

corrélée à la disponibilité d'électricité sur le système électrique ; elle atteindrait sa capacité maximale pendant les creux de consommation et serait réduite à son minimum pendant les pointes de consommation. La production d'hydrogène serait alors le consommateur flexible utilisé pour adapter la demande d'électricité à la production.

L'hydrogène comparé aux carburants fossiles a un énorme avantage. En effet sa densité massique énergétique 35,7 kwh/kg est près de trois fois celle de l'essence, par contre sa densité volumique 600 kwh/m³ à 200 bar est faible, moins de 6 % de celle de l'essence ou le tiers de celle du gaz naturel ! L'hydrogène est un gaz qui ne peut être stocké que sous forme gazeuse sous pression à 350 ou 700 bar ou sous forme liquide à très basse température -253°C. D'autres formes de stockage solide sont en phase avancée de prototypage par fixation chimique sur des hydrures métalliques à basse pression.

L'utilisation de l'hydrogène peut se faire principalement sous deux formes : par combustion interne dans un moteur, mais le rendement est très défavorable, ou dans une pile à combustible générant de l'électricité, évitant ainsi le cycle de Carnot, on obtient alors un rendement global (hydrolyse et génération d'électricité) de près de 35%. Il peut aussi être utilisé pour convertir du CO₂ (qui est abondant ...) en gaz (Power to Gas), produits chimiques – méthanol MeOH (projet VITESSE2) - ou carburants liquides (Power to Liquid), car il y a des domaines où ces derniers seront essentiels pendant longtemps : aviation, transports lourds, ... La pile à combustible ou PAC (FuelCells - FC) semble être la voie la plus prometteuse. Son origine est ancienne, le premier prototype remonte à 1953, mais le coût des matériaux, par exemple le platine, et celui de l'hydrogène comparé aux autres sources d'énergies électriques a freiné son développement. Elle est adaptable à un grand nombre d'applications aussi bien pour du nomade (recharges de lampe de poche, de téléphone, d'ordinateur) que pour du stationnaire (projet MYRTE : génération d'électricité et de chaleur pour des sites isolés – refuges, îles ; projet THEMIS : alimentation pour relais de télécoms ou TV) ou pour de la mobilité (vélos, voitures, bus, véhicules utilitaires, chariots élévateurs). Beaucoup de ces applications ont déjà dépassé le stade de prototype pour maintenant être vendues et accessibles au grand public. La commission européenne coordonne un partenariat public/privé ayant pour objectifs de diviser le coût des PAC destinées au transport par un facteur 10, améliorer leur rendement de 10% et démontrer la faisabilité de production d'hydrogène à grande échelle à partir d'ENR. Il s'agit du FCH 2 JU (Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking) ayant démarré en juin¹ avec un budget de 1,3 milliard d'euros. De gros progrès ont déjà été réalisés : les PAC récentes utilisent moins de platine qu'un pot catalytique et des développements récents permettent même de s'en passer. De plus l'hydrogène produite par hydrolyse est à un coût marginal grâce aux surplus d'électricité générés par les renouvelables ou le nucléaire.

Concentrons-nous sur un cas important d'utilisation : la mobilité, en particulier sur l'utilisation de la PAC à basse température (PEM Proton Exchange Membrane-pile à membrane d'échange de protons). Cette dernière peut équiper tout véhicule électrique dans tous les domaines du transport : terrestre, fluvial, maritime (par exemple, la marine allemande a équipé ainsi certains de ses sous-marins), ... En ce qui concerne le transport terrestre on peut distinguer deux principaux types d'usage : les véhicules utilitaires de livraison urbaine ou périurbaine et les véhicules particuliers. Il y a aussi des appli-

cations de niches qui se développent comme les engins de manutention. Dans ce domaine on peut citer le « Don Quichote project » avec des chariots élévateurs chez Colruyt en Belgique, aussi le fait que chez IKEA près de Lyon 20 chariots élévateurs à PAC sont prévus d'ici fin 2014, sans oublier que près de 4 000 chariots à PAC fonctionnent déjà aux États-Unis.

Pour des véhicules la PAC présente des avantages par rapport à l'électricité fournie par batterie tel le temps de recharge (de l'ordre de 5mn), ou le fait qu'elle chauffe : en hiver au lieu d'utiliser l'électricité pour le chauffage et le désembuage ce qui diminue le rayon d'action, on récupère la chaleur dégagée par la PAC. Bien entendu, l'avantage n°1 est son rayon d'action, de l'ordre de 500 km. Tout ceci est obtenu avec un stockage moins volumineux et moins lourd que des batteries qui ont d'ailleurs une durée de vie limitée. La PAC peut être aussi utilisée en hybridation d'un véhicule électrique (VE) - remplaçant ainsi une partie des batteries, on parle aussi dans ce cas de prolongateur d'autonomie. Cela permet de compenser le manque de puissance instantanée de la PAC par un appel à la batterie. La différence entre un véhicule à PAC « pur » et un hybride PAC / Electrique étant la taille de la batterie.

