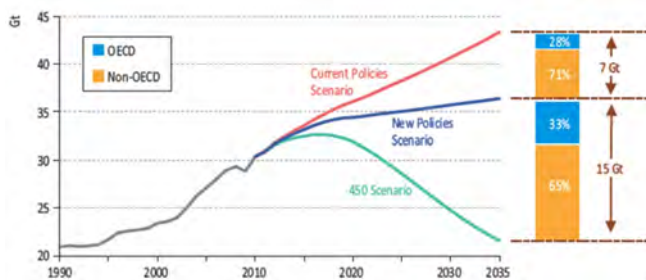


conférence s'est effectivement conclue par l'adoption d'une feuille de route et d'un calendrier de négociations, destinés à des groupes de travail qui seront mis en place. Ces éléments ont pour but d'établir un futur cadre juridique d'ici 2015.

Cependant, ce résultat est plutôt la traduction d'un échec de la prolongation du Protocole de Kyoto dans les conditions souhaitées par l'Europe en particulier, qui fixerait des objectifs contraignants plus ambitieux et impliquerait les grands émetteurs d'aujourd'hui. Au final, le refus de ces derniers s'est soldé par une opposition à cette prolongation de la part de quelques pays déjà contraints, qui dénoncent l'iniquité de l'engagement commun actuel, et qui se sont donc désistés. Ainsi, cette décision de ne pas adhérer à une deuxième période du Protocole de Kyoto du Canada ⁽⁶⁾, du Japon, de la Russie et de l'Australie a fait passer de 30 à 15% la couverture des émissions par le Protocole. Enfin, si la continuité des règles et des outils du Protocole devrait être assurée, une incertitude demeure encore sur la fin de cette deuxième période, les dates possibles retenues étant 2017 ou 2020.



Graph 1 : Emissions de CO2, liées à l'énergie ; cas de plusieurs scénarios AIE à l'horizon 2035 (WEO 2011)

En parallèle de cette décision périlleuse de maintien du Protocole, le débat sur le nouvel accord multilatéral a été différé de quatre ans, date à laquelle sera définie sa future forme : protocole, instrument juridique, ou « accord concerté ayant force légale » dont la formulation vague a permis de satisfaire toutes les parties. Dans le meilleur des cas, celui-ci devrait entrer en vigueur dès 2020. Pour autant, cette conclusion, qui a le mérite d'exister, entérine simplement de fait le principe d'un tel accord, sans aucune avancée sur sa mise en œuvre.

D'autres avancées modestes

Un autre point névralgique de ces négociations portait sur l'abondement du fonds vert créé à Cancun, destiné à soutenir les pays en développement dans leur adaptation au changement climatique. Son lancement officiel à Durban n'a pas été suivi par une entente sur les sources de financements. Or, les premiers financements devraient être débloqués en 2013. Les sommes en jeu, qui doivent atteindre jusqu'à 100 milliards de dollars par an

d'ici 2020, demandent de réfléchir à leur rythme de déblocage et à la mise en place de mécanismes financiers innovants, qui s'affranchiraient d'une mobilisation de fonds publics. Cette question reste encore en suspens. Enfin, l'amélioration du système MRV (surveillance, notification, vérification) favorisera la transparence sur les actions de réduction des émissions, tout en renforçant la confiance réciproque. La prise en compte d'un nouveau gaz à effet de serre, NF3, au très fort pouvoir de réchauffement, l'incitation aux bonnes pratiques dans le domaine de l'agriculture ont fait également partie du débat.

Une nouvelle gouvernance se dessine

Au cours de cette conférence de Durban, la difficulté des négociations liées à des dissensions entre les différentes parties a montré certaines limites de la gouvernance mondiale actuelle. Pourtant, des inflexions de position de la part des Etats-Unis qui ont joué un rôle plus actif, la nouvelle fermeté de l'Union Européenne, la coalition déterminée de 120 pays contre les 3 plus grands émetteurs, une ouverture inattendue de la Chine, sont autant de signes porteurs d'un début d'évolution de cette gouvernance. Et si un intérêt mutuel compris et accepté s'avère encore absent de ces conférences annuelles, il pourrait bien un jour naître des jeux politiques désormais observés.

