



LABORATOIRE D'ECONOMIE DE LA PRODUCTION
ET DE L'INTEGRATION INTERNATIONALE

UMR 5252 CNRS - UPMF

CAHIER DE RECHERCHE

N° 27

**La transition vers l'hydrogène est-elle
bloquée par un verrouillage technologique
au profit des énergies fossiles ?**

**Nuno Bento
Jean-Pierre Angelier**

Novembre 2009

La transition vers l'hydrogène est-elle bloquée par un verrouillage technologique au profit des énergies fossiles ?

Nuno Bento*, Jean-Pierre Angelier

* LEPII - Université de Grenoble - CNRS

Adresse: LEPII – BP47 38040 GRENOBLE Cedex 9 France

Téléphone: +33 (0)6 69 29 74 01 ; Fax: +33 (0)4 56 52 85 71

Email: nuno.bento@upmf-grenoble.fr; nunombento@hotmail.com

Résumé

La difficulté d'introduire l'hydrogène et les piles à combustible dans le marché découle du fait que ces technologies ne constituent pas une innovation évolutive, comme les biocarburants ou les voitures hybrides, mais plutôt une rupture technologique. La domination actuelle des technologies liées au pétrole crée un contexte socio-économique favorisant les acteurs impliqués dans le paradigme actuel, et donne moins de possibilités aux carburants alternatifs de se développer et de contester le statu quo. L'environnement institutionnel tend à reproduire les incitations économiques donnant lieu à un cycle vicieux, lequel rend la sortie du verrouillage au carbone difficile. Si cette hypothèse est correcte, les entreprises intéressées par l'économie de l'hydrogène peuvent se voir bloquées en l'absence d'un contexte stable ou en raison d'intérêts contradictoires. En passant en revue les actions et les annonces des principaux acteurs intéressés par l'hydrogène-énergie, nous cherchons les vrais verrous technologiques au carbone empêchant les entreprises de démarrer la transition. L'infrastructure, plus que la pile à combustible, semble être un facteur majeur de blocage au changement.

1. Introduction

Les émissions de CO₂ doivent être réduites dans tous les secteurs de 50 %-85 % en 2050 par rapport aux niveaux de 2000, de manière à stabiliser l'augmentation des températures à 2-2,4°C au-dessus de la moyenne préindustrielle et éviter ainsi la catastrophe climatique (GIEC, 2007). Dans le secteur des transports, le taux croissant de motorisation dans le monde oblige à une réduction plus sévère de l'ordre de 80-90 % avant 2050 (AIE, 2009). Certains spécialistes croient que la réduction de 50 % des émissions est possible par l'amélioration de l'efficacité des voitures actuelles, notamment par la voie de l'hybridation des moteurs (AIE, 2009 ; Schäfer *et al.*, 2006). Mais cela risque d'être trop court face à l'ampleur du problème, des réductions plus profondes rendent nécessaire la mise en place d'innovations radicales comme l'électricité ou l'hydrogène.

Le coût de la voiture à pile à combustible dépend en grande partie de la pile à combustible et du stockage à bord de l'hydrogène. Le coût de la pile à combustible est descendu à \$60/kW et se

rapproche du coût du moteur à combustion (\$30/kW).¹ Mais ces estimations supposent une production cumulée de 500 000 unités, sinon le coût actuel est de \$3 000 par kW. En outre, le coût du stockage gazeux d'hydrogène à 700 bar (10 000 psi) permettant de garder l'énergie suffisante pour une autonomie de 500 km, de manière non encombrante, a été estimé entre \$250-350/kWh, encore très éloigné de l'objectif de \$2/kWh du département américain de l'énergie (DOE) pour 2015.²

Les plus sceptiques considèrent que l'hydrogène a fait l'objet d'un phénomène médiatique ('hype') qui est en train de s'essouffler par la frustration des attentes créées autour de son utilisation (Romm, 2004 ; Bakker, 2009). A l'aide de modèles analytiques, d'autres considèrent que le blocage à la diffusion de l'hydrogène n'est justifié que pour des situations très particulières d'absence d'infrastructures (Greaker et Heggedal, 2007) ou de difficultés des constructeurs à financer les pertes avec les premières voitures (Conrad, 2004), mais il n'y a pas encore eu d'études empiriques avançant de telles hypothèses. En outre, les décisions au niveau des firmes sont contraintes par leur contexte externe, ce qui peut être en contradiction avec leurs plans d'investissement. Cet article réfléchit à l'existence d'un blocage institutionnel en faveur des technologies fossiles, qui retarde les investissements dans des technologies de rupture comme l'hydrogène. Premièrement, nous analysons attentivement les raisons institutionnelles d'une telle résistance. Deuxièmement, nous passons en revue les stratégies des acteurs (entreprises d'énergie, compagnies pétrolières et constructeurs automobiles) vis-à-vis de la transition vers l'hydrogène. Enfin, l'étude conclut par l'analyse critique des éventuelles situations de *lock-in* qui empêchent les acteurs d'investir dans la nouvelle filière hydrogène-énergie.

2. Verrouillage institutionnel au profit du pétrole

Les systèmes technologiques modernes (comme le téléphone ou l'électricité) sont ancrés dans les structures institutionnelles existantes (Hughes, 1983). L'interaction des éléments technologiques et institutionnels rend le changement plus difficile.

2.1. Dépendance au sentier et stabilité institutionnelle

L'économiste Douglas C. North a analysé les institutions, la façon comme elles évoluent et leur impact sur la performance économique. Selon l'auteur, les institutions sont des constructions des actions humaines qui structurent les interactions politiques, économiques et sociales (North, 1990, 1991). Elles consistent en des normes formelles (comme les lois et les droits de propriété) et informelles (comme la tradition et la culture). Tout au long de l'histoire, l'objectif des institutions a été d'introduire un certain ordre et de réduire l'incertitude dans les transactions (North, 1991). Pour cela, elles se sont appuyées sur des modèles mentaux de culture et de croyances partagés collectivement (North, 2005). Les décisions des agents sont prises à partir de leurs croyances et orientées vers les opportunités ouvertes par l'environnement. Leur compréhension de la réalité est limitée (Simon, 1959) et ils doivent décider dans un monde « non ergodique » qui change en continu

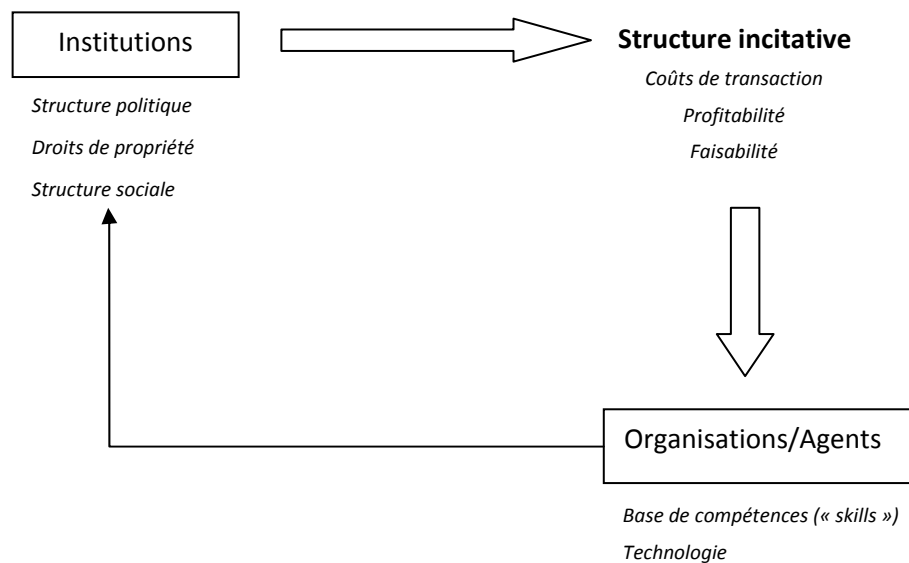
¹ Les estimations et les objectifs techniques sont retirés de DOE (2009).

² Le rapport final du consortium Roads2HyCom (2009) considère le stockage d'hydrogène comme l'obstacle technique le plus important à la commercialisation de la voiture pile à combustible à hydrogène.