Les premières expériences en France portent sur des véhicules utilitaires avec un objectif de l'ordre de 1500 d'ici à 2020. Les flottes captives en sont la première cible car elles permettent de diminuer l'investissement en nombre de stations de recharge et de préparer la transition vers un réseau national de stations. Un bon exemple est l'expérience menée par La Poste en Franche-Comté avec un HyKangoo, un VE de série équipé d'un prolongateur d'autonomie utilisant une PAC.

En Europe il y a plus de 150 voitures à PAC (FCEV²) en service. Au niveau mondial, les principaux constructeurs automobiles - dont Honda, Toyota et Hyundai - ont des projets de commercialisation de voitures grand-public à piles à hydrogène d'ici à 2015. Daimler, Ford et Nissan comptent le faire vers 2017. Certains semblent même se réorienter vers cette solution : Toyota a annoncé récemment qu'il ne renouvelerait pas son contrat d'achat de batteries à Tesla et Honda a annoncé fin 2013 qu'il arrêterait la production de sa voiture électrique Fit EV ; de plus le gouvernement japonais vient d'annoncer une prime à l'achat de 14 500€ pour tout véhicule à PAC, ainsi la future Toyota FCV ne coûterait plus à la vente que 36 500€.



Mais pour que la vente et la circulation de voitures grand-public à PAC (FCEV) se développe de nombreux verrous doivent encore sauter.

Le premier est son image : la « peur de l'hydrogène » considéré comme ultra-explosif est souvent évoquée avec une référence à la catastrophe du dirigeable

¹ www.fch-ju.eu

² FCEV : Fuel Cell Electric Vehicle

Hindenburg en 1937. Pourtant l'ampleur de la catastrophe n'est pas dû à l'hydrogène mais aux toiles de l'enveloppe du dirigeable en « aircraft dope » et au carburant diesel embarqué. En réalité l'hydrogène est plus sûr que l'essence car il s'échappe directement dans l'air au lieu de s'accumuler au ras du sol. En 2001 le Dr Swain simulât deux incendies de voitures, une à essence l'autre à PAC. Le résultat est clairement en faveur de la PAC³. Plus récemment, Hyundai mit le feu à son crossover Tucson à PAC et il n'y eut pas d'explosion. En 1970, aux États-Unis, un camion-citerne rempli d'hydrogène fit une sortie de route en montagne répandant son chargement, il n'y eut aucun incendie.

Un autre point important est le manque de stations d'approvisionnement. C'est un peu le dilemme de la poule et l'œuf : pas de FCEV pas de station, pas de station pas de FCEV. Mais la situation commence à évoluer. A fin mars 2014 il y avait 186 stations publiques dans le monde dont 9 en Californie. Ce dernier état possède un plan de financement pour 100 stations, 68 d'ici 2017 dont 19 co-financées par Toyota. Au niveau de l'Europe, il existe des initiatives pour contribuer au développement d'une infrastructure hydrogène, en particulier les projets H2 Mobility en Allemagne et en Grande Bretagne depuis 2009. Une initiative identique réunissant de nombreux industriels, des organismes publics et des associations est en cours de discussion en France depuis 2013, les premiers résultats devraient être publiés cette année. Les objectifs au niveau de l'UE sont de 1 000 stations,

dont 50 à 60 en France, et 500 000 FCEV à l'horizon 2020. L'hydrogène utilisé dans ces stations étant au départ à moins d'un tiers d'origine électrolytique mais devenant à long terme, 2050, à plus de 90 % fourni par électrolyse et à près de 50 % grâce à de l'électricité d'origine renouvelable.

Les deux technologies, électrique ou pile à combustible (seule ou plus probablement en complément d'une batterie) sont complémentaires. Le VE rechargé chez soi ou au bureau pour les petites distances, le FCEV à charge rapide pour des usages variés en particulier les longs trajets. Les deux permettent de réduire quasiment à zéro les émissions de CO2 et de particules polluantes ainsi que les nuisances sonores. Seuls les transports routiers lourds, du fait des puissances nécessaires, resteront dans un futur lointain au carburant liquide mais produit par synthèse à partir de l'hydrogène. Bien que la route soit longue avant une utilisation généralisée de l'hydrogène, cette technologie a tout pour s'imposer et d'ici 2050 elle devrait avoir remplacé majoritairement les carburants fossiles.



Illustration 1: Logo de l'initiative de l'UE

³ <http://evworld.com/article.cfm?storyid=482>

Construction d'un réseau de transport d'électricité en Europe

Par Alain Argenson (ECN 62)

Chaque pays avait développé son propre système de transport⁴ mais, dès l'après-guerre, un des premiers actes de reconstruction des pays européens fut d'interconnecter leurs réseaux nationaux.

Les réseaux sont connectés les uns aux autres dans un but :

- d'assistance mutuelle des gestionnaires de réseaux dans le cas d'une défaillance technique brutale ;
- de réglage commun de la fréquence dans le cas de réseaux synchrones.