Vers une nouvelle dynamique ?

Même si les échéances d'engagements contraignants sont différées pour le futur accord, celles pour la deuxième période du Protocole de Kyoto étant imminentes, le résultat important aujourd'hui de cette conférence de Durban est d'avoir obtenu un cadre opérationnel susceptible in fine d'héberger une nouvelle dynamique pour relancer le processus au niveau qui convient. Celle-ci pourrait déjà être perçue favorablement au prochain sommet de la Terre en juin prochain, 20 ans après celui de Rio.

Mais il faudra encore attendre 2015, date de sortie du 5^{ème} rapport du GIEC qui fournira une nouvelle base d'objectifs contraignants de réduction des émissions de gaz à effet de serre, pour mettre le cap sur un accord multilatéral post Kyoto. Son issue sera liée principalement à la volonté politique des parties impliquées ainsi qu'à une gouvernance mondiale peut être réhabilitée.

(1) Correspondant à une concentration atmosphérique de 450 parties par million de gaz à effet de serre
 (2) D'après l'AIE, les émissions engagées des installations existantes et en construction excéderaient déjà les émissions à atteindre pour ce scénario (phénomène de lock-in)
 (3) Date d'adoption du Protocole de Kyoto
 (4) 4^{ème} rapport du GIEC 2007
 (5) Principalement, absence des Etats-Unis et des grands émergents
 (6) Qui s'est retiré du Protocole

Mobilité électrique à Pile à Combustible : quelle(s) cible(s) de prix pour l'hydrogène à la pompe ?

par Alain Le DUGOU

L'hydrogène fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt en tant que vecteur énergétique capable de se substituer à terme à une part importante des énergies fossiles, notamment en ce qui concerne les véhicules à pile à combustible. Comment caractériser de manière pertinente la compétitivité de ce nouveau type de carburant à la pompe ?

L'hydrogène présent dans les scénarios Européens et Mondiaux.

Dans le cadre de l'ambition d'une réduction drastique des émissions des gaz à effet de serre, les énergies primaires non fossiles et renouvelables (vent, soleil, biomasse) se positionnent principalement sur le "créneau" de la production de ce que l'on nomme aujourd'hui un "vecteur énergétique" : l'électricité. Les vecteurs énergétiques ne sont pas légion, et celui qui vient immédiatement à l'esprit après l'électricité est l'**hydrogène**, élément qui présente la particularité tout à fait remarquable de pouvoir être utilisé à la fois dans des applications chimiques et énergétiques. Le marché de l'hydrogène ne va pas sans poser aujourd'hui d'importantes questions sur sa compétitivité économique, ainsi que sur beaucoup d'aspects technologiques. Mais aucune analyse récente ne l'exclut des futurs acteurs du développement durable, notamment dans la **Mobilité**, domaine sensible car producteur d'émissions diffuses.

Des perspectives de forte croissance de l'utilisation d'hydrogène dans ce secteur économique sont aujourd'hui envisagées par divers scénarios réalisés, notamment lors de la dernière décennie, tant par des institutions internationales (Scénarios AIE ⁽¹⁾, WETO-H2 ⁽²⁾) que par le biais de projets européens (HyWays ⁽³⁾) et nationaux (HyFrance ⁽⁴⁾, PROTEC-H2 ⁽⁵⁾). Ces scénarios mettent principalement en avant les applications de type Piles à Combustible (PàC), et ce sont les applications mobiles qui sont le plus largement traitées. Le scénario "BLUE Map" de l'édition 2010 de l'IEA Energy Technology Perspective ⁽⁶⁾ anticipe une réduction de 50% des émissions de CO₂ en 2050, en comparaison du scénario dit de référence (« baseline »), et ce au moyen d'un déploiement massif de véhicules hybrides "plug-in" à essence d'une part, et de véhicules électriques à batteries (EV) et à piles à combustible (PHEV). Les véhicules électriques (véhicules dits "légers", soit de moins de 3,5 t) contribueraient pour leur part à 30% de réduction des émissions, moyennant à la fois un développement accéléré des véhicules électriques à batteries (EV) dès 2015 et la présence de 20 millions de véhicules électriques EV et PHEV en 2020.