(North, 2005 ; Arthur, 1989). Dans ce cadre, l'erreur est normale et différents équilibres multiples sont possibles, qui en résultent.

Cet ensemble complexe d'institutions peut être décomposé en trois volets : structure politique, où se forment et s'agrègent les choix ; structure des droits de propriété qui déterminent les incitations ; et structure sociale comprenant les normes et conventions caractéristiques des institutions informelles (North, 2005). Ces infrastructures définissent l'ensemble des choix disponibles à chaque instant et ainsi la structure d'incitations et d'opportunités des acteurs (North, 1991). Les choix sont affectés par les interactions effectuées entre les agents et les institutions. Les organisations investissent continuellement dans de nouvelles compétences et connaissances (« *skills* ») pour rester compétitives (Nelson et Winter, 1982).³ La concurrence indique les types de compétences et technologies perçues comme apportant le rendement maximal (North, 1995). Cet investissement des acteurs va conditionner leur perception de nouvelles opportunités dans l'avenir. Mais l'agent ne reçoit pas les signaux du marché de façon passive, il répond aux changements de l'environnement en prenant en compte son propre stock de connaissances et de technologies acquises dans le passé (Nelson et Winter, 1982). Cela affecte à leur tour les choix qui influencent l'évolution des institutions, lesquelles reflètent les croyances accumulées au fil du temps (schéma 1).

Schéma 1. Le cadre institutionnel base de l'analyse de North



Les interdépendances institutionnelles produisent des rendements croissants importants (North, 1990). L'évolution des institutions serait alors marquée par des économies d'échelle, économies de gamme, effets de réseau, etc., qui consolident le système existant (Arthur, 1989). Ainsi, les coûts opérationnels des organisations se réduisent avec l'expérience ; l'emploi prolongé des arrangements formels et informels réduit l'incertitude sur ces encadrements ; les investissements induits produisent des effets de coordination importants. Alors le changement est incrémental et

³ Pour une analyse de la stratégie des organisations visant à s'adapter à l'environnement institutionnel et à choisir l'encadrement contractuel qui réduit les coûts de transaction, voir Williamson (2005).

conditionné par les choix historiques précédents (North, 2005). Il est incrémental dans le sens où les changements de grande ampleur sont susceptibles de se confronter à l'hostilité des acteurs économiques qui y voient une menace à leurs profits. L'évolution des institutions est dépendante des choix du passé (*path dependency*) dans la mesure où le changement sera cohérent avec la matrice institutionnelle existante (David, 1985). Dans ce contexte, le changement est plus facile lorsque réalisé de manière graduelle et par l'intégration dans les structures préexistantes.

Aoki (2001, 2007) analyse les mécanismes (internes et externes) de changement des institutions. Une nouvelle architecture peut venir se substituer à l'ancienne par un processus similaire à celui de la destruction créatrice de l'entrepreneur-innovateur schumpétérien. Mais les normes sociales encastrées dans plusieurs domaines peuvent freiner ce mouvement, en introduisant des éléments du passé (Aoki, 2007). En l'absence d'institutions complémentaires et de compétences de support, la transition ne peut se faire que très difficilement.

La formation d'un nouveau système technologique peut être bloquée par les défaillances institutionnelles. Jacobsson et Johnson (2000) décomposent le système technologique en : acteurs et leurs compétences respectives ; réseaux ; et institutions. Les acteurs assoient leur action sur leurs compétences techniques, organisationnelles et financières, afin de développer les nouveaux systèmes technologiques. Cela concerne surtout l'action et la prise de risque par des firmes pionnières. Les réseaux professionnels sont des lieux de transfert de connaissance tacite ou explicite, au sein desquels se forme un certain consensus technologique limitant les choix techniques des firmes (Dosi, 1982). Enfin, les institutions sont des contraintes qui structurent les interactions politiques, économiques et sociales.

Dans chacune des trois composantes peuvent exister des éléments faisant résistance au développement des nouvelles technologies. Du côté de la demande, en présence d'une nouvelle innovation, les consommateurs potentiels n'arrivent pas à exprimer leurs attentes en termes de qualité, prix et performance du produit. Du côté de l'offre, le processus de recherche localisée de technologies peut empêcher le recours à des innovations trop différentes de celles qui sont actuellement utilisées (Dosi, 1988). De plus, la résistance au changement des firmes dont les intérêts sont liés à la technologie dominante risque de retarder l'adoption de la nouvelle technologie. Finalement, l'incertitude et le risque associés à la nouvelle technologie rendent plus difficile le recours au marché de capitaux (Murphy et Edwards, 2003). D'où l'importance d'inciter les firmes à entrer dans le marché pour éduquer les consommateurs à la nouvelle technologie et influencer favorablement le contexte institutionnel. Mais aussi des politiques de création de variété technologique comme les subventions à la R&D de manière à réduire les barrières techniques au développement de nouveaux systèmes (Jacobsson et Johnson, 2000).

En bref, les institutions peuvent rendre plus difficile le changement technologique, mais une fois la transformation consommée, l'encadrement institutionnel protège la technologie devenue dominante (North, 2005). Dans le domaine de l'énergie, le problème est le verrouillage technologique en faveur des énergies fossiles et ses implications pour le développement des innovations « vertes ».

2.2. Le *lock-in* au profit des énergies fossiles

La domination des hydrocarbures a fait l'objet de plusieurs études qui y voient une barrière à la transition vers une société sobre en carbone. Unruh (2000, 2002) considère que les économies

industrialisées ont été verrouillées dans les énergies fossiles par un processus de coévolution technologique et institutionnel en présence de rendements croissants d'adoption. Ce verrouillage favorisant les technologies utilisant des énergies dont la combustion émet du carbone (*carbon lock in*) est le résultat des changements intervenus à plusieurs niveaux (technologique, organisationnel, industriel, sociétal et institutionnel), qui ont été à la base de l'émergence d'un complexe technico-institutionnel (*techno-institutional complex* ou TIC) assis sur les énergies fossiles (Unruh, 2002). Ce complexe technico-industriel serait défendu par les intérêts des firmes dominantes (Olson, 1965). Par exemple, l'industrie pétrolière serait comparée aux « groupes préférés » (*preferred groups*) de la théorie de l'action collective qui profitent de leur nombre réduit pour se coordonner de manière à résister aux menaces des substituts au pétrole (Unruh, 2000).

L'existence d'un tel verrouillage technique et institutionnel au carbone bloque la diffusion de technologies propres et moins émettrices de gaz à effet de serre, même lorsque celles-ci sont compétitives en termes de coût (Kemp, 1997). Le TIC serait alors responsable du retard des innovations propres à entrer dans le marché.

La diffusion des moteurs à combustion interne – d'abord aux Etats-Unis et puis dans le monde – est un exemple du processus de verrouillage technologique dans le marché des transports.⁴ Au début du XX^e siècle, trois technologies se disputent la traction des automobiles : la voiture à vapeur, les moteurs électriques et le moteur à combustion interne. La voiture électrique apparaît comme une technologie simple, silencieuse et non polluante. Cette technologie avait toutefois le handicap du temps de recharge et de l'autonomie des voitures. Malgré leurs inconvénients, les moteurs à vapeur et les moteurs électriques ont été les premiers gagnants de cette bataille technologique. Ce n'est que plus tard, avec l'avènement de la production en masse et les nouvelles méthodes de rationalisation de la production mises en place par Henry Ford pour son modèle T, que le coût des voitures équipées d'un moteur à combustion diminue drastiquement en les rendant accessibles à une fraction plus large de la population. De plus, la voiture à combustion interne a pu bénéficier de l'infrastructure existante de l'essence et du kérosène pour les utilisations domestiques, ce qui s'est avéré un avantage compétitif fondamental pour consolider sa domination sur les autres types de motorisation (Melaina, 2007). Les avantages du moteur à combustion interne en termes d'accessibilité/prix de la voiture et de l'autonomie l'ont finalement emporté sur les inconvénients comme le bruit, la pollution et le démarrage des premiers modèles.

