



HAL
open science

La transition vers une économie de l'hydrogène : infrastructures et changement technique

Nuno Bento

► **To cite this version:**

Nuno Bento. La transition vers une économie de l'hydrogène : infrastructures et changement technique. Economies et finances. Université Pierre Mendès-France - Grenoble II, 2010. Français. NNT : . tel-00463857

HAL Id: tel-00463857

<https://theses.hal.science/tel-00463857>

Submitted on 15 Mar 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

U.F.R. ECONOMIE, STRATEGIES, ENTREPRISE

Thèse de Doctorat *es* Sciences Economiques

Nuno Bento

**LA TRANSITION VERS UNE ECONOMIE DE L'HYDROGENE :
INFRASTRUCTURES ET CHANGEMENT TECHNIQUE**

Thèse dirigée par Jean-Pierre Angelier

Soutenue le 12 mars 2010

LEPII

Laboratoire d'Economie de la Production et de l'Intégration Internationale

Jury :

Directeur de thèse	Jean-Pierre Angelier <i>Professeur Agrégé des Universités, Université de Grenoble</i>
Rapporteurs	Isabel Soares <i>Professor Catedratico, Faculdade de Economia do Porto</i>
	Jacques Percebois <i>Professeur Agrégé des Universités, Université de Montpellier 1</i>
Suffragant	Patrick Criqui <i>Directeur de Recherches au CNRS, Université de Grenoble</i>

“ La Faculté n’entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse ; ces opinions doivent être considérées comme propre à leur auteur ».

AVEC LE CONCOURS FINANCIER DE LA REGION RHONE ALPES

Rhône-Alpes Région

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord *Jean-Pierre Angelier* pour son accompagnement motivant, pour ses remarques qui ont toujours été très pertinentes afin de faciliter l'avancement du travail et pour sa patience lors de la relecture finale du manuscrit.

Patrick Criqui pour m'avoir initié à la problématique de l'hydrogène ainsi que pour m'avoir offert des conditions de travail très favorables à la concrétisation de cette thèse.

Isabel Soares et *Jacques Percebois* pour avoir accepté de lire et d'évaluer le fruit de mes recherches.

Bernard Gerbier pour m'avoir ouvert la porte du Master Economie Internationale et Stratégie d'Acteurs, qui a été à la base de cette thèse.

Joan Ogden pour l'accueil ouvert et généreux qu'elle m'a offert à l'*Institute of Transportation Studies*, University of California Davis, ainsi que toute l'équipe de cet institut pour les nombreux échanges très enrichissants.

Les membres de l'équipe du laboratoire LEPII-CNRS pour les discussions très fructueuses pour l'avancement de la thèse, tout particulièrement *Danièle Revel, Michel Damian, Philippe Menanteau, Sadek Boussena, Cédric Clastres, Silvana Mima et Catherine Locatelli*.

Mes amis pour leur soutien durant les moments les plus difficiles, en particulier Janet Roche, David McCollum, Lindsay McCollum, Ricardo Frederico Silva, Miguel Silveira, Miriam Perez et Núria Cíncas.

Enfin, *Sylvain Rossiaud, Sergiy Chukhno et Simon Guidecoq*, qui combinent le statut de collègues et d'amis et qui ont contribué à l'achèvement de ce travail.

A toute ma famille et à Susana qui m'ont toujours soutenu et qui ont souffert des longues périodes d'absence de ma part motivées par cette recherche. Et à tous ceux qui ont offert leur grande amitié.

Bien évidemment, je reste le seul responsable de toutes les erreurs que comporterait ce document.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
PREMIERE PARTIE. LE DEVELOPPEMENT DES INFRASTRUCTURES NECESSAIRES A L'ECONOMIE DE L'HYDROGENE.....	31
CHAPITRE 1. L'ECONOMIE DE L'HYDROGENE : CLE DE L'AVENIR OU REVE D'INGENIEUR ?	35
CHAPITRE 2. ANALYSE PROSPECTIVE DE LA MISE EN PLACE DES INFRASTRUCTURES POUR L'HYDROGENE A PARTIR DES EXEMPLES HISTORIQUES DE L'ELECTRICITE ET DU GAZ NATUREL	107
CHAPITRE 3. LES INCERTITUDES RELATIVES A L'INVESTISSEMENT EN INFRASTRUCTURE DE DISTRIBUTION DE L'HYDROGENE POUR LES TRANSPORTS : L'IMPORTANCE DE LA DEMANDE.....	159
DEUXIEME PARTIE. LES BARRIERES A LA DIFFUSION DE L'HYDROGENE ET DES PILES A COMBUSTIBLE SUR LE MARCHE.....	191
CHAPITRE 4. L'EMERGENCE DE TECHNOLOGIES DE RUPTURE EN PRESENCE D'UN VERROUILLAGE SUR LE PETROLE.....	195
CHAPITRE 5. STRATEGIES DE SOUTIEN A LA TRANSITION TECHNOLOGIQUE VERS L'ECONOMIE DE L'HYDROGENE.....	263
CHAPITRE 6. DYNAMIQUE DE DIFFUSION DE L'HYDROGENE ET CONCURRENCE TECHNOLOGIQUE SUR LE MARCHE DE L'AUTOMOBILE	323
CONCLUSION GENERALE	359
ANNEXES.....	365
BIBLIOGRAPHIE.....	369
Liste des tableaux, graphiques et encadres.....	401
TABLE DES MATIERES	407

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

AFC: Alkaline Fuel Cell (pile à combustible alcaline)
AIE : Agence Internationale de l'Energie
APU : Auxiliary Power Unit (Unité auxiliaire de génération)
ATR : Autothermal reforming (reformage autothermique)
CaFCP: California Fuel Cell Partnership
CCS : Carbon Capture and Sequestration (Capture et séquestration du carbone)
CH₂ : Hydrogène comprimé
CH₄ : Méthane
CO : Monoxyde de carbone
CO₂: Dioxyde de carbone
DMFC: Direct Methanol Fuel Cell (pile à combustible à méthanol)
DOE: Department of Energy (Ministère américain de l'énergie)
EIA : United States Energy Information Administration
EV : Electric vehicle (voiture à batterie « toute électrique »)
FCV : Fuel Cell Vehicle (voiture PAC)
GES : Gaz à effet de serre
GIEC: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (en anglais IPCC International Panel on Climate Change)
GNL : Gaz naturel liquéfié
H₂ – ICE : Hydrogen in Internal Combustion Engine (Moteur à explosion à hydrogène ou « hydrogène thermique »)
H₂ : Hydrogène
H₂O : Eau
HEV : Hybrid electric vehicle (voiture électrique hybride)
HPAC : Pile à combustible à hydrogène (ou en anglais *HFC : Hydrogen Fuel Cell*)
IGCC : Integrated Gasification Combined Cycle (Cycle combiné à gazéification intégrée)
IPHE: International Partnership for the Hydrogen Economy
LH₂ : Hydrogène liquide
MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell (pile à combustible à carbonates fondus)
METI: Ministry of Economy, Trade and Industry (Ministère japonais de l'économie, commerce et industrie)
NO_x : Oxydes d'azote
OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques
OPEP : Organisation des pays exportateurs de pétrole
PAC: Pile à combustible
PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell (pile à combustible à acide phosphorique)
PCI : Pouvoir calorifique inférieur
PCS : Pouvoir calorifique supérieur

PEMFC: Proton Exchange Membrane Fuel Cell (pile à combustible à acide polymère)
PHEV : plug-in hybride electric vehicle (voiture électrique hybride rechargeable)
PIB : Produit Intérieur Brut
POX : Partial oxydation (oxydation partielle d'énergies fossiles)
R&D : Recherche et développement
SMR : Steam methane reformer (vaporeformage de méthane)
SO₂ : Dioxyde de soufre
SOFC: Solid Oxide Fuel Cell (pile à combustible à oxyde solide)
TVA : Taxe sur la valeur ajoutée
UE : Union Européenne
VAN: Valeur Actualisée Net

INTRODUCTION GENERALE

*« Et le blanc liséré fut d'île en continent,
Vive clarté courant jusqu'aux confins du monde,
Alors on vit la terre entière, tout soudain,
Surgir, bien ronde, des profondeurs de l'azur. »*

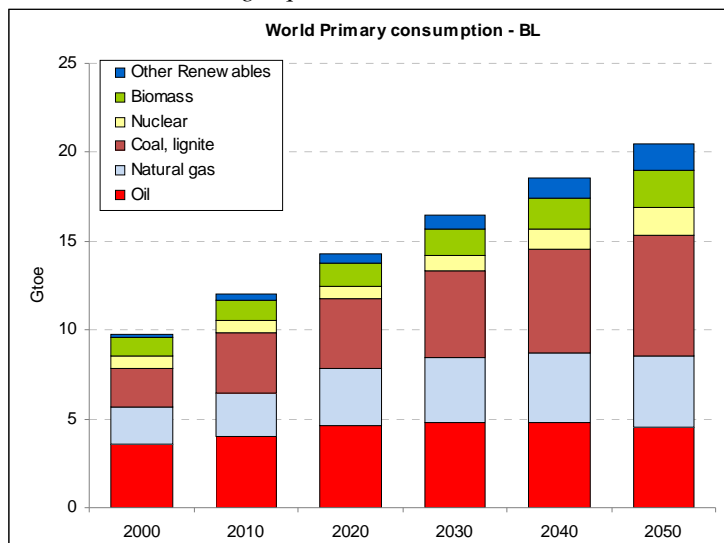
Fernando Pessoa (*Message, L'Infant, 1934*)

*« Oui, mes amis, je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la
constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d'une
intensité que la houille ne saurait avoir. »*

Jules Verne (*L'île mystérieuse, 1874*)

Le système énergétique actuel est loin de pouvoir être considéré comme soutenable. Il est très dépendant des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) lesquelles comptent pour plus de 80% du mix énergétique primaire (AIE, 2008a). La croissance économique, et celle de la population dans les pays en développement tels que la Chine, l'Inde ou le Brésil, engendrent une augmentation importante de la demande énergétique. Ainsi, la consommation énergétique mondiale devrait doubler d'ici 2050 (graphique 1). Malgré l'augmentation de la part de l'énergie renouvelable et nucléaire dans le mix énergétique, celle-ci ne sera pas suffisante pour contrecarrer la domination des énergies fossiles. La production pétrolière doit atteindre un maximum avant 2030 et l'exploitation des pétroles non conventionnels repousse le « peak oil » d'une dizaine d'années seulement (Criqui et Mima, 2009). La part du charbon doit augmenter pour compenser la diminution de la production de pétrole, ce qui contribue à l'augmentation des émissions annuelles de dioxyde de carbone - principal gaz à effet de serre (GES). Ces émissions devraient doubler d'ici 2050 et, par voie de conséquence, amener la concentration de GES dans l'atmosphère à dépasser le seuil des 500 parts de molécules par million de molécules d'air sec (ppm), ce qui peut entraîner des conséquences drastiques pour le climat (GIEC, 2007a). Cette augmentation serait due principalement au secteur industriel et, dans une moindre mesure, au secteur des transports. La part de ce dernier est toutefois croissante d'ici 2050, et la dépendance des transports aux énergies fossiles rend très difficile la réduction des émissions dans ce secteur.

Graphique 1. La consommation énergétique mondiale à l'horizon 2050

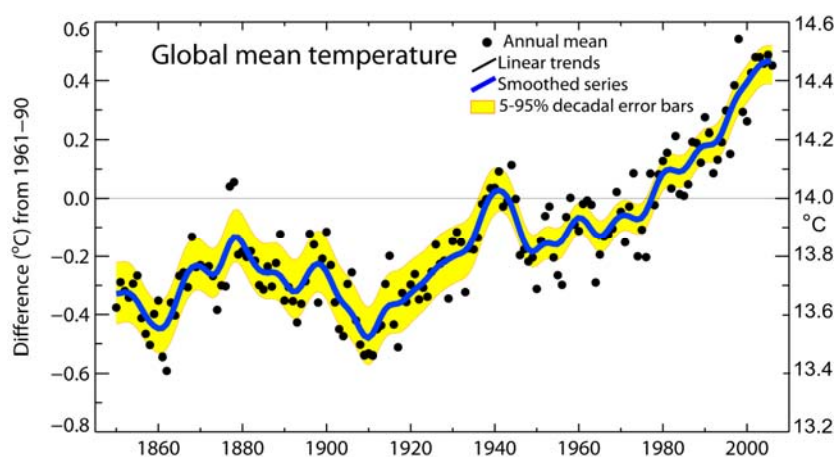


Source: Criqui et Mima, 2009.

L'accélération inéluctable du phénomène de changement climatique

Le quatrième rapport d'évaluation du groupe international d'études du Climat (GIEC)¹ présente le résultat d'un ensemble d'analyses réalisées sur l'évolution du climat. Il met en évidence le fait que le réchauffement climatique est un phénomène indubitable, et que le rôle de l'activité humaine contribue à ce phénomène.² Le réchauffement du climat a été particulièrement important pendant les 50 dernières années et il est sans précédent dans l'histoire de la Terre, du moins au cours des 1300 dernières années.

Graphique 2. L'augmentation de la température moyenne depuis la révolution industrielle



Source : GIEC, 2007a : WG1-AR4.

Les concentrations globales de dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄) et oxyde nitreux (N₂O) ont beaucoup augmenté depuis le début des révolutions industrielles. Le CO₂ est le plus important des

¹ Le 4ème Rapport d'évaluation du 1er Groupe de travail, désormais référencié comme GIEC : WG1-AR4.

² Pour une rétrospective des Rapports d'évaluation du GIEC : Criqui, P. (2007), « Climat : l'Europe donne le cap », Telos - Agence Intellectuelle, 19 juin, http://www.telos-eu.com/2007/06/climat_leurope_donne_le_cap-print.php

gaz à effet de serre. Sa concentration dans l'atmosphère – mesurée en parts de molécules de CO₂ équivalent (CO₂eq) par million de molécules d'air sec (ppm) – est passée de 280 ppm avant la révolution industrielle à 379 ppm de CO₂eq en 2005. L'utilisation des combustibles fossiles est la cause principale de cette augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, alors que l'activité agricole est surtout à l'origine de l'augmentation des concentrations de CH₄ et N₂O dans l'atmosphère. Le rapport souligne, avec *un degré de confiance très élevé* (very likely)³, que les émissions anthropiques (résultant de l'activité humaine) sont à la base du réchauffement global de la planète.⁴ De surcroît, le problème est aggravé par la longue durée de permanence des GES dans l'atmosphère (p.ex. une décennie environ pour le CO₂).

Selon les analyses du GIEC, le doublement des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère prévu pour le milieu du siècle entraîne - avec une très forte probabilité - l'élévation de la température moyenne dans une fourchette de 2°C à 4,5°C (plus probablement 3°C) au dessus de la moyenne de la période préindustrielle. Il s'agit d'un indicateur mettant en évidence l'imminence du bouleversement climatique si rien n'est fait pour contrer la tendance d'augmentation des émissions. Par ailleurs, le rapport du groupe de travail III (Mesures d'atténuation ou mitigation) a mesuré l'effort nécessaire pour stabiliser la concentration de GES dans l'atmosphère entre 445 et 490 ppm afin de limiter l'augmentation des températures à **2-2,4°C** au dessus de la moyenne préindustrielle. Pour cela, il faut que les émissions annuelles atteignent un maximum avant 2015 et qu'elles décroissent ensuite d'un niveau de **50%-85%** en 2050 par rapport aux niveaux de 2000 (GIEC, 2007b).

Les coûts économiques du changement climatique

Le rapport Stern (2006) se propose de calculer les « *coûts de la non-action* » et les compare aux coûts de la réduction des émissions de GES. Pour cela, il part des études du GIEC à propos des impacts physiques de l'effet de serre sur l'économie, l'écosystème et l'environnement, pour estimer les coûts économiques du phénomène, ainsi que les coûts de la transition vers une économie « décarbonée ».

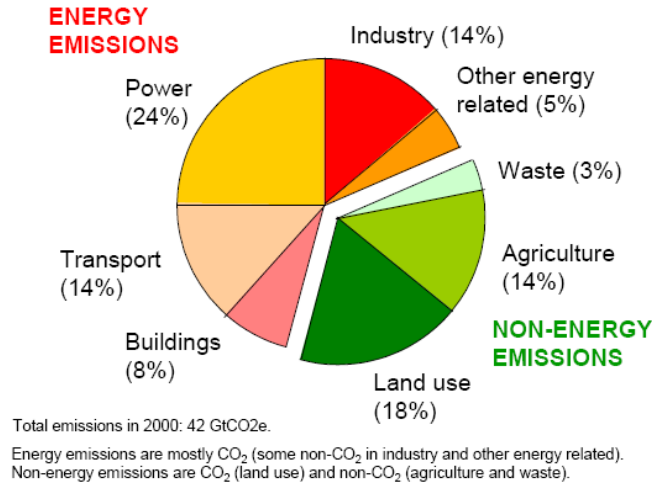
Le rapport s'appuie sur les résultats du modèle PAGE2002 lequel mesure l'impact du réchauffement climatique sur l'économie mondiale. Ainsi, les émissions de GES associées au scénario « fil de l'eau » du GIEC seraient responsables d'une diminution forte de la qualité de vie moyenne mondiale - mesurée par le niveau de consommation annuel per capita équivalent au produit intérieur brut (PIB) mondial - de 5% dans les deux siècles à venir. Cette baisse peut aller jusqu'à 20% - ou même au-delà - si le calcul prend en compte les impacts hors marché sur l'environnement et la santé humaine, le risque des impacts amplifiés de l'effet de serre et la disproportion des coûts entre les régions riches et pauvres.

³ Les estimations du GIEC sont présentées avec un degré de probabilité accordée par le jugement des experts impliqués qui sert en même temps de mesure du degré de l'unanimité de la décision. Le classement évolue comme se suit : « *Virtually certain* > 99% probability of occurrence, *Extremely likely* > 95%, *Very likely* > 90%, *Likely* > 66%, *More likely than not* > 50%, *Unlikely* < 33%, *Very unlikely* < 10%, *Extremely unlikely* < 5%. » (GIEC, 2007, WG I, p. 3)

⁴ «Most of the observed increase in globally averaged temperatures since the mid-20th century is very likely due to the observed increase in anthropogenic greenhouse gas concentrations. This is an advance since the TAR's conclusion that "most of the observed warming over the last 50 years is likely to have been due to the increase in greenhouse gas concentrations". Discernible human influences now extend to other aspects of climate, including ocean warming, continental-average temperatures, temperature extremes and wind patterns.» (GIEC, 2007)

Une réduction drastique des émissions de GES dans tous les secteurs doit être réalisée à court terme. (La répartition des émissions mondiales de GES par secteur est présentée dans le graphique ci-dessous).

Graphique 3. Répartition des émissions mondiales de GES par secteur



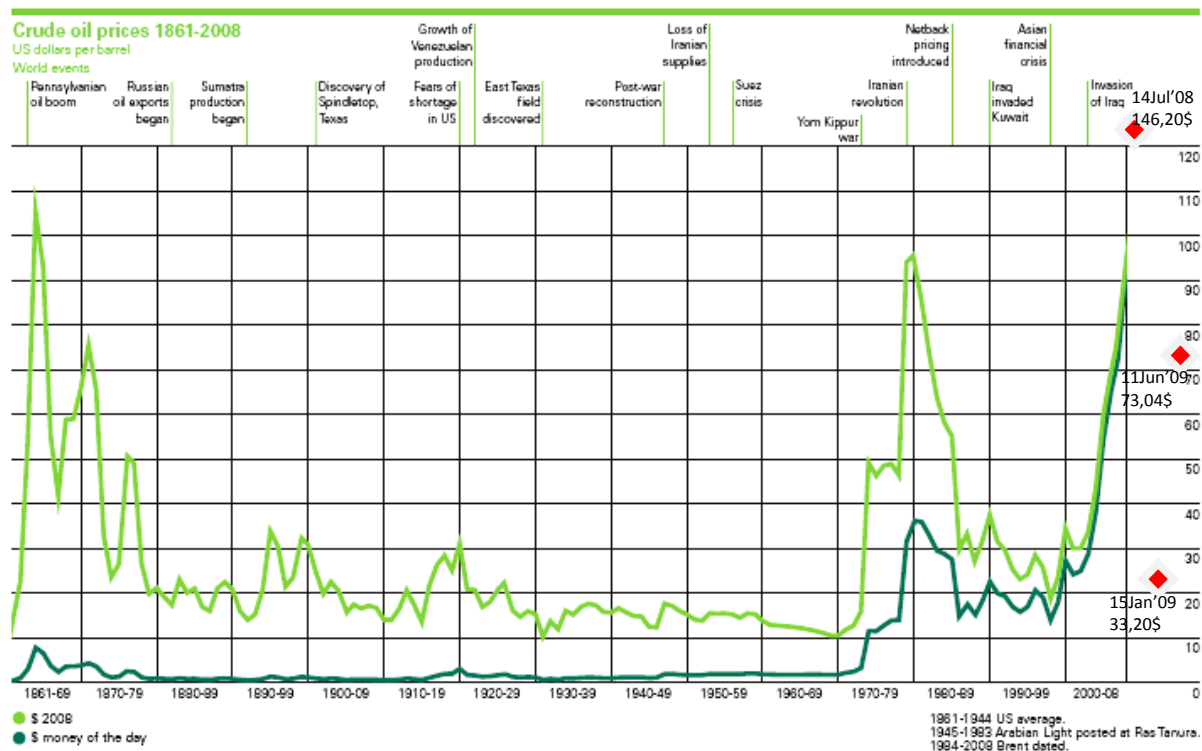
Source : Stern Review, p. iv, à partir de « World Resources Institute Climate Analysis Indicators Tool », version 3.0.

En 2000, les émissions d'origine énergétique ont représenté deux tiers du total d'émissions de GES. Les secteurs les plus émetteurs ont été la production d'électricité (24%), les transports et l'industrie (14% chacun). L'augmentation prévue de la consommation énergétique dans les transports ainsi que la dépendance de ces derniers à l'égard du pétrole constituent l'un des obstacles majeurs à une réduction drastique des émissions.

Le problème de la dépendance des transports vis-à-vis du pétrole. Contexte et enjeux

Le pétrole a été longtemps considéré comme une matière première abondante et bon marché. Les carburants pétroliers ont une concentration énergétique très élevée et leur transport est très aisé, ce qui les rend spécialement adaptés pour les transports (routier, maritime, aérien, ferroviaire). La diffusion spectaculaire des transports tout au long du XXe siècle (en particulier la mobilité des personnes), a entraîné une augmentation de la consommation de pétrole. Toutefois cette tendance ne peut pas être durable à moyen et long termes. D'une part, les ressources fossiles ont besoin de milliers d'années pour renouveler les stocks : leur production est limitée par la dotation physique de la planète ainsi que par la possibilité d'extraction à des conditions techniques et économiques raisonnables. D'autre part, la combustion de carburants fossiles dégage d'importantes quantités de gaz polluants qui renforcent le problème du changement climatique (p.ex. dioxyde de carbone) ou augmentent la pollution de l'air atmosphérique (p.ex. oxyde d'azote, monoxyde de carbone).

Graphique 4. La reprise de la volatilité des cours du pétrole



Source : BP, *Statistical Review* 2009.

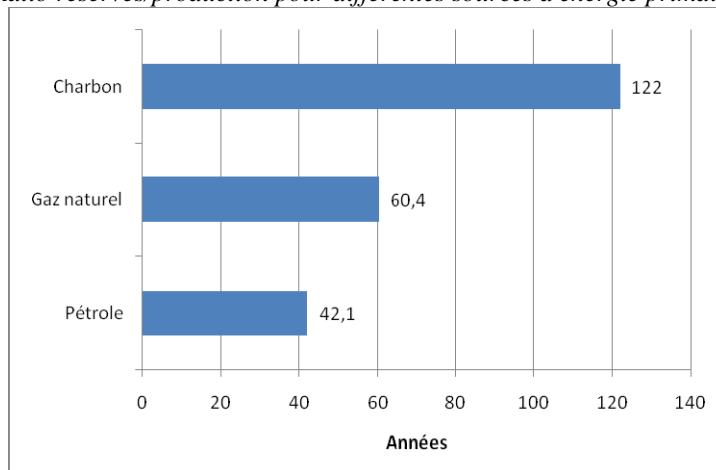
L'instabilité a été une des caractéristiques de l'industrie pétrolière dès son origine. En effet, la concurrence entre les producteurs pour la récupération de la plus grande quantité possible de pétrole et l'arrivée de nouveaux producteurs sur le marché ne permettait pas un rythme optimal de production, d'où plusieurs crises de surproduction. Yergin (1991) qualifie les premières années de l'industrie pétrolière de « boom and bust » (expansion et récession) marquées par une très forte volatilité des prix.

La volatilité a récemment repris après une longue période de stabilité des prix. Entre juillet 2008 et janvier 2009, le pétrole est passé de 146,20\$ à 33,20\$ pour ensuite rebondir et atteindre 73,04\$ en Juin 2009. L'instabilité de prix affecte la mise en place des investissements nécessaires à l'industrie pétrolière pour renouveler la production et faire face à l'augmentation prévisible de la demande (Percebois, 1989). Elle a également un impact sur le développement des alternatives technologiques au pétrole.

D'une manière générale, les grandes baisses de prix ont été associées à des craintes quant à l'évolution de la demande de pétrole (en raison par exemple d'une crise économique). Les fortes augmentations du prix du pétrole sont plutôt expliquées par le double effet de l'augmentation de la consommation et des insuffisances de l'offre, lesquels sont amplifiés par l'action de la spéculation. Le ratio réserves sur production est un indicateur de la disponibilité de la ressource à la fin de chaque année.⁵ Le graphique suivant compare les valeurs de ce ratio pour le pétrole, gaz naturel et charbon.

⁵ Il s'agit d'un indicateur d'épuisement de la ressource moins controversé que les prévisions du pic de production réalisées par la l'Association internationale pour l'étude du pic de pétrole ('Association for the Study of the Peak Oil' – ASPO) lesquelles s'efforcent de montrer que le monde est en train de passer le pic pétrolier. « *Despite the uncertainties of detail, it is now evident that the world faces the dawn of the Second Half of the Age*

Graphique 5. Ratio réserves/production pour différentes sources d'énergie primaire

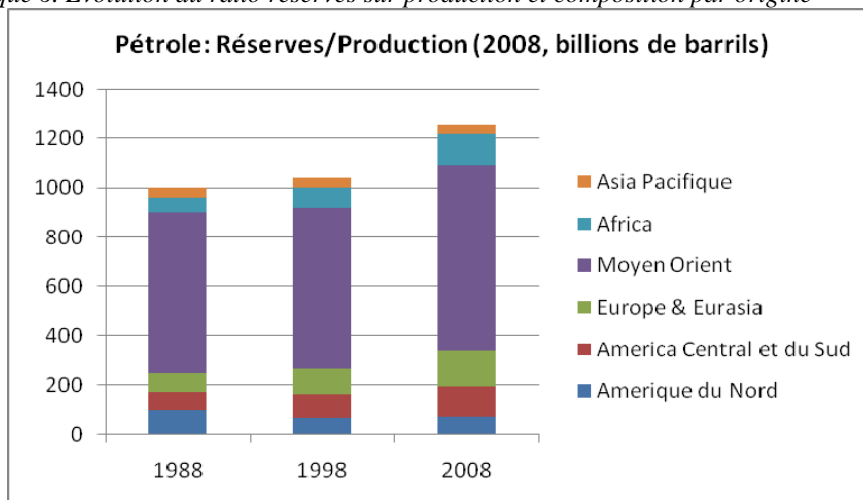


Source : BP, *Statistical Review 2009*.

