cet essor fulgurant, tant la conjoncture était mauvaise à l'époque. Les enjeux culminaient à la hauteur des risques encourus : approche imminente et inéluctable du peak-oil<sup>2</sup>, bilan alarmant du GIEC<sup>3</sup> en 2001, prévision de croissance drastique de la consommation d'énergie primaire parallèlement à l'épuisement des réserves ultimes... Comment, dans ces conditions, approvisionner la demande énergétique mondiale dans un souci constant de développement durable ?

C'est bel et bien la pile à combustible qui apporta historiquement les premiers éléments de réponse. Au rythme des chocs pétroliers successifs, les enveloppes budgétaires sont venues doper les programmes de recherche pour finalement parvenir à lever les verrous technologiques entravant son développement.

Cet élan fut originellement insufflé par le secteur des transports qui se retrouvait en effet au cœur de la tourmente : il représentait 30% de la consommation énergétique globale sachant que 97% de l'énergie primaire qui y était consommée provenait de ces ressources fossiles, contribuant ainsi à en faire un pôle important d'émissions de Gaz à Effet de Serre (GES).

Deux avancées majeures furent salutaires pour l'avènement de l'hydrogène : s'émanciper d'abord de l'utilisation du platine dans sa production<sup>4</sup>, et parvenir à le stocker de manière acceptable socialement et techniquement. Cette dernière prouesse fut permise grâce aux propriétés des nanomatériaux capables de stocker le dihydrogène dans des structures (figure 1) tout en respectant les multiples critères de performance dictés par le DOE<sup>5</sup>.

Grâce à l'atteinte de cette haute densité énergétique couplée à l'innocuité de cette forme de stockage, l'hydrogène supplanta définitivement le pétrole dont l'hégémonie était remise en cause.

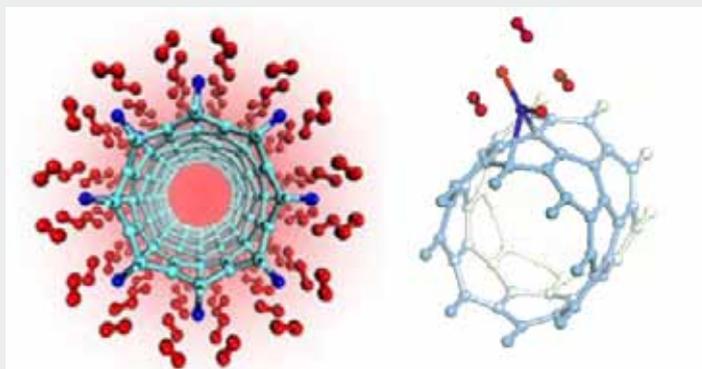


Figure 1 : Selon un modèle informatique et des calculs quantiques, chaque atome de titane (en bleu foncé) centré sur la structure des nanotubes de carbone (en bleu ciel), peut se lier avec quatre molécules de H<sub>2</sub> (en rouge).

Source : NIST (National Institute of Standards and Technology)

### ...vers l'émergence de champs d'application insoupçonnés.

Comme le soulignait en son temps l'astrophysicien Hubert REEVES: « Pour explorer le champ des possibles, le bricolage est la méthode la plus efficace ». C'est en effet au gré d'améliorations incrémentales que, de proche en proche, la filière hydrogène a pleinement contribué à la refonte du paysage énergétique mondial.

Et c'est paradoxalement l'industrie pétrolière qui lui donna un second souffle. En effet, dès les premiers signes avant-coureurs du peak-oil, l'International Oil Company (IOC) TOTAL créa avec AREVA un Groupement d'Intérêts Economiques (GIE) visant à produire massivement de l'hydrogène sur le site même des champs pétrolifères pour exploiter des puits devenus rentables grâce à l'hydrogénation<sup>6</sup>. Fort de ce cumul d'expérience, AREVA parvint à mettre sur pied, d'abord en France puis dans le monde entier, un véritable parc de production d'hydrogène dont les usines étaient jumelées aux centrales nucléaires. La chaleur des réacteurs permet en effet d'obtenir d'excellents rendements de production par électrolyse de l'eau à haute température. Cette synergie entre le nucléaire et la filière hydrogène adoucit les mœurs, d'autant plus que les générations III et IV fonctionnent maintenant de concert, les déchets HAVL<sup>7</sup> des EPR<sup>8</sup> sont incinérés dans le cœur des RNR<sup>9</sup> qui produisent à leur tour du combustible pour les EPR.