Les rendements croissants d'adoption ont joué un rôle important tout au long du processus qui a conduit à la domination du moteur à explosion. Les économies d'échelle et d'apprentissage sont venues élargir les avantages des voitures à essence, ce qui a progressivement verrouillé le marché sur cette technologie par un processus de sentier de dépendance. Cela a conduit à une domination presque totale du marché, laquelle rend difficile l'émergence de technologies alternatives comme les voitures à hydrogène ou la voiture électrique. De plus, la promotion d'un modèle technologique alternatif doit faire face à la résistance des agents liés au paradigme actuel.

Les grands changements ne sont pas normalement entamés par les acteurs dominants, mais par de nouveaux acteurs qui introduisent les innovations radicales (Geels, 2005 ; Christensen, 1997). Les agents installés ont intérêt à défendre la technologie existante promouvant des innovations

⁴ Pour une présentation plus approfondie, voir : Grübler (1999), Geels (2005) et Melaina (2007).

majeures. Dès lors que la domination technologique se voit menacée par une nouvelle technologie, les acteurs tentent rapidement d'améliorer les performances de la technologie établie avec des technologies connues (*off the shelf*). Cette situation est connue dans la littérature comme l'effet des bateaux à voile *sailing ships* (Geels, 2005). Les améliorations de la technologie existante sont un mécanisme pour ralentir la diffusion de nouvelles technologies radicales.⁵

En raison de leur rôle dans le paradigme technologique actuel, les constructeurs automobiles et les compagnies pétrolières peuvent être tentés de se comporter comme les « gardiens du temple » des moteurs à combustion d'énergies fossiles, en freinant ainsi les altérations dans les transports. Les constructeurs automobiles ont un savoir-faire dans les moteurs à explosion et ils ont jusqu'alors répondu aux menaces d'entrée de nouvelles alternatives par l'amélioration de l'efficacité des moteurs. Cette stratégie peut toutefois être mise en cause par la croissante prise en compte des externalités négatives des voitures (pollution de l'air, changement climatique), ainsi que par les limites physiques à l'amélioration du rendement de la technologie actuelle. De leur côté, les compagnies pétrolières ont intérêt à pérenniser leur activité de base et à rentabiliser au maximum les investissements réalisés dans l'infrastructure actuelle, mais la perspective de raréfaction du pétrole peut les obliger à repenser l'avenir après le pétrole.

3. Les stratégies des acteurs potentiels de l'économie hydrogène

Les principaux acteurs potentiellement intéressés par une économie hydrogène peuvent être retrouvés dans le secteur du transport individuel, ainsi que chez les fournisseurs de gaz industriel, les fabricants de piles à combustible et les compagnies d'électricité et de gaz, lesquelles semblent principalement intéressées par les applications stationnaires de la pile à combustible. Même si les entreprises peuvent avoir des raisons identiques pour s'impliquer dans la filière hydrogène, il peut exister des différences dans la perception des avantages à devenir le pionnier sur le marché.

3.1. Les constructeurs automobiles entre l'absence d'infrastructure et les objectifs à court terme

Le parc automobile mondial doit tripler à l'horizon 2050, en raison surtout de l'augmentation de la demande dans les pays émergents comme la Chine et l'Inde (AIE, 2009 ; WBCSD, 2004). En effet, les problèmes de réchauffement climatique et de pollution de l'air dans les villes doivent augmenter la demande pour la voiture propre. Entretemps, les constructeurs font face à la concurrence croissante des nouveaux constructeurs venant de Corée du Sud, d'Inde ou de Chine. Dans un contexte de surcapacité installée, le mouvement de concentration et d'établissement de partenariats se poursuit afin d'accompagner l'évolution technologique, en même temps que les marques font face à une compétition globalisée sur un produit devenu plus homogène (CAS, 2009). C'est dans ce contexte que les constructeurs doivent choisir la ou les technologies qui viendront éventuellement remplacer le moteur à combustion.

Les grands constructeurs automobiles ont un programme de développement de voitures à hydrogène et presque toutes les marques ont déjà présenté au moins un modèle dans un salon

⁵ Ce concept a été introduit par Ward (1967) en se référant aux améliorations survenues aux bateaux à voile pendant les années 1860 et 1870, lorsque leur domination a été défiée par les navires à vapeur.

automobile. Dans la plupart des cas, il s'agit de prototypes équipés d'une pile à combustible du type *Proton Exchange Membrane* (PEM) alimentée à hydrogène stocké à bord de façon comprimée (350 ou 700 bars), à l'exception de BMW qui utilise un moteur à explosion capable de carburer indifféremment à l'essence ou à l'hydrogène liquide, ainsi que Mazda et son moteur rotatif acceptant également ces deux carburants. La pile à combustible est tantôt fournie par une firme spécialisée (par exemple Ballard), tantôt développée « maison ». Une estimation récente des dépenses en développement des voitures à hydrogène par les firmes les plus actives (Daimler, General Motors, Honda et Toyota) rend compte d'un budget annuel de l'ordre de 100 million de US\$ par constructeur depuis 2000 (Sperling et Gordon, 2008). Les démonstrations actuelles attestent un tel niveau d'investissements, Daimler et GM comptent chacune plus d'une centaine de voitures pile à combustible circulant actuellement dans le monde (tableau 1).

Tableau 1. Plans de démonstration et de commercialisation de voitures pile à combustible

Constructeur	Plans actuels			Première annonce	
	Démonstration	Lancement	Production de masse	Année	Commercialisation
BMW (Allemagne)	2009 100 Série7 ICE-LH ₂				
Daimler (Allemagne)	2009 >100 Classe-A 30 bus Citaro 2010 20 Classe-B	2012 1000 unités	2015 Décision oui/non	1997	2004 40.000 unités
Ford (Etats-Unis)	2005-2010 30 Focus			2002	2004 (lancement) 2010 (commerciale)
GM (Etats-Unis)	2009 115 Chevy Equinox	2012 1000 unités	>2012 1 million/an	2001	2004
Honda (Japon)	2008-2012 200 FCX Clarity		2018 Coût objectif \$65000	2001	2004
Hyundai-Kia (Corée du Sud)	2009 30 unités 2010 200 unités	2012 1000 unités	2018 30.000 unités		
Mazda (Japon)	2008+ 30 RX-8 (HyNor)				
Nissan (Japon)		2009	2014		
Toyota (Japon)	2009 38 FCHV-adv		2015 Coût objectif \$50000	2001	2004
Volkswagen (Allemagne)		2020			

Source: Fuel Cell Today (2009), sites internet des marques.

Daimler est une des marques les plus actives dans le développement de la voiture pile à combustible depuis son minibus Nekar 1 en 1994. Le constructeur est aussi à l'origine des 30 bus Mercedes-Benz Citaro qui ont équipé la flotte de démonstration européenne de l'hydrogène dans les transports publics (programme CUTE) entre 2006 et 2009, laquelle s'est entre-temps étendue à d'autres villes dans le monde.⁶ Daimler entretient une des plus grandes flottes de voitures pile à combustible au monde avec plus de 100 voitures (sur base de la Mercedes Classe A). En janvier 2009, la marque a présenté le nouveau BlueZERO F-Cell, une voiture sur base de la Classe B, équipée d'une pile à

⁶ <http://www.global-hydrogen-bus-platform.com>

combustible de 90 kW de l'Automotive Fuel Cell Cooperation Corp (AFCC), l'ancienne division transports de Ballard qui a été reprise par Daimler.