BP définit les réserves prouvées comme les quantités pour lesquelles l'information géologique et technique disponible des gisements permet de conclure avec une certitude raisonnable que la récupération des ressources dans le futur est possible aux conditions économiques et techniques actuelles. Le ratio réserves sur production (R/P) est calculé par la division des réserves restantes en fin d'année par la production de l'année. Le résultat exprime le nombre d'années pendant lesquelles il est encore possible d'exploiter les réserves restantes au rythme actuel de production.

Les réserves prouvées de pétrole permettent encore 42 ans environ de consommation au rythme actuel de production, alors que ce ratio est de 60 ans pour le gaz et de 122 pour le charbon. Ainsi, l'information disponible permet de conclure que le pétrole est en train de devenir une matière rare. Toutefois les résultats de cette analyse sont à considérer avec prudence car, d'une part, toutes choses égales par ailleurs, l'augmentation de la demande diminue le ratio, et d'autre part, les conditions économiques et les innovations techniques peuvent créer des incitations favorables au remplacement des réserves, ce qui maintient, voire augmente, le ratio (graphique 6).

Graphique 6. Evolution du ratio réserves sur production et composition par origine



Source : BP, *Statistical Review 2009*.

of Oil, when this critical commodity, which plays such a fundamental part in the modern economy, heads into decline due to natural depletion. A debate rages over the precise date of peak, but rather misses the point, when what matters — and matters greatly — is the vision of the long remorseless decline that comes into sight on the other side of it. The transition to decline threatens to be a time of great international tension.” (Campbell C.J. in <http://www.peakoil.net/about-peak-oil> accédé le 17 juillet 2009).

Depuis les années 1980, la production de pétrole a évolué à un rythme supérieur à celui des nouvelles découvertes (AIE, 2008a). En effet, l'augmentation des réserves doit plus à l'avance technologique qu'à la découverte de nouveaux gisements. Aussi, l'augmentation du nombre de découvertes de pétrole en mer profonde où les conditions de production sont plus difficiles témoigne des difficultés croissantes pour trouver de nouveaux gisements à terre.

L'ère du pétrole bon marché semble ainsi s'essouffler. La production de pétrole devient plus chère au fur et à mesure que les nouveaux gisements, dont la production est plus coûteuse, remplacent les anciens, arrivés en fin de vie.

De plus, les réserves de pétrole sont concentrées sur certaines zones géographiques, en particulier dans des régions politiquement instables du Moyen Orient, Afrique, Eurasie et Amérique Latine. Et les principaux pays producteurs sont organisés en un cartel disposant des deux tiers des réserves mondiales et qui contrôle l'approvisionnement de 40% du marché mondial (AIE, 2008a).

La vulnérabilité énergétique d'un pays a été définie par Percebois (2006) « *comme une situation dans laquelle ce pays n'est pas en mesure de faire des choix de politique énergétique librement consentis ou de le faire à un coût économique ou politique collectivement insupportable.* » Cette définition est plus large que celle de la dépendance énergétique.

La dépendance au pétrole rend les pays consommateurs vulnérables à l'évolution sociopolitique dans les régions productrices, ce qui engendre des tensions géopolitiques au niveau international comme par exemple la guerre en Irak. L'Europe est tout à fait concernée par ce problème puisqu'elle est de plus en plus dépendante des importations énergétiques – en particulier de pétrole - en raison d'une baisse de la production interne. Le tableau 1 compare la dépendance européenne vis-à-vis des importations de plusieurs énergies en 2006.

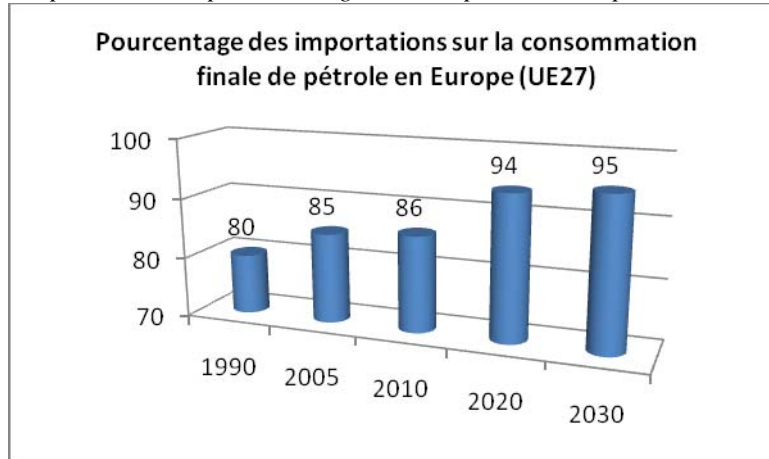
Tableau 1. Dépendance européenne aux importations énergétiques en 2008 (en %)

	Combustibles solides	Pétrole	Gaz
UE27	43,1	84,9	61,2

Source : BP, *Statistical Review* 2009.

Les pays Européens (UE27) sont dépendants des importations de pétrole à 84,9%, plus que pour toutes les autres sources d'énergie comme le gaz naturel (61,2%) ou les combustibles solides (le charbon essentiellement) dont la production interne approvisionne une plus grosse partie de la consommation. La part des importations de pétrole doit continuer à progresser jusqu'à atteindre 95% en 2030 (graphique 7).

Graphique 7. Dépendance européenne à l'égard des importations de pétrole, 1990-2030

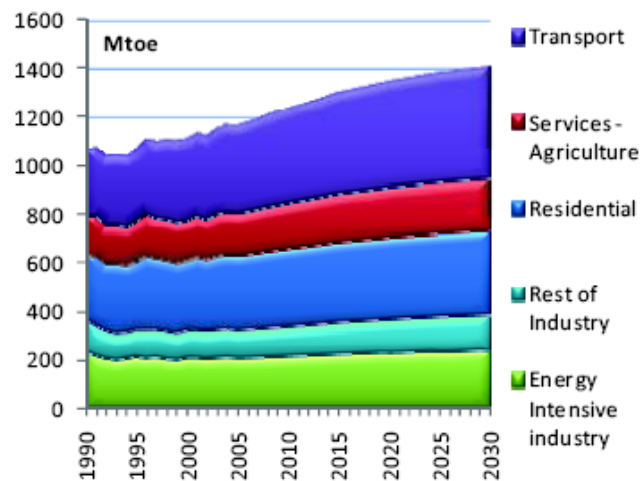


Source : Commission Européenne, DG Tren, Trends to 2030, 2008.

Le pétrole représente 40,65% de l'énergie consommée en Europe (UE27) en 2008 (BP, 2009). En 2006, les principaux fournisseurs de pétrole de l'Europe ont été la Russie (33,5%), la Norvège (15,8%), la Libye (9,4%), l'Arabie Saoudite (9,0%) et l'Iran (6,4%) (Eurostat, 2008). La part de la Norvège diminue depuis quelques années ; à l'inverse, la Russie a augmenté sa part depuis le début des années 2000.

Le secteur des transports est le plus grand consommateur de produits pétroliers, comptant pour 60% de la consommation finale de pétrole en 2005 (52,7% en 1990) (Eurostat, 2008). Ce secteur est également le deuxième plus grand consommateur d'énergie finale en Europe avec le tiers environ (31,4%) de l'énergie finale, contre 21% en 1990. Le graphique suivant présente les prévisions de l'évolution de la consommation énergétique en Europe à l'horizon 2030.

Graphique 8. Consommation finale d'énergie en Europe (UE27) par secteur, 1990-2030



Source : Commission Européenne, DG Tren – Trends to 2030, 2008.

La consommation finale d'énergie en Europe doit augmenter de 20,5% entre 2005 et 2030. La plus forte augmentation (28%) est attendue dans le secteur des transports ; ce qui doit amener à 33% la part du secteur dans la consommation finale.

Le transport routier est de loin le plus important mode de transport avec 82% de la consommation énergétique dans le secteur en 2005 (55,9% consommé par les voitures individuelles). De plus, le

transport routier est dépendant des carburants fossiles à plus de 98% en Europe. Ainsi, si rien n'est fait pour contrarier cette tendance, la croissance de la demande dans les transports devrait nécessairement induire l'augmentation des importations de pétrole et des émissions polluantes.⁶

Entre-temps, la demande mondiale d'automobiles devrait être multipliée par trois d'ici 2050 en raison de l'augmentation dans les pays en développement tels que la Chine et l'Inde (WBCSD, 2004). La poursuite de cette tendance risque de ne pas être soutenable étant donnés les ressources existantes et les impacts environnementaux. Ainsi, il sera indispensable que l'inéluctable augmentation du parc automobile mondial soit compensée par une forte diminution de la consommation et des émissions des véhicules.

L'augmentation de la demande pour les transports et ses impacts sur les émissions de GES et sur la qualité de vie dans les villes

Actuellement, le transport routier repose quasi-exclusivement sur la technologie du moteur à combustion interne utilisant des carburants fossiles. Bien que plus économique, la combustion de carburants fossiles dans les transports est à la base d'importants dégâts pour la santé humaine et pour l'environnement, en raison des émissions polluantes et de gaz à effet de serre.

Le secteur des transports a été responsable de 26,6% des émissions de gaz à effet de serre dans les 27 pays de l'Union Européenne (UE-27) en 2005. Si les transports avaient suivi la même tendance que celle des autres secteurs pendant la période 1990-2005, les émissions auraient été réduites de 14% au lieu des 7,9% observés (AEE, 2008). En effet, l'augmentation des émissions dans ce secteur durant cette période a contrebalancé la diminution dans les autres secteurs, en particulier dans l'industrie (20% des émissions en 2050).

Les émissions de gaz à effet de serre en Europe doivent augmenter de 206 millions de tonnes (+5,1%) en 2020 par rapport à 1990 (Commission Européenne, 2008). Le principal responsable de cette augmentation est le secteur des transports (+403 millions de tonnes) suivi par celui de la production d'électricité (+84 million de tonnes). Cela contraste avec l'objectif européen de réduction des émissions de GES de 20% (ou 30% en cas d'accord international). La croissance de la demande des transports a aussi d'autres impacts sur la qualité de vie des citoyens dans les villes.

En outre, les transports routiers rejettent des gaz polluants tels que particules, ozone ou substances acides, responsables de la dégradation de la qualité de l'air dans les villes. Au sein de l'UE-27, le nombre de décès dus aux niveaux élevés de pollution a été estimé à 4 millions par an (AEE, 2008).

Le rapport de l'INFRAS (2004) estime les coûts externes des transports à 7% du produit intérieur brut (PIB) des 17 pays de l'Union Européenne (UE-17). Cette estimation comprend les coûts en termes de pollution de l'air local, de bruit, d'accidents et de contribution au changement climatique. A cela s'ajoutent les coûts économiques de la congestion, – mesurés par les effets sur la production et l'emploi –, qui ont été estimés à 3% du PIB de l'UE-17. En bref, le transport routier est responsable de 80% des coûts externes des transports.

⁶ Notamment du fait de l'inertie qui caractérise le remplacement du parc automobile.

Faits marquants de la politique européenne de l'environnement et des transports

L'Europe a choisi d'anticiper la mise en œuvre du marché de permis d'émissions prévu par le protocole de Kyoto, à partir du 1er janvier 2005. La Directive européenne pour « **l'échange des droits d'émission de gaz à effet de serre** » publié en 2001 a jeté les bases du fonctionnement du système européen d'échange de quotas ('European Trading System' ETS). Cette directive concerne les secteurs de l'énergie et les industries grosses consommatrices d'énergie (e.g. la sidérurgie), représentant ensemble 45% des émissions de l'UE. En revanche, elle ne concerne pas l'agriculture, l'habitat et les transports.

Dans la dynamique créée autour du protocole de Kyoto et du marché de permis, la Commission Européenne présente sa stratégie en matière d'énergie et environnement (le « **paquet climat-énergie** ») en janvier 2007.⁷ Dans ce document, la Commission propose un programme de mesures destinées à atteindre les objectifs de fond en termes de développement durable, de compétitivité et de sécurité d'approvisionnement. Pour cela, elle propose que l'UE s'engage à mener l'initiative « **20-20-20** », qui consiste à réduire de 20% (30% en cas d'accord international) les émissions de gaz à effet de serre, à amener à 20% (et non pas 8,5% prévu dans la législation précédente) la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique et améliorer de 20% l'efficacité énergétique, le tout avant 2020.⁸

Le secteur des transports est parmi les plus grands émetteurs de gaz à effet de serre en Europe. En raison de sa dépendance à l'égard du pétrole, les émissions des voitures légères représentent près de 12% du total des émissions de CO₂ (le principal gaz à effet de serre) de l'UE. Concernée par l'impact des transports sur l'environnement, la Commission Européenne rend publique sa stratégie pour renforcer la durabilité des transports dans le Livre vert *A strategy for sustainable mobility* (Union Européenne Communiqué [COM(1992) 46]). Le concept de '**mobilité soutenable**' est ici défini de manière large. Il inclut aussi bien les transports (moyens de transports et infrastructure) que les comportements sociaux et les mouvements de personnes et de marchandises. En 2001 la Commission lance le livre blanc sur *La politique européenne des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix*, qui présente la stratégie destinée à réduire les effets externes des transports routier et aérien en termes de pollution, de congestion et d'accidents. Cette stratégie privilégie l'équilibre entre les différents modes de transport en faveur des transports alternatifs à la voie routière et aérienne. En juin 2009, la Commission a présenté sa vision de l'avenir des transports après 2010.⁹ Cette nouvelle stratégie vise à répondre aux deux défis qui se posent actuellement au secteur des transports. Premièrement, la population devient plus citadine (84% de la population européenne habitera la ville en 2050). Deuxièmement, il s'agit d'atteindre l'objectif de 20% d'énergie renouvelable dans les transports, en accord avec les objectifs du paquet climat pour les autres secteurs.

La directive 2003/30 CE « **biocarburants** » fixe comme objectif minimal que 5,75% des carburants en Europe sont d'origine renouvelable en 2010. Plus tard, le sommet européen de mars 2007 a ramené l'objectif à 10% dans chaque Etat membre d'ici 2020. En 2007, le taux d'incorporation des

⁷ Communication de la Commission au Conseil européen et au Parlement européen, du 10 janvier 2007, intitulée « Une politique de l'énergie pour l'Europe » [COM(2007) 1].

⁸ Cette initiative a été approuvée par le Conseil Européen de mars 2007.

⁹ Communication de la Commission « Un avenir durable pour les transports : vers un système intégré, convivial et fondé sur la technologie » [COM (2009) 279/4].

biocarburants a été de 2,7% en Europe, encore loin de l'objectif de 5,75% pour 2010. En revanche, les pays comme l'Allemagne, la France et, dans une moindre mesure, l'Espagne, sont en bonne voie pour respecter les engagements.¹⁰ Entretemps, les biocarburants ont fait l'objet de beaucoup de critiques, ce qui a fait infléchir la politique européenne. La révision de la directive « biocarburants » présentée par la Commission européenne en janvier 2008 prend en compte les « critères de durabilité » (comme la réduction des émissions de CO₂, le respect des droits de l'Homme et l'impact sur le prix des aliments) dans l'évaluation des biocarburants qui sont éligibles pour l'objectif de 10%.¹¹ ¹² En outre, les autres énergies renouvelables peuvent être comptabilisées pour atteindre cet objectif, notamment par le biais des voitures à hydrogène ou électriques.

En France, la loi de programmation fixant les orientations de la politique énergétique (loi POPE du 13 juillet 2005) soutient la division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici 2050, ce qui revient à une division par quatre des émissions pour les pays développés, compte tenu de leur plus grande consommation. Cette politique de « facteur 4 » exige alors une réduction de 75% des émissions de gaz à effet de serre en 2050 par rapport aux niveaux actuels.

Les alternatives technologiques dans les transports

Pour faire face à la demande croissante dans les transports et atteindre les objectifs de réduction de 80% des émissions de gaz à effet de serre dans le monde d'ici 2050 par rapport à leur niveau de 1990, des innovations technologiques et organisationnelles majeures sont nécessaires pour ce qui concerne le véhicule particulier (motorisation, structure, accessoires...) et l'usage qui en est fait.

Les améliorations à la marge des voitures actuelles équipées d'un moteur à combustion ne semblent pas pouvoir suffire pour contrebalancer l'augmentation de la demande des voitures particulières afin de réduire la consommation énergétique ainsi que les émissions de GES. Des changements techniques profonds sont nécessaires pour réduire les émissions dans les transports individuels. Plusieurs alternatives technologiques se profilent telles que l'électricité, les biocarburants, et l'hydrogène. Leur rentabilité dépend directement du prix du pétrole. Dans la plupart des cas, elles deviennent compétitives à partir du moment où le cours du pétrole dépasse le seuil des 70\$ le baril (Ball et Wietschel, 2009).

¹⁰ Le biocarburant le plus consommé en Europe est le biodiesel (6.091.535 tep) à comparer avec le bioéthanol (1.225.668 tep). L'Allemagne est de loin le premier consommateur de biocarburants en Europe (3.986.338 tep) avec un taux d'incorporation de 7,3% en 2007 bien au-delà de l'objectif pour 2010. Le deuxième plus grand consommateur est la France (1.496.400 tep correspondant à 3,5% de la consommation de carburants), suivie par l'Espagne (373.220 tep). Source: EurObserv'ER (2008), *État Des Énergies Renouvelables En Europe*, 8e bilan EurObserv'ER, édition 2008.

¹¹ Les critères de durabilité en discussion seraient appliqués en deux étapes : dans un premier temps, la réduction des émissions de gaz à effet de serre devrait atteindre 35% pour certifier le biocarburant ; à partir de 2017 ce seuil minimum monterait à 50% de réduction des GES. Source : Euroactiv, « Biocarburants pour les transports », 18 septembre 2008, <http://www.euroactiv.com> (accédé le 13 juillet 2009).

¹² Les procédés actuels de fabrication des biocarburants de « première génération » devraient alors être améliorés afin de respecter les critères de réduction des gaz à effet de serre comme pour l'éthanol de blé (aujourd'hui de 33%) ou de betterave (35%), et le biodiesel de colza (36%). Certains biodiesels seraient déjà dans les critères comme l'éthanol de maïs (49%), le biodiesel de tournesol (51%), ou l'éthanol brésilien fabriqué à partir du sucre de canne (74%). En dépendant des filières, les biocarburants de deuxième génération peuvent atteindre jusqu'à 95% de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Source : Les Echos, « L'Europe prête à durcir les normes sur les biocarburants », 2 Septembre 2008.

Biocarburants

Les biocarburants¹³ (ou biocombustibles) sont des carburants produits à partir de matières organiques non fossiles comme la canne à sucre ou le maïs. Actuellement les seuls biocarburants disponibles sur le marché appartiennent à la première génération (biodiesel et bioéthanol). Les principaux avantages des biocarburants sont la sécurité d'approvisionnement et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. D'une part, la production de carburants à partir de la biomasse remplace la consommation des hydrocarbures dans les transports et renforce ainsi la sécurité d'approvisionnement énergétique. D'autre part, la biomasse retient du CO₂ existant dans l'atmosphère pendant la période de vie de la plante, lequel est libéré au moment de la combustion de la biomasse. Le bilan carbone est donc neutre, les émissions de gaz à effet de serre n'augmentent pas. Par ailleurs, les biocarburants ont l'avantage de pouvoir utiliser l'infrastructure de distribution des carburants fossiles. De plus, les voitures actuelles ne nécessitent que de légères adaptations pour utiliser ces biocarburants ; ce qui réduit les investissements nécessaires à sa mise en place.

Le bilan environnemental des biocarburants de première génération est de plus en plus contesté. Les études des cycles de vie (« well to wheel analysis ») des différents types de biocarburants rendent compte d'une réduction très légère des émissions par rapport à l'essence, et même d'une augmentation des émissions dans certaines situations (Wang, 2008). En fonction de la filière, les émissions au cours des étapes de prétraitement, transport et conversion, peuvent être supérieures à celles des carburants fossiles. En effet, le bilan carbone dépend de plusieurs facteurs comme : le terrain cultivé et sa productivité ; l'utilisation d'engrais et de pesticides et les émissions occasionnées lors de leur production ; l'énergie dépensée pour ramasser la matière première et la faire transporter jusqu'à la raffinerie ; enfin l'énergie dépensée pendant le processus de conversion énergétique. Un rapport de la division Energie des Nations Unies montre que l'utilisation des biocarburants pour la cogénération de chaleur et d'électricité serait deux à trois fois plus efficace pour la réduction de gaz à effet de serre que leur utilisation comme carburant dans les transports.¹⁴

De plus, les besoins en termes d'eau pour l'irrigation et pour le traitement de la biomasse pose des questions quant à la durabilité de la filière. En outre, la production intensive de maïs, colza ou canne à sucre pour la production de biocarburants peut conduire à la mise en péril de la biodiversité des zones à forte diversité biologique (comme les forêts, les zones humides et certaines prairies).

Les crises alimentaires mondiales sont venues exacerber les problèmes des biocarburants, et ont mis sur le devant de la scène la question éthique de la production de carburants à partir de matières alimentaires. En effet, l'arrivée des biocarburants est venue lier le marché agricole alimentaire à celui des carburants en créant des choix éthiquement complexes tels que la production agricole pour l'alimentation humaine ou pour la voiture. Un rapport de la Banque Mondiale a estimé que les biocarburants ont été responsables d'une hausse de 75% des prix des produits agricoles

¹³ Les critiques des biocarburants les surnomment aussi « agrocarburants » en raison du soutien du secteur agricole à cette filière laquelle devient au même temps un débouché important du secteur. Pour une critique de la politique de soutien aux agrocarburants voir : Her Majesty's Treasury United Kingdom (2008), « The King Review of low-carbon cars, part II: recommendations for action ».

¹⁴ United Nations (2007), « Sustainable Bioenergy : A Framework for Decision Makers », Report, May.

alimentaires.¹⁵ Cette hausse touche en premier lieu les populations les moins favorisées des pays en développement et a déclenché plusieurs crises comme celle de la 'tortilla' au Mexique, en février 2007, suite à l'augmentation du prix du maïs.

La recherche mise actuellement sur le développement des biocarburants de deuxième génération à partir de matières ligno-cellulosiques (bois) n'ayant pas d'utilisation alimentaire. Cette nouvelle filière espère résoudre une partie des problèmes de conflit d'utilisation finale (du moins les usages alimentaires) de la biomasse, le problème de l'occupation des sols et de l'empreinte écologique. Elle en est encore à la phase préindustrielle et sa commercialisation est attendue à l'horizon 2020. Néanmoins, les biocarburants ne semblent pas être en mesure de remplacer plus que 20 à 23% de la consommation globale de carburants (Ball et Wietschel, 2009).

En conclusion, les biocarburants de première génération peuvent, à court terme, réduire légèrement la consommation d'hydrocarbures et les émissions de gaz à effet de serre dans les transports. Toutefois, ils semblent incapables de contribuer significativement à la lutte contre l'augmentation de la consommation énergétique et les émissions de GES. En outre, la diffusion à large échelle de ces biocarburants sera limitée par les conflits d'utilisation finale de la biomasse, les impacts socio-environnementaux et le bilan carbone, à moins que les défis techno-économiques qui entourent les carburants de deuxième génération ne soient résolus.

Electricité

La voiture électrique n'est pas une technologie nouvelle. Au début du XXe siècle, elle dominait le marché automobile au moment où la voiture à combustion interne commençait à être diffusée sur le marché. Le succès récent des voitures hybrides (p.ex. Toyota Prius) a renouvelé l'intérêt pour la voiture électrique comme moyen de réduction des émissions polluantes des transports individuels, et de diversification des sources énergétiques. Il existe plusieurs types de véhicules électriques qui diffèrent selon l'importance de la batterie dans la propulsion de la voiture : la voiture électrique hybride ('hybrid electric vehicle' HEV) équipée d'une batterie qui supplée au moteur à combustion traditionnel ; la voiture électrique hybride rechargeable ('plug-in hybride electric vehicle' PHEV) qui, à la différence de la précédente, peut se brancher sur le réseau et recharger une partie des batteries en une dizaine de minutes ; et enfin la voiture « tout électrique » ('electric vehicle' EV).

L'hybridation de la propulsion est une solution déjà disponible pour augmenter l'efficacité des véhicules dans des conditions économiques (Demirdoven et Deutch, 2004 ; Morris, 2003). La HEV combine les avantages de la voiture conventionnelle (infrastructure existante, autonomie, efficacité à haut régime) avec celles de la voiture électrique en termes de réduction de la consommation, des émissions et du bruit. Néanmoins, il s'agit essentiellement d'une technologie qui améliore le comportement des moteurs à explosion actuels, et qui par conséquent ne résout pas complètement les problèmes de la dépendance aux hydrocarbures.

Les voitures EV et PHEV sont particulièrement intéressantes pour la réduction des émissions et pour la diversification des sources énergétiques des transports. Premièrement, la voiture EV et la PHEV (lorsque celle-ci roule en mode électrique) ne rejettent pas de gaz à effet de serre et d'autres gaz polluants dans l'atmosphère. Le bilan environnemental doit toutefois prendre en compte les

¹⁵ World Bank (2008), « A Note on Rising Food Prices », July.

émissions en amont lors de la production d'électricité.¹⁶ Les avantages de cette solution sont d'autant plus faibles que les énergies fossiles – surtout les plus émettrices de GES comme le charbon sans séquestration du carbone - jouent un rôle plus important dans le mix électrique. Les avantages maximaux seraient atteints lorsque l'électricité est d'origine renouvelable. Deuxièmement, cette technologie ouvre la possibilité d'utilisation de diverses sources énergétiques dans les transports en rompant avec la dépendance au pétrole. Troisièmement, les voitures électriques ont une efficacité énergétique élevée en raison du fort débit électrique de la batterie et de la minimisation des pertes associées aux conversions énergétiques.

La voiture EV est une solution particulièrement efficace ; elle fait face toutefois à des handicaps sérieux qui doivent être levés par des sauts technologiques avant que la diffusion à large échelle soit possible. Comme dans le passé, l'attractivité de l'EV souffre des performances insuffisantes des batteries. Les batteries sont encore très lourdes et encombrantes, pour une densité énergétique très faible, ce qui limite le rayon d'action du véhicule (CAS, 2008a). Le coût des batteries est un autre problème, surtout lorsque l'autonomie de la voiture doit être augmentée. Le temps de recharge reste encore très élevé (une recharge complète prend une nuit). Les batteries Lithium-ion sont actuellement une voie prometteuse pour améliorer la performance de la batterie, mais le lithium est un métal rare et sa production est très concentrée géographiquement dans les Andes et le Tibet, ce qui soulève des questions quant à la production à grande échelle.¹⁷ En outre, l'autonomie limitée de l'EV rend la question de l'infrastructure de recharge et de changement des batteries à mettre en place plus importante. De plus, les impacts sur la production d'électricité, ainsi que sur les réseaux de transport et distribution du courant électrique, doivent être évalués et des investissements nouveaux seront probablement nécessaires pour renforcer le réseau électrique, ce qui serait un obstacle sérieux à la diffusion de la voiture électrique.