Une compétitivité réelle entre les piles à combustible et les moteurs classiques

Un précédent article de la Lettre de l'I-tésé ⁽⁷⁾ a mis l'accent sur l'impact de la segmentation des déplacements sur la part de kilométrage annuel qui pourrait être réalisée en véhicule électrique à batterie, en fonction de l'autonomie. On peut alors parler de complémentarité des deux systèmes, en fonction de l'usage. Mais à l'instar de ces derniers dont l'autonomie devrait rester limitée, même à long terme ⁽⁸⁾, la mobilité électrique hydrogène à PàC est, ou en tous cas le devient de plus en plus, similaire à la mobilité « classique » à moteur à combustion interne, tant en termes de facilité de rechargement (quelques minutes pour un « plein » hydrogène) qu'en termes d'autonomie (à titre d'exemple, la Honda FCX Clarity, qui associe une PàC de 100 kW et une batterie Li-Ion, affiche déjà une autonomie de 460 km pour un réservoir de 4 kg d'H₂ ⁽⁹⁾). Une analyse des compétitivités respectives prend alors tout son sens.

L'hydrogène compétitif à la pompe ? oui, sous conditions

Si l'on se place du côté du consommateur, en évaluant ce que devrait être le « prix objectif de l'hydrogène à la pompe » pour que ce type de motorisation soit compétitif par rapport aux véhicules « classiques », il faut également prendre en compte le prix d'achat du véhicule à PàC. En effet, le coût des piles à combustible (exprimé généralement en \$/kW) a, tout du moins aujourd'hui encore, une importance considérable sur ce dernier point, et fait actuellement l'objet de recherches poussées principalement dans le domaine de la réduction de la charge en platine. C'est pourquoi l'analyse de la compétitivité des véhicules à PàC est ici fondée sur des calculs de Coûts Totaux de Possession (CIP) qui intègrent à la fois des composants spécifiques (investissements) de chacun des deux systèmes et les coûts des énergies (fonctionnement).

Plus précisément, les résultats (figure 1) présentent les prix objectifs de l'hydrogène à la pompe en fonction de

l'évolution des paramètres «prix du diesel à la pompe» (donc TTC, en €/l) et «coût de la pile à combustible» (en €/kW), le cadre de la comparaison des deux systèmes étant fixé par le jeu d'hypothèses suivant pour les deux types de véhicules (coût du réservoir d'essence négligé):

- Coûts des moteurs électrique et à combustion, ainsi que du réservoir d'hydrogène, relevés dans (10) : respectivement 1600\$, 2400\$ et 2000\$ (taux de change €/ \$ = 1.4).
- Durée de vie d'étude : 10 ans, taux d'actualisation 5%.
- PàC de 100 kW.
- Distance annuelle parcourue : 15 000 km (valeur moyenne pour la France).
- Consommation du véhicule MCI : 5,6 l/100 km.
- Coûts identiques pour les autres composants des véhicules.
- Pas de subvention gouvernementale à l'achat.

Le calcul consiste à évaluer pour quels prix d'hydrogène à la pompe les CTP de chacun des véhicules sont identiques. Le prix objectif de l'hydrogène est présenté en €/100 km, immédiatement convertible en €/kg H₂ si l'on considère que pour ce type de véhicule (5,6 l/100 km en version MCI) il faut aujourd'hui environ 1kg d'hydrogène pour faire 100 km⁽¹¹⁾. Le prix du carburant à la pompe (€/l) n'est pas fixé dans la mesure où il est illusoire de le prévoir aujourd'hui pour les années (qui plus est les décennies !) à venir : on a préféré une analyse paramétrique.