General Motors (GM) est l'autre grand acteur de la voiture à hydrogène. On doit à GM la première camionnette propulsée par une pile à combustible, en 1968. La marque a été à l'origine d'autres innovations comme le châssis type « *skate board* » intégrant la pile à combustible et le stockage d'hydrogène dans un plancher plat, ou le concept de la conduction par fils « *drive by wire* » où toutes les parties mécaniques sont remplacées par des fils électriques. En avril 2009, GM avait déjà livré près de 115 véhicules Chevrolet Equinox à des clients aux États-Unis (Californie, New York et Washington DC), Europe, Japon, Chine et Corée du Sud. En avril 2008 la compagnie de Detroit a annoncé l'intention de déployer 1 000 voitures piles à combustible en Californie à l'horizon 2012, avant d'être atteinte de plein fouet par la crise qui l'a obligée à se mettre sous la protection de la loi des faillites pour pouvoir se restructurer. La crise a aussi eu comme effet des suppressions de postes dans la division hydrogène (Fuel Cell Today, 2009a).⁷

Honda et Toyota ont été les pionniers dans la commercialisation de petites flottes de voitures pile à combustible à hydrogène. Tous les deux ont commencé à louer quelques voitures piles à combustible en Californie en décembre 2002 (Solomon et Banerjee, 2006). Fin 2008, Honda a démarré la commercialisation des premières voitures FCX Clarity à Los Angeles et Tokyo par un système de *leasing* de 3 ans. La compagnie japonaise prévoit de louer 200 voitures dans le monde pendant les 3 prochaines années. Les informations non officielles rendent compte d'un coût de 1 million d'euros par voiture.⁸ En 2007, Honda ambitionnait de réduire le coût à 65 000 € en 2018 par l'effet des progrès dans la pile à combustible et la production à large échelle (Beuzit et Meillaud, 2007). Toyota a lancé en 2008 l'Highlander Fuel Cell Hybrid Vehicle – Advanced (FCHV-adv)', un SUV basé sur le modèle Highlander. Ce véhicule à hydrogène est parmi les plus performants déjà présentés avec une autonomie annoncée de 830 km (Fuel Cell Today, 2009b). La compagnie japonaise a récemment confirmé l'intention de lancer la voiture pile à combustible avant 2015 avec un prix objectif de \$50 000 (Fuel Cell Today, 2009c).

En 2001, Toyota, Honda, GM et Ford (en 2002) ont annoncé des perspectives très optimistes quant à la commercialisation de la voiture pile à combustible à court terme en 2004 (Bakker, 2009). Ces annonces surviennent après que Daimler ait annoncé en 1997 la commercialisation de 40 000 voitures piles à combustible pour 2004 et de 60 000 en 2006 (Reuters, 1997). En effet, les compagnies ont de manière récurrente dépassé les attentes contre toutes les évidences qui indiquaient que l'étape de la commercialisation était encore loin. A part des questions liées à l'image environnementale et technologique des marques, il se peut que les compagnies aient poursuivi des intérêts spécifiques avec ces annonces. Aux déclarations très optimistes sur les voitures pile à combustible visant l'obtention de financement pour les activités de R&D et de démonstration, succédait un discours plus réaliste destiné à contenir les changements de la réglementation environnementale et à modérer les attentes des agences gouvernementales quant à l'état actuel de la technologie (Suurs *et al.*, 2009). Ces annonces médiatiques ont été à l'origine d'un effet de mode

⁷ Dans une présentation récente la marque américaine prévoit que la propulsion à pile à combustible sera compétitive à partir de 2022, lorsque la production annuelle atteindra 250 000 voitures (Cole, 2009).

⁸ http://www.huffingtonpost.com/2008/06/16/hondas-zero-emission-car_n_107307.html (consulté le 12 septembre 2009)

jusqu'à la fin de la première moitié de cette décennie. Depuis, le report successif des échéances de commercialisation a provoqué une désillusion généralisée sur la capacité de la voiture à hydrogène à devenir un jour une solution pour les transports, ce qui a amené quelques analystes à parler de phénomène médiatique « *hype* » (Bakker, 2009 ; Romm, 2004).

En outre, la crise économique a poussé les constructeurs à accélérer le déploiement de technologies propres. La contrainte financière a contribué à ce que les marques se concentrent sur les technologies qui peuvent se déployer à plus brève échéance. C'est le cas des marques qui cherchent à accélérer le lancement de la voiture hybride comme Ford, BMW, et PSA Peugeot Citroën ; l'introduction de la voiture hybride rechargeable comme la nouvelle Toyota Prius et la Chevy Volt de GM ; ou la commercialisation de voitures électriques à batterie comme la nouvelle gamme de voitures Renault Z.E. (« zéro émission ») attendue pour 2011. Cela dit, l'hydrogène continue à être considéré comme une solution à moyen et long termes pour certaines firmes (Daimler, GM, Honda, Toyota croient à 2015 ; Volkswagen a indiqué 2020 ; BMW pense à 2025). L'absence d'infrastructure est signalée comme le principal frein par les compagnies les plus avancées technologiquement dans le domaine (Gross *et al.*, 2007), les autres évoquent plutôt la performance des piles à combustible et la priorité aux technologies susceptibles d'être déployées à plus court terme (par ex. BMW, Ford).

3.2. Entreprises du secteur de l'énergie

3.2.1. Les compagnies pétrolières : prises en otage par l'or noir ?

Les compagnies pétrolières connaissent l'hydrogène depuis longtemps pour le raffinage du brut. Le nouveau carburant apparaît comme un possible successeur du pétrole en assurant ainsi la continuité de l'activité. A la différence des constructeurs automobiles, une compagnie pétrolière a moins de raisons de s'engager avant les autres dans la filière de l'hydrogène (Van Benthem *et al.*, 2006). Les augmentations récentes du prix du brut ont accru la rentabilité des activités dans le pétrole ; la dernière affaire Shell sur l'évaluation des réserves a montré l'importance de celles-ci pour la valeur boursière. Enfin, les compagnies sont plus intéressées à amortir les investissements réalisés qu'à mettre en place une nouvelle infrastructure pour l'hydrogène.

BP et Royal Dutch Shell sont les deux premières compagnies à ouvrir une division interne consacrée à l'hydrogène en 1998 et 1999, respectivement. Au début des années 2000, BP a voulu montrer son engagement dans la promotion des alternatives au pétrole avec le slogan « *Beyond Petroleum* » (au-delà du pétrole). L'entreprise se lance alors dans des projets de démonstration d'hydrogène, mais ceux-ci ne représentent qu'une maigre part des investissements en énergies alternatives dont le budget atteint 1,4 milliard de dollars en 2009 (Financial Times, 2009). En outre, BP crée avec Rio Tinto une joint venture surnommée « Hydrogen Energy » pour la construction de centrales électriques à charbon avec production d'hydrogène et capture et séquestration du carbone. En 2001, Shell publie une vision durable de l'énergie à 2050 où l'hydrogène prend une grande place dans le mix énergétique. Depuis, la compagnie néerlandaise a alloué plus d'un milliard de dollars à la recherche et promotion des applications énergétiques de l'hydrogène (Solomon et Banerjee, 2006). La compagnie pétrolière participe à divers projets de démonstration dans le monde, le plus souvent en ouvrant une station-service, comme à Reykjavik en Islande, laquelle a été une des premières stations au monde. La collaboration avec GM aux Etats-Unis a été à la base de l'ouverture de plusieurs stations en Amérique. En 1999, elle rejoint le partenariat californien pour la promotion des

pires à combustible (CaFCP) en lien avec BP, ExxonMobil et Chevron, et s'engage à construire un réseau de stations dans l'Etat américain. A son tour, BP participe à plusieurs autres démonstrations dans le monde en Europe, Etats-Unis, Australie, Chine et Singapour comme le projet « HyFleet : Cute » de démonstration de l'hydrogène dans les transports collectifs.⁹ Signalons encore Total qui compte deux stations d'hydrogène en Allemagne (Berlin, Munich) et une autre ouverte récemment en Belgique (Bruxelles). La compagnie française vient de signer un accord de coopération avec Daimler, Linde, quelques compagnies de gaz et Shell pour la mise en place des infrastructures pour l'hydrogène en Allemagne à partir de 2011 (Daimler, 2009).

En 2009, Shell et BP ont fermé leurs unités d'hydrogène en réaction à une conjoncture pétrolière plus incertaine et à un redéploiement stratégique dans leurs activités centrales (Financial Times, 2009). L'augmentation du prix de pétrole rend les activités d'exploitation et de production plus profitables, en même temps que les perspectives de profits dans l'hydrogène sont dépendantes de l'augmentation de la demande (Fuel Cell Today, 2009). Les deux compagnies ont pour l'instant affiché l'intention de garder ouvertes les stations d'hydrogène existantes.

Le tableau suivant présente une synthèse non exhaustive des projets de démonstration de voitures pile à combustible à hydrogène dans le monde.