Dans le cas où l'EV s'avèrerait un échec, une autre solution est encore possible. La voiture PHEV dispose d'une batterie plus grande par rapport à la HEV ce qui lui permet de rouler en ville pratiquement en mode électrique ; en comparaison avec l'EV, la PHEV dispose d'un réservoir de carburants liquides pour les grands déplacements. Elle peut ainsi réduire fortement la demande de carburants liquides, d'autant que 20% des déplacements ne dépassent pas 60 km (Ball et Wietschel, 2009). Par ailleurs, le stockage à bord de carburants liquides diminue les exigences en termes de performance des batteries (une batterie de plus de 30 km d'autonomie serait suffisante) en réduisant ainsi le volume, le poids et le coût de la batterie. De même, les nécessités en termes de points de recharge et de stations de remplacement seraient relâchées dans le cas de la voiture PHEV. Celle-ci peut utiliser l'infrastructure actuelle des carburants fossiles, la prise domestique (avec quelques adaptations), et un nombre inférieur de bornes publiques en comparaison avec le déploiement des voitures électriques. Cependant, la voiture PHEV a encore besoin des carburants liquides, lesquels seront probablement des hydrocarbures. Une autre solution est l'utilisation de biocarburants pour les grands déplacements (Morris, 2003 ; Room, 2004).

Néanmoins, les constructeurs rencontrent plusieurs difficultés dans la conception de la voiture PHEV. De nombreuses recherches doivent être entreprises de manière à retrouver la batterie adaptée

¹⁶ C'est pour cela que les critiques de la voiture électrique (EV) la surnomme de 'elsewhere emissions vehicle' (déplacer les émissions ailleurs).

¹⁷ Kempf H., « *Les ressources limitées de lithium pourraient freiner l'essor des voitures électriques* », Le Monde, 8 Juillet 2008.

(« batterie puissance » par rapport à la « batterie pointe » qui équipe les HEV), et la gestion électronique embarquée (CAS, 2008a).

La technologie de l'hydrogène et des piles à combustible est une option importante dans le contexte énergétique et environnemental actuel

Pourquoi l'hydrogène ?

L'hydrogène est une solution particulièrement adaptée aux défis énergétiques et environnementaux qui se posent actuellement (Dunn, 2002 ; Hoffman, 2001). L'hydrogène est un vecteur énergétique (comme l'électricité) et non pas une source primaire d'énergie. L'utilisation d'un vecteur énergétique propre comme l'hydrogène (s'il est produit à partir des sources non fossiles) offre une multitude d'avantages et ce, à plusieurs niveaux. Il s'agit d'un vecteur énergétique très versatile en raison des différents modes de production et d'utilisation. L'hydrogène a le potentiel de remplacer l'utilisation des énergies fossiles dans différents usages (mobile, stationnaire ou portable), mais c'est dans le secteur des transports que ses atouts sont les plus importants, pour les raisons exposées ci-dessus. Les principaux bénéfices de l'économie de l'hydrogène sont :

- **Réduction des émissions polluantes** : l'hydrogène est un vecteur énergétique zéro-émission du point de vue de l'utilisation. Il peut être une solution importante pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre (en particulier de CO₂) dans le cas des transports, ainsi que pour l'amélioration de la qualité de l'air local.
- **La pollution de l'air dans les villes** est associée aux problèmes de santé provoqués par les particules, ozone et pluies acides. La mise en place des voitures piles à combustible à hydrogène peut réduire drastiquement les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) et de dioxyde de soufre (SO₂), ainsi que le bruit, responsable également de problèmes de stress et de santé.
- **Indépendance énergétique et sécurité d'approvisionnement** : l'hydrogène peut être produit à partir de sources renouvelables domestiques comme l'éolien, le solaire ou la géothermie. Il peut être également produit à partir du charbon – source primaire plus abondante et mieux répartie que le pétrole – avec capture et séquestration du carbone.
- **Efficiences énergétique** : l'hydrogène permet une amélioration des performances au niveau de l'utilisation finale de l'énergie. Toutefois c'est lorsqu'il est combiné avec les piles à combustible qu'il atteint le maximum d'efficacité. L'hydrogène est le combustible idéal des piles à combustible (le moyen le plus efficace pour convertir l'énergie chimique en énergie électrique). L'hydrogène et la pile à combustible permettent de doubler le rendement énergétique du moteur à combustion (AIE, 2005).
- **Economie et emploi** : l'industrie de l'hydrogène et des piles à combustible offre des biens et services à haute valeur ajoutée et l'investissement dans ce secteur peut entraîner des effets multiplicateurs dans l'économie en même temps qu'il génère des emplois.¹⁸

Le bilan environnemental de l'hydrogène dépend de la façon dont il est produit en amont. La production à partir des énergies fossiles est la méthode la plus économique ; elle devrait ainsi

¹⁸ Selon les estimations des industriels, l'industrie européenne des piles à combustible pourrait créer plus de 500 milliers d'emplois en Europe à l'horizon 2030. Voir : Commission Européenne Direction Générale de Recherche (2007), « Third Status Report on the European Technology Platforms », ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/technologyplatforms/docs/etp3rdreport_en.pdf

perdurer pendant les premières années de l'hydrogène-énergie. Néanmoins, ceci ne résout pas le problème des émissions de gaz à effet de serre. La production centralisée à partir du charbon avec capture et séquestration du carbone peut être une solution importante pour la production de grandes quantités d'hydrogène de manière économique et sans émissions de carbone. En attendant que la réduction des coûts de l'électrolyse de l'électricité d'origine renouvelable rende ce processus compétitif en comparaison avec les méthodes fossiles de production d'hydrogène.

Histoire de l'hydrogène-énergie ¹⁹

Au XVI^e siècle, le médecin suisse Paracelse s'interroge sur les propriétés de l'« air » qui se dégage lors de la réaction du vitriol sur le fer. Un siècle plus tard, le scientifique irlandais Robert Boyle isole une liqueur fumante à partir de cet « air ». En 1763, l'hydrogène est identifié comme un élément distinct par le scientifique britannique Henry Cavendish, après qu'il ait séparé le gaz hydrogène à travers la réaction du zinc avec l'acide chlorhydrique. Dans une démonstration de la Royal Society de Londres, Cavendish a appliqué une étincelle à l'« air inflammable » et à produit de l'eau. Une vingtaine d'années plus tard, le chimiste, philosophe et économiste français Antoine Laurent de Lavoisier montre que l'eau (H₂O) est composée d'air vital et d'« air inflammable ». Il dénomme ce dernier « hydrogène », du grec *hydro* (eau) et *genes* (né de), qui signifie « né de l'eau ». Cette découverte a conduit à la constatation que l'eau (H₂O) est faite d'hydrogène et d'oxygène. La même année le physicien et chimiste français Jacques Charles fait le premier vol en ballon à hydrogène. En 1784 Lavoisier et Munier présentent un processus industriel de décomposition de l'eau, capable de produire une grande quantité d'hydrogène par passage de vapeur d'eau sur un lit de fer chauffé.

En 1800 les scientifiques anglais William Nicholson et Anthony Carlisle découvrent le principe de la production d'hydrogène par électrolyse, par passage d'un courant électrique dans l'eau. Le processus inverse de l'électrolyse, c'est-à-dire la production de courant électrique et d'eau par la combinaison d'oxygène et hydrogène, a été découvert plus tard par le chimiste suisse Christian Friedrich Schoenbein en 1839. En 1845, le scientifique et juge anglais William Grove réalise la première pile à combustible qu'il baptise 'gas voltaic battery'. De ce fait, Grove est considéré comme le père de la pile à combustible. En 1959, Francis Bacon présente une version plus pratique de la pile à combustible. La « Bacon Cell » avait une puissance de 5 kW suffisante pour alimenter un poste de soudure à l'arc. Les domaines d'application de cette pile n'ont pas cessé d'augmenter depuis son invention. Ainsi, un an plus tard, Harry Karl Ihrig met au point le premier tracteur à hydrogène équipé d'une pile à combustible de 20 kW. Depuis la mission spatiale Apollo, la pile à combustible équipe également les navettes spatiales, assurant la production embarquée d'eau, d'électricité et de chaleur. Dans le domaine spatial, l'hydrogène est utilisé aussi bien comme carburant pour les piles à combustible que pour la propulsion des fusées.

Dans les années 1910, deux chimistes allemands Fritz Haber et Carl Bosch inventent le procédé de synthèse de l'ammoniac par catalyseur, lequel est amélioré plus tard par le français George Claude, fondateur de la société l'Air Liquide. Quelques années auparavant, Adolph Frank, Heinrich Caro et Carl von Linde, développent un procédé de production d'hydrogène portant le nom des inventeurs. Par ailleurs, Carl von Linde (le fondateur de la société Linde) et George Claude ont développé séparément des méthodes de liquéfaction de l'hydrogène. Les avancées scientifiques dans la

¹⁹ Pour une histoire approfondie de l'hydrogène, voir : Hoffman (2001) ; Association Française de l'Hydrogène (2003), « Histoire de l'Hydrogène » in Mémento de l'Hydrogène, Fiche 1.1, <http://www.afh2.org>

production de l'hydrogène ont ouvert la voie pour son utilisation dans plusieurs domaines industriels : par exemple dans l'industrie chimique pour la synthèse de l'ammoniac, dans la pétrochimie pour le traitement des hydrocarbures, dans l'électronique et l'industrie alimentaire. Le succès dans les usages chimiques et spatiaux, ainsi que ses propriétés énergétiques (encadré 1), ont permis d'envisager l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique. L'utilisation de l'hydrogène énergie n'est pourtant pas totalement nouvelle dans l'histoire.

Encadré 1. Les propriétés de l'hydrogène

Les avantages de l'hydrogène²⁰ sont nombreux :

- c'est un atome très abondant sur terre (sous forme d'eau),
- c'est la molécule la plus énergétique (120 MJ/kg) soit 2,2 fois le gaz naturel,
- il n'est ni polluant, ni toxique,
- sa combustion dans l'air ne génère que de l'eau,
- c'est le plus léger des gaz, ce qui est un facteur positif vis à vis de la sécurité (grande vitesse de diffusion dans l'air).

Parmi les inconvénients de ce gaz :

- sa légèreté implique une densité énergétique volumique moins favorable au transport et au stockage sous forme gazeuse que pour le gaz naturel (facteur 4 à 200 bars, par exemple)
- ses limites d'inflammabilité et de détonation avec de l'air sont plus larges que pour le gaz naturel (d'un facteur 5 environ), mais, de fait, seule compte la limite inférieure : 4% en volume dans l'air au lieu de 5,3% pour la limite inférieure d'inflammabilité et 13% au lieu de 6,3% en limite inférieure de détonation.
- l'énergie minimale à fournir pour l'enflammer est 10 fois inférieure à celle requise pour les hydrocarbures classiques (20μ pour l'hydrogène, contre 260 pour le propane),
- sa flamme est presque invisible, et sa combustion (non électrochimique) en présence d'air génère des NOx.
- son image dans le public n'est pas bonne (il est considéré comme un gaz dangereux) et son acceptabilité n'est donc pas encore acquise.

Adapté d'AFH2, 2006a.

La première expérience d'utilisation de l'hydrogène-énergie à grande échelle a été l'usage du gaz de ville dans les principales villes du XIXe siècle.²¹ Le gaz de ville est essentiellement du gaz de houille contenant du monoxyde de carbone et de l'hydrogène. Dans un premier temps, le gaz de ville fut utilisé pour l'éclairage et, plus tard, pour les usages moteurs et calorifiques. Les principales villes européennes ont commencé à se doter de réseaux de distribution du gaz de ville produit dans des usines à gaz, d'abord à partir de la distillation du bois, puis à partir du charbon. La première démonstration a été faite à Paris en 1803. Depuis, l'utilisation du gaz de ville s'est étendue graduellement dans les espaces urbains partout en Europe. A partir des années 1910, le gaz de ville souffre de la concurrence de l'électricité, surtout pour l'éclairage, et à partir des années 1940, il va progressivement céder sa place au gaz naturel suite aux grandes découvertes de gisements en Europe.

²⁰ «En toute rigueur l'hydrogène tel qu'il est titré dans ce document, devrait être intitulé di-hydrogène pour indiquer clairement qu'il s'agit de la molécule H₂ et non pas de l'atome H, qui lui s'appelle hydrogène en toute rigueur. Néanmoins, il sera toujours fait référence à l'hydrogène pour parler du di-hydrogène par extension des habitudes prises. » AFH2, 2006a, p.6

²¹ Pour une rétrospective de l'industrie gazière européenne, voir Paquier (2005).

Le défi actuel est alors de faire de l'hydrogène un vecteur énergétique soutenable, et amplement utilisé, comme l'électricité. C'est l'électro-chimiste John Bockris qui a été le premier à employer le terme « *économie de l'hydrogène* » pour désigner l'utilisation de l'hydrogène-énergie sur grande échelle. Selon cette vision, l'hydrogène serait produit à partir de l'énergie nucléaire et solaire sans émissions polluantes (Bockris, 1999).

Les énergies renouvelables jouent un rôle central dans les différentes visions de l'économie de l'hydrogène (Rifkin, 2007, 2002 ; Dunn, 2002 ; Lovins et Williams, 1999). Cette nouvelle '*civilisation de l'hydrogène*' serait la seule alternative possible à la dépendance aux carburants fossiles, sous la condition d'un changement profond des valeurs sociales (Goltsov et Veziroglu, 2001). Elle permettrait une redistribution des pouvoirs, non seulement entre les pays mais également entre les citoyens. Ces derniers seraient en même temps consommateurs et producteurs d'énergie, et échangeraient le courant sur le réseau, comme ils échangent aujourd'hui l'information sur internet (Rifkin, 2002). Cela ouvrirait la voie à la troisième révolution industrielle, plus propre et plus juste (Rifkin, 2007). L'hydrogène serait ainsi un pas inévitable dans le progrès de l'humanité (Dunn, 2002).

De cette manière, l'hydrogène participe à la tendance à la décarbonisation du système énergétique, c'est-à-dire la diminution des émissions de carbone par unité d'énergie.²² Les transitions énergétiques vont dans le sens d'une utilisation plus efficace de l'énergie mesurée par le ratio hydrogène sur carbone (H/C). Ainsi, le système énergétique a évolué de sources ayant un faible ratio H/C vers d'autres disposant d'un ratio plus élevé (Marchetti, 1985) : bois (0,1) ; charbon (0,5-1 selon la qualité) ; pétrole (2) ; et gaz naturel (4). L'extrapolation de cette tendance peut mener à la conclusion que le système converge vers l'hydrogène. Toutefois, cela dépend de la manière dont l'hydrogène est produit : la poursuite de la tendance à la décarbonisation dépend de la production de l'hydrogène à partir de sources non fossiles.

Les freins actuels au développement de la filière

Malgré les avantages de l'hydrogène-énergie, les obstacles à son développement sont les suivants :

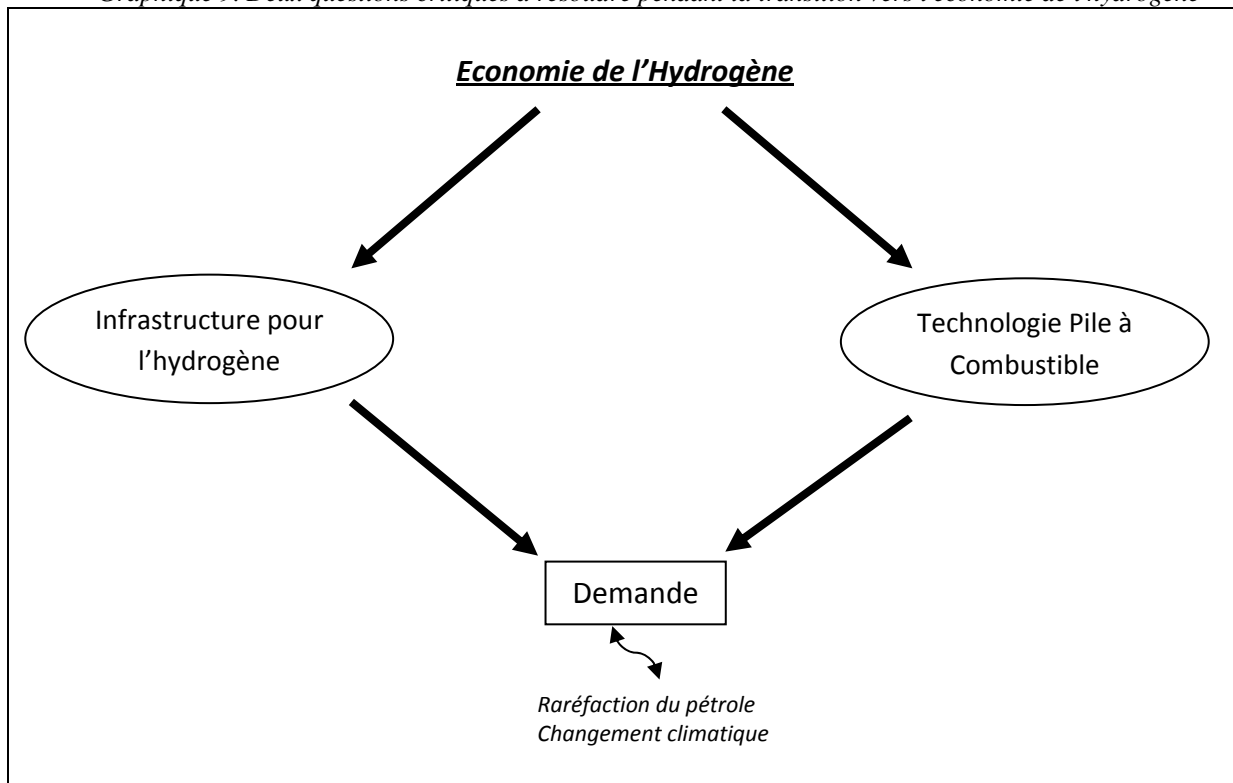
- Le **coût de production** de l'hydrogène à partir des sources renouvelables n'est pas encore compétitif.
- La technologie **de capture et séquestration du carbone** qui ouvre la possibilité de production de grandes quantités d'hydrogène à partir des énergies fossiles (p.ex. charbon), reste encore à l'état pré-commercial et des incertitudes techniques et économiques restent à résoudre.
- L'absence d'une réglementation contraignante face aux émissions de CO₂ et surtout l'inexistence d'une **valeur du carbone** stable et suffisamment élevée pour justifier l'investissement dans les technologies à très faible émission de carbone.
- L'**aspect réglementaire** qui parfois bloque les démonstrations (cela a contribué notamment au fait que la France n'a pas participé au programme européen CUTE de démonstration de bus à hydrogène).
- L'absence de **l'infrastructure** bloque le développement de la demande d'hydrogène.

²² Cela a été possible grâce à l'utilisation successive de sources de moins en moins carbonées : le bois (1,25 de tonnes de carbone, tC, par tonne équivalente de pétrole, toe), le charbon (1,08 tC/toe), le pétrole (0,84 tC/toe) et le gaz naturel (0,64 tC/toe) (Grübler et Nakicenovic, 1996).

- La **pile à combustible** n'est pas encore compétitive et des avancées en termes de coût, de durabilité et de fiabilité, sont nécessaires avant le passage à la production de masse.

Les deux premières barrières concernent la production de l'hydrogène, laquelle commence à être compétitive en utilisant le gaz naturel. Les deux obstacles suivants sont liés à la réglementation dont l'évolution récente va dans le sens de l'abaissement des barrières, grâce à la mise en place du marché de quotas de carbone en Europe et des groupes de travail pour la création des codes et standards pour l'hydrogène, et des piles à combustible internationalement reconnues. Enfin, les deux derniers obstacles au développement de l'hydrogène, l'infrastructure et les piles à combustible, sont des questions critiques pour le succès de la filière (graphique 9).

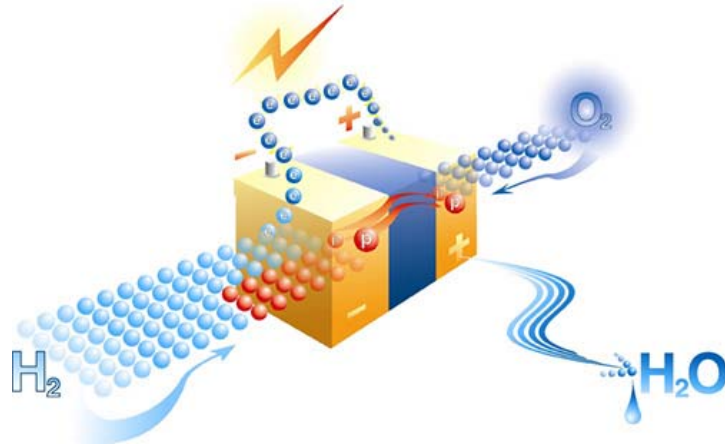
Graphique 9. Deux questions critiques à résoudre pendant la transition vers l'économie de l'hydrogène



La technologie de la pile à combustible

La technologie de la pile à combustible (PAC) produit la réaction inverse de l'électrolyse en ce sens qu'elle combine l'hydrogène (ou un autre carburant riche en hydrogène) et l'oxygène pour produire électricité à partir d'un processus électrochimique (graphique 10). La PAC est constituée par deux électrodes (l'anode négative et la cathode positive) séparées par un électrolyte. D'une manière simple, les atomes d'hydrogène se séparent en proton et électron au niveau de l'anode. Les électrons passent par un circuit externe qui génère l'électricité ; alors que les protons passent par l'électrolyte jusqu'à arriver à la cathode où ils se combinent avec l'oxygène et les électrons en dégageant de l'eau et de la chaleur. L'énergie chimique est directement transformée en électricité, ce qui permet d'éviter les pertes de rendement par les transformations intermédiaires en énergie thermique et dynamique. Ainsi, la PAC atteint des rendements bruts supérieurs à 50% (à comparer avec 20-30% d'un moteur de combustion interne) (AIE, 2005).

Graphique 10. Principe de la pile à combustible



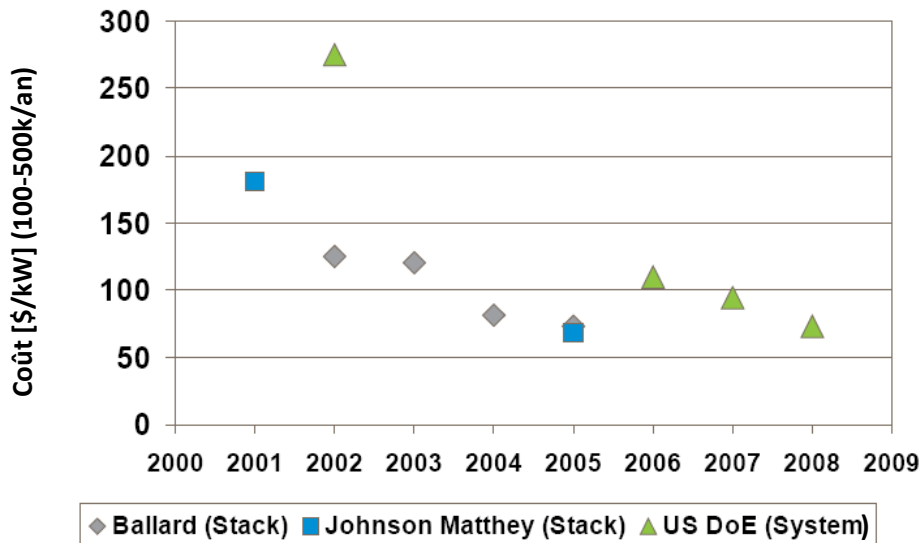
Source : Axane® (<http://www.axane.net>)

Il existe différents types de PAC selon l'électrolyte utilisé. L'électrolyte détermine le type de réaction chimique qui se produit dans la PAC, la température et donc les applications appropriées. Les usages portables (téléphones portables, ordinateurs portables, baladeurs de musique) ont besoin d'une faible puissance et des températures de fonctionnement peu élevées. Pour la génération stationnaire (p.ex. générateurs d'appui), la palette de puissances est très grande (de 1KW à plusieurs MW) et la température élevée permet une utilisation plus économique d'hydrogène à faible degré de pureté, voire même du gaz naturel. En ce qui concerne les usages mobiles, le démarrage rapide est une condition importante, ce qui n'est pas compatible avec le temps nécessaire pour mettre en route les piles à haute température.

Pour ce qui est des carburants pour la pile à combustible, l'utilisation de l'hydrogène permet des rendements énergétiques supérieurs et zéro émission pendant la consommation. D'autres carburants riches en hydrogène peuvent aussi être utilisés comme le méthanol. Ceci est d'ailleurs le cas des piles de génération portable du type *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC). Les énergies fossiles telles que le gaz naturel constituent une autre source d'énergie possible, spécialement pour les piles à haute température de génération stationnaire pour la production décentralisée d'électricité et de chaleur. En ce qui concerne les applications mobiles, la situation change parce que la PAC la plus adaptée à la voiture (en termes d'efficacité, température, taille,...) est la *Polymer Electrolyte Membrane* (PEM), laquelle accepte uniquement l'hydrogène à très haut degré de pureté de manière à ne pas empoisonner le catalyseur au platine.

L'utilisation de l'hydrogène dans une PEM permet d'augmenter significativement le rendement énergétique dans les transports. L'efficacité d'une pile à combustible est actuellement de 40% (il est raisonnable d'espérer un taux de 50 à 60% dans le futur), alors que le rendement énergétique du moteur à combustion est de 20 à 25% (AIE, 2005). En comparaison, avec la voiture hybride, le rendement actuel de la PEM est 1-1,5 fois supérieur. Certes, le coût de la PEM n'a pas cessé de diminuer pendant les dernières années (graphique 11). Toutefois, les PAC ne sont pas encore compétitives pour les usages mobiles et un effort de recherche et de démonstration est encore nécessaire.

Graphique 11. Réduction de coûts des piles à combustible du type PEM



Source : Roads2Hycom, 2009a.

Les estimations présentées dans le graphique postulent une production annuelle de 100 à 500 milliers de PAC – encore faut-il que les premiers exemplaires plus chers et moins performants trouvent un financement. Actuellement, le coût des piles à combustible est supérieur à \$500/kW (Roads2HyCom, 2009a), ce qui peut être comparé à un objectif de \$50/kW aux Etats-Unis et de 100€/kW en Europe. Les pistes de recherche actuelles privilégient notamment la réduction de l'utilisation du platine et son remplacement par des matériaux plus économiques. En outre, la fiabilité et la durabilité de la pile doivent encore faire l'objet d'améliorations. Enfin, le stockage à bord de l'hydrogène permettant une autonomie de la voiture supérieure à 500 km est un autre verrou technique important qui reste à lever.

En ce qui concerne les obstacles nécessaires à surmonter pour le développement de l'hydrogène, une question importante est de savoir si les acteurs privés sont en mesure de réaliser les investissements nécessaires sur le marché. Cette question se pose au niveau de l'organisation de la mise en place des infrastructures énergétiques et des stratégies financières des firmes. En effet, les spécificités des industries de réseau énergétique en termes d'intensité capitalistique, de coordination des investissements et d'accompagnement de la demande, empêchent les firmes d'intégrer l'hydrogène dans leurs stratégies d'investissement. Il nous faut aussi analyser les incitations à participer à l'effort de développement des piles à combustible.

Pour ce qui est du processus d'innovation lors d'une rupture technologique, il est important de se demander si les interdépendances des acteurs avec le système technologique actuel ne sont pas en mesure d'atténuer leurs intérêts pour le développement d'une alternative technologique.

Notre recherche est particulièrement focalisée sur les questions suivantes : *quelles sont les conditions nécessaires au développement d'une économie de l'hydrogène en Europe ? Comment mettre en place les infrastructures pour l'hydrogène dans le cadre du marché ? Quels sont les obstacles à la diffusion de la technologie pile à combustible ?*

Cette thèse va donc chercher à mettre en évidence les facteurs favorables ainsi que les freins à la transition d'un système énergétique grand émetteur de carbone basé sur les énergies fossiles vers un

autre plus propre caractérisé par l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique (hydrogène-énergie), ayant comme sources primaires principales les énergies renouvelables. Notre analyse de la transition technologique s'intéresse notamment au développement des réseaux et à la dynamique d'innovation des piles à combustibles. L'intérêt est de savoir si l'hydrogène et les piles à combustible peuvent remplacer les technologies conventionnelles, en particulier les moteurs à carburants fossiles dans les transports, - et dans ce cas, comment la transition peut-elle se dérouler ? -, ou bien si ces technologies sont réservées à des niches de marché, en contribuant seulement à l'augmentation de la variété technologique sans avoir un rôle de fond dans la résolution du problème environnemental et énergétique.