L'autre impact providentiel de l'avènement de la filière hydrogène fait écho à la nécessité impérieuse de produire l'électricité sans aggraver le dérèglement climatique. Les énergies renouvelables intermittentes y trouvent ainsi un moyen de stocker leur énergie pour la distribuer lors des pics de charge grâce à des PAC de forte puissance. Bon nombre de pays de l'OCDE<sup>10</sup> ont donc pu troquer leurs centrales thermiques classiques obsolètes contre des générateurs dits « propres », annihilant ainsi leurs émissions de GES. L'implémentation de ce nouveau système électrique est d'autant plus facilitée pour les Gestionnaires de Réseau de Transport (GRT) qu'ils ne doivent plus faire face aux conséquences néfastes de la production décentralisée puisqu'ils sollicitent la PAC en fonction de la demande. Cela évite l'écueil des creux de tensions et l'absorption ou l'injection de puissance réactive et d'harmoniques sur le réseau.

### Des limites qui s'estompent sans pour autant disparaître.

Si aujourd'hui dans les pays de l'OCDE et les Nouveaux Pays Industrialisés (NPI), la filière hydrogène entretient l'espoir d'une énergie meilleure qui placerait enfin l'homme en symbiose avec son écosystème, la situation s'annonce sous des auspices bien différents dans d'autres endroits du monde. Le leitmotiv

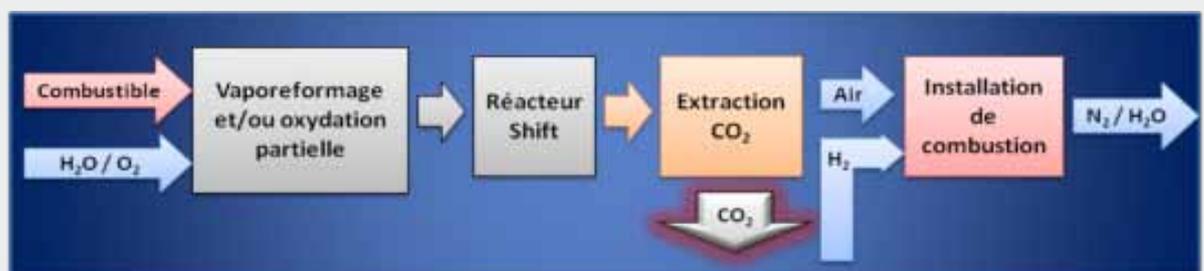


Figure 2 : Le gaz de synthèse issu du charbon est un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Le CO présent dans le mélange réagit avec l'eau au cours de l'étape de shift-conversion pour former du CO<sub>2</sub> et de l'hydrogène. Le CO<sub>2</sub> est alors séparé de l'hydrogène, lequel peut être utilisé pour produire de l'énergie (électricité ou chaleur) sans émission de CO<sub>2</sub>.

Source : IFP dans le cadre du Projet européen CASTOR (CO<sub>2</sub> from CApture to STORage)



du développement durable est aux antipodes des exigences de croissance et retour sur investissements rapides pratiquées par les Nouveaux Pays en Voie de Développement (NPVD). Ceux-ci exploitent à outrance le charbon dans leur industrie, facile d'accès et rentable, mais fortement émetteur de GES.

Cependant l'hydrogène pourrait, ici encore, incarner une voie de recours. La Chine s'est évertuée depuis 2035 à implémenter sur 100 de ses centrales au charbon un procédé de captage du CO<sub>2</sub> particulier: le captage précombustion. Il consiste à convertir le charbon en un gaz de synthèse duquel on va extraire le CO<sub>2</sub> et récupérer du dihydrogène pour produire de l'énergie (figure 2). Les yeux se tournent à présent vers Johannesburg qui accueillera en 2051 la 57<sup>e</sup> Conférence Mondiale sur le Climat dont la principale attente réside dans la généralisation de ce procédé de captage innovant à tous les NPVD.

S'il est encore indéniable aujourd'hui que l'avenir de la planète demeure en porte-à-faux, les améliorations notoires apportées depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle par le développement de la filière hydrogène laissent cependant filtrer une lueur d'optimisme. Les ressources de la planète étant en effet certes limitées; il y aura toujours des hommes aux ressources, elles inépuisables, pour imaginer et mener des projets d'envergure qui feront que l'utopie d'aujourd'hui sera la réalité de demain.

#### NOTES

- (1) Acronyme de la Pile A Combustible dont le principe est de produire de l'électricité par oxydation d'hydrogène et réduction simultanée d'oxygène avec pour seuls sous-produits de l'eau et de la chaleur.
- (2) Les plus pessimistes de l'ASPO (Association for the Study of Peak Oil) annonçaient le peak-oil avant 2030.
- (3) Groupe d'Experts Internationaux sur l'Evolution du Climat.
- (4) Le platine a été remplacé par le nickel, bien plus abondant, qu'utilisent les micro-organismes dans leurs systèmes enzymatiques pour produire leur énergie à base d'hydrogène.
- (5) Le Department Of Energy imposait des critères de compacité volumique et massique pour viabiliser la PAC.
- (6) Les pétroles non-conventionnels (schistes bitumineux...) sont rendus exploitables par hydrogénation.
- (7) Le volume de déchets à Haute Activité et Vie Longue est divisé par 100 grâce à la génération IV.
- (8) European Pressurized Reactor: évolution de la génération II avec des performances accrues (rendement, sûreté...)