Tableau 2. Le nombre de voitures et de stations prévues dans les projets de démonstration

Projet	Région	Période	Plan de déploiement	Nombre prévu de stations
California Fuel Cell Partnership (CaFCP)	California (USA)	2012-2014	4,307 voitures PAC	100 stations
		2015-2017	50.000 voitures PAC	
Joint Technology Initiative (JTI)	UE	2010	100 véhicules, 100 bus	
		2013	500 véhicules, 500 bus	
Icelandic New Energy	Islande	2007-2010	3 bus (2003-2006) 13 Smart-H2 1 bateau	1 station
Clean Energy Partnership (CEP)	Berlin, Hambourg (Allemagne)	2008-2010	40 véhicules	5 stations
Phase II			Non spécifié	
Phase III				
JHFC	Japon	2006-2010	60 véhicules	20 stations
Phase II			En discussion	
Phase III		En discussion		
Scandinavian Hydrogen Highway	Norvège, Suède, Danemark	2015	500 voitures, 500 voitures spéciales, 100 bus	15 stations 30 stations satellites
HyChain	France, Italie, Espagne, Allemagne	2006-2010	150 voitures spéciales	
H₂ Mobility	Allemagne	2009-2011		Planification
		2011-2015		Centaines de stations
		>2015		1 000 stations

⁹ <http://www.fuelcells.org>

3.2.2. Nouveaux marchés en perspective pour les fournisseurs de gaz industriels

Les producteurs de gaz industriel comme le Groupe Linde, Air Liquide, Praxair et Air Products & Chemicals collaborent avec les compagnies pétrolières pour mettre en place des stations d'hydrogène dans le monde. Il existe actuellement 103 stations, dont 58 aux Etats-Unis, 35 en Europe, 16 au Canada et 12 au Japon.¹⁰

La consommation mondiale d'hydrogène a été de 450 milliards de m³ en 2003 dont 84 aux Etats-Unis et 61 en Europe, la consommation de cette dernière a été estimée à 76 milliards de m³ en 2008 (Roads2HyCom, 2007). En Europe, la production captive de l'hydrogène par l'industrie représente 64 % du total, suivi par la production dérivée (27 %) et par la production des compagnies de gaz industriels (9 %, soit 10 milliards de m³ environ par an) (Roads2HyCom, 2007). Linde, Air Liquide et Air Products possèdent 15 grands pipelines de transport d'hydrogène en Europe parcourant presque 1 600 km. Air Liquide et Linde sont les plus grandes compagnies au monde partageant 40 % environ du marché mondial de gaz industriels et ont chacune réalisé 13 milliards d'euros de chiffre d'affaires en 2008.¹¹ La perspective de l'élargissement des usages de l'hydrogène explique l'intérêt du secteur à cet égard. En effet, l'économie de l'hydrogène ouvre une nouvelle opportunité pour la valorisation de leurs compétences et pour l'expansion des marchés de base dans l'avenir. Mais les entreprises de gaz industriels ne veulent pas rester cantonnées à la production d'hydrogène. Air Liquide est aussi actif dans la production de piles à combustible avec sa division Axane. Cependant, ce marché tarde à démarrer et les déficits s'accumulent, ce qui soulève des questions quant à la disposition de la firme mère à continuer à supporter les pertes de sa filiale.

3.2.3. Entreprises de service public de gaz et d'électricité : vers la diversification de l'offre ?

Les compagnies de services publics d'énergie (*utilities*) voient aussi dans le changement pour l'hydrogène et les piles à combustible une opportunité de diversifier leurs activités dans le futur. Les infrastructures du gaz naturel peuvent servir au transport/distribution d'hydrogène. De plus, la technologie de la pile à combustible peut ouvrir des débouchés de grande valeur pour le gaz naturel. Par ailleurs, les électriciens sont intéressés par les possibilités des piles à combustible en termes de génération électrique décentralisée, propre et très efficace. Mais l'intérêt des groupes électriques est surtout porté par la perspective que l'électron vienne à assumer un rôle plus important dans les transports avec la voiture électrique à batterie. EDF est actuellement engagée dans une recherche sur les batteries, ainsi que dans le déploiement des bornes électriques pour l'assistance aux véhicules.

Les compagnies gazières et électriques sont actives dans les grands programmes de déploiement de piles à combustible dans les applications stationnaires au Japon et en Allemagne. Le gouvernement japonais et les grandes entreprises d'énergie ont mis en place un programme de déploiement sur large échelle de la pile à combustible stationnaire de petite taille (1kWe) pour le secteur résidentiel du type PEMFC et (moins) du type SOFC (Adamson, 2007). Ce programme a démarré en 2005 sous la coordination du « New Energy Foundation » (NEF) et les subventions du « New Energy and Industrial Technology Development Organisation » (NEDO). Jusqu'à son terme en mars 2009, des systèmes pile à combustible ont été installés sur 600 sites (Campanari et Rosés, 2009). Les compagnies

¹⁰ <http://www.iphe.net>

¹¹ www.linde.com; www.airliquide.com

participantes – surtout des compagnies gazières et pétrolières comme Tokyo Gas, Osaka Gas ou Nippon Oil –, installent les piles à combustible et sont appelées à payer la différence entre le coût des piles et la subvention gouvernementale. Pour cela, elles ont établi des collaborations avec les fabricants de piles à combustible ; ainsi en est-il du partenariat entre Sanyo Electric et Nippon Oil, ou Matsushita et Tokyo Gas.

En Allemagne, le ministère des transports, de la construction et du développement urbain en collaboration avec neuf partenaires industriels a lancé en septembre 2008 un grand programme de démonstration pré-commercial des systèmes domestiques de chauffage à pile à combustible surnommé « Callux ». ¹² Trois fabricants de systèmes de pile à combustible sont impliqués dans le projet – BAXI INNOTECH, Hexis and Vaillant, – ainsi que cinq compagnies électriques et gazières – E.ON Ruhrgas, EWE, MVV Energie, VNG Verbundnetz Gas. Une centaine de piles à combustible ont été déjà installées sur les 800 prévues pour la première phase qui se déroule jusqu'à 2012. Le coût du projet est estimé à 86 milliards d'euros, dont 46 milliards sont apportés par les partenaires industriels et le reste par des subventions de l'état.

En outre, les *utilities* nouent des collaborations avec les fabricants de piles à combustible à l'exemple de GDF Suez qui a élargi son accord avec Ceramic Fuel Cells Limited pour le développement et le déploiement d'unités de micro-cogénération (mCHP) de 2KW d'électricité et d'eau chaude en France, ou de Ceres Power qui est en partenariat avec Centrica (British Gas) pour le développement des piles à combustible SOFC de 1 KWe + 1 KWth au gaz naturel afin de les commercialiser à partir de 2011 au Royaume-Uni (Campanari et Rosés, 2009). Le coût du système pile à combustible reste un frein au développement du marché stationnaire, bien que le seuil de compétitivité soit moins rigide que dans le cas des applications mobiles : 2 000€/kW pour les mCHP contre 50€/kW pour les transports en 2020 (HFP, 2007). Toutefois, la compétition technologique dans le marché stationnaire est aussi plus intense que dans le marché des transports (turbines, générateurs diesel, etc.).

3.3. Fabricants de piles à combustible et de technologies d'hydrogène : les premières victimes du retard dans le démarrage du marché

Les fabricants des piles à combustible – spécialisées dans des composants comme les membranes ou les intégrateurs de systèmes – sont le miroir des problèmes de la transition technologique entre le laboratoire et la commercialisation. La perspective d'un grand marché a justifié le lancement des compagnies privées en bourse, les perspectives initiales tardent à se concrétiser et les entreprises cotées présentent des pertes successives. La technologie reste encore au niveau des grandes démonstrations ou dans la dernière étape de la R&D. Dans le cas des marchés mobiles, les fabricants indépendants de piles dépendent des commandes des constructeurs automobiles, lesquels sont contraints par le coût actuel de la pile et par l'absence d'infrastructures. De plus, nombreux sont les cas où la marque fait sa propre pile « maison » (Honda, Nissan, Toyota ou Daimler suite à la reprise de la division transports de Ballard).