Le changement technique dans les industries de réseau énergétique et la vision évolutionniste de l'innovation

Le développement de nouveaux systèmes énergétiques basés sur des innovations radicales est abordé dans cette thèse à travers la littérature portant sur les industries de réseau pour ce qui est de l'organisation de l'industrie, en particulier l'infrastructure, d'une part, et par la mobilisation des théories de l'innovation et du changement technique pour le traitement du processus d'innovation et la diffusion technologique, d'autre part.

L'organisation des industries de réseau énergétique

Une caractéristique des industries énergétiques telles que l'électricité ou le gaz est le fait d'avoir recours à une infrastructure afin de relier la production et le consommateur. Cela leur confère la caractéristique d'une industrie de réseau (Angelier, 2007 ; Curien, 2005). Les industries de réseau apparaissent dans la littérature économique comme un exemple typique de l'application des idées de l'école Walras-Pareto et de l'économie du bien-être. Selon cette approche, le marché est la forme la plus efficiente d'allocation des biens et des facteurs, à moins que l'existence d'externalités, sous la forme de biens publics ou de monopoles naturels, n'empêche d'atteindre un équilibre optimal au sens de Pareto. Le cas échéant, l'Etat intervient dans les secteurs où le marché se montre « défaillant » de manière à rétablir l'équilibre optimal.

Un réseau est une interconnexion spatiale d'activités et d'équipements complémentaires techniquement compatibles (Economides, 1996). Les biens-réseau sont un type de biens dont la valeur est fonction des interactions créées entre les agents économiques. Cela renvoie à la notion d'externalités ou d'effets externes non capturés par le mécanisme de marché. Un effet externe ou externalité est produit lorsque l'activité d'un agent impose des bénéfices ou des coûts à un autre agent, sans que cela donne lieu à une rémunération du surplus ou des surcoûts occasionnés (Baumol et Oates, 1988). La non prise en compte de tous les bénéfices et coûts amène l'équilibre concurrentiel de marché à ne pas coïncider pas avec l'optimum social (Coase, 1960).

Les industries de réseau sont caractérisées par l'existence d'externalités non prises en compte par le marché. Ces effets externes peuvent être *directement* dégagés par l'augmentation de la demande (les effets de club), mais aussi *indirectement*, par la diminution des prix à travers la réalisation d'économies d'échelle, ou l'amélioration de la qualité par la diversification des services disponibles (Economides, 1996 ; Buchanan, 1965 ; Braeutigam, 1989 ; Baumol, Panzar et Willig, 1985). Enfin, le développement des réseaux entraîne des externalités positives pour le reste de l'économie (Barro, 1990).

Les industries de réseau fonctionnent souvent dans le cadre d'un monopole naturel. Une industrie est en situation de monopole naturel lorsqu'une entreprise unique fournit le marché à moindre coût en comparaison avec la production partagée par plusieurs entreprises plus petites (Braeutigam, 1989 ; Baumol, Panzar et Willig, 1982). La concurrence par la duplication des réseaux d'électricité ne serait pas une solution efficiente. Dans ce cas, la concurrence ne mène pas à une solution efficiente, elle entraîne des effets pervers au niveau de l'instabilité des prix, ce qui justifie la réglementation de l'activité.

La mise en place de l'infrastructure requiert normalement des investissements initiaux très élevés qui ont le caractère de coûts fixes irrécupérables ('sunk costs'), difficilement redéployables économiquement dans une autre activité. Dans ce cas, le monopole naturel s'explique par les externalités technologiques au niveau de l'offre. La part des coûts fixes dans les coûts finals est à l'origine d'importantes économies d'échelle. Dès lors, la taille du réseau doit être suffisamment grande pour que ce dernier devienne rentable. La diversification des services permet la réalisation d'économies d'envergure aidant à rentabiliser l'infrastructure. Enfin, l'interconnexion des nouveaux consommateurs et l'élargissement de la taille permettent de dégager des économies de réseaux.

Le caractère capitaliste de l'industrie altère son mode de développement. La dynamique de développement d'une industrie de réseau est marquée par l'existence d'un seuil critique (point mort). En-deçà de ce seuil, l'industrie ne peut pas se développer sans un appui externe. Au-delà de ce point, les externalités positives renforcent la dynamique de développement du réseau (Buchanan, 1965). De plus, le problème principal est moins le démarrage des petits réseaux au niveau local que la coordination des investissements et les interconnexions à l'échelle nationale. Le réseau se développe d'abord pour des raisons techniques et économiques mais l'expansion est une décision publique (Noam, 1991). Ceci est particulièrement important puisque l'adhésion des consommateurs dépend des anticipations qu'ils font sur la taille que le réseau aura dans le futur (Katz et Shapiro, 1985).

Les théories des grands systèmes techniques analysent la dynamique de développement des réseaux dans une approche plus historique (Hughes, 1983, 1993, 1998). Les grands systèmes électriques, téléphoniques, routiers, etc., sont composés d'éléments plus petits et complexes. Ils sont formés par des appareils technologiques (lignes de transmission, routes), ainsi que par des composantes socioculturelles tels que les organisations, les personnes ou les textes législatifs. Ainsi, il s'agit bien de systèmes sociotechniques (Hughes, 1993, 1983). Le système est une construction sociale destinée à délivrer un service. La croissance des systèmes dépend de manière critique de la demande, surtout pendant les phases initiales et de croissance (Hughes, 1983). A un moment ou un autre, le réseau fait face à des problèmes structurels, dont la résolution permet le développement, que Hughes qualifie de « saillant rentrant ». (Hughes, 1998). La prolongation et l'intensification de la croissance permettent que l'expansion du réseau prenne de l'élan (« momentum ») et devienne disponible partout (Hughes, 1993).

Dans le passé, l'expansion des réseaux (électricité, gaz, routier, etc.) à l'échelle nationale a bénéficié du soutien public. Toutefois, les difficultés budgétaires des Etats à partir des années 1970 ainsi que le changement de paradigme économique pour un rôle plus actif des acteurs privés amènent à poser la question du financement des nouvelles infrastructures énergétiques. D'une part, il s'agit d'investissements intensifs en capital qui sont amortis sur une longue période. Or, les entreprises

privilégient normalement les projets dans des horizons temporels plus courts. D'autre part, ces investissements entraînent des incertitudes importantes qui renchérissent le coût en capital. Il convient ici de rappeler que le financement public est moins coûteux que le financement privé puisque le risque des pertes est partagé par la société dans son ensemble (Arrow et Lind, 1970). En outre, l'investissement dans l'apprentissage technologique porte une valeur d'option qui doit être prise en compte (Dixit et Pindyck, 1994). La probabilité d'une évolution favorable de la demande de la technologie peut justifier l'investissement.

La vision évolutionniste de la dynamique des innovations environnementales

La technologie a été longtemps considérée comme un facteur exogène dans l'analyse économique classique. Schumpeter est le premier auteur à avoir intégré la technologie dans l'explication de la dynamique économique. Dans ses premiers travaux, il s'intéresse au rôle de l'entrepreneur au sein de l'entreprise (Schumpeter, 1912). Plus tard, Schumpeter souligne la routinisation des activités de recherche, en particulier dans les laboratoires des grandes compagnies (Schumpeter, 1942).²³ Enfin, cette analyse a permis d'expliquer l'évolution de l'économie à partir des changements technologiques, en considérant la technologie comme une force majeure de progrès des systèmes économiques capitalistes.

Les travaux de Schumpeter ont impulsé une série d'études empiriques et théoriques durant les décennies suivantes. Un nouveau courant de l'histoire de la technologie s'est développé avec l'objectif d'ouvrir la « boîte noire » du processus d'innovation (Rosenberg, 1982). Un autre groupe de travaux empiriques s'est intéressé aux phénomènes plus microéconomiques de l'innovation comme les stratégies et la capacité technologique des entreprises (Dosi, 1988a ; Nelson et Winter, 1982).

Nelson et Winter (1977, 1982) s'inspirent de la vision schumpetérienne de la concurrence dynamique pour étudier le processus de sélection des firmes par le marché. Ceci peut être expliqué par le comportement des entreprises. Il est supposé que ce comportement est soumis à la rationalité limitée. La capacité des entreprises à choisir le processus technologique est limitée par leur base de connaissances. De ce fait, le processus d'apprentissage est local et cumulatif. D'une part, les choix technologiques qui s'offrent à la firme ne sont pas illimités, mais sont contraints par les compétences spécialisées des firmes au sein d'un domaine précis. D'autre part, l'expérience du passé permet aux firmes de développer des routines pour chercher les technologies les plus rentables dans l'ensemble des options disponibles. Ainsi, la direction du changement technologique au niveau de la firme tend à suivre des directions spécifiques. Ce processus d'apprentissage cumulatif au niveau de l'organisation a des répercussions dans la manière dont les capacités évoluent au niveau de la société (Nelson, 1982). Celles-ci tendent à être guidées par des trajectoires naturelles.

Dosi (1988a) reprend l'idée de trajectoire technologique pour étudier les déterminants de la direction du changement technologique. Selon lui l'activité innovante est très sélective dans le choix des nécessités à satisfaire et des principes scientifiques à utiliser. Celle-ci évolue dans des directions spécifiques déterminées par les croyances partagées au sein du milieu scientifique. Et l'acquisition de compétences est cumulative par le biais de la résolution de problèmes spécifiques. Ceci est à la base de modèles de solution des problèmes techniques appelés *paradigmes technologiques* (Dosi, 1988a).

²³ Il s'agit de l'hypothèse schumpetérienne considérant les avantages de la grande taille pour les activités de recherche. Ceci a été à l'origine d'une large littérature empirique à propos de l'effet de la taille de l'entreprise sur les résultats de la recherche et de l'existence d'un niveau optimal.

Dans ce contexte, la trajectoire technologique de Nelson et Winter exploite les opportunités économiques et techniques définies par le paradigme. Ainsi, les trajectoires technologiques sont plutôt associées aux améliorations à la marge des produits ou des processus de production. Le changement de paradigme peut être provoqué par l'introduction d'une innovation radicale responsable de la discontinuité technologique (Freeman, 1982).

L'apprentissage est un élément fondamental dans les trajectoires technologiques. Il réduit les coûts de production et rend les technologies plus accessibles pour la diffusion (Arrow, 1962a). Une innovation en phase pré-commerciale bénéficie de l'apprentissage obtenu par l'investissement en R&D ou en démonstration afin de réduire ses coûts et devenir compétitive. En outre, l'adoption de la technologie diminue les incertitudes que les consommateurs ont vis-à-vis de l'innovation (Mansfield, 1968). Ainsi, l'utilisation génère des gains d'apprentissage par l'usage ('learning by using') dans la mesure où elle permet d'optimiser les performances de l'innovation (Rosenberg, 1982).

L'adoption croissante de la technologie contribue alors à renforcer son attractivité en termes de performances et de coûts. La technologie devient plus attractive grâce à l'augmentation du nombre d'adhérents (Katz et Shapiro, 1985). Des infrastructures sont créées et plus de services sont offerts. Arthur (1989) explique la dynamique positive de croissance par l'existence de rendements croissants d'adoption. Ces derniers permettent d'augmenter la probabilité d'adoption au fur et à mesure que l'innovation se diffuse. Cela a des implications lorsque plusieurs technologies sont en concurrence.

En présence de rendements croissants d'adoption, le résultat de la concurrence technologique est affecté par la séquence historique d'adoption, et des facteurs mineurs aléatoires peuvent déterminer le résultat final (Arthur, 1989). La part de la technologie dépend du sentier d'adoption ('path dependence') et le marché peut être verrouillé par une technologie inférieure (David, 1985). La manière dont les économies industrielles ont été verrouillées sur les énergies fossiles par un processus historique de coévolution technologique, économique, social et institutionnel, est un exemple de dépendance de sentier (Unruh, 2000, 2002). L'action des acteurs dépend des opportunités ouvertes par l'économie, et leurs choix tendent donc à reproduire le système d'incitations existant. Cela renforce le « lock in » institutionnel en rendant plus difficile la sortie du paradigme (North, 2005).

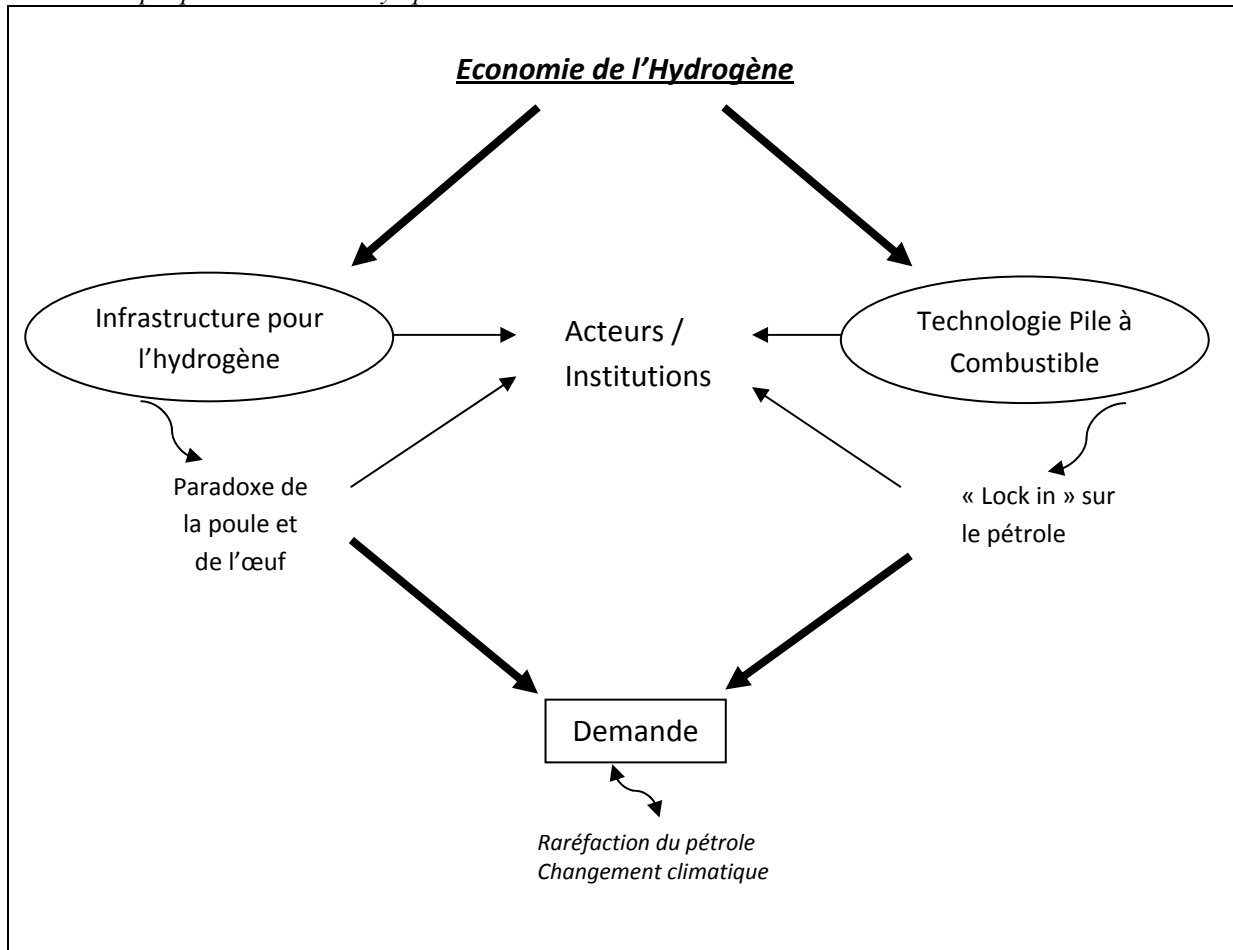
Ainsi, la transition technologique est un processus complexe en raison des modifications qu'il est nécessaire d'observer au niveau des structures sociales (Geels, 2005). Les innovations de système émergent à partir des liaisons entre plusieurs niveaux : les niches de marché, le régime sociotechnique et le paysage socioculturel. Les innovations radicales entrent d'abord dans les marchés niches où, par effet d'apprentissage, elles progressent en termes de rapport prix/performances. L'entrée dans les niveaux supérieurs, c'est-à-dire le changement de régime technologique et de contexte socioculturel, dépend des processus spécifiques à ces deux niveaux. La dynamique peut être favorable et en synchronie avec les avancées au niveau des niches, ce qui ouvre une fenêtre d'opportunité à la diffusion de l'innovation sur le marché. Les premiers marchés niches ont un rôle important dans la mesure où ils permettent à la technologie d'améliorer ses performances et de s'adapter graduellement à la pression concurrentielle avant d'entrer dans les marchés principaux (Christensen, 1997 ; Kemp et al., 1998). Cependant, les barrières techniques et institutionnelles peuvent bloquer la diffusion des innovations à grand potentiel économique et environnemental.

La prise en compte des effets externes sur l'environnement est une condition fondamentale pour établir une concurrence équilibrée entre les innovations vertes et les technologies polluantes (Jaffe, Newell et Stavins, 2003). La politique environnementale (instruments économiques, normes et réglementation) est en mesure de réduire l'écart de coût entre les innovations décarbonnées et les technologies polluantes, ouvrant ainsi une fenêtre d'opportunité pour la diffusion des technologies vertes.

Le traitement théorique de la problématique de la thèse

Notre thèse essaye de comprendre quelles sont les conditions favorables au développement d'une économie de l'hydrogène en Europe, et la manière dont ce développement peut être organisé. La littérature de l'organisation industrielle et du changement technique nous semble constituer un cadre théorique approprié au traitement de notre problématique de recherche. Le graphique 12 résume l'approche qui est adoptée ici.

Graphique 12. Cadre analytique de la thèse



Afin de comprendre l'application pratique de l'hydrogène comme vecteur énergétique permettant d'alimenter les objets portables ou mobiles, ou encore une pile à combustible stationnaire de production d'électricité (éventuellement avec récupération de chaleur), nous commençons par une analyse technico-économique de la chaîne industrielle depuis la production d'hydrogène jusqu'à son utilisation dans les piles à combustible. Cette analyse permettra de repérer les principaux facteurs et

conditions pour la viabilité d'une nouvelle industrie de réseau basée sur l'hydrogène, ainsi que les obstacles à son développement.

Nous démarrons l'étude par le constat que l'hydrogène est une solution possible et, sous certaines conditions, économiquement rentable. Cependant, une grande difficulté à l'introduction de l'hydrogène dans le marché est l'absence d'infrastructures de transport et de distribution. Ceci empêche le développement de la demande. Et, en l'absence de demande, la décision des acteurs d'investir dans les réseaux d'hydrogène devient difficilement justifiable. Ce paradoxe de l'« œuf et de la poule », de l'adéquation de l'offre à la demande, est un premier grand obstacle à la diffusion de l'hydrogène. Par conséquent, la transition peut démarrer par la mise en place de petits réseaux avec une légère avance par rapport à la demande.

Le développement des infrastructures nécessaires à l'économie de l'hydrogène aura besoin d'un investissement à grande échelle. L'expérience du changement industriel avec mise en place d'infrastructures, dans le cas de l'électricité et du gaz, est une source d'inspiration importante pour la planification des investissements dans les nouveaux réseaux d'hydrogène. La coordination des acteurs privés (y compris de la demande) et le rôle actif des institutions publiques ont été décisifs pour l'émergence des filières énergétiques dans le passé. Pour ce qui est de l'hydrogène, notre analyse vise à apporter des éléments de réponse aux questions suivantes : comment mettre en place les premières infrastructures et plus tard les interconnexions ? Qui doit supporter les coûts des premières démonstrations qui permettent d'acquérir l'expérience nécessaire pour faire baisser les coûts ?

Le comportement de la demande est un autre facteur décisif pour le succès de la transition. Les principaux facteurs qui expliquent l'intérêt pour l'hydrogène ont déjà été identifiés ci-dessus et concernent la raréfaction du pétrole (la matière première centrale de l'actuel paradigme technologique), et le phénomène du changement climatique. Par ailleurs, le développement de la demande est conditionné par l'évolution technologique puisque l'hydrogène n'est pas la seule alternative technologique. En effet, il est en concurrence dans les transports avec les biocarburants de nouvelle génération, les voitures hybrides ou électriques. Ainsi, à l'aide des théories de la transformation technologique d'inspiration évolutionniste (Kemp et al., 1988 ; Arthur, 1989 ; Dosi, 1988a ; Freeman, 1982 ; Nelson et Winter, 1977 ; Mansfield, 1968), nous analyserons les incertitudes technologiques de la pile à combustible, ainsi que la progression des autres technologies. Le développement incertain de la technologie et de la demande étant pris en compte dans les analyses des investissements (Dixit et Pindyck, 1994). Quelques questions doivent être abordées dans cette analyse : dans quelle mesure le comportement de la demande dépend-t-il de l'incertitude technologique ? Comment établir un contexte favorable aux investissements ? Est-ce que la probabilité d'une évolution favorable de la demande justifie l'investissement dans une technologie en évolution ?

La technologie pile à combustible représente une rupture technologique plus importante que les autres alternatives technologiques mentionnées. Les améliorations considérables de la performance par rapport à la technologie conventionnelle et l'emploi de principes scientifiques et techniques différents permettent de qualifier ce changement de saut de paradigme technologique plutôt que changement de trajectoire technologique (Dosi, 1988a ; Nelson, 1982). Cela rend la transition plus complexe et difficile. Premièrement, les barrières sont d'ordre technique. Les piles à combustible ont

vu leurs coûts se réduire considérablement au cours des dernières années. Toutefois, elles se trouvent toujours loin du seuil concurrentiel. Un effort de recherche fondamentale et appliquée est alors nécessaire pour lever les verrous technologiques (p.ex. membranes plus résistantes et utilisant moins de matériaux rares comme le platine). Une attention dans l'investissement en projets de démonstration à grande échelle pour préparer la technologie et réduire les coûts par l'effet d'apprentissage est également nécessaire (Arrow, 1962a). Deuxièmement, le déploiement de la pile à combustible doit contourner une situation de « lock in » technique et institutionnel aux énergies fossiles (Unruh, 2000, 2002). Il est alors intéressant d'analyser les stratégies des acteurs impliqués dans l'actuel paradigme (p.ex. compagnies pétrolières, constructeurs d'automobiles) qui normalement résistent au changement technologique. Néanmoins, dans le cas de l'hydrogène, ces acteurs ont des intérêts contradictoires.

En ce qui concerne la transformation du système technologique, les stratégies à considérer doivent prendre en compte le processus de changement technologique et les mécanismes de sélection technologique par le marché. Cela concerne le mode par lequel les innovations radicales entrent sur le marché et remplacent progressivement les technologies existantes. De plus, le problème des innovations environnementales est que les bénéfices pour la collectivité sont difficilement appropriables par l'investisseur. Dans ce cadre, quels instruments doivent être mis en place pour soutenir ces innovations ? Les instruments qui promeuvent la soutenabilité sont-ils suffisants pour appuyer le développement de l'hydrogène ou faudra-t-il encore des instruments plus spécifiques ?

Une fois que les principales caractéristiques du changement technologique des industries de réseau ont été mises en lumière, l'analyse se concentrera sur les effets attendus de la diffusion de l'hydrogène. Pour analyser les implications pratiques du paradoxe de l'œuf et de la poule (effets de réseau, dépendance de sentier et verrouillage technologique), nous avons besoin de comprendre comment s'exerce la concurrence entre plusieurs alternatives technologiques pour le remplacement des technologies conventionnelles. Il s'agira d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes : quelle est l'évolution attendue de l'hydrogène sur le marché ? Dans quelle mesure les effets de réseau affectent-ils la diffusion de l'hydrogène ? Comment peut évoluer la rivalité concurrentielle entre la voiture à hydrogène et la voiture électrique ?

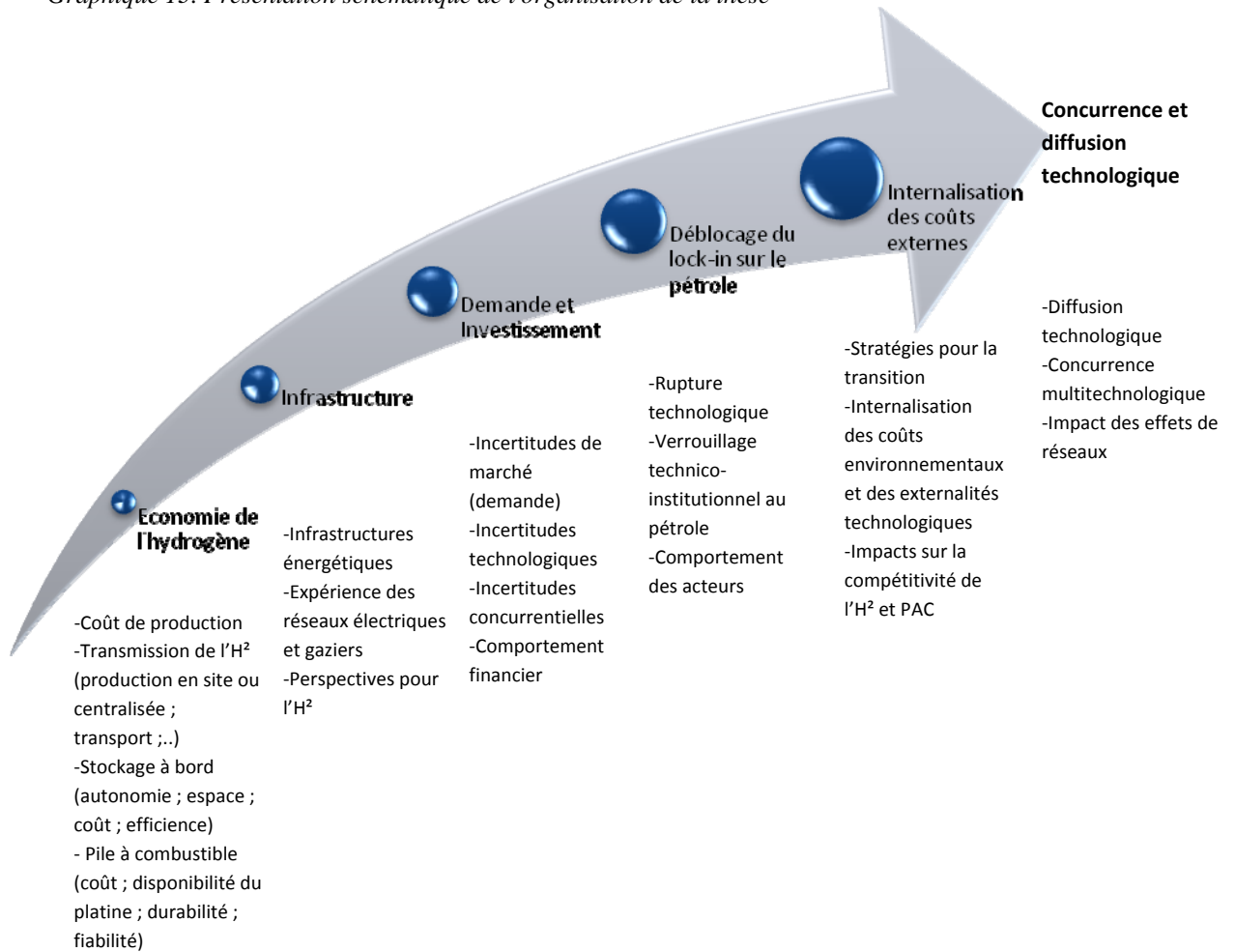
La réponse à notre question de départ requiert l'étude du changement technologique dans les industries de réseau et celle de la spécificité des technologies d'hydrogène. L'analyse doit mettre en évidence le processus parallèle de mise en place des infrastructures et d'innovation à travers l'étude des structures industrielles et les processus d'apprentissage et de diffusion de la technologie des piles à combustible. En particulier, la démarche *souline l'importance des rétroactions positives provoquées par l'infrastructure et les externalités d'adoption de la pile à combustible pour la diffusion de l'hydrogène sur le marché.*

Plan de la thèse

La thèse est organisée en deux parties. La première partie présente la chaîne industrielle de l'économie de l'hydrogène, en particulier l'infrastructure. Les conditions permettant la viabilité de l'infrastructure sont analysées à partir de l'exemple historique des réseaux électriques et de gaz naturel, de même que l'étude du comportement de la demande. La deuxième partie de la thèse analyse l'entrée sur le marché, et spécialement dans les transports, des innovations décarbonées comme les piles à combustible et les facteurs qui bloquent leur introduction. La dépendance au

pétrole est une barrière à surmonter avant que la transition pour un nouveau carburant ne soit possible. En outre, la mise en place d'une nouvelle infrastructure pose la question de la concurrence entre plusieurs options technologiques.