Des efforts de R&D à poursuivre, des objectifs atteignables

La figure 1 montre que le coût total de possession d'un véhicule à PàC de 100 kW au prix de 43€/kW (soit 60\$/kW au taux de change de 1,4 \$/€), coût moyen envisagé en 2020 par l'étude Européenne⁽⁸⁾, sera celui d'un véhicule à essence similaire consommant 5,6 l/100 km, si les prix du carburant et de l'hydrogène à la pompe sont respectivement de 1,7 €/l et 5,3€/kg (en supposant une consommation de 1 kg H₂ / 100 km). Pour le même prix du carburant à la pompe, si le coût de la pile est de 100€/kW (soit 5 fois moins qu'aujourd'hui), l'hydrogène devrait être gratuit. La réduction des coûts des PàC dépend très sensiblement des quantités produites, le DoE projette 30\$/kW (environ 21€/kW) à l'horizon 2020, ce qui autoriserait un prix d'hydrogène à la pompe de 6,5 €/kg (toujours pour un prix de carburant de 1,7€/l), ce qui semble aujourd'hui réalisable. Mais au-delà du coût réel d'approvisionnement de l'hydrogène à la pompe, une attention particulière devra être portée aux dispositifs économiques susceptibles d'accompagner la mise sur le marché de l'hydrogène, afin d'en évaluer plus précisément la compétitivité : taxes (de type TIPCE, CO₂, par exemple), incitations, etc. Par contre la question d'une éventuelle taxe de type TICPE se pose et pourrait jouer significativement sur le niveau de coût de production maximum de l'hydrogène pour en assurer la compétitivité. Nous l'aborderons dans un travail ultérieur.

On remarque également la très forte sensibilité du coût des piles à combustible sur le prix admissible de