Les niches de marché où les piles sont déjà compétitives sont très réduites (générateurs de secours *backup*, chariots élévateurs, génération d'appoint pour la navigation de plaisance) et ne suffisent pas à générer assez de recettes pour poursuivre le développement des piles à combustible. Les firmes ont alors dû revoir leurs plans ou même fermer leurs portes face aux pertes annuelles répétitives.

¹² <http://www.callux.net>

C'est le cas de Millenium Cell, spécialisée dans le stockage d'énergie par cartouches d'hydrogène destiné aux applications portables, qui a déposé son bilan en 2008. La spécialiste des piles du type PEMFC, Ballard, a vendu sa division transports à Daimler en 2007 suite à une restructuration interne et cela malgré le fait d'équiper grand nombre de voitures pile à combustible au monde (Fuel Cell Today, 2009). En mai dernier, la compagnie canadienne a rompu sa collaboration avec la société japonaise Ebara pour la vente de systèmes de cogénération au Japon. Nonobstant, Ballard est active avec Hydrogenics et Dantherm dans l'initiative technologique conjointe canadienne-danoise (CanDan) pour le développement et le déploiement des piles à combustible pour les transports (notamment chariots élévateurs et petites voitures), générateurs d'appoint (UPS en anglais) et de secours.

Une douzaine de firmes sont focalisées dans le marché stationnaire de grande puissance, dont les deux plus grandes sont UTC Power et FuelCells Energy. Certes le marché est en expansion, mais les problèmes financiers posent des questions sérieuses aux entreprises (Fuel Cell Today, 2008). HydroGen a récemment dû licencier les deux tiers de sa force de travail, alors que Siemens a préféré (encore une fois) quitter le marché. Par ailleurs, les principaux fabricants de piles pour les applications portables modifient leur structure financière en même temps que le marché est en phase de démarrage (tableau 3). En effet, CMR Fuel Cells, MTI Micro et Medis Technologies viennent de sortir ou se préparent à renoncer à la cotation en bourse (Fuel Cell Today, 2009).

Tableau 3. Unités existantes, nouvelles ventes et production cumulée

Pile à combustible (unités)	Existantes	Nouvelles	Production cumulée
Transport			
Voiture PAC	217	180	>1 000
Bus	103	-	-
Petit véhicule (APU, chariots élévateurs,..)	-	5 000	14 000
Stationnaire			
Petite taille	4 500	4 000	11 000
Grande taille		50 (50 MW)	900 (175 MW)
Portable			
(jouets, démos, unités militaires,..)	-	10 000	32 000

Transport (voiture pile à combustible et petit véhicule) et PAC portable : estimations pour 2009. PAC stationnaires (petite et grande taille) : chiffres 2008.

Source: Fuel Cell Today (2009d,e,f,g ; 2008); <http://www.iphe.net> (piles à combustible existantes).

3.4. La coopération nécessaire entre acteurs publics et privés

La présentation précédente a montré que les agents se focalisent chacun sur les activités proches de leur métier de base, mais la transition n'est possible que si les décisions sont coordonnées au niveau de la R&D, du lancement sur le marché et de la mise en place de l'infrastructure. Lorsque la transaction demande la mise en place d'investissements durables, donc très spécifiques, le nombre de fournisseurs se réduit et alors une des parties peut se trouver dans la dépendance contractuelle de sa contrepartie (i.e. l'ouverture des stations dépend de la disponibilité de voitures et vice-versa). Cette dépendance amplifie le risque de comportements opportunistes, lesquels augmentent les

coûts de transaction en rendant la gouvernance par le marché plus difficile (Williamson, 1985). Un engagement coopératif doit alors se mettre en place de façon à gérer les problèmes d'opportunisme et d'incertitude (Ménard, 2004).¹³ Par ailleurs, les incertitudes associées aux activités de R&D et les problèmes d'appropriation des résultats rendent difficile le recours au marché des capitaux et justifient l'intervention des gouvernements (Arrow, 1962). Ceux-ci assument normalement un rôle catalyseur dans l'organisation de la transition des innovations vers le marché à exemple du développement de l'industrie éolienne dans le passé (Jacobsson et Johnson, 2000).

Dans le cas de l'hydrogène, les organisations hybrides ont commencé par des arrangements ponctuels (par exemple des collaborations entre constructeurs et laboratoires publics pour la réalisation d'activités de R&D) et évoluent graduellement vers la formalisation des relations au fur et à mesure que le moment du déploiement des investissements se rapproche et que la dépendance des décisions augmente. Ainsi, les acteurs privés collaborent ensemble et avec les organismes publics de manière à surmonter les obstacles qui se posent à l'hydrogène, notamment en termes de coût et de disponibilité de l'hydrogène, du stockage à bord et des piles à combustible.

Aux Etats-Unis, le ministère américain de l'énergie (DOE) mène des programmes de R&DD en collaboration avec l'industrie, les universités, les laboratoires nationaux (NREL, ARNL, ORNL, etc.), visant à surmonter les obstacles technologiques, économiques et institutionnels à la commercialisation de l'hydrogène et des piles à combustible, de manière à les rendre disponibles à l'horizon 2015 lorsque la décision de commercialisation doit être prise par les entreprises moyennant la concrétisation des objectifs techniques. L'initiative présidentielle pour la promotion de l'hydrogène dans les transports a investi 1,5 milliard de dollars entre 2004 et 2009. Le budget pour l'année fiscale 2010 a été finalement restitué par le Sénat et le Congrès malgré la demande initiale de la nouvelle administration pour réduire substantiellement la dotation budgétaire des programmes concernant surtout les applications mobiles de la pile à combustible.

Encore sur le continent américain, le partenariat public-privé californien sur les piles à combustible (« California Fuel Cell Partnership » ou CaFCP) a été créé en janvier 1999 avec l'objectif de promouvoir la commercialisation des technologies d'hydrogène dans les transports. En 2004, le gouverneur Schwarzenegger lance l'initiative visant à mettre en place un réseau de stations d'hydrogène le long des principales autoroutes californiennes (« California Hydrogen Highway Network »). L'état compte actuellement 23 stations, une dizaine d'autres sont attendues très prochainement. En outre, l'obligation légale « Zero Emission Vehicle » (ZEV) obligeant les marques présentes en Californie à vendre un nombre minimal de voitures zéro-émission a été récemment revue. Le nombre de véhicules PAC demandées a été abaissé à 4 307 (de 25 000 auparavant, il était déjà descendu à 7 500 en 2008), la majorité des véhicules devant être des voitures hybrides rechargeables (CaFCP, 2009).

Au Japon, le programme qui prépare l'entrée des véhicules piles à combustible à hydrogène (« Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration project », JHFC) a été lancé en 2002 par le ministère de l'économie du commerce et de l'industrie (METI), en partenariat avec les principales marques

¹³ Les organisations hybrides de gouvernance peuvent prendre plusieurs formes selon la dépendance et le degré d'autonomie des entités. Ménard (2004) distingue quatre types de configurations : les organisations basées sur la confiance (*trust*) ; le réseau relationnel (*network relation*) ; le leadership ; la gouvernance formelle (*formal government*).

d'automobile japonaises et étrangères (Toyota, Honda, Nissan, Daimler, GM) et quelques entreprises énergétiques (comme Tokyo Gas et Shell). Cela a permis l'ouverture de 12 stations d'hydrogène pour assister la démonstration de 60 voitures à hydrogène.¹⁴ La décision de commercialisation doit être prise vers 2015, loin des premières annonces officielles du début des années 2000 qui prévoyaient 18 millions de voitures pile à combustible pour 2020 (FCCJ, 2008).

La Commission européenne et les industriels prévoient la commercialisation des voitures pile à combustible à partir de 2015 avec un objectif de vente annuelle de 58 000 à 750 000 unités en 2020 et un parc automobile situé entre 0,4 et 1,8 million de voitures à la même date (HFP, 2007). C'est loin de la vision de 2003 qui ambitionnait 2 % des 190 millions de voitures estimés pour 2020, soit 3,8 millions de voitures pile à combustible. La collaboration entre les organismes publics et compagnies privées a évolué vers un programme technologique de promotion des piles à combustible et de l'hydrogène (« *Joint Technology Initiative* » JTI). Ce programme a démarré en 2008 pour une période de 4 ans avec un budget de 1 milliard d'euros – apporté à parties égales par les organismes publics et privés – et l'objectif de déployer sur une large échelle la technologie de la pile à combustible avant 2020.