Graphique 13. Présentation schématique de l'organisation de la thèse



L'économie de l'hydrogène dépend de la manière dont l'hydrogène est produit et surtout distribué jusqu'à l'endroit de son utilisation. Le chapitre 1 présente la chaîne de l'hydrogène d'un point de vue technico-économique. Les coûts de l'infrastructure ont un poids décisif dans l'ensemble de la chaîne. Le chapitre se poursuit avec le passage en revue des différents scénarios envisagés dans la littérature pour la mise en place de l'infrastructure. La viabilité économique de celle-ci repose sur l'existence de la demande ; elle-même dépendante de l'existence des réseaux de distribution. Les deux éléments - infrastructure et demande – à la base du problème de l' « œuf et la poule » sont analysés plus profondément dans les chapitres suivants.

Le chapitre 2 est consacré à l'étude de l'infrastructure selon une approche de l'organisation industrielle de la nouvelle filière hydrogène. Le développement historique de l'électricité et du gaz naturel est riche en enseignements en termes d'organisation d'une industrie de réseau énergétique naissante. Cela permet d'avoir des perspectives sur la manière dont les réseaux d'hydrogène peuvent être déployés.

Le chapitre 3 part du constat que l'Etat n'est plus en mesure de soutenir seul les investissements dans les nouveaux réseaux énergétiques et que les agents privés doivent aussi participer à la mise en place des réseaux. Ainsi, l'étude se place selon l'optique de l'investisseur qui analyse l'environnement des projets et utilise le calcul financier de la rentabilité avant d'engager les investissements. Le rôle de la demande est fondamental pour la viabilité des projets. Les incertitudes portant sur la demande, dont le comportement dépend de l'évolution de la technologie des piles à combustible, requièrent un traitement analytique particulier qui nous amène à privilégier la théorie des options.

Dans la deuxième partie de la thèse, nous allons mettre en lumière le processus d'évolution des piles à combustibles, ainsi que les facteurs qui bloquent sa progression sur le marché. Cela nous conduit à une discussion sur les stratégies possibles pour lever les barrières non économiques à la diffusion des PAC. Cette analyse prend notamment en compte le fait que l'hydrogène n'est pas le seul candidat au remplacement du pétrole dans les transports.

L'analyse du chapitre 4 est centrée sur les caractéristiques du changement technique introduit par les technologies de l'hydrogène et des piles à combustibles. L'utilisation de cette technologie représente une rupture avec les technologies actuelles basées sur les énergies fossiles, mais son coût reste plus élevé que celui d'autres technologies alternatives. Ce coût doit diminuer grâce à la recherche qui peut permettre de lever les verrous techniques ; à l'effet d'apprentissage avec l'augmentation du nombre de piles à combustibles déployées ; et grâce à la mise en production à grande échelle. En outre, le système actuel des transports a été verrouillé sur les carburants fossiles par un processus historique de dépendance de sentier, ce qui pose des défis additionnels à l'introduction de l'hydrogène dans le marché.

Le chapitre 5 étudie les stratégies destinées à lever le verrouillage technologique et institutionnel des transports sur le pétrole. Nous examinerons les développements théoriques récents relatifs à la transition énergétique. Le développement de l'industrie automobile dans le passé offre un champ d'application aux théories de la transition technologique. Cela permet en particulier de comprendre comment la transition a pu se dérouler, et de retirer quelques leçons pour le développement des alternatives dans le futur. Par ailleurs, les barrières au développement de l'hydrogène sur le marché rendent indispensable la mise en place d'une politique technologique. L'analyse essaye alors de caractériser le choix des instruments économiques et réglementaires les plus adéquats, compte tenu de la dynamique d'innovation révélée dans la thèse.

Pour finir, le chapitre 6 est divisé en deux parties. La première partie fait un tour d'horizon des modèles économiques de la diffusion technologique. Dans la deuxième partie, nous analysons, à partir de la dynamique d'innovation mise en évidence dans la thèse, et en particulier à partir des externalités de réseau et l'infrastructure, le potentiel de remplacement des voitures conventionnelles par une motorisation plus soutenable. L'étude se focalise sur la concurrence technologique entre l'hydrogène et l'électricité. Nous montrons que la voiture hybride rechargeable – plus proche de la commercialisation – peut gagner une part initiale de marché susceptible de verrouiller l'industrie sur ce standard et empêcher l'entrée de l'hydrogène dans le futur et ce, quelle que soit sa performance technologique. De plus, l'investissement initial dans l'infrastructure électrique, sans un effort équivalent pour l'hydrogène, renforce la probabilité de « lock in » et limite la capacité du marché à retenir la meilleure technologie.

PREMIERE PARTIE

LE DEVELOPPEMENT DES INFRASTRUCTURES NECESSAIRES A L'ECONOMIE DE L'HYDROGENE

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE

Les tendances actuelles de l'évolution du secteur des transports ne sont pas compatibles avec un développement durable. La consommation énergétique de ce secteur devrait doubler d'ici 2050 (WBCSD, 2004), ce qui augmenterait considérablement les besoins en pétrole et rapprocherait l'avènement d'un éventuel 'peak oil'. Et les émissions de gaz à effet de serre de ce secteur constitueraient l'une des composantes majeures de l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère avec l'avènement probable d'un changement climatique (GIEC, 2007a).

L'hydrogène peut être produit à partir de ressources renouvelables, et converti en énergie par une pile à combustible embarquée dans le véhicule sans émission de gaz à effet de serre. Il peut être alors la solution pour les défis énergétiques actuels, mais pour cela des barrières doivent être encore surmontées avant qu'il puisse entrer sur le marché.

En particulier, l'hydrogène nécessite une infrastructure nouvelle à l'instar des autres révolutions énergétiques du passé. Cependant, cette infrastructure très intensive en capital doit se mettre en place dans un environnement concurrentiel, ce qui pose des questions de financement et de coordination des investissements, notamment au début de la transition. De plus, les incertitudes technologiques portant sur la pile à combustible et le stockage d'hydrogène à bord n'incitent pas aux investissements privés dans la filière. Enfin, le succès de l'hydrogène dépend de l'adhésion de la demande, laquelle ne se développera pas sans que les technologies soient disponibles et que les infrastructures soient en place.

Nous commençons par analyser l'économie de l'hydrogène dans le **chapitre 1**. Pour cela, une caractérisation de la filière est présentée, en particulier pour les applications mobiles. Cette analyse permet de concevoir l'ampleur des défis techniques et économiques à partir desquels s'élaborent les scénarios possibles pour l'avenir. Les acteurs expriment leurs préférences dans cet exercice, les uns voyant dans l'hydrogène une manière de préserver leur métier-base (compagnies pétrolières, constructeurs automobiles) ; les autres voyant là une façon de diversifier leurs activités (compagnies de gaz industriel ; électriciens et gaziers). Malgré toutes les barrières qui s'opposent au développement de l'hydrogène, les perspectives économiques de la filière sont prometteuses, et on assiste au démarrage graduel des investissements un peu partout dans le monde surtout grâce au soutien des Etats.

Dans le **chapitre 2**, nous examinons la manière dont la transition vers un système énergétique basé sur l'hydrogène peut s'organiser dans le nouveau cadre concurrentiel en Europe. Nous mobilisons

pour cela le cadre théorique des industries de réseau afin d'analyser la mise en place de l'infrastructure. Ainsi, plusieurs concepts sont développés tels que les effets de club, les économies d'échelle, les économies d'envergure, et les externalités socio-économiques de l'investissement dans de grandes infrastructures. L'analyse de l'évolution historique de l'électricité et du gaz en Europe renforce l'argument selon lequel l'intervention publique est nécessaire pour que le réseau atteigne la taille critique et, sous l'effet des externalités de réseau, se diffuse plus rapidement dans le marché.

Le **chapitre 3** vise à améliorer la compréhension des facteurs qui entravent actuellement la mise en place de l'infrastructure pour l'hydrogène. L'hydrogène et les piles à combustible sont une innovation radicale avec un grand potentiel à long terme, mais ils sont actuellement entourés par de nombreuses incertitudes. L'incertitude sur le comportement de la demande est particulièrement importante ; son évolution dépend entre autres de la performance relative des technologies de l'hydrogène et l'existence de l'infrastructure. L'analyse financière standard montre que l'investissement n'est pas rentable dans les conditions actuelles. Toutefois, cette méthode ne tient pas compte des aspects qualitatifs du projet tels que les gains d'apprentissage et l'information sur le potentiel de marché. L'utilisation de la théorie des options réelles nous permettra de prendre en compte l'environnement incertain dans la prise de décision.

CHAPITRE 1

L'Economie de l'hydrogène : Clé de l'avenir ou rêve d'ingénieur ?

L'hydrogène a la capacité de se substituer aux combustibles fossiles et d'apporter, à terme, une réponse aux défis actuels en termes de sécurité énergétique, de changement climatique, et de pollution de l'air dans les villes. L'économie de l'hydrogène est un concept qui décrit un monde où l'énergie provient essentiellement de sources non polluantes (et renouvelables à long terme) par intermédiaire de l'hydrogène.

A l'instar de l'électricité, l'hydrogène est un vecteur énergétique qui peut être produit à partir d'une grande palette de sources énergétiques. Il peut être produit à partir de sources fossiles sans émissions de gaz à effet de serre (GES) à condition que le carbone soit capturé pendant le processus de production et séquestré dans les cavités géologiques adéquates. Ou bien, l'hydrogène peut être produit à partir de ressources renouvelables en satisfaisant les besoins énergétiques d'une manière plus soutenable. Cette dernière permet notamment de valoriser les ressources locales et de renforcer l'indépendance et la sécurité énergétique des pays. En outre, la conversion de l'hydrogène dans les piles à combustible atteint des rendements énergétiques très élevés.²⁴

La pile à combustible ouvre la possibilité pour l'hydrogène d'être utilisé dans un grand nombre de fonctions (stationnaires, mobiles ou portables) englobant presque tous les domaines de consommation d'énergie. Son application stationnaire participe à la tendance à la décentralisation des réseaux de production et de distribution d'électricité, ainsi qu'à la pénétration des énergies renouvelables dans le mix énergétique (Rifkin, 2007 ; Lovins et Williams, 1999). Toutefois, c'est dans les transports que les bénéfices de l'hydrogène sont les plus attendus (Ogden, 2006).

²⁴ Des efficacités énergétiques 2 à 3 fois supérieures à celles des moteurs conventionnels à combustion interne (Ogden et al., 2004).

Le secteur des transports est le deuxième plus grand émetteur de GES du domaine de l'énergie (14% des émissions de GES), avec une tendance croissante, en raison de la dépendance aux hydrocarbures.²⁵ L'hydrogène produit à partir de flux illimités d'énergies renouvelables peut être combiné avec de l'oxygène dans une pile à combustible pour générer l'énergie à bord, avec comme seul rejet la vapeur d'eau. Alors, l'hydrogène peut jouer un rôle important dans la réduction de la dépendance au pétrole et des émissions de GES dans ce secteur.

La transition vers un régime énergétique basé sur l'hydrogène participe à la tendance longue pour la décarbonisation des systèmes énergétiques. Mais pour que l'économie de l'hydrogène soit un jour possible, un ensemble de conditions doivent être préalablement réunies à commencer par les coûts de la production de l'hydrogène et de la pile à combustible qui soient compétitifs. Les nécessités logistiques sont présentées dans la section 1. Ensuite, la section 2 se focalise sur la principale technologie de conversion finale de l'hydrogène, la pile à combustible. La section 3 analyse enfin les défis de la transition en termes de la mise en place de l'infrastructure et du développement de la demande d'hydrogène.

Section 1. La chaîne industrielle de l'hydrogène-énergie

L'industrie de l'hydrogène est composée de différents segments autour d'activités spécifiques tout au long de la chaîne, depuis la production jusqu'à l'utilisation finale. Ces activités sont au nombre de quatre :²⁶

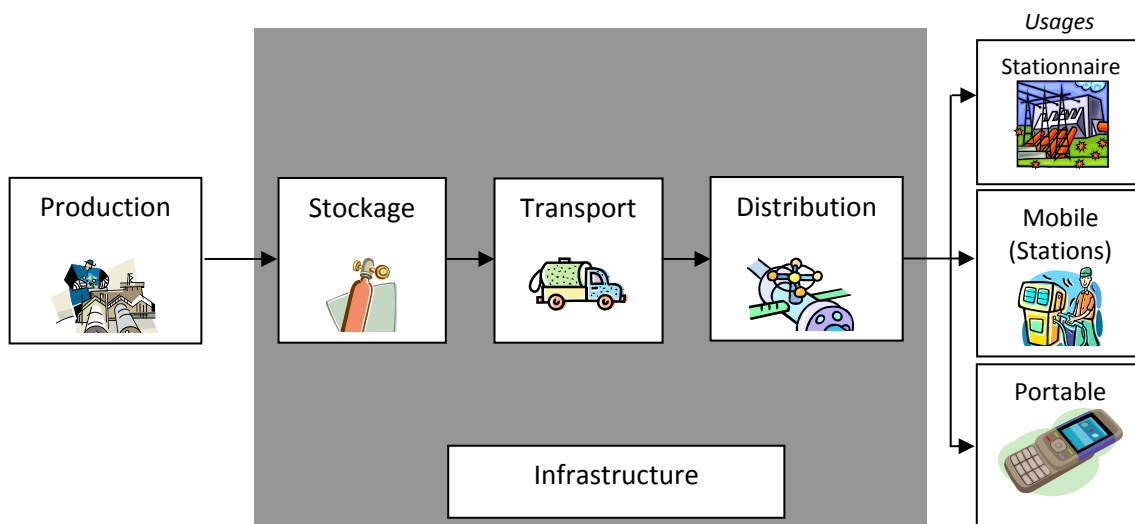
- production
- stockage
- transport et distribution (lorsque l'hydrogène n'est pas captif, c'est-à-dire lorsqu'il n'est pas produit et consommé sur place)
- station-service (pour les applications mobiles).

La production d'hydrogène peut se faire (ou non) à l'endroit même de son utilisation. Ainsi, on dira que l'hydrogène est produit de manière *décentralisée* si sa consommation se fait sur le lieu même de production, par opposition à la situation où la production est réalisée dans un lieu différent de celui de sa consommation (de manière *centralisée*) (graphique 14). La configuration centralisée bénéficie de gains d'échelle, mais présente l'inconvénient de nécessiter la mise en place d'une infrastructure de transport et de distribution, ce qui augmente les coûts finals de l'hydrogène.

²⁵ Voir introduction.

²⁶ Voir par exemple Ogden, 1999.

Graphique 14. La chaîne hydrogène-énergie dans le cas de production centralisée



L'industrie de l'hydrogène est très intensive en capital à tous les niveaux de la chaîne de production et de l'infrastructure. Les coûts de l'hydrogène au point de consommation dépendent de la configuration de la filière, laquelle à son tour dépend particulièrement des spécificités régionales (les sources d'énergie meilleur marché) et du volume de la demande.

1.1. La production d'hydrogène

L'hydrogène peut être produit à partir de différentes sources primaires d'énergie avec des processus de production distincts (tableau 2).²⁷

Tableau 2. Synthèse des principales technologies de production de l'hydrogène

Méthode	Entrants	Techniques de production
Thermochimique	Gaz Naturel	Reformage du gaz naturel (<i>steam methane reformer, SMR</i>)
		Oxydation partielle du gaz naturel (<i>Partial oxidation, POX</i>)
		Reformage autothermique (<i>autothermal reforming, ATR</i>)
	Charbon	Gazéification du charbon
	Biomasse	Gazéification de la biomasse
		Pyrolyse de la biomasse
Électrolyse de l'eau	Mix électrique	Electrolyse alcaline
	Renouvelable (solaire, éolien, etc.)	PEM
		SOEC
	Nucléaire	Electrolyse à haute température
	Energies fossiles	

²⁷ Pour une description des méthodes de production de l'hydrogène, voir par exemple : Padro et Putsche, 1999 ; Ogden, 1999 ; Simbeck et Chang, 2002.

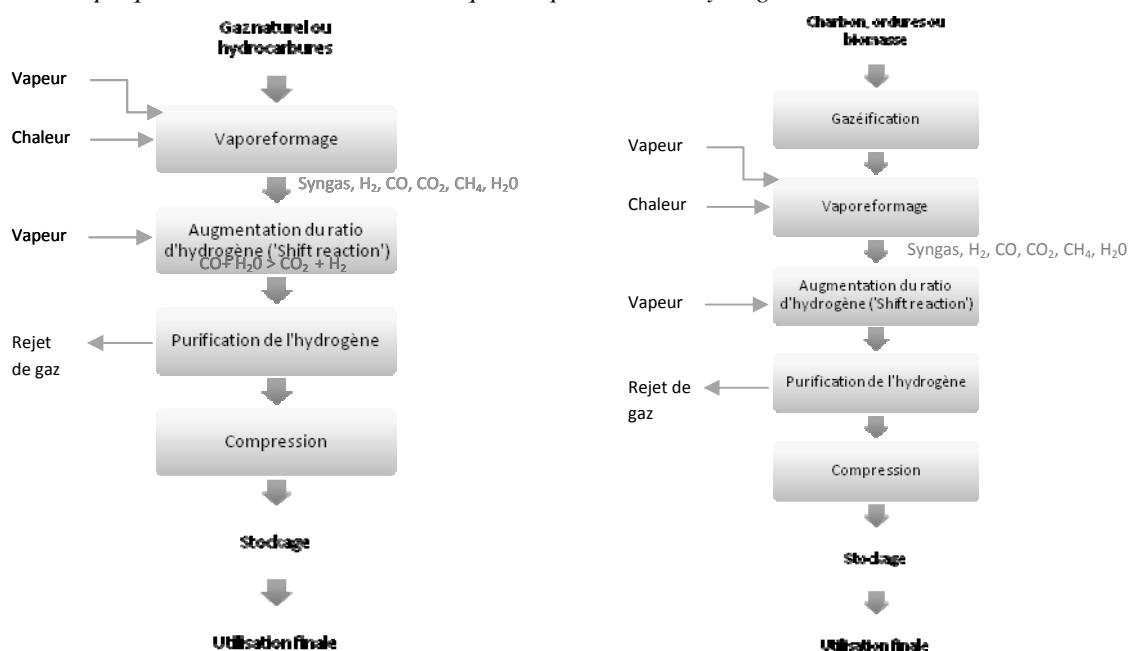
Les principales méthodes de production peuvent être regroupées en deux grands groupes : les méthodes thermochimiques extrayant l'hydrogène à partir des hydrocarbures ; et l'électrolyse de l'eau, qui permet d'en séparer les deux éléments constitutants, l'oxygène et l'hydrogène.

Chaque année, 65 000 tonnes d'hydrogène sont produites dans le monde, dont 95 % à partir de sources fossiles.²⁸ Le processus de production le plus utilisé est le reformage du gaz naturel. La production mondiale est en majeure partie captive, c'est-à-dire consommée sur place. La production d'ammoniac et le raffinage d'hydrocarbures représentent plus de 80% des débouchés.

1.1.1. Les méthodes thermochimiques

Les principales méthodes thermochimiques connues de production d'hydrogène sont : le reformage du gaz naturel ; l'oxydation partielle des hydrocarbures ; le reformage autothermique ; la gazéification du charbon ou de la biomasse ; la pyrolyse de la biomasse. Le graphique suivant présente les procédés de production d'hydrogène à partir du reformage de gaz naturel ou d'hydrocarbures, et de la gazéification du charbon, des déchets organiques ou de la biomasse.

Graphique 15. Processus thermochimiques de production d'hydrogène



Adapté d'Ogden, 1999a, p.233.

Le reformage des hydrocarbures, normalement du gaz naturel ('*steam methane reformer*' ou SMR), est le moins cher des processus de production d'hydrogène. Cette technique est similaire au processus historique de production du gaz de ville. Elle consiste à produire l'hydrogène à travers la transformation des hydrocarbures en gaz de synthèse composé de monoxyde de carbone (CO), dioxyde de carbone (CO₂), hydrogène (H₂), eau (H₂O) et méthane (CH₄). A l'issue du processus, le ratio hydrogène/carbone de ce gaz est habituellement augmenté par réaction avec l'eau ('*water gas shift reaction*'). Selon les besoins de pureté de l'utilisation finale, le gaz sortant peut être sujet à un processus additionnel de purification dont le plus connu est le « *pressure swing adsorption* » (PSA)

²⁸ <http://www.iea.org/Textbase/techno/essentials.htm> (accès du 2 mai 2008).

qui garantit des niveaux de pureté de l'ordre de 99,999% très appréciés notamment dans l'électronique.

L'efficacité de la conversion énergétique est de l'ordre de 75-80 %²⁹ pour la production à grande échelle.³⁰ Cette valeur peut même atteindre 85% en cas de réutilisation de la chaleur dégagée pendant le processus de production. Toutefois, l'efficacité de conversion se dégrade légèrement à 70-80% pour une plus petite échelle de production.

L'oxydation partielle (« partial oxidation », POX) est un processus similaire à celui du reformage. Il est aussi constitué par trois phases de production (l'oxydation des hydrocarbures ; la réaction du gaz avec l'eau ; et la purification du gaz). Ce processus consiste à oxyder le gaz naturel ou autres hydrocarbures de façon à obtenir le gaz de synthèse.

Un autre processus de production de l'hydrogène est la gazéification de la biomasse, charbon ou ordures municipales, à haute température (et haute pression) de manière à produire le gaz de synthèse. Ensuite, la concentration en hydrogène du gaz de synthèse est enrichie et en fin de processus, le gaz est purifié. La gazéification du charbon est spécialement rentable lorsque cette matière première est bon marché et/ou les autres hydrocarbures (comme le gaz naturel, le pétrole) sont plus chers (par exemple en Chine). Dans le cas des ordures municipales et de la biomasse, une partie importante des coûts est affectée au traitement et à la collecte des entrants.

Un avantage de l'oxydation partielle et de la gazéification par rapport à la SMR est la flexibilité de l'utilisation des matières premières. Les deux premiers processus peuvent traiter un éventail plus large de matières gazeuses, liquides et solides, alors que le SMR n'est capable d'utiliser que des entrants gazeux ou liquides légers en raison de sa faible tolérance aux impuretés.³¹ Des avancées technologiques importantes sont attendues dans les filières charbon, biomasse et ordures, en raison de la grande disponibilité des entrants lesquels sont mieux répartis au niveau mondial en comparaison avec le pétrole.

Les systèmes avancés de gazéification du charbon, bien qu'ils soient encore au stade de la R&D, promettent une meilleure efficacité et un plus haut degré de pureté de l'hydrogène avec la mise en place de techniques de nettoyage à haute température et l'utilisation de polymères pour la séparation des gaz. Un système plus proche de la commercialisation est celui de la poligénération d'hydrogène et d'électricité par utilisation de la technique des cycles combinés (« Integrated Gasification Combined Cycle », IGCC).³²

La production d'hydrogène par ces méthodes thermochimiques permet d'utiliser des matières premières autres que les énergies fossiles. Les techniques de gazéification et de pyrolyse de la biomasse sont des voies prometteuses de production d'hydrogène. La technique des cycles combinés (IGCC) est une autre option pour la cogénération d'hydrogène et d'électricité à partir de la biomasse. Entre-temps, les recherches se poursuivent sur la qualité de la biomasse, les façons de mieux la traiter et la transporter, et sur la qualité de l'hydrogène final.³³

²⁹ Mesurée par son pouvoir calorifique supérieur (PCS), en anglais « high heat value » HHV.

³⁰ Cf. Ogden, 1999, p.234-5.

³¹ Cf. Simbeck et Chang, 2002, p.8 .

³² Cf. WETO-H2, 2007, p.74-5.

³³ Cf. AIE, 2006a, p.15.

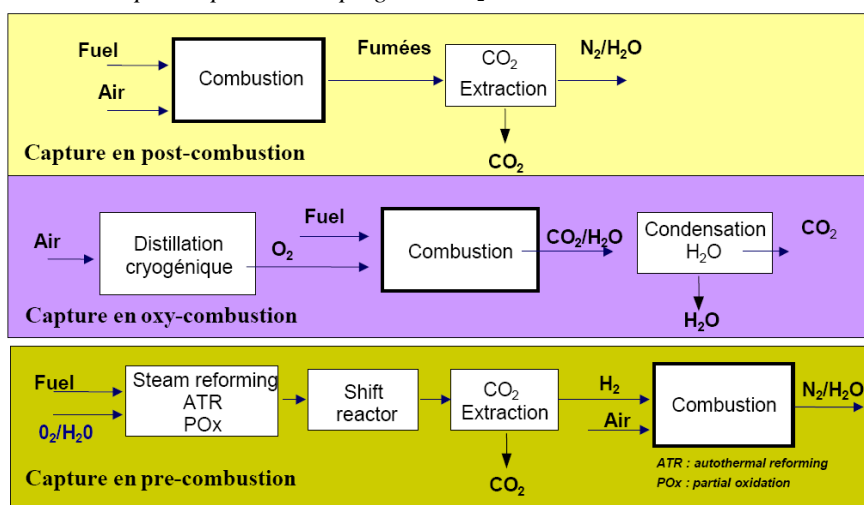
En attendant, la majeure partie de l'hydrogène est produit par traitement thermo-chimique d'énergies fossiles avec l'inconvénient des émissions de gaz à effet de serre (GES), en particulier du CO₂. Cela va à l'encontre de l'objectif de réduction des émissions, et limite donc le rôle que l'hydrogène peut jouer dans la lutte contre le changement climatique.³⁴ Néanmoins, des techniques existent pour empêcher que le CO₂ soit libéré dans l'atmosphère.

La capture et séquestration du CO₂

Le CO₂ généré pendant la production d'hydrogène par la voie du reformage des hydrocarbures ou de la gazéification du charbon ou biomasse peut être capturé et séquestré de manière à ce que l'utilisation de ce vecteur énergétique se fasse sans émissions de carbone.

La chaîne de la capture et séquestration du CO₂ est composée de trois étapes : captage, comprenant la séquestration et la compression ; transport ; et stockage.