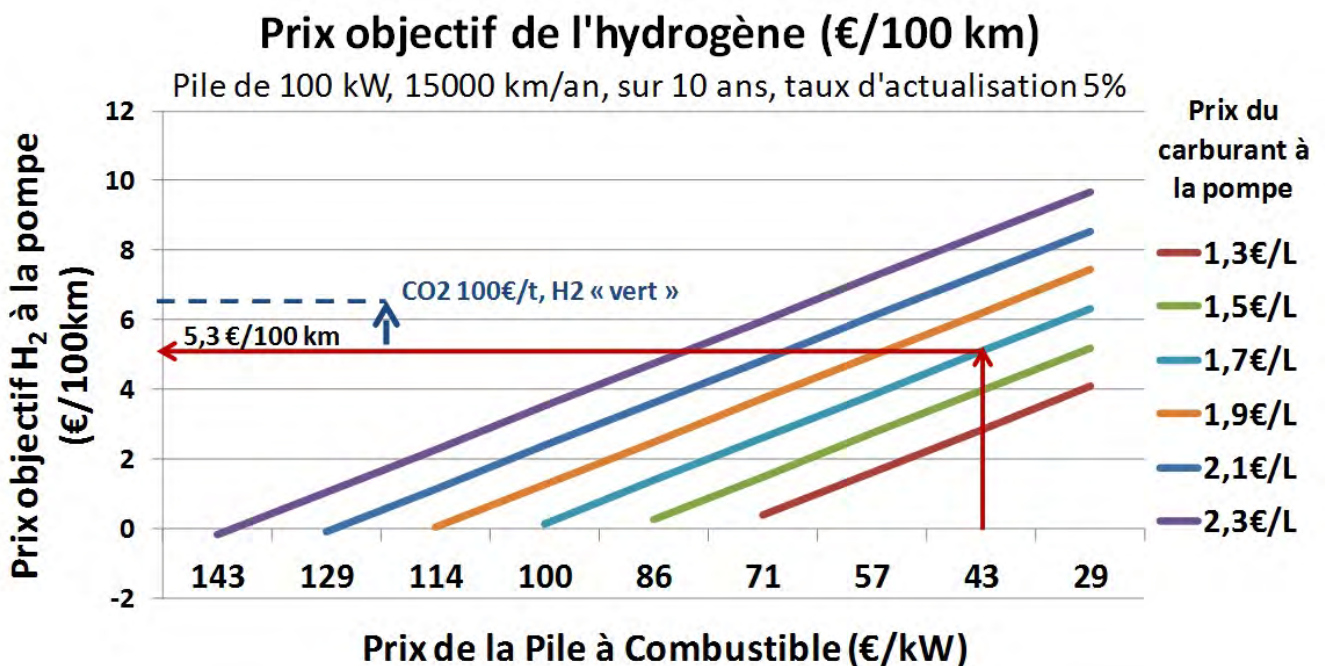


Figure 1 : prix objectifs de l'hydrogène à la pompe pour un véhicule à PàC, en fonction du prix de la pile à combustible (€/kW) et du carburant classique (TTC, €/l) pour un véhicule MCI similaire.



F-City H2, le premier véhicule à hydrogène immatriculé en France (constructeur : FAM Automobile, Pile à Combustible Michelin)

l'hydrogène à la pompe, via les pentes des droites de prix des carburants : environ 12€/kW pour 1€/kg, ce qui rend hasardeuses les projections de prix admissibles de l'hydrogène en station qui ne tiennent pas compte des progrès de la R&D sur les PàC.

Par ailleurs, la figure 1 montre également qu'une taxation des émissions de CO₂ du véhicule classique de 100€/t permettrait d'accroître le prix admissible de l'hydrogène à la pompe d'environ 1€/kg.

Notons enfin que ces prix et leurs évolutions respectives dépendent également de la taille du véhicule, de la distance annuelle parcourue, de la durée de vie envisagée et enfin du taux d'actualisation. Bref, des marchés ciblés et du modèle économique choisi. A titre d'exemple, réduire le taux d'actualisation à 0% permet d'augmenter le prix admissible de l'hydrogène à la pompe de 1 à 2€/kg.



(1) World Energy Outlook, WEO 2008 - ISBN: 978-92-64-04560-6 – IEA editions

(2) World Energy Technology Outlook – WETO H2 - EUR 22038 / EUROPEAN COMMISSION - Directorate-General for Research, Directorate Energy

(3) HyWays, the European Hydrogen Roadmap, Contract SES6-502596

(4) Towards a French Hydrogen Energy Roadmap: the HyFrance Project / J.M. Agator et S. Avril, WHEC 16 / 13-16 June 2006 – Lyon France

(5) Synthèse du Projet PROTEC-H2 / ANR-05-PANH-007 / 27 Février 2009 – ENERDATA

(6) IEA/ ETP (Energy Technology Perspectives) 2010 / Scenarios & Strategies to 2050 / OECD/IEA, 2010 - International Energy Agency (9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France)

(7) Guan Y., Le Duigou A., Amalric Y., Dautremont, S. – De la Compétitivité des Déplacements Electriques, La Lettre de l'I-tésé N° 14, Nov 2011

(8) A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis. The role of battery electric vehicles, plug-in hybrids and fuel cell electric vehicles. McKinsey & Company, November 2010.

(9) Site d'information communautaire Automobile Propre / Essai de la Honda FCX Clarity – Alexandre Lenoir

(10) G.J. Offer, etc. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. Energy policy, 38 (2010) 24-29.

(11) J-P Poirot-Crouvezier, X Glipe, F Roy, Réalisation d'un prototype de pile à combustible dédié à l'application automobile / Journées Thématiques SFT-CEA «Piles à combustible à membrane PEMFC», Avril 2008