- (9) Réacteur à Neutrons Rapides: génération IV pouvant recycler les déchets des EPR.
- (10) Organisation de Coopération et de Développement Economique dont dépend l'Agence Internationale pour l'Energie.

**SOURCES ET INSPIRATIONS :**

**PUBLICATIONS :**

- « L'île Mystérieuse », Jules VERNE, 1875.
- « Piles à combustibles », P. STEVENS, Techniques de l'Ingénieur, Génie électrique, D 3 340, 2000.
- « La filière hydrogène », Les clefs CEA n° 50-51, 2004.
- « La Ciencia inesperada », Cienciateca, Pedro Gómez Romero, investigador y divulgador científico del CSIC, 2006.
- « La Pile à Combustible : structure, fonctionnement, applications », Meziane BOUDELLAL, Publications de l'ADEME, Editions DUNOD, 2007.
- « Lost Generation », Poem by Jonathan REED, 2007.
- « Le stockage pré-combustion », Science & Vie n° 1074, page 57, mars 2007.
- « Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 », Centre d'analyse stratégique, Rapport de la commission énergie, 2008.
- « Stockage d'hydrogène : comment l'hydrogène se lie aux nanocornets de carbone », F.J. BERMEJO, Techniques de l'ingénieur, Nano-technologies, NM5150, 2008.
- « Enjeux de l'énergie, de la géopolitique au citoyen », E. IACONA, J. TAINÉ, B. TAMAIN, éditions DUNOD 2009.
- « S'affranchir du platine dans la production et l'utilisation de l'hydrogène », Département Bio-énergies du CEA, novembre 2009.
- « Precious metals that could save the planet », The Independant, 2 janvier 2010.
- « La compétition pour les minerais rares est une source de conflits majeurs », Le Monde, Friedbert Pflüger, Professeur honoraire en politique internationale au King's College de Londres et conseiller chez Roland Berger Strategy Consultants, 4 novembre 2010.
- « World Energy Outlook », International Energy Agency, 17 novembre 2010.
- Les Echos, Supplément "Spécial Développement Durable", mercredi 1er décembre 2010.

**SITES INTERNET :**

- [www.ifpenergiesnouvelles.fr](http://www.ifpenergiesnouvelles.fr)
- Site du DOE : [www.energy.gov](http://www.energy.gov)
- Site de l'International Energy Agency : [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Site de British Petroleum : Statistical Review of World Energy : [www.bp.com](http://www.bp.com)
- Site du GIEC, rapport de synthèse des changements climatiques : [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
- Site du BRGM, Captage et Stockage du CO2 : [www.brgm.fr/brgm/CO2/default.htm](http://www.brgm.fr/brgm/CO2/default.htm)

**CONFÉRENCES :**

- « Vers un nucléaire durable : les systèmes du futur », conférence de Christophe BEHAR, directeur de l'énergie nucléaire du CEA, 21 septembre 2010.
- « Bienvenue dans le nano-monde », Conférence-Débat du festival du Film Scientifique PARISCIENCES, Pascale Chenevier, chercheuse en électronique moléculaire au CEA, 8 octobre 2010.
- Conférence d'honneur de l'Energy Day 2010, « L'avenir de la distribution d'électricité », Michèle BELLON président du directoire d'ERDF, 5 novembre 2010.
- Conférence-Débat « Les scénarios globaux de l'énergie à l'horizon 2020, l'émergence des conditions d'une énergie alternative », Jérôme C. GLENN, directeur du Projet Millenium, 9 novembre 2010.
- Table Ronde « L'énergie et ses enjeux : des ruptures scientifiques et techniques sont-elles possibles ? », Pierre PAPON, physicien et professeur émérite à l'ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle), 17 novembre à la Cité des Sciences et de l'Industrie de PARIS.

**VISITES :**

- Au premier semestre 2010, visite du laboratoire de l'université NTU de Singapour travaillant sur la Pile à Combustible. Depuis août 2010, les bus de ville de Singapour roulent grâce à la technologie de la Pile à Combustible.
- En août 2010, visite du laboratoire CNRS au four solaire d'Odeillo (Pyrénées Orientales) travaillant sur les nanomatériaux.
- En septembre 2010, visite du centre PSA – Peugeot Citroën à la Garenne Colombe travaillant, entre autres, sur la Pile à Combustible.