Graphique 16. Principales options de captage du CO₂



Source : Le Thiez et Rojey, 2007.

Le captage du CO₂ peut être effectué en employant une des trois techniques suivantes (graphique 16) :

- La *postcombustion* ou la séparation du CO₂ à partir de fumées de combustion, est une technique connue – utilisée pour le gaz naturel - qui consiste dans le lavage des fumées en employant un solvant. Cette technique est facilement adaptée aux installations existantes, mais elle présente l'inconvénient d'être plus adéquate au traitement de grands volumes de fumées à faible pression et dilués dans le CO₂.³⁵ C'est pour cela que les deux autres techniques sont plus fréquemment retenues dans les installations nouvelles.
- L'*oxycombustion* consiste dans l'utilisation d'oxygène pur pendant la combustion ce qui permet de dégager un gaz très concentré en CO₂ facilement séparable de la vapeur d'eau.

³⁴ La littérature sur les analyses du cycle de vie étudie l'impact du choix des technologies tout au long de la chaîne (depuis la production jusqu'à l'utilisation finale), ainsi que l'utilisation de différentes matières premières, sur les coûts finals et émissions de GES. Pour une révision : NaturalHy (2004), « Literature Review Report, Work Package 1: Life Cycle and Socio-Economic Assessment, » December.

³⁵ Le gouvernement anglais a lancé un appel d'offre pour la construction d'une centrale à charbon de 300-400 MW de capacité avec captage du carbone par postcombustion à échéance 2014.

- La *précombustion* a été présentée lors de notre exposé des méthodes de production de l'hydrogène par la voie thermochimique. Le combustible (gaz naturel, biomasse, charbon, etc.) est transformé en gaz de synthèse (hydrogène, dioxyde de carbone, monoxyde de carbone) par un des procédés présentés ci-dessus (reformage, oxydation partielle, reformage autothermique). Ce gaz réagit ensuite avec l'eau de manière à former d'avantage d'hydrogène et aussi de CO₂. Le CO₂ peut alors être facilement séparé de l'hydrogène, lequel peut servir à la production d'électricité, ou comme carburant pour les transports, sans émission de carbone.

La différence de coût entre les trois processus décrits ici n'est pas très grande et donc plusieurs techniques doivent être testées avant le déploiement à grande échelle (McKinsey, 2008).

Ensuite, le CO₂ est stocké et transporté sous forme gazeuse, liquide ou solide. Le transport peut se faire par gazoduc ou tanker (route, rail ou mer). Cependant, les importants volumes attendus de capture/stockage de CO₂ favorisent nettement l'option gazoduc. Les Etats-Unis disposent d'une grande expérience dans le transport de CO₂ par gazoduc lequel est utilisé pour la récupération assistée de la production de pétrole et de gaz naturel. Chaque année, 22 Mt CO₂ environ sont transportées à travers un réseau de 3980 km de gazoducs vers les puits d'hydrocarbures du Bassin Permien (Le Thiez et Rojey, 2007).

Finalement, le CO₂ est séquestré dans les formations géologiques profondes telles que les gisements épuisés de pétrole ou de gaz, les aquifères salins profonds, ou les veines de houille non exploitées. Cette technologie est connue depuis des années, toutefois des améliorations et des baisses de coûts sont encore nécessaires en vue d'une utilisation à grande échelle.

Les coûts de la séparation, capture et compression du CO₂ sont les plus importants de la chaîne et c'est dans les techniques de séparation de l'hydrogène que les améliorations sont les plus nécessaires (McKinsey, 2008 ; Le Thiez et Rojey, 2007). Les coûts de transport varient avec la distance et la situation géographique. En particulier, le transport du CO₂ sur de grandes distances augmente fortement les coûts.³⁶

Ainsi, les coûts de la capture, transport et séquestration du CO₂ dans les formations géologiques ont été estimés **entre 10 à 50% du coût final de l'hydrogène**, ce qui reflète l'incertitude avant la commercialisation.³⁷ Toutefois, la viabilité de la capture et séquestration du CO₂ n'est pratiquement envisagée que pour la production centralisée en raison des coûts des équipements, en raison

³⁶ Une distance de 200 km supérieure à la normale augmente le coût final de 10 € par tonne de CO₂ (McKinsey, 2008).

³⁷ Ogden (1999, 2002), indique >10% ; WETO-H2 (2007) calcule à 20% des coûts de la production d'hydrogène par gaz naturel et charbon: entre 3-10 €/tCO₂ pour le transport et injection dans le réservoir ; et 30-50 €/t CO₂ les coûts globaux de capture and stockage du CO₂. Pour sa part, Roads2HyCom (2009b) prévoit une augmentation de 45-50% du coût de l'hydrogène. Une estimation du consultant McKinsey (2008) chiffre le coût des projets pilote à 60 à 90 €/tCO₂, lequel peut diminuer par l'effet d'apprentissage jusqu'à 30-45€/tCO₂ à l'horizon 2030. L'objectif de la Commission Européenne est de ramener ces coûts sous le seuil des 20 €/t CO₂ à moyen terme (légèrement en dessous de la valeur théorique considérée pour la tonne de CO₂ dans le système européen d'échange de quotas).

également de l'impossibilité de mettre en place une infrastructure qui raccorde chaque unité décentralisée de production d'hydrogène aux endroits les plus proches de stockage du CO₂.³⁸

Des incertitudes majeures demeurent au niveau du stockage de CO₂. Bien que la partie estimée du coût du stockage soit faible par rapport au coût total de la chaîne, des questions restent à résoudre sur la capacité de stockage, les lieux de séquestration et la sécurité. Les coûts de stockage dépendront beaucoup de la réglementation concernant la sûreté et le contrôle du CO₂. Le potentiel de stockage dans le monde ne fait pas l'objet d'un consensus ; cependant, il semble ne pas poser de contraintes majeures au moins à l'horizon 2050 (Le Thiez et Rojey, 2007).

La capture et le stockage du CO₂ ont aussi des retombées économiques positives. Dans la plupart des cas, il s'agit soit d'éviter une pénalisation, soit d'augmenter un bénéfice. Entre autres, cette technologie permet : (i) la production d'hydrogène à bas coûts et sans la contrainte environnementale ; (ii) le paiement de la taxe (ou quotas en Europe) sur les émissions de CO₂ ; (iii) la récupération assistée de la production de gaz naturel ou pétrole.

Un projet de séquestration de CO₂ a été récemment mis en place au champ de Sleipner, en Norvège, où la compagnie norvégienne Statoil injecte environ un million de tonnes de CO₂ par an dans la formation Utsira, dans une zone profonde de la mer du Nord. Le CO₂ est séparé du gaz naturel sur place (avant que celui-ci soit expédié vers les pays consommateurs), comprimé et injecté dans l'aquifère salin (DTI, 2004).³⁹ D'autres projets de capture et séquestration sont à l'étude en Norvège comme celui de Snohvit. Ces projets sont aussi un moyen pour les exploitants des champs gaziers et pétroliers de s'affranchir du paiement de la taxe sur les émissions de CO₂ en vigueur dans ce pays.

L'injection de CO₂ dans les gisements de gaz naturel ou pétrole est une technique qui sert aussi à augmenter les taux de récupération et la durée de vie des champs en cours d'exploitation. Une opération pilote a démarré à Weyburn, Canada, où 5 000 tonnes de CO₂, en provenance d'une usine de gazéification du charbon situé à 330 km du côté des Etats-Unis, sont séquestrées chaque jour pour améliorer la récupération au sein du champ pétrolier (Le Thiez & Rojey, 2007). La viabilité économique de cette technique de récupération s'est accrue ces dernières années en raison des avancés techniques et de l'apprentissage permis par les nombreux projets de démonstration dans le monde, et surtout, par l'augmentation du prix du pétrole.

Partout dans le monde, les gouvernements soutiennent les efforts de déploiement des techniques de capture et stockage de CO₂. Pour citer quelques exemples : le Canada, la Norvège, le Royaume-Uni, la France et les Etats-Unis (AIE, 2008b). Les pays du G8 ont récemment annoncé leur intention de lancer la construction de 20 projets d'envergure pour la capture et la séquestration du carbone avant 2010 (AIE, 2008b). Les pays européens ont pris l'engagement de financer 12 centrales de démonstration avant 2015. Le projet européen Dynamis (6^{ème} programme cadre) qui a duré jusqu'en 2008 a été

³⁸ Ogden (2002) compare les coûts de capture et séquestration du carbone de la production centralisée d'hydrogène à partir du gaz naturel et du charbon. Le prix de l'hydrogène livré à la pompe est légèrement inférieur lorsqu'il est produit à partir du charbon en raison du moindre coût de l'entrant. Toutefois, les gains de la capture et séquestration du carbone sont plus grands lorsque l'hydrogène est produit à partir du charbon, puisqu'il émet le double environ de CO₂ en comparaison avec la production au gaz naturel.

³⁹ www.statoil.com

consacré au développement de méthodes de production d'électricité et d'hydrogène à partir de carburants fossiles (gaz naturel et charbon surtout) avec capture et séquestration du carbone.⁴⁰

En janvier 2008, le gouvernement fédéral américain a toutefois annoncé la décision de geler les subventions accordées au projet de centrale électrique à charbon zéro émission « FutureGen » en raison d'un dépassement des délais et du budget prévisionnel.⁴¹ Le plan initial était de construire une centrale à cycle combiné au charbon gazéifié (*'integrated gasification combined-cycle'* ou IGCC) à Mattoon, Illinois, d'une capacité de 275 MW et avec production d'hydrogène, avant 2012. Depuis lors, la nouvelle administration Obama discute la réouverture du projet.⁴²

1.1.2. L'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau consiste à décomposer l'eau en hydrogène et oxygène par le passage de courant électrique. Les principales techniques se distinguent essentiellement selon le type d'électrolytes utilisé et les conditions de pression et de température de la réaction.

Il existe plusieurs types d'électrolyseurs :

- Les électrolyseurs *alcalins* sont déjà commercialisés depuis de nombreuses années. Il s'agit d'une technologie plus conforme aux applications stationnaires, notamment pour les sites isolés.
- La membrane polymère conductrice de protons (« Proton Membrane Exchange », *PEM*) est une technologie plus récente en train d'entrer sur le marché. Les avantages de cette technologie en comparaison de la technologie précédente portent sur sa portabilité, sa simplicité de fonctionnement, et ses performances supérieures. De ce fait, elle peut être utilisée dans les applications stationnaires et mobiles. De nombreux espoirs se concentrent sur cette nouvelle technologie, bien qu'à l'état actuel elle soit en lutte à des problèmes de durabilité et de coûts. Les coûts sont encore trop élevés, principalement du fait de l'utilisation des matériaux précieux tels que le platine.
- L'électrolyse à haute température par l'utilisation d'un électrolyseur solide (« solid oxide electrolizer cell » SOEC) basé sur la pile à combustible du type oxydes solides (« solid oxide fuel cell » SOFC). Le fonctionnement à des températures très élevées (vers 900 – 1000°C) augmente légèrement l'efficacité parce que la chaleur provoque elle-même une partie des réactions. L'efficacité globale peut être encore améliorée avec le raccordement à une source de chaleur disponible à proximité (p.ex. un générateur thermique).

⁴⁰ <http://www.dynamis-hypogen.com>

⁴¹ Le projet a été organisé autour d'un partenariat public-privé qui partageait le coût attendu de 1,5 milliard de US dollars de la manière suivante : gouvernement fédéral (USD 1.12 billion) ; et l' "Industrial Alliance" constituée par des producteurs et usagers de charbon (USD 0.38 billion). Voir : AIE, 2008.

⁴² Voir aussi : <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/futuregen/>

Steven Chu, le nouveau ministre de l'énergie de l'administration Obama, a déclaré très récemment la volonté de changer la décision de l'administration Bush et de relancer le programme « FutureGen » : <http://www.nytimes.com/2009/05/08/science/earth/08energy.html?ref=science>

Les électrolyseurs présentent typiquement des efficacités de l'ordre de 70-85% mesurées en termes de pouvoir calorifique supérieur, ce qui est comparable aux meilleurs systèmes de reformage de gaz naturel à large échelle avec récupération de chaleur (Ogden, 1999a)

En comparaison avec les techniques thermochimiques, les coûts en capital sont inférieurs. En plus, l'électrolyse est une procédure plus flexible que, par exemple, le reformage du gaz naturel, par la variété de tailles disponibles (des petites unités de 1 kW jusqu'aux grandes unités de 150 MW). Sa modularité permet de mieux adapter les capacités de production à la demande d'hydrogène, et ainsi de mieux gérer l'incertitude sur l'évolution de la demande (Barthel et al., 2004).

Les coûts opérationnels sont toutefois plus élevés par rapport aux méthodes thermochimiques. La consommation d'électricité représente une grosse partie du coût final de l'hydrogène. Actuellement, l'électrolyse de l'eau n'est compétitive que lorsque les prix de l'électricité sont très bas (1-2 c\$/kWh).⁴³ Alors, la production d'hydrogène par électrolyse se justifie lorsque l'électricité est abondante et pas chère (hydroélectrique; production éolienne et solaire excédentaire; nucléaire en période creuse), ou dans les régions isolées où le transport d'énergie est difficile.

Cependant, l'électrolyse produit l'hydrogène à très haut degré de pureté ce qui dispense des surcoûts liés aux équipements de purification du gaz. Cela est d'autant plus important que la pureté de l'hydrogène est nécessaire pour les piles à combustible de basse température (p.ex. du type PEMFC) qui sont envisagées dans les transports.

Le principal avantage de l'électrolyse est la réduction des émissions carboniques. Les émissions polluantes sont mesurées tout au long de la chaîne industrielle et dépendent de la combinaison des technologies déployées aux différents maillons de la chaîne, dès la production de l'hydrogène jusqu'au lieu de consommation (« Well-To-Tank » WTT) (EUCAR-CONCAWE-JRC, 2008). A l'instar de l'électricité, la majeure partie des émissions est occasionnée lors de la production d'hydrogène. Il est important que le bilan environnemental ne soit pas trop dégradé par une production polluante ce qui réduirait l'intérêt environnemental de la nouvelle filière.

Dans le cas de l'électrolyse, la quantité d'émissions carboniques dépend de la source primaire utilisée pour produire l'électricité. Ainsi, les émissions seront réduites ou nulles si l'électricité a été produite à partir de sources propres (comme la biomasse, l'éolien, le solaire, l'hydrique ou le nucléaire); ou très élevées si l'électricité a été produite dans une centrale à charbon, fuel ou gaz naturel, sans capture et séquestration du carbone.⁴⁴ L'utilisation d'électricité renouvelable dans l'électrolyse réduit à zéro les émissions de gaz carbonique de toute la chaîne énergétique. Ce sentier peut devenir très important au cas où il devient nécessaire de réduire drastiquement les émissions afin d'empêcher les changements climatiques brusques.

Par ailleurs, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau peut aider à la valorisation des énergies renouvelables. Le caractère intermittent des sources renouvelables (particulièrement éolien et solaire) est un des principaux obstacles à la progression de la filière renouvelable dans le bilan énergétique. L'intermittence des moyens de production rend très difficile l'équilibrage du réseau.

⁴³ Cf. Ogden, 1999, p.238.

⁴⁴ WETO-H2 (2007) present des estimations pour les émissions au long de la chaîne énergétique. La plage des émissions évolue de 0 g/MJ lorsque l'hydrogène est produit à partir de l'électrolyse sur place, jusqu'à 240 g/MJ lorsque la production d'hydrogène est centralisée puis délivrée par camion sur la forme liquide, et l'électricité considéré est produite à partir du mix électrique européen.

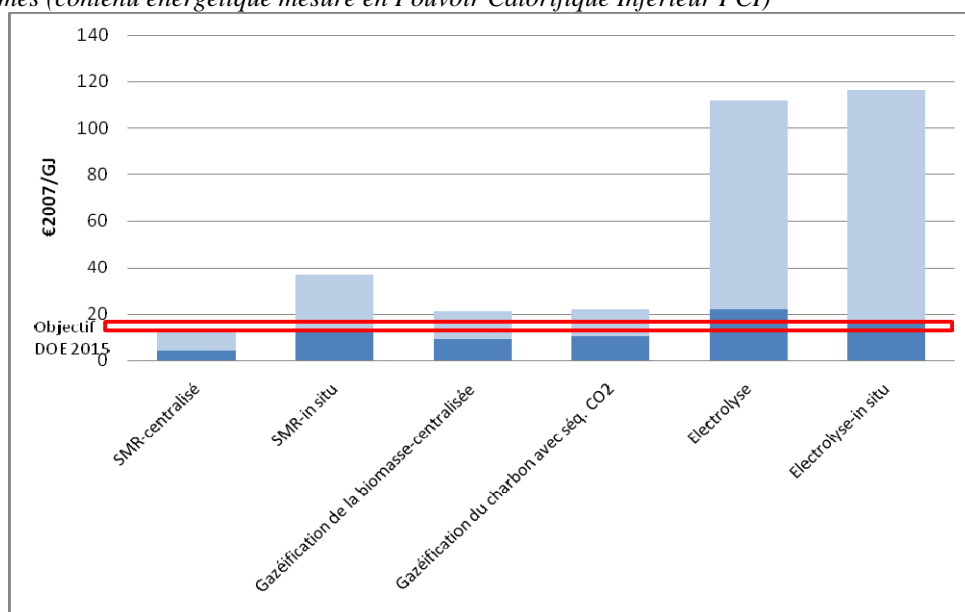
D'une part, les pointes de consommation ne coïncident pas forcément avec les moments de vent et de soleil. Alors, des capacités de production additionnelles doivent être mises en place pour prévoir un arrêt des capacités intermittentes en période de pointe. D'autre part, si l'électricité injectée dans le réseau ne trouve pas de débouché (y compris dans le pompage d'eau dans les barrages pour stocker l'énergie) elle sera définitivement perdue. La production d'hydrogène par électrolyse offre un moyen sûr pour stocker la production intermittente. La production électrique excédantaire est transformée en hydrogène et ensuite stockée sous forme gazeuse ou liquide. Ceci peut servir plus tard comme combustible pour les applications mobiles, ou être reconverti en électricité et réinjecté dans le réseau en période de pointe. Au-delà des avantages économiques de la revalorisation de l'énergie renouvelable et de l'équilibrage du réseau, cette solution a aussi des avantages environnementaux lorsqu'elle remplace les centrales polluantes à charbon pour la production électrique en période de pointes ou comme relais ('back-up') lors d'un manque de vent ou de soleil.

En bref, des avancées technologiques dans les électrolyseurs sont encore nécessaires afin d'augmenter la durabilité, l'efficacité, et diminuer les coûts unitaires. Entre-temps, des nouvelles technologies apparaissent comme potentiellement commerciales à moyen-terme et long-terme (AIE, 2006a). C'est le cas de la décomposition à très haute température (jusqu'à 3000°C) et des cycles thermochimique qui peuvent donner un rôle important à l'énergie nucléaire dans la production d'hydrogène. Ou encore de nouveaux concepts au niveau de la R&D tels que la photo-électrolyse (photolyse) où la lumière est utilisée pour décomposer l'eau en oxygène et hydrogène, ou la production d'hydrogène photo-biologique (biophotolysis) en utilisant des algues vertes et des cyanobactéries.

1.1.3. Comparaison des coûts de production, efficacités et émissions

Le graphique suivant présente une synthèse des coûts de production d'hydrogène par technologie à partir de différentes sources au sein de la littérature (la couleur foncée indique le coût minimal).

Graphique 17. Coût de production d'hydrogène selon les principales techniques disponibles à court et moyen termes (contenu énergétique mesuré en Pouvoir Calorifique Inférieur PCI)



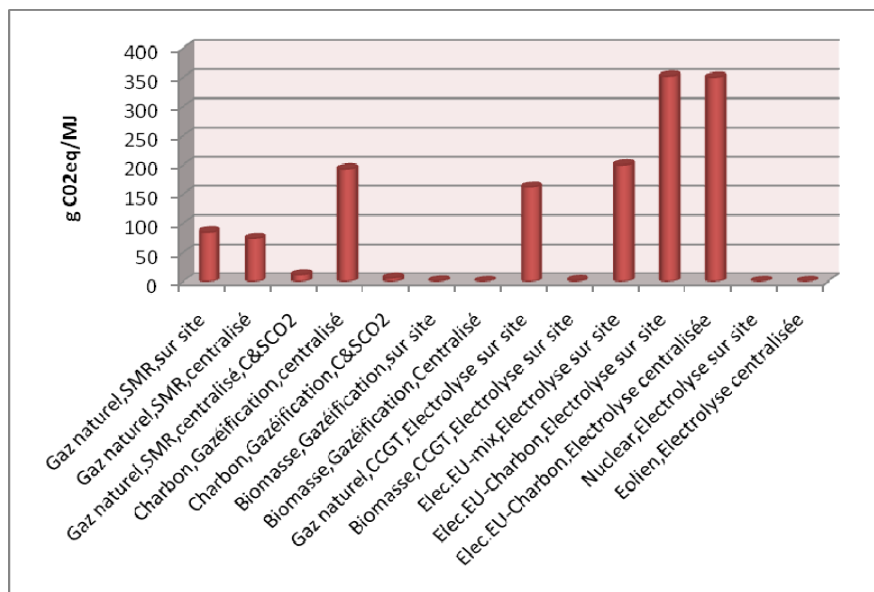
Sources: WETO-H2, 2007; DOE, 2007; AIE, 2006a; Castello et al., 2005.

Les coûts actuels se rapprochent des objectifs officiels du Ministère américain de l'énergie (DOE) pour la production d'hydrogène (14-16 €/GJ) lesquels prennent en compte le prix de l'essence et la plus grande efficacité des PAC par rapport au moteur à combustion hybride. Les méthodes thermochimiques à partir d'énergies fossiles sont les plus proches des objectifs commerciaux. En particulier, le reformage du gaz naturel reste la manière la plus économique de production d'hydrogène. L'électrolyse reste l'option la moins économique, plusieurs facteurs la rendant plus chère par rapport aux méthodes thermochimiques. Cependant, la situation est très diverse et dépend directement des coûts de l'électricité. Ainsi, l'électrolyse centralisée avec l'électricité produite en période de base à partir du charbon ou du nucléaire est presque compétitive ; alors que l'utilisation de l'électricité solaire photovoltaïque augmente fortement les coûts finals de l'hydrogène.

Les estimations présentées dans le graphique ne prennent pas en compte les coûts des émissions de gaz à effet de serre, sauf pour la gazéification du charbon où la capture et séquestration est nécessaire afin d'éviter un bilan carbone trop mauvais. Toutefois, la situation peut évoluer en raison d'une série de facteurs tels que l'augmentation du prix des énergies fossiles ou les coûts des émissions de CO₂.

Le graphique suivant présente le bilan environnemental des différentes méthodes de production d'hydrogène.

Graphique 18. Emissions de gaz à effet de serre des différentes méthodes de production d'hydrogène comprimé



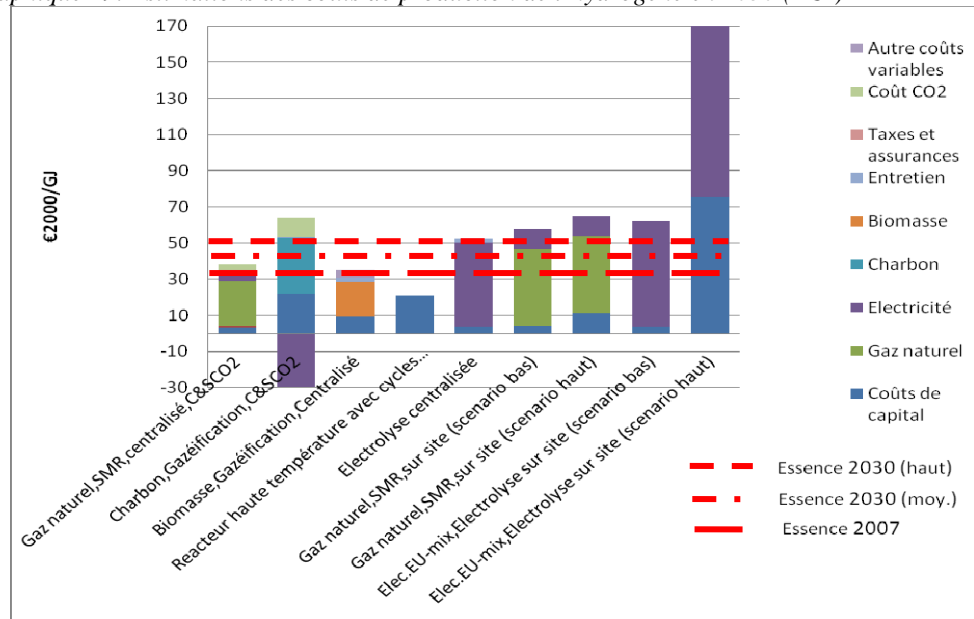
Source : EUCAR-CONCAWE-JRC, 2007.

L'utilisation du charbon sans capture et séquestration du carbone (C&SCO₂) augmente substantiellement les émissions de gaz à effet de serre de la production d'hydrogène, que ce soit par les voies thermochimiques ou par l'électrolyse de l'eau. La production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables (biomasse, éolien) ou propres (nucléaire) n'émet pratiquement pas de GES. Toutefois, cette analyse n'aborde ni la disponibilité des énergies renouvelables, ni les bénéfices des usages alternatifs à la production d'hydrogène.

Le graphique suivant présente une estimation des coûts de production de l'hydrogène pour 2030. Les données sont compilées dans le Roads2HyCom (2009a) et prennent en compte la réduction attendue

des coûts des technologies, l'amélioration des efficacités et l'augmentation des coûts des entrants (en particulier des énergies fossiles).

Graphique 19. Estimations des coûts de production de l'hydrogène en 2030 (PCI)



Source : Roads2HyCom, 2009b.

Les filières fossiles (p.ex. gaz naturel, charbon) restent les moins chères pour la production de l'hydrogène. Toutefois, les avancées techniques attendues dans l'électrolyse à haute pression et dans la filière de la biomasse (au niveau de la sélection des matières et de la gazéification) sont susceptibles de réduire l'écart qui les sépare des méthodes fossiles conventionnelles. De surcroît, les méthodes thermochimiques sont pénalisées par l'augmentation attendue du prix des énergies fossiles.

Les estimations du rapport Roads2HyCom (2009b) concernant les coûts des entrants (gaz naturel, charbon, biomasse, électricité) en 2030 expliquent l'augmentation des coûts finals de l'hydrogène par rapport au graphique 19. Cela est particulièrement évident dans le cas de l'électrolyse dont la plus grosse partie du coût final est constituée par le coût de l'électricité.

Les centrales à charbon à production conjointe d'électricité et d'hydrogène peuvent profiter de leur souplesse de production pour amortir plus rapidement les investissements initiaux. Les coûts d'électricité négatifs représentent précisément l'électricité qui est vendue sur le réseau. Selon cette estimation, la production d'hydrogène à partir du charbon ou du gaz naturel avec capture et séquestration du carbone sont compétitifs au regard du prix de l'essence en 2030.⁴⁵

Il est opportun de noter les incertitudes quant à l'évolution des coûts en capital de la production d'hydrogène par les cycles thermochimiques à haute température (centrales nucléaires de IVème génération), ainsi que sur la réduction des coûts des petits électrolyseurs pour la production sur site.

⁴⁵ Dans le scénario moyen du coût de l'essence (39€/GJ) en 2030, le prix du baril de pétrole retrouve les valeurs de 2008, soit 135\$. Le scénario haut (47,1€/GJ) est défini pour le même cours du pétrole mais avec des coûts de raffinage plus élevés par rapport au scénario moyen. Pour avoir une idée des ordres de grandeur, un prix final d'essence à 1,20€ TTC équivaut à 38€/GJ environ.