Selon la feuille de route européenne pour l'hydrogène, une large démonstration doit démarrer après 2010 avec une flotte initiale d'un millier de voitures devant être déployé avant 2015 (HyWays, 2008). La même « roadmap » envisage 400 stations urbaines d'ici 2015, complétées par 500 stations-service sur les principales autoroutes européennes pendant la même période, de manière à créer un « couloir » pour l'hydrogène. Les plans commencent à prendre forme en Allemagne. En septembre 2009, Daimler, Linde, EnBW, OMV, Shell, Total, Vattenfall et l'association nationale pour la promotion de l'hydrogène et piles à combustible (« NOW ») ont lancé l'initiative « *H2 Mobility* » pour le développement de l'infrastructure de l'hydrogène à partir de 2011. Cette collaboration vise à mettre en place des centaines de stations à hydrogène en Allemagne avant 2015 (Daimler, 2009). Cela vient en conséquence de l'accord signé entre les constructeurs automobiles (Daimler, GM, Honda, Toyota, Ford et Hyundai) concernant le lancement des voitures pile à combustible et de l'infrastructure d'hydrogène d'ici 2015 avec un total de quelques centaines de milliers de véhicules commercialisées dans le monde peu de temps après (Fuel Cell Today, 2009h).

Le tableau suivant synthétise les plans de commercialisation des principales régions actives dans l'hydrogène pour les transports.

¹⁴ <http://www.jhfc.jp/e/>

Tableau 4. *Planning de commercialisation des voitures pile à combustible dans le monde*

	2010	2015	2020
Japon		Décision sur le lancement commercial	
Etats-Unis		Décision finale basée sur la concrétisation des objectifs techniques	2 million de voitures ^a
Europe ^b	200 voitures, 13 sites, 9 stations	3 000 voitures, 30 sites	0,4-1,8 million de voitures pour une vente annuelle entre 58 000 et 75 000

^a Nombre maximal de voitures (0,7 % des 280M de voitures) selon le rapport NRC (2008).

^b Selon l' « *Implementation Plan* » (HFP, 2007).

4. Existe-t-il vraiment un verrouillage technologique bloquant la transition vers l'hydrogène ?

En reprenant le schéma initial, la structure incitative est influencée par les institutions existantes ; les organisations investissent continuellement pour rester compétitives en compétences et connaissances qui apportent le rendement maximal. Cet investissement conditionne la perception des acteurs quant aux nouvelles opportunités dans l'avenir, et en même temps, il renforce le cadre institutionnel présent. Ainsi, un verrouillage technique et institutionnel au profit des technologies fossiles existe lorsque la diffusion des technologies propres potentiellement plus compétitives reste bloquée par les technologies conventionnelles.

Dans le domaine des transports, les avancées dépendent dans une large mesure des stratégies des constructeurs automobiles et des entreprises d'énergie telles que les compagnies pétrolières. Les premières sont plus actives que les dernières dans la promotion de l'hydrogène. Les compagnies pétrolières sont au centre de l'actuel paradigme des transports et elles ne sont pas pressées de changer le système. Mais la diffusion des voitures électriques risque de diminuer leur importance au profit des compagnies électriques, ce qui serait moins probable dans le cas d'un changement en faveur de la voiture à hydrogène où le savoir-faire des pétroliers ainsi que leur réseau de distribution pourrait être mieux valorisés. Dans un contexte d'intensification de la concurrence, les constructeurs automobiles peuvent récolter les fruits résultant du fait qu'ils sont les pionniers à lancer un nouveau marché. Ils investissent alors dans le développement et la démonstration de nouvelles technologies telles que les voitures piles à combustible à hydrogène. La crise financière est venue réorienter leurs plans vers les technologies susceptibles d'être déployées à plus court terme. De plus, les incertitudes pesant sur les coûts de la voiture pile à combustible dans le futur et sur la disponibilité de stations-service freinent les ambitions les plus optimistes.

Concernant la pile à combustible, l'existence d'un verrouillage technologique qui bloque son développement paraît peu évident. Actuellement, son utilisation est contrainte par de nombreuses limitations (durabilité, fiabilité, performance) et n'est pas compétitive avec le moteur à combustion. Les estimations les plus crédibles démontrent une baisse des coûts mais sous l'hypothèse draconienne d'une production dépassant 500 000 unités (est-ce que les constructeurs accepteront de supporter le coût des premières unités plus chères ?), ce qui risque de prendre du temps après le

début de la production en série. De plus, la question du stockage de l'hydrogène à bord est loin d'être résolue. L'augmentation du prix du pétrole peut accélérer la transition, mais cela joue également en faveur des autres technologies (biocarburants, hybrides, hybrides rechargeables ou électriques à batterie). En outre, la diffusion des piles dans les applications portables et stationnaires est susceptible d'avoir des retombées positives sur le développement des marchés mobiles.

Même si la nécessité de l'intervention de l'Etat pour lutter contre un *lock-in* technologique – notamment par la création de niches de marché (Kemp *et al.*, 1998) – ne semble pas entièrement fondée, le soutien à la R&D et à l'investissement en apprentissage peut encore se justifier par les perspectives solides de création d'un secteur industriel compétitif à l'exemple de l'éolien danois et allemand (Jacobsson et Johnson, 2000) ou du solaire japonais (Adamson, 2007) dans le passé.

Là où le verrouillage technologique nous semble particulièrement évident, c'est au niveau des infrastructures : leur absence bloque clairement le lancement des voitures à hydrogène dans le marché, même lorsque le différentiel de prix pour la voiture conventionnelle est réduit (Greaker et Heggedal, 2007). La mise en place du réseau de stations-service est très complexe en raison de l'interdépendance des décisions (promoteurs des stations, constructeurs automobiles, usagers), en raison aussi de la complexité de planification des investissements de manière à établir les interconnexions nécessaires pour garantir une certaine liberté d'utilisation de la voiture. Dans ce sens, les développements de la collaboration germanique entre les acteurs publics et privés sont sans doute à suivre avec attention.

5. Conclusions

Le soutien public à la nouvelle filière hydrogène est traditionnellement justifié par l'existence d'un éventuel *lock-in* en faveur des énergies fossiles, qui empêche la transition vers un système technologique plus propre. Cet article a réfléchi aux conditions dans lesquelles une telle argumentation correspond à la réalité.

La transition dépend des actions des agents présents sur le marché. Les acteurs les plus probables d'une économie hydrogène se trouvent aussi au centre du paradigme technologique actuel. Cependant, les incitations à entrer dans le nouveau système technologique ne sont pas les mêmes pour tous les secteurs. Les constructeurs automobiles voient plus d'intérêt à être les premiers dans le nouveau paradigme technologique, alors que les compagnies pétrolières ont plus d'avantages à amortir les investissements existants. En outre, la perspective d'élargir leurs activités peut favoriser l'entrée de nouveaux acteurs comme les entreprises de gaz industriels, les compagnies électriques et gazières.

Enfin, l'argument du coût de la technologie ne peut pas être évoqué en tant que tel pour justifier une intervention publique puisque cela signifierait la substitution du marché par l'Etat avec les risques technologiques et budgétaires connus. En revanche, l'absence des infrastructures soulève des obstacles majeurs à l'investissement des agents dans les nouvelles alternatives au pétrole, dont les bénéfices collectifs sont susceptibles d'être importants.