Les interconnexions électriques sont aussi le vecteur de transactions commerciales transfrontalières :

- Historiquement aux frontières françaises, pour l'exportation de l'énergie nucléaire excédentaire d'EDF (contrats de long terme) ;
- Aujourd'hui elles sont au cœur de l'objectif de l'Union Européenne pour :
 - o développer la concurrence sur les marchés nationaux, bénéficier de la complémentarité de la demande et des parcs de production,
 - o palier la variabilité des énergies éolienne et photovoltaïque par le foisonnement et réduire les coûts liés à leur intégration en mutualisant les réserves et les sources de flexibilité.

L'objectif de l'Union Européenne, définit initialement dans la déclaration de Messine en 1955 a été précisé par la directive 96/92/CE puis la directive 2003/54/CE concernant des règles communes pour la production, le transport et la distribution du marché intérieur de l'élec-

tricité. Elles ont notamment contraint les états à progressivement ouvrir à la concurrence les activités de production et de fourniture d'énergie, et à accroître l'interconnexion et l'intégration entre marchés.

L'interconnexion, l'interopérabilité et le développement des réseaux transeuropéens de transport d'électricité sont un instrument indispensable au bon fonctionnement du marché intérieur de l'énergie. C'est pourquoi la décision n° 1364/2006/CE⁵ du Parlement européen et du Conseil, du 6 septembre 2006, établit des orientations relatives aux réseaux transeuropéens d'énergie. Ces nouvelles lignes directrices listent et hiérarchisent, selon les objectifs et priorités définis, les projets éligibles pour un financement communautaire. Elles introduisent notamment le concept de projet d'intérêt européen.

En 2007, un rapport de la Commission européenne sur les progrès réalisés en la matière soulignait que les exigences des différentes directives sur l'électricité n'avaient pas été respectées par certains États membres. Un nouveau paquet législatif, appelé « troisième paquet Énergie », a donc été adopté en juillet 2009. L'objectif était de renforcer les règles communes pour la production et la transmission (avec notamment la dissociation des réseaux de transmission et la production), la distribution et l'approvisionnement en électricité. Des autorités de régulation nationales ont été instaurées dans chaque État membre, ainsi qu'une Agence de coopération des régulateurs de l'énergie (ACER) et un Réseau européen des gestionnaires de réseaux de transport de l'électricité (ENTSO-E).

⁴ Réseau Transport= tension supérieure à 50kV

⁵ <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32006D1364:FR:NOT>

ENTSO-E⁶ regroupe 41 gestionnaires de réseaux de transport (305 000 km de lignes) de 34 pays (28 de l'UE et 6 autres interconnectés).

En novembre 2010 la présentation, par le Commissaire Européen à l'Énergie pour la Commission, d'une stratégie pour atteindre les objectifs de 2020 (dont 33% de production brute d'électricité renouvelable) soulignait que la mise en œuvre souffrait de graves lacunes notamment dans le domaine des infrastructures. L'Europe ne dispose toujours pas d'infrastructure de réseau qui permettra aux sources d'énergie renouvelables de se développer et de concurrencer à armes égales les sources d'énergie traditionnelles.

La localisation excentrée des nouvelles sources d'électricité par rapport aux centres de consommation et leur intermittence, que seul un foisonnement à grande échelle peut atténuer, nécessitent de grandes transformations du réseau électrique européen. ENTSO-E est chargé de mettre en place un tel réseau.

D'ici à 2020, ENTSO-E a identifié la mise en place de 42 100 km de lignes électriques supplémentaires de transport (certains ouvrages contribuent à plusieurs objectifs) :

- 26 000 km permettront d'améliorer la sécurisa-

tion d'approvisionnement des européens

- 20 000 km faciliteront l'intégration des énergies renouvelables (ENR)
- 28 500 km accompagneront le développement du marché électrique européen

Le tout représente un investissement **de 23 à 28 milliards d'euros**.

La capacité d'échange globale de la France est insuffisante par rapport aux volumes d'énergie que les acteurs de marché aimeraient s'échanger : les interconnexions forment des goulots d'étranglement.

En guise de conclusion :

La Commission européenne a lancé plusieurs initiatives visant à accélérer le déploiement d'infrastructures essentielles. Toutefois, dans la pratique, le rythme de développement des lignes de transport internes et transfrontalières prend bien plus de temps que prévu (jusqu'à 25 ans) et certaines ont été abandonnées. L'opposition locale constitue généralement un obstacle majeur pour ce type de projets d'infrastructures.

La Commission ne devrait-elle pas s'interroger sur le bien-fondé de sa politique énergétique ? Vouloir faire transiter l'électricité d'un bout à l'autre de l'UE en fonction strictement des prix du marché n'est-ce pas oublier les contraintes physiques du transport ?

⁶ ENTSO-E = The European Network of Transmission System Operators for Electricity



La France, un centre d'échanges (source Commission Régulation de l'Énergie)

Confédération des Associations Centraliennes