Cette analyse montre que la production centralisée est plus économique que la production en site pour une série de raisons (moindre coût des entrants, efficacité plus élevée, etc.). Cependant, la production centralisée exige la mise en place d'infrastructures de transport et de distribution de l'hydrogène. Il est peu probable que le niveau de demande soit suffisant pendant la période initiale de la transition pour justifier les investissements dans l'infrastructure. A terme, le développement de la demande est susceptible de rendre viable la mise en place de l'infrastructure.

1.2. Les infrastructures de stockage, transport et distribution

L'infrastructure est ici considérée comme l'ensemble des étapes nécessaires pour amener l'hydrogène des lieux de production jusqu'à l'endroit où il est stocké dans l'application qui fournit le service final (voiture, ordinateur portable, etc.). Ainsi, l'analyse recouvre les phases de stockage, de transport, de distribution et de livraison dont la plus connue est la station à hydrogène. L'infrastructure de transport et de distribution est nécessaire lorsque l'hydrogène est produit de manière centralisée. Une autre option est la production au niveau de la station de ravitaillement. Il s'agit d'une infrastructure importante et moins intensive en capital permettant l'entrée de l'hydrogène dans le marché.

1.2.1. Le stockage

Au terme du processus de production, l'hydrogène est stocké de manière convenable afin d'être expédié et utilisé comme un carburant. Il s'agit d'un gaz non toxique et très riche énergétiquement (2,3 fois plus concentré que le méthane en termes de contenu énergétique par kilogramme) (tableau 3). L'inconvénient de l'hydrogène est sa faible densité énergétique. Un kilogramme d'hydrogène prend presque 10 fois plus de place que le gaz méthane. Pour avoir le même contenu énergétique, il faut stocker un volume d'hydrogène 3 à 4 fois supérieur à celui du méthane (le pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène est de $10,7 \text{ MJ/m}^3$, alors que celui du méthane est de $37,6 \text{ MJ/m}^3$). L'encombrement rend plus coûteux le stockage et le transport d'hydrogène.

Tableau 3. Comparaison entre l'hydrogène et le méthane en termes de caractéristiques de volume et de densité

	Unités	Hydrogène	Méthane
Gravimétrie PCI	MJ/kg	120	53,2
Densité à CNTP	kg/m^3	0,0887	0,707
Volumétrie PCI et CNTP	MJ/m^3	10,7	37,6

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur.

CNTP : Conditions Normalisées de Température et Pression.

Adapté de Bossel et al., 2003.

Pour réduire le volume, l'hydrogène est comprimé, liquéfié à très basse température (cryogénique) ou retenu dans des matériaux solides ou chimiques. Le choix entre les différentes options dépend particulièrement de la méthode de stockage dans l'application finale.

Les taux de compression considérés dans les applications mobiles sont 350 bars (35 mégapascal MPa) et 700 bars (70 MPa). Actuellement, l'hydrogène est comprimé à 350 bars mais un taux de compression de 700 bars sera nécessaire pour atteindre les objectifs de densité énergétique nécessaires pour les voitures à hydrogène (CEA, 2005). Ce niveau de compression permet de réduire

d'un tiers le volume du réservoir par rapport à la pression à 350 bars, au prix d'une consommation additionnelle d'énergie⁴⁶ ainsi que de l'augmentation du poids du réservoir (AIE, 2006a).

La liquéfaction de l'hydrogène est une autre manière de réduire son volume. A la température de -253°C, l'hydrogène est 800 fois plus dense qu'à la température ambiante. Ainsi, il peut être stocké de façon plus compacte et moins lourde que dans les réservoirs à haute pression. Toutefois, la liquéfaction requiert des forts investissements en capital (ce qui demande une échelle minimale de production) et elle est très consommatrice en électricité (le tiers environ du contenu énergétique initial).⁴⁷ Par ailleurs, l'isolation thermique des cryostats (réservoir d'hydrogène liquides) n'est jamais parfaite ce qui entraîne une évaporation légère et permanente d'hydrogène de l'intérieur du réservoir ('boil-off'). Ces gaz doivent être libérés de manière à ne pas augmenter la pression dans le cryostat. Cette perte en hydrogène est en moyenne de l'ordre de 1% par jour (entre 0,3% et 3% selon la taille et la forme du réservoir). Cela peut empêcher l'utilisateur de laisser sa voiture dans un lieu confiné en raison de l'accumulation de gaz.⁴⁸

A l'heure actuelle, le stockage sous forme comprimée et liquide sont les manières les plus économiques d'emmagasiner l'hydrogène. Les coûts restent toutefois très élevés, 2 à 3 fois supérieurs au niveau concurrentiel actuel (DOE, 2007). La production en masse doit réduire les coûts des réservoirs. Par ailleurs, des avancées technologiques sont nécessaires pour toutes les méthodes de stockage afin que l'hydrogène ne soit pas trop pénalisé en termes de coût et de performance. Spécialement dans les nouvelles méthodes métallique et chimique très prometteuses.

Le stockage sous une forme solide (e.g. carbones, hydrides rechargeables, hydrides chimiques) reste au stade de la R&D, mais promet des avantages multiples, particulièrement en termes de volumétrie, de moindre pression nécessaire (gains d'efficacité), et de pureté de l'hydrogène (AIE, 2006a).

Selon le volume et l'utilisation finale, l'hydrogène est stocké de différentes manières :

- à très grande échelle, premièrement, il peut être comprimé et stocké dans des formations géologiques adéquates (cavernes, aquifères salins, etc.) pour approvisionner une très large demande (en faisant face à ses fluctuations) ou une vaste zone géographique. Deuxièmement, il peut être liquéfié et mis dans un « méthanier » pour exportation ;
- à une échelle intermédiaire, il peut être stocké dans des réservoirs cryogéniques conçus pour réduire au maximum les échanges thermiques avec l'extérieur. Le choix de la capacité de stockage cryogénique est très large, allant de quelques grammes jusqu'à plusieurs tonnes. Par ailleurs, l'hydrogène peut être comprimé et stocké dans des tubes pressurisés. Ceux-ci peuvent être disposés soit horizontalement (en file) soit verticalement (empilés). La capacité de stockage peut ainsi s'accroître très facilement avec l'augmentation du nombre de réservoirs ;
- à une échelle plus petite, mais aussi très importante, l'hydrogène peut être stocké à bord des applications mobiles sous forme i) comprimée à haute pression dans des bouteilles cylindres, ii) cryogénique dans des petits réservoirs spéciaux, iii) adsorbé dans un hydride métallique, si

⁴⁶ 25% de pertes énergétiques (CEA, 2005).

⁴⁷ Cf. Ogden, 1999, p.242.

⁴⁸ Voir: Bossel et al. (2003); AFH2 (2003).

le poids et la haute température nécessaire pour libérer l'hydrogène de l'hydride ne pose pas de problèmes pour le fonctionnement de l'application.

Le problème du stockage de l'hydrogène dans les véhicules est actuellement un des principaux verrous à franchir avant la production de masse de voitures pile à combustible (attendue à partir de 2015).⁴⁹ Cet aspect est d'autant plus important que le stockage d'énergie a toujours handicapé la diffusion de la voiture électrique au profit de la voiture à moteur à explosion. La quantité embarquée d'hydrogène doit permettre un confort comparable à la voiture actuelle avec une autonomie supérieure à 400-500 km sans augmenter excessivement le volume, le poids et le prix du réservoir (Schlapbach et Zuttel, 2001). De plus, le temps de transfert de l'hydrogène de la pompe jusqu'à la voiture ne doit pas dépasser quelques minutes (3-5 minutes environ est le temps jugé nécessaire pour « faire le plein » d'une voiture conventionnelle). Le choix de la méthode de stockage (comprimé, gazeux, métallique ou chimique) a des implications directes au niveau de la définition de la station de ravitaillement, ce qui sera analysé ci-dessous.

En somme, le choix du type de stockage dépend des options prises au long de la chaîne de production et de transport. Il doit aussi prendre en compte les nécessités spécifiques de l'utilisation finale (en termes de volume, de pureté, hydrogène gazeux ou liquide), ainsi que la géologie régionale, l'éventuelle expansion de la capacité de production et les investissements que cela entraîne.⁵⁰ Le tableau suivant résume les principales options de stockage de l'hydrogène.

⁴⁹ Voir par exemple DOE (2007) et HLG (2003).

⁵⁰ Cf. Amos, 1998, p.24-5.

Tableau 4. Synthèse des caractéristiques des technologies de stockage de l'hydrogène

	Stockage souterrain	Liquide	Comprimé	Hydrides métalliques
Avantages	Large capacité (millions de kg) Longues périodes Faibles coûts en capital si les cavités disponibles Faibles coûts opérationnels	Meilleure densité énergétique que le gaz comprimé Fortes économies d'échelle Technologie maîtrisée	Coûts en capital (compresseurs) Utilisation flexible à plusieurs échelles Technologie maîtrisée	Densité énergétique par volume (CNTP) Sûreté Pureté du gaz livré
Inconvénients	Non adéquat à des petits volumes ou au stockage à court terme « Gas cushion », un coût additionnel de capital	Température très basse (-253°C) Forts coûts en capital au niveau de la liquéfaction Large apports d'électricité pour la liquéfaction Evaporation (« Boil off »)	Faible densité énergétique Coûts de capital plus élevés des conteneurs en comparaison avec le stockage liquide Sécurité des bouteilles à haute pression à bord des véhicules	Lourd Forts coûts en capital Pas d'économies d'échelle Des développements nécessaires au niveau de la R&D
Adéquation	Larges quantités de gaz ou longue durée de stockage	Larges quantités, longue durée de stockage, faibles coûts d'électricité, ou applications à hydrogène liquide	Quantités moindres, haut niveau de rotation ou pour des trajets et périodes courtes	Quantités plus petites de gaz Compromis poids/volume
Capacité (Kg)	10.000 – 1.000.000	100 – 200.000	0 – 1.000	0 - 100
Efficienc e (%)	85 – 95 (hors « cushion gaz »)	70 – 80	85 – 90	< 90 (incertain)
Coûts additionnés (\$₂₀₀₀/kg) *	\$0,12 – \$0,30	\$1,00 - \$1,50	\$0,15 - \$0,60	\$0,40 - \$4,00
Composantes majeures des coûts	Energie (90%)	Energie (50%), Capital (50%)	Energie (25 - 50%), Capital (25 -75%)	Métal (75%)
Facteur d'échelle **	1	0,60 – 0,65	0,80 – 0,95	1

* D'après Hawkins (2006) à partir des données disponibles dans la littérature.

** Le facteur d'échelle est une mesure des gains d'échelle avec le changement de taille du stockage. La représentation habituelle est la suivante :

$$K_1 = K_0 \cdot (C_1/C_0)^r$$

où le « K » représente l'investissement en capital, le « C » la capacité de stockage, et le « r » le facteur d'échelle. La période initiale est signalé par un indice « 0 », alors que le moment après l'investissement est signalé par le numéro « 1 ». Les résultats considérés varient entre 0 et 1. Des valeurs proches de 0 signifient que l'augmentation de l'échelle de ce type de stockage apporte des gains d'échelle considérables, alors qu'ils disparaissent quand les valeurs se rapprochent de la valeur 1.

Source: Hawkins (2006) ; Amos (1998) ; AIE (2006a) ; WETO-H2 (2007).

1.2.2. Le transport et la distribution

Selon le lieu de production et de consommation de l'hydrogène, l'organisation de la production et de l'infrastructure est différente. Alors, la production peut se faire de manière :

- *décentralisée* à l'endroit de la consommation (ou de ravitaillement des applications mobiles). L'infrastructure existante de gaz naturel ou d'électricité fournit les entrants nécessaires à la production d'hydrogène sur place. Cela évite les coûts de la mise en place de l'infrastructure de transmission ;
- *centralisée* dans un lieu de production différent de celui de sa consommation. Cette option permet de diminuer les coûts unitaires de l'hydrogène grâce à des gains d'échelle et à l'accès à des entrants moins chers. Pour cela, il faut mettre en place une infrastructure de transport et distribution très coûteuse, laquelle exige un volume minimal de demande dont l'évolution est incertaine pendant la phase initiale.

Le transport et la distribution d'hydrogène peuvent se faire selon plusieurs modes. Les voies les plus importantes sont : les pipelines (l'hydrogène est comprimé dans les gazoducs) ; ou la route, par camion (comprimé ou sous forme liquide).

A. Le transport par pipeline

A l'instar du gaz naturel, l'hydrogène peut être transporté en grandes quantités par pipelines ayant de grands diamètres et une forte pression (1,1-30 MPa), depuis des centres de production parfois lointains. Lorsque l'on se rapproche des centres de consommation (à l'usine, ou à la « porte de la ville »), ces pipelines donnent lieu à des pipelines plus fins et à des pressions plus faibles (0.01-2 MPa), destinés à la distribution du gaz. Par ailleurs, les pipelines ne sont pas construits avec les mêmes matériaux. Les gazoducs dédiés au transport sont construits en acier afin de résister aux fortes pressions et aux grands volumes transportés ; alors que les pipelines dédiés à la distribution sont souvent en polymère. Cela est important notamment pour déterminer le pourcentage maximal d'hydrogène qui peut être transmis par les tuyaux sans créer de problèmes de cassures, fuites, ou autres, lesquels peuvent menacer la sécurité et la stabilité du réseau.

Bien qu'il n'existe pas encore une infrastructure de transport d'hydrogène pour les voitures et les bâtiments, des pipelines d'hydrogène desservent depuis plusieurs décennies l'industrie chimique (production d'ammoniac, raffinage d'hydrocarbures, etc.). Ainsi il y a déjà en place quelques milliers de pipelines d'hydrogène dans le monde. Le principal pipeline d'hydrogène en Europe est propriété de l'entreprise française Air Liquide, il est long de 900 km entre le Nord de la France, la Belgique et les Pays-Bas (voir Annexe 2). A la fin des années quatre-vingt dix, les Etats-Unis comptaient 700 km de pipelines distribués le long du Golfe du Mexique et dans la région des grands lacs (Amos, 1998).

Le transport par pipeline offre plusieurs avantages. Il s'agit du moyen le plus économique pour mobiliser de grandes quantités de gaz sur de courtes distances. De plus, l'hydrogène qui n'est pas consommé peut rester stocké dans le pipeline. Cela donne plus de flexibilité à la gestion du réseau, notamment en périodes de pointe de consommation. Aussi, moins d'équipements sont nécessaires pour le stockage à la station de combustible ou dans les bâtiments, ce qui allège les besoins en investissement et en espace (particulièrement important pour les stations de centre-ville).

Le principal problème de la transmission par pipeline est le niveau d'investissement initial. Les coûts en capital sont très élevés (e.g. droits de passage, main d'œuvre, compresseurs, tuyaux, ingénierie). Par conséquent, les flux doivent être suffisamment larges pour amortir les coûts de capital. Les droits de passage sont une composante très importante de l'investissement. Les coûts des pipelines ont été estimés par Tzimas et al. (2006) à 100.000€ en zones faiblement peuplées et 500.000€ en zones densément peuplées.

Les coûts de transport et de distribution par pipeline sont fonction de la distance parcourue, de la quantité d'énergie transportée et de la densité de la demande (Yang et Ogden, 2007 ; Ogden, 1999a,b ; Amos, 1998).

La *distance* a un impact direct sur les coûts de transport. Outre les coûts en capital très élevés, les coûts opérationnels augmentent avec l'extension du pipeline. Spécialement l'énergie nécessaire aux compresseurs pour maintenir la pression dans les tuyaux et ainsi permettre le gaz de se déplacer. La faible densité énergétique de l'hydrogène rend plus cher son transport par rapport au méthane. Au même contenu énergétique, sous les mêmes conditions de pipelines et pour les mêmes distances, le transport d'hydrogène est 1.5 à 3 fois plus cher que le gaz naturel (Ogden, 1999a). On peut ainsi conclure que le volume nécessaire à la viabilité du pipeline augmente avec la distance de transport.

Un autre facteur important est la *quantité* d'énergie transportée par jour (mesuré par GJ/jour). En raison de l'importance des coûts en capital, les coûts unitaires de transport diminuent avec le flux de gaz transporté. Néanmoins, cela se fait à partir des seuils minimaux de gaz transporté.⁵¹ Il est nécessaire de transporter de très gros volumes pour justifier les investissements, ce qui rend indispensable l'existence d'une demande suffisante avant d'engager des larges sommes d'argent dans l'infrastructure. En plus, cette demande doit être suffisamment concentrée pour réduire le montant d'investissements nécessaires.⁵²

Une plus grande *densité* de la demande permet de diminuer l'extension des lignes de distribution pour la même quantité consommée de gaz. Etant donnés les coûts élevés des gazoducs de distribution en ville, un réseau moins étendu est moins cher à construire et à entretenir. C'est aussi la raison pour laquelle les premiers réseaux d'hydrogène doivent apparaître à partir de quelques poches locales, à forte concentration de la demande (p.ex. grandes villes). Puis, au fur et à mesure que l'hydrogène se diffuse dans le marché, ces poches s'élargissent et se rallient aux réseaux à proximité en formant ainsi le réseau régional, d'abord, et le réseau national, plus tard.

Selon le type de demande, l'hydrogène est acheminé vers la station d'hydrogène s'il est destiné aux marchés des transports, ou vers les systèmes de chauffage ou de cogénération de chaleur et électricité au cas où il est destiné aux bâtiments. Cette dernière option requiert la mise en place d'un système de distribution plus extensive et complexe. Comme on vient de la voir, les premiers réseaux doivent voir le jour dans les zones urbaines à forte densité de la population où les coûts de distribution sont les moins chers. De plus, dans la plupart des villes européennes, il existe une infrastructure de gaz naturel en place. Dans certain cas, cette infrastructure vient du temps du gaz de ville (lequel est constitué par un large pourcentage d'hydrogène). Ainsi, il paraît techniquement

⁵¹ Voir par exemple Ogden, 1999, p.250.

⁵² Une étude réalisée pour les villes des Etats-Unis montre que les coûts de distribution de l'hydrogène augmentent rapidement lorsque la densité de voitures est inférieure à 300 véhicules par mile (Ogden, 1999, p.252).

possible de faire passer l'hydrogène par le réseau en place et donc de résoudre le problème de l'absence de l'infrastructure pendant les premières années.

Ainsi, l'utilisation du réseau de gaz naturel pour le transport et la distribution d'hydrogène est envisagée de trois manières différentes : (i) le gaz naturel peut être utilisé directement dans les piles à combustible à haute température (« Solid Oxide Fuel Cell » (SOFC), « Molten Carbonate Fuel Cell » (MCFC)). Ces applications stationnaires peuvent être utilisées sans infrastructure d'hydrogène ; (ii) l'hydrogène peut être injecté dans le réseau et mélangé avec le gaz naturel à un certain pourcentage. Puis, il peut être séparé (ou pas) du mélange selon le degré de pureté admis par l'application finale ; (iii) enfin, à plus long terme, quand la disponibilité de gaz naturel diminue, les tuyaux peuvent être convertis totalement au transport et à la distribution d'hydrogène.

L'hydrogène peut être injecté dans les réseaux de gaz naturel jusqu'à 20% environ, seuil à partir duquel les tuyaux, les compresseurs et autres équipements deviennent friables et peuvent casser.⁵³ Etant donné que le coût de l'hydrogène est plus élevé que celui du gaz naturel, le coût final de ce mélange revient plus cher. De plus, l'hydrogène est plus difficile à transporter, ce qui augmente les coûts finals. Il est peu probable que les caractéristiques énergétiques et environnementales soient suffisantes pour convaincre les producteurs, les transporteurs, les distributeurs et les consommateurs de gaz naturel des avantages du mélange avec l'hydrogène. A moins que l'état intervienne pour fixer des politiques claires en termes de diminution des émissions de GES, notamment par la mise en place d'instruments de marché (taxes, quotas, subventions) au niveau de la demande finale, ou par la fixation de standards obligeant le gaz naturel à contenir un pourcentage minimal d'hydrogène (Haeseldonckx et D'haeseleer, 2006).

B. Le transport par la route

Une autre façon de livrer l'hydrogène au point d'utilisation est par la route. Selon l'état physique de l'hydrogène, on distingue deux façons différentes de transmission par la route: l'hydrogène pressurisé dans des bouteilles ou dans des tubes à haute pression; et l'hydrogène liquéfié transporté par camion dans un réservoir cryogénique.

L'hydrogène peut être transporté par camion sous forme pressurisée à partir de deux modes distincts : dans les cylindres à haute pression (de 20 à 40 MPa) qui peuvent contenir 2 kg d'hydrogène chacun environ ; ou dans un tube (« tube trailer »), entre 20 à 60 MPa de pression, contenant 63-460 kg d'hydrogène, en dépendant du nombre de tubes.⁵⁴ Cependant, la densité énergétique limite le transport de l'hydrogène à un faible contenu énergétique et à de courtes distances.⁵⁵

Un autre moyen de transporter l'hydrogène est de le liquéfier et de l'expédier par camion (ou bien par voie ferrée ou maritime) dans des conteneurs cryogéniques à très basse température (- 253°C environ). En comparaison avec un « tube trailer » de 21 m³ de gaz comprimé, le conteneur

⁵³ Voir les travaux du programme européen NaturalHy créé à partir du 6^{ème} programme cadre, www.naturalhy.net .

⁵⁴ Cf. Amos, 1998, p.32.

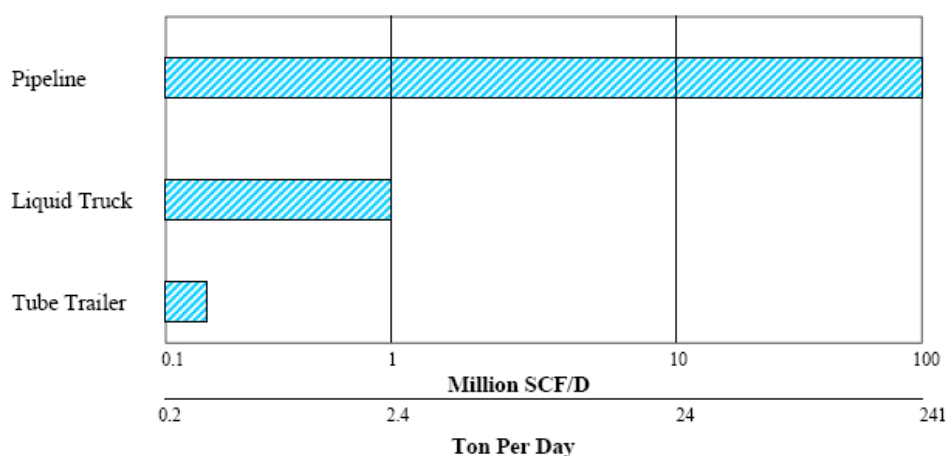
⁵⁵ « ...Compared to road delivery of gasoline, the diesel fuel required to deliver only 70% as much energy as gaseous hydrogen is 32 times, and as liquid hydrogen, about 4,5 times as high. » (Bossel et al., 2003, p.21).

cryogénique de 40 m³ de capacité peut contenir cinq fois plus de contenu énergétique.⁵⁶ Par conséquent, une plus grande quantité d'énergie peut être transportée sur une distance plus étendue. Le transport d'hydrogène liquide reste toutefois pénalisé par les pertes énergétiques au niveau de la liquéfaction puisque celle-ci demande l'équivalent du tiers de la valeur énergétique initiale (Ogden, 1999a).

1.2.3 Choix optimal de l'infrastructure et coûts de transport et de distribution

Le choix de l'infrastructure doit prendre en compte le volume attendu d'hydrogène transporté et le coût des différentes options de transport. Le graphique suivant présente la relation entre la méthode de transport et le volume transporté (par tonnes/jour).

Graphique 20. Comparaison de différentes méthodes de transport par rapport à la distance



Source: Air Products.

Source : Simbeck et Chang, 2002, p. 15.

Le pipeline est l'option idéale pour transporter de très grandes quantités d'hydrogène. Le transport par camion est plus adéquat pour les petites quantités et sur les courtes distances.

Le tableau suivant présente une estimation des coûts en capital de chacune des options de transmission d'hydrogène d'après la littérature.

⁵⁶ Cf. WETO-H², 2007, p.80.

Tableau 5. Coûts de capital des pipelines, "tube trailers" et camions cryogéniques

	Coûts	Source
Pipeline (en € 2005 par km)		
Transport à haute pression (Ø 50cm)	1.500.000 €	Tzimas et al. (2006)
Transport à moyenne pression (Ø 25cm)	850.000 €	
Distribution	100.000 € (zones faiblement peuplées) 500.000 € (zones densément peuplées)	
Camion (€ 2004, \$ 2002, par unité)		
LH2 (4.000 kg)	460.000 € [\$600.000]	HySociety database (2004)*
CH2 (540 kg) [300 kg]	256.000 € [\$250.000]	[Simbeck & Chang, 2002]**

* Résultats en € 2004. Source: HySociety, 2004.

** Résultats entre parenthèses en \$ 2002. Source : Simbeck & Chang, 2002.

Les différentes options de transmission entraînent des coûts en capital très différents. De plus, les premières années après l'introduction de l'hydrogène dans le marché seront naturellement marquées par l'incertitude sur le rythme de croissance de la demande. Cela aura des répercussions sur le choix des investissements. Dans le cas des pipelines, l'amortissement des coûts en capital colossaux oblige à une utilisation maximale de la capacité en place. Ainsi, l'incertitude sur le comportement de la demande aura comme effet une remise à plus tard des investissements. Entre-temps, il est probable que l'hydrogène sera produit sur place ou délivré par camion sous forme gazeuse ou liquide.

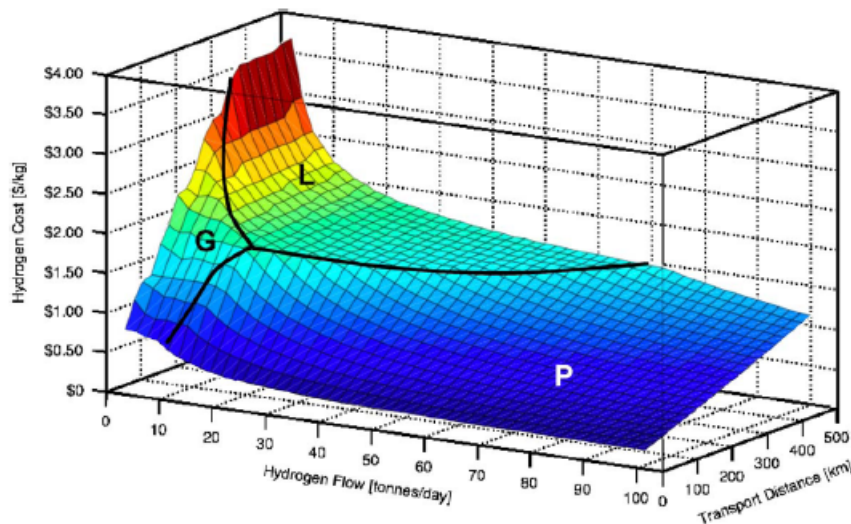
Ainsi, les trois options peuvent être combinées selon les phases de développement du marché : i) le transport de l'hydrogène gazeux par camion ayant un coût en capital plus bas peut s'avérer la meilleure solution pendant la phase initiale du marché, lorsque les quantités sont faibles et l'évolution de la demande incertaine ; ii) le transport d'hydrogène liquide par camion permet de mobiliser une quantité d'hydrogène plus importante que les « tube trailers » sur une distance plus étendue, ce qui rend cette option préférable dans une situation de demande croissante; iii) la transmission par pipeline est l'option qui entraîne le plus grand coût en capital, mais aussi le coût variable par unité transportée le plus bas, ce qui la rend adéquate pour les zones à forte demande d'hydrogène.