Références

- Adamson K.-A. (2007), *Stationary Fuel Cells : An Overview*, Elsevier, Oxford.
- Agence internationale de l'énergie (2003), *Transport, Energy and CO2 : Moving Toward Sustainability*, AIE/OCDE, Paris.
- Aoki M. (2007), Endogeneizing Institutions and Institutional Changes, *Journal of Institutional Economics* 3 (1), pp. 1-31.
- Aoki M. (2001), *Toward a Comparative Institutional Analysis*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Arrow K. J. (1962), The Economic Implications of Learning by Doing, *Review of Economic Studies*, 29 (20), pp. 155-173.
- Arthur W. B. (1989), Competing Technologies: Increasing Returns and Lock-in by Historical Events, *The Economic Journal* 99 (1), pp. 116-131.
- Bakker S. (2009), *The car industry and the blow-out of the hydrogen hype*, Innovation Studies Utrecht Working Paper Series 09.14.
- Beuzit P., Meillaud L. (2007), *Hydrogène : L'avenir de la voiture ?*, l'Archipel, Paris, 203 p.
- Campanari S., Rosés L. (2009), Fue cell-based Micro-CHP systems, *Cogeneration and On-Site Power Production*, November-December, pp.36-41.
- Christensen C.M. (1997), *The Innovator's Dilemma*, Harvard Business School Press, Boston.
- Cole K. (2009), Automotive Fuel Cell Update, General Motors, Presentation at the National Hydrogen Association, November 4.
- Conrad K. (2004), Network effects, Compatibility and the Environment: The Case of Hydrogen Powered Cars, Paper presented at the *European Conference of Environmental and Resource Economists*, Bremen.
- Daimler (2009), *Initiative "H2 Mobility" - Major Companies Sign Up to Hydrogen Infrastructure Built-up Plan in Germany* [en ligne], disponible sur : <http://www.daimler.com/dccom/0-5-658451-1-1236356-1-0-0-0-0-8-7145-0-0-0-0-0-0.html> (consulté le 15 novembre 2009).
- David P.A. (1985), Clio and the economics of Qwerty, *American Economic Review*, 75 (2), pp. 332-337.
- Dosi G. (1988), Sources, Procedures and Microeconomic Effects of Innovations, *Journal of Economic Literature*, 36, pp. 1126-1171.
- Dosi G. (1982), Technological paradigms and technological trajectories, *Research Policy*, 11, pp. 147-162.
- Financial Times (2009), Back to Petroleum, 7 July.

- Fuel Cell Commercialization Conference of Japan - FCCJ (2008), Commercialization of fuel cell vehicles and hydrogen stations to commence in 2015, Press Release, July 4.
- Fuel Cell Today (2009a), « GM Lays off 8 Fuel Cell Staff », July 24.
- Fuel Cell Today (2009b), « Toyota unveils advanced fuel cell vehicle », June 6.
- Fuel Cell Today (2009c), « Toyota reiterates its commitment to Fuel Cell Vehicles », Aug. 19.
- Fuel Cell Today (2009d), « 2009 Light Duty Vehicle Survey ».
- Fuel Cell Today (2009e), « 2008 Niche Transport Survey ».
- Fuel Cell Today (2009f), « Small Stationary Survey 2009 ».
- Fuel Cell Today (2009g), « Portable Fuel Cell Survey 2009 ».
- Fuel Cell Today (2009h), « Six major automakers sign MOU encouraging the development of hydrogen infrastructure », Sept. 10.
- Fuel Cell Today (2008), « 2008 Large Stationary Survey ».
- Geels, F. W. (2005), *Technological Transitions and System Innovations: A Co-evolutionary and Socio-Technical Analysis*, Cheltenham : Edward Elgar.
- Greaker H., Heggedal T.R. (2007), *Lock-in and the transition to hydrogen cars: When should governments intervene?*, Discussion paper n° 516, September, Statistics Norway, Research department.
- Gross B.K., Sutherland I.J., Mooiweer H. (2007), *Hydrogen Fueling Infrastructure Assessment*, General Motors Corporation, Research & Development Center, R&D-11.065, December.
- Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat-GIEC (2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*, 10th Session of Working Group I (WG I), Paris, February, disponible sur : <http://www.ipcc.ch>.
- Grübler A. (1999), *The Rise and Fall of Infrastructures*, Physica-Verlag, Heidelberg.
- Hughes T.J. (1983), *Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930*, John Hopkins University Press, Baltimore and London.
- Hydrogen and Fuel Cell Platform - HFP (2007), *Implementation Plan – Status 2006* [en ligne], The European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform, disponible sur : <https://www.hfpeurope.org>
- HyWays (2008), *The European Hydrogen Energy Roadmap*, Final Report [en ligne], February, disponible sur : <http://www.hyways.de>
- Jacobsson S., Johnson A. (2000), The diffusion of renewable energy technology : an analytical framework and key issues for research , *Energy Policy*, 28, pp. 625-640.

Kemp R. (1997), *Environmental Policy and Technical Change – A Comparison of the Technological Impact of Policy Instruments*, Edward Elgar, Cheltenham.

Melaina M.W. (2007), Turn of the century refueling: A review of innovations in early gasoline refueling methods and analogies for hydrogen, *Energy Policy*, 33, pp. 4919-4934.

Ménard C. (2004), The Economics of Hybrid Organizations, *Journal of Institutional and Theoretical Economics* 160(3), pp. 345-376.

Murphy L.M, Edwards P.L. (2003), *Bridging the Valley of Death: Transitioning from Public to Private Sector Financing*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.

National Research Council – NRC (2008), *Transitions to Alternative Transportation Technologies: A Focus on Hydrogen*, Committee on Assessment of Resource Needs for Fuel Cell and Hydrogen Technologies, The National Academies Press, Washington, DC.

North D.C. (2005), *Le processus du développement économique*, Ed. d'Organisation, Paris.

North D.C. (1991), Institutions, *Journal of Economic Perspectives*, 5(1), winter, pp. 97-112.

North D.C. (1990), *Institutions, Institutional Change and Economic Performance*, Cambridge University Press.

Reuters (1997), « Daimler-Benz fuels alternative energy hopes », Oct. 22.

Roads2HyCom (2009), « Fuel Cells and Hydrogen in a Sustainable Energy Economy: Final Report of the Roads2HyCom Project », April, R2H8500PU.6.

Roads2HyCom (2007), European Hydrogen Infrastructure Atlas [and] Industrial Excess Hydrogen Analysis, PART II: *Industrial surplus hydrogen and markets and production*, Deliverable 2.1 and 2.1a, R2H2006PU.1, March, disponible sur : www.Roads2HyCom.com

Romm J. (2004), *The Hype About Hydrogen – Fact and Fiction in the Race to Save the Climate*, Island Press.

Schäfer A., Heywood J.B., Weiss M.A. (2006), Future fuel cell and internal combustion engine automobile technologies: A 25-year life cycle and fleet impact assessment, *Energy*, 31, pp. 2064-2087.

Sperling D., Gordon D. (2008), Advanced Passenger Transport Technologies, *Annual Review of Environment and Resources*, 33, pp. 63-84.

Simon H.A. (1959), Theories of Decision-Making in Economics and Behavioral Science, *American Economic Review*, 49 (1), pp. 253-283.

Solomon B.D., Banerjee A. (2006), A Global Survey of Hydrogen Energy Research, Development and Policy, *Energy Policy*, 34, pp. 781-792.

Suurs A.A., Hekkert M.P., Smits R.E.H.M. (2009), *Understanding the build-up of a technological innovation systems around Hydrogen and Fuel Cell Technologies*, University of Utrecht, ISU Working Paper n°09.10

U.S. Department of Energy - DOE (2009), *Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan: Technical Plan – Technological Validation*, [en ligne], Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Washington, D.C.,
disponible sur : <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/mypp> .

Unruh G.C. (2002), Escaping carbon lock in, *Energy Policy*, 30, pp. 317-325.

Unruh G.C. (2000), Understanding carbon lock-in, *Energy Policy*, 28, pp. 817-830.

Van Benthem, Kramer G.J., Ramer R. (2006), An options approach to investment in a hydrogen infrastructure, *Energy Policy*, 34, pp. 2949-2963.

Ward W.H. (1967), The sailing ship effect, *Bulletin of the Institute of Physics and Physical Society*, 18, 169.

Williamson O.E. (2005), The Economics of Governance, *American Economic Review*, (95) 2, pp. 1-18.

Williamson O.E. (1985), *The Economic Institutions of the Capitalism*, New York: The Free Press.

World Business Council for Sustainable Development - WBCSD (2004), *Mobility 2030: Meeting the Challenges to Sustainability*, [en ligne], The Sustainable Mobility Project 2004, disponible sur : <http://www.wbcscd.ch>