Amos (1998) présente une approche plus complète en incluant la distance et les coûts de stockage. Selon l'auteur, les coûts de livraison d'hydrogène sont influencés par : le niveau de production ; la distance de livraison ; le temps de stockage ; le type d'hydrogène nécessaire à l'application finale. Par exemple, pour les applications qui requièrent du gaz liquide tels que certains véhicules, le transport de l'hydrogène liquide sera préférable.

Une augmentation des quantités transportées de 45 kg/hr à 4.500 kg/hr rend le transport par pipeline l'option la moins chère, surtout lorsqu'il s'agit de petites distances (Amos, 1998). Une augmentation de la distance de 16 km pour 800 km (à quantité transportée constante) a comme effet une augmentation des coûts de l'hydrogène délivré. C'est compréhensible puisque la situation idéale est de ramener l'hydrogène à proximité. Une distance plus grande a aussi comme résultat une augmentation du poids du transport dans les coûts unitaires et une diminution de la part des coûts de stockage. Ceux-ci sont surtout importants lorsque le transport est fait sur de petites distances.

Une analyse plus fine des coûts de transport et de distribution a été proposée par Yang et Ogden (2007). Les auteurs proposent un modèle où le transport est analysé séparément de la distribution de l'hydrogène. Le mode optimal de transport dépend de la distance et de la quantité transportée d'hydrogène. Le résultat est présenté dans le graphique suivant :

Graphique 21. Les coûts de transport de l'hydrogène



Source : Yang et Ogden, 2007.

Les conclusions du modèle sur le choix optimal du transport complètent les analyses précédentes. L'hydrogène doit être transporté par : camions lorsque les quantités transportées sont très faibles ; pipeline, dans la situation opposée ; ou par camion sous forme liquide pour des quantités intermédiaires. Deuxièmement, le graphique montre aussi l'existence d'effets d'échelle importants puisque l'augmentation du flux diminue significativement les coûts unitaires de transport. En outre, la manière la moins chère de transporter l'hydrogène est par pipeline pour les grandes quantités et sur courtes distances (< \$0,50 USD/kg). A l'inverse, le transport de faibles quantités d'hydrogène à très grandes distances entraîne les coûts de transport les plus élevés (\$3,50-\$4,00 USD/kg).

La distribution de l'hydrogène est plus compliquée que celle du transport puisque les coûts de distribution dépendent de la configuration du réseau. Un modèle de la ville type a été réalisé par les chercheurs de l'Université de Californie à Davis pour estimer la distance du réseau de distribution par pipeline et par la route, respectivement, à partir de la concentration de la population et du nombre de stations d'hydrogène (Yang et Ogden, 2007). Le coût de distribution de chacune des options dépend *in fine* des caractéristiques de la demande, en particulier de : la quantité demandée ; le rayon de la ville ; la taille de la population ; le pourcentage de pénétration de l'hydrogène dans le marché ; la densité de population ; et la taille de la station. Le tableau suivant résume les options optimales de distribution selon les valeurs des variables, ainsi que leur coût respectif (en \$/kg hydrogène).

que le réseau de transport soit considéré comme source d'importants effets de réseau ce qui peut justifier l'intervention du gouvernement.⁵⁷

Le tableau suivant résume les caractéristiques des principaux modes de transmission de l'hydrogène.

Tableau 7. Synthèse des principales techniques de transport et distribution d'hydrogène

	Pipeline	Liquide (LH2) route	Comprimé (CH2) route
Avantages	Grands volumes Efficience Stockage Faibles coûts variables	Volume supérieur que le CH2 Efficience	Transport de faibles quantités
Inconvénients	Intensité en capital Besoin de grands volumes pour justifier son emploi (croît avec la distance)	Dépenses et pertes liés à la liquéfaction Pertes par évaporation (déperdition du liquide) Augmente le trafic routier	Faibles quantités par livraison Inefficience énergétique (croît avec la distance) Augmente le trafic routier
Adéquation	Grandes quantités	Longues distances	Petites quantités et courtes distances
Capacité (Kg)	< 100.000 kg/h	< 4.000 kg par camion	< 400 kg par camion
Coûts en capital	\$200.000- \$1.000.000 /km	\$300.000-\$400.000 par camion	\$250.000-300.000 par camion
Efficience (%)	99,2 % par 100 km	99 % par 100 km 75 % avec les pertes de la liquéfaction	94 % par 100 km
Coûts en 2030 (€₂₀₀₀/km/kg H₂) distance*	0,0004-0,00164 250 km	0,0043 50 km	0,016 50 km
Energie requise	Compresseurs	Combustible	Combustible

Sources : Hawkins (2006) ; AIE (2006a) ; Ogden (1999a); Amos (1998).

* Roads2HyCom, 2009b.

1.3. Station d'hydrogène

La mise en place des stations d'hydrogène est une condition *sine qua non* pour l'entrée de la technologie hydrogène et piles à combustible (PAC) dans le marché des transports. En effet, le réseau actuel d'essence et diesel est tellement étendu que personne n'est incité à changer pour une voiture à hydrogène tant que celle-ci ne dispose pas de stations où se réapprovisionner de façon pratique et confortable. De même, les constructeurs automobiles ne peuvent pas commercialiser les voitures PAC tant que l'infrastructure n'est pas en place. De plus, les investissements en nouvelles stations ou

⁵⁷ Nous développons cet argument dans le chapitre 2.

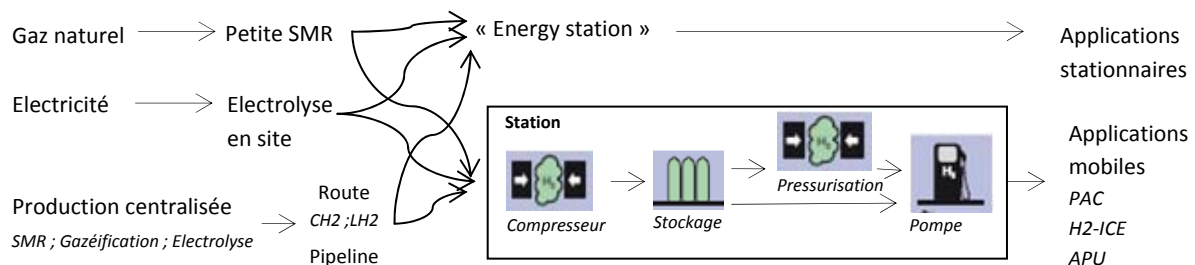
la reconversion des stations existantes ne se feront pas tant qu'il n'y a pas de demande. Le problème est alors de savoir lequel des deux vient en premier : les voitures ou l'infrastructure. Ce problème est connu dans la littérature comme le dilemme de « l'œuf et la poule ».

La démarche méthodologique de l'analyse de la station d'hydrogène évolue de la manière suivante : dans un premier temps, nous présentons les configurations possibles de la station à hydrogène ; dans un second temps, nous traitons les questions de sécurité et des risques propres à l'utilisation d'hydrogène qui doivent être présentes dans la conception des stations ; et, finalement, nous abordons la question critique du stockage d'hydrogène à bord de la voiture, laquelle a un impact direct sur le choix de l'hydrogène à fournir par la station.

1.3.1 Configurations possibles

Le graphique suivant présente les différentes configurations possibles pour la station d'hydrogène.

Graphique 22. Configurations possibles de la station à hydrogène



Selon le mode de production choisi, les stations ont des caractéristiques distinctes. Premièrement, l'hydrogène peut être produit dans une usine de production centralisée, puis délivré à la station par pipeline ou par camion (sous forme liquide ou comprimée), stocké et fournit aux voitures. La deuxième option est de produire l'hydrogène sur place, de manière décentralisée, avant d'être stocké et délivré aux voitures.

Selon la configuration adoptée, les exigences en termes d'investissement sont considérablement différentes. Quand le choix pour une production centralisée a été fait, l'essentiel des coûts d'investissement se situe au niveau de la production et de l'infrastructure de transmission. Quand la production est réalisée sur place, l'infrastructure existante de gaz et d'électricité fournit les entrants aux unités de petite taille de production d'hydrogène. Ainsi, dans cette deuxième option, le gros des investissements est engagé sur place au niveau des équipements de production (SMR, ATR ou électrolyseur), de purification (en cas de production par gaz naturel et de besoin d'un haut degré de pureté de l'hydrogène), de compression, de stockage et de pompage.⁵⁸

La décision de produire l'hydrogène sur site ou selon le mode centralisé résulte de l'arbitrage entre : les coûts unitaires de production plus faibles de la production centralisée, notamment grâce aux

⁵⁸ Myers et al. (2002) analyse deux techniques de purification d'hydrogène, par PSA (« pressure swing adsorption ») et par membrane. Les résultats de l'analyse montrent que la première technologie est plus économique que la seconde. Pour une révision de la littérature sur les coûts des stations : Agnolucci, 2007c.

économies d'échelle⁵⁹ et à l'accès à des matières premières moins chères ;⁶⁰ et le coût de la mise en place d'une infrastructure de transmission d'hydrogène évité par la production décentralisée.⁶¹

La production de l'hydrogène sur site ouvre la porte à l'arrivée de producteurs indépendants sur le marché. A contrario des revendeurs de carburants actuels dépendant du raffinage central dominé par les compagnies pétrolières, les propriétaires des stations à hydrogène peuvent produire leur propre carburant sur site sans avoir recours à l'approvisionnement externe. L'entrée de nouveaux acteurs intensifie la concurrence pour la fourniture de l'hydrogène, ce qui peut diminuer le prix de l'hydrogène et éventuellement réduire les pratiques de collusion pour la fixation des prix à la pompe, ce dont les principales compagnies pétrolières sont souvent accusées.

La station d'hydrogène peut aussi prendre une configuration hybride, en combinant la production sur site avec des livraisons d'hydrogène produit ailleurs.⁶² Parmi d'autres avantages, cette solution permettrait un investissement moindre en capacité de production sur site et ainsi moins de coûts échoués pendant la transition vers une production complètement centralisée.

Une autre distinction concerne le type d'hydrogène proposé aux conducteurs. Les stations peuvent fournir l'hydrogène comprimé (CH₂), liquide (LH₂), ou les deux formes à la fois.⁶³ Le CH₂ produit à la station ou arrivé par pipeline ou camion est comprimé et stocké, avant qu'il ensuite soit délivré à la voiture. Les technologies utilisées sont commercialement disponibles et très proches de celles utilisées pour le ravitaillement des voitures au gaz naturel. En 2008, toutes les nouvelles stations construites dans le monde ont été configurées pour livrer l'hydrogène gazeux (Fuel Cell Today, 2008d).

Quant au LH₂, dans la plupart des cas il est produit et liquéfié à l'usine de production centrale. Ensuite, il est transporté par camion jusqu'à la station et transféré pour les réservoirs cryogéniques sur place. Une autre possibilité, très utilisée par les camions de CH₂ pour des raisons logistiques et de temps de l'opération, c'est de laisser la remorque avec le réservoir plein de LH₂ et de repartir avec l'ancienne contenant le réservoir vide.

Le LH₂ ainsi stocké à la station est ensuite pompé vers les réservoirs des voitures dans une procédure semblable au « plein » de diesel ou d'essence. La station peut encore proposer à la fois les deux types

⁵⁹ Barthel et al. (2004). Simbeck et Chang (2002, p.20-1) défendent que l'effet des économies d'échelle pour la production d'hydrogène sur site est important, et d'avantage lorsque l'hydrogène est produit à partir du gaz naturel par SMR. Les réformateurs de petite taille, très probablement utilisés pendant la phase initiale quand la demande est encore embryonnaire et incertaine, sont moins efficaces et donc le coût unitaire de l'hydrogène est plus élevé. Dans le cas de l'électrolyse de l'eau, la taille d'électrolyseurs est plus grande (dès quelques kW jusqu'à MW), la technologie est alors plus modulaire, ce qui fait que les contraintes en termes de taille ne se posent pas de la même façon que pour les SMR.

⁶⁰ Les coûts de production sont très sensibles aux coûts des entrants utilisés (le gaz naturel ou l'électricité selon la technologie est le SMR ou l'électrolyse de l'eau, respectivement). Voir notamment les résultats du modèle "H2A" créé pour le U.S. DoE in Mann M.K. (2004), "Moving Towards Consistent Analysis in the HFCT&IT Program: H2A", National Renewable Energy Laboratory, NREL, Proceedings for the ITS-Davis hydrogen Systems Modeling Workshop, sep. 20-21, Davis, CA.

⁶¹ La contribution des coûts de l'infrastructure pour les coûts finals de l'hydrogène. Voir notamment : Amos, 1998; Yang et Ogdén, 2007.

⁶² Voir, par exemple, E4Tech (2005) qui fait une analyse sur l'infrastructure d'hydrogène pour les transports en Allemagne. L'analyse compare notamment les coûts à la pompe d'une production centralisée avec les coûts des configurations hybrides tels que « production centralisée et SMR sur site », et « production centralisée et électrolyse sur site ».

⁶³ Cf. WETO-H2, 2007, p.80-1.

d'hydrogène, puisque le LH2 peut être aussi livré aux voitures sous forme comprimé. Il suffit de regazéifier le LH2 avant de le pomper à haute pression (jusqu'à 70 MPa) pour les bouteilles de CH2 dans la voiture. Il s'agit d'une opération qui permet de déplacer l'hydrogène rapidement vers la voiture et cela de façon économique puisqu'il suffit de baisser la température du LH2 (-253°C) pour déclencher la procédure.

Le choix entre le LH2 ou le CH2 dépendra *in fine* du mode de stockage de l'hydrogène dans la voiture adopté par les constructeurs automobiles. Ce choix dépendra en grande mesure des risques spécifiques à l'hydrogène et des codes et standards adoptés au niveau des stations et des voitures pour assurer la sûreté d'utilisation.

Par ailleurs, une étude techno-économique sur la station d'hydrogène (Weinert et Lipman, 2006) a révélé que le principal facteur pesant sur les coûts de la station, et par ce biais sur le coût final d'hydrogène, est l'utilisation de la capacité de la station. Étant donné que la demande d'hydrogène doit être plus faible pendant la période initiale, l'auteur propose que la station produise et vende aussi de l'électricité pour les applications stationnaires (dans et hors de la station). La vente d'électricité à l'extérieur pourrait être destinée à des utilisateurs « de qualité » qui ont besoin d'apports constants et sans faille d'électricité et qui sont pour cela disposés à payer bien plus que le prix normal (e.g. hôpital, l'électronique). Cela permettrait d'amortir plus vite les investissements et d'entamer plus vite la construction des stations.

C'est le concept de station-énergétique (« H2E-Station » en anglais), une station qui produit à la fois de l'électricité pour le réseau et de l'hydrogène pour les voitures (Weinert et Lipman, 2006; Clark et al., 2005 ; Lipman et al., 2002; Lovins et Williams, 1999). La coproduction d'hydrogène et d'électricité renforce la viabilité économique des stations à hydrogène. Toutefois, les détracteurs des « H2E-Stations » argumentent que ce type de projets devient plus coûteux que la simple station d'hydrogène puisqu'il augmente les coûts en capital pour la production d'électricité, les coûts de raccordement au réseau, et les coûts de gestion du réseau et du dispatching de l'électricité (Simbeck et Chang, 2002).

1.3.2. Sûreté et risques propres à l'hydrogène

Un aspect fondamental est la sûreté de la station. L'histoire de l'industrie de l'hydrogène est exempte de presque tout accident majeur. Cependant, la perception de l'hydrogène par le public est normalement associée à l'accident d'Hindenburg, à l'explosion de la navette spatiale Challenger ou à la bombe H.⁶⁴ Les consommateurs n'accepteront le nouveau carburant que s'ils sont certains de sa sûreté et les habitants ne s'opposeront pas à la mise en place de nouvelles stations si le danger potentiel est inférieur à celui de l'infrastructure actuelle. De plus, le moindre accident pourrait affecter la perception du public quant à l'utilisation de l'hydrogène et ainsi empêcher définitivement la transition.

Le tableau suivant présente les propriétés de l'hydrogène en comparaison avec le méthane et l'essence.

⁶⁴ Dans chacun des cas, l'hydrogène est souvent associé à tort à l'accident. Pour une explication détaillée des faits voir par exemple Hoffman (2001).

Tableau 8. Indicateurs relatifs à la sécurité de l'hydrogène, méthane et essence

	Unité	Hydrogène	Méthane	Essence
Limites d'inflammabilité dans l'air	vol %	4.0-75	5.3-15	1.0-7.6
Limites de détonation dans l'air	vol %	13-65	6.3-13.5	1.1-3.3
Coefficient de diffusion dans l'air	cm/s	0.61	0.16	0.05
Vitesse de flamme dans l'air	cm/s	260	43	-
Energie minimale d'inflammation	mJ	0.02	0.29	0.24
Energie minimale d'inflammation à la limite inférieure de flammabilité	mJ	10	20	-
Toxicité (contamination de l'eau)	mg/l	-	-	40

Compilé de plusieurs sources : AIE, 2006a ; Ogden, 1999a ; <http://www.afh2.org>.

En comparaison avec l'essence et le méthane, l'hydrogène est plus sûr sur certains aspects. Suite à une fuite, l'hydrogène se diffuse immédiatement dans l'atmosphère, plus rapidement que le gaz méthane, alors que l'essence a tendance à se concentrer et à créer un nuage de fumées.⁶⁵ En plus, l'hydrogène n'est pas toxique, ce qui est un avantage par rapport à l'essence. D'autres aspects posent toutefois des questions plus sérieuses comme l'inflammabilité et la faible énergie d'ignition.

L'hydrogène possède une large plage d'inflammabilité (4-75%) et de détonation (13-65%), c'est-à-dire qu'un domaine large de mélange d'hydrogène et d'air peut provoquer une flamme ou une explosion. Dans la pratique, c'est la limite inférieure qui est plus importante. Par exemple, suite à une fuite, lorsque la concentration d'hydrogène dans un espace confiné atteint la limite inférieure d'inflammabilité.

L'énergie d'inflammation de l'hydrogène est environ dix fois inférieure à celle de l'essence et du méthane. En revanche, sa température d'auto-inflammation est plus élevée (858°K) que pour le gaz méthane et l'énergie minimale d'inflammation à la limite inférieure d'inflammabilité – où les problèmes sont plus importants - est comparable au second.⁶⁶ Néanmoins, la flamme de l'hydrogène dans l'air est quasi-invisible et très chaude (2000°C) ce qui pose des problèmes additionnels au niveau de la détection de fuites et du stockage dans les voitures (voir le point suivant).

Pour assurer la sûreté d'utilisation de l'hydrogène comme carburant, des codes et standards sont en cours de développement à la fois pour la station, la qualité du carburant et la voiture. Au niveau européen, la Commission Européenne a travaillé en partenariat avec l'industrie dans le cadre du projet EIHP⁶⁷, entre 1998 et 2004, pour développer des propositions de réglementation européenne et internationale pour l'hydrogène. Ces travaux sont à l'origine des nombreuses directives européennes pour les diverses applications des piles à combustible à hydrogène. En 2001 ces propositions ont été soumises au Conseil Economique pour l'Europe des Nations Unies (UN – ECE) en vue de les discuter plus globalement et de créer des standards internationalement reconnus. Les normes et réglementations pour l'hydrogène devraient être complètes vers 2010.

⁶⁵ Pour des plus grands débits ou en milieu confiné, une fuite d'hydrogène peut se révéler critique. Cependant, les expériences faites montrent qu'il est difficile de construire une concentration inflammable d'hydrogène, à l'exception d'endroits fermés, parce que l'hydrogène se disperse très vite (AFH2, 2003 ; Ogden, 1999).

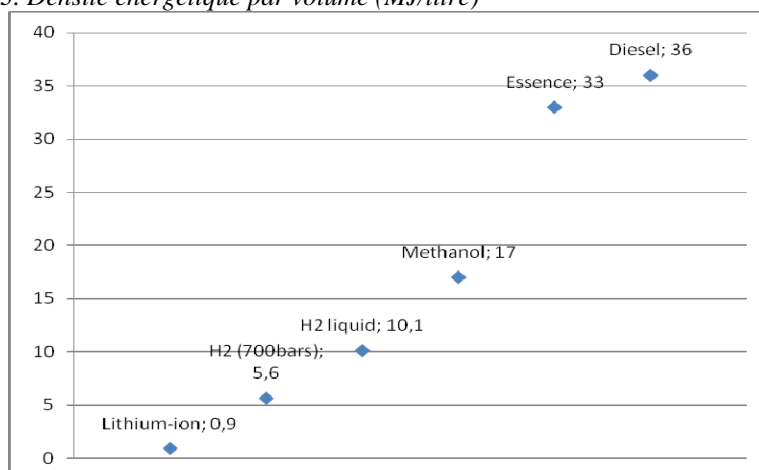
⁶⁶ Pour les propriétés de l'hydrogène et la comparaison avec le méthane, voir annexe n°1.

⁶⁷ <http://www.eihp.org> Actuellement, les travaux sur les codes et standards pour l'hydrogène se poursuivent dans le cadre de la plateforme technologique européenne pour l'hydrogène et les piles à combustible (HFP), et d'autres programmes européens comme le « HyApproval » pour la création d'un protocole de certification des stations d'hydrogène ouvertes au public.

1.3.3. Le stockage de l'hydrogène à bord du véhicule

Un autre aspect important est l'autonomie de la voiture. Le principal atout du véhicule à hydrogène par rapport à la voiture électrique est sa capacité à stocker une plus grande quantité d'énergie ce qui lui permet une autonomie accrue et la capacité à propulser un véhicule de taille normale. Néanmoins, l'hydrogène est un gaz à très faible densité énergétique (en termes volumiques) ce qui rend très difficile son stockage.⁶⁸ Sous forme gazeuse et à pression atmosphérique, 1 kilogramme d'hydrogène – l'équivalent de 3,7 litres d'essence en contenu énergétique – occupe 12.000 litres ; alors qu'il n'occupe que 14 litres sous forme cryogénique (liquide) mais à une température très basse (-252°C). Seulement, le contenu énergétique d'un litre d'essence équivaut à 3-3,5 litres d'hydrogène liquide, et même si on ajuste pour la plus grande efficacité de la pile à combustible (au mois 2 fois par rapport au moteur à explosion), le litre d'essence reste 1,5 fois plus dense énergétiquement que l'hydrogène liquide.

Graphique 23. Densité énergétique par volume (MJ/litre)



Source : Bognoux et Douaud (2009).

Pour remplacer la voiture conventionnelle, le véhicule à hydrogène doit permettre un niveau similaire de confort d'utilisation. Pour une autonomie de 400-600 km, la voiture pile à combustible nécessite d'embarquer 5 kilogrammes⁶⁹ d'hydrogène en moyenne (Schlapbach et Zuttel, 2001).⁷⁰ L'hydrogène doit être stocké à des conditions de poids, de volume, de durabilité, et de sécurité, comparables à celles des voitures actuelles et à un coût raisonnable qui ne dégrade pas la compétitivité des voitures à hydrogène (400-500€).⁷¹ Le rechargement doit être rapide et à des conditions similaires à la manière dont le plein d'essence est fait aujourd'hui, c'est-à-dire que

⁶⁸ AIE (2006) fait le point de la technologie de stockage d'hydrogène et des nécessités de R&D. Voir aussi Beuzit (2007) et l'état de l'art dans Roads2HyCom (2009) et DOE (2007 avec des mises à jour en avril 2009).

⁶⁹ Un kilogramme d'hydrogène est l'équivalent d'un gallon (3,785 litres) en termes de contenu énergétique, donc 5 kilogrammes équivalent à environ 19 litres. Si la consommation de la voiture PAC est constante et égale à 2,9 litres/100km (EUCAR-CONCAWE-JRC, 2008), l'autonomie de la voiture est supérieur à 655 kilomètres.

⁷⁰ L'autonomie nécessaire pour la voiture à hydrogène a été officiellement fixée à 300 miles (480 km environ) par le *FreedomCAR and Fuel Cell Partnership*, un partenariat formé par le gouvernement ('Department of Energy' DOE), l'association des constructeurs (USCAR), et les compagnies d'énergie.

⁷¹ Nous présentons ici les objectifs techniques officiels américains et européens selon : DOE, 2007 ; HFP, 2007.

l'opération ne doit pas dépasser les 3 minutes. Pour cela, le réservoir d'hydrogène doit contenir 2 kWh/kg (ou 6% du poids) en 2010 et 3 kWh/kg en 2015 (9% du poids). Pour la comparaison, l'objectif à terme pour les batteries est de stocker 0,3 kWh/kg ; alors que la batterie à ions de lithium qui équipe la dernière voiture électrique de Nissan, la « Leaf », ne stocke que 0,14 kWh/kg. En faveur de la voiture électrique joue toutefois sa plus grande efficacité (>80%).⁷²

Une solution qui a été envisagée est l'utilisation de carburants riches en hydrogène (essence, diesel, méthanol, GPC, biocarburants, etc.) avec un réformateur embarqué produisant l'hydrogène pur destiné à la pile PEMFC.⁷³ D'une part, ces carburants disposent d'une très forte densité énergétique et leur stockage est maîtrisé. D'autre part, cela permettrait d'utiliser les réseaux actuels de distribution de combustibles et de résoudre le problème initial d'absence d'infrastructures d'hydrogène. Cependant, l'utilisation du réformateur à bord dégrade les performances énergétiques et environnementales de la voiture PAC (EUCAR-CONCAWE-JRC, 2007, 2008). Par conséquent, les nouvelles voitures à hydrogène en démonstration dans le monde utilisent surtout des réservoirs d'hydrogène comprimé.⁷⁴

Graphique 24. Etat de l'art des différents systèmes de stockage d'hydrogène à bord de la voiture



Source: Dynetek

Hydrogène comprimé à 350 bars



Source: Magna Steyr

Hydrogène liquide



Hydride métallique

Source : StorHy, 2007.

Les systèmes de stockage à bord actuellement à l'étude sont les suivants (graphique 24) :⁷⁵

- **stockage d'hydrogène comprimé** : une grande partie des voitures à hydrogène qui ont été présentées étaient équipées d'un réservoir de stockage d'hydrogène comprimé à 350 bars (350 fois la pression atmosphérique) ce qui ramène le volume occupé à 24 litres. Plus récemment, l'hydrogène a été aussi stocké à une pression encore supérieure (700 bars) ce qui a permis de réduire le volume du réservoir (15 litres en se rapprochant du volume du réservoir cryogénique). C'est la voie qui est actuellement privilégiée par les constructeurs, toutefois cette solution n'est pas dénuée de problèmes. Premièrement, l'hydrogène stocké à 700 bars occupe six fois plus d'espace que le stockage d'essence. Deuxièmement, les

⁷² <http://www.autoblog.com/2009/08/01/2010-nissan-leaf-electric-car-in-person-in-depth-and-u-s-b/>

⁷³ Voir, par exemple, Beuzit, 2007.

⁷⁴ En 2004, le ministère de l'énergie des Etats-Unis a interrompu le financement de la R&D pour le reformage de l'hydrogène à bord puisque les objectifs techniques n'avaient pas été atteints (78 % d'efficacité et moins de 30 secondes pour le démarrage).

⁷⁵ Dans ce bref descriptif de l'état de l'art du stockage d'hydrogène, nous utilisons principalement les sources suivantes : Roads2HyCom, 2009b ; DOE, 2007 ; StorHy, 2007 ; AIE, 2006a.

pressions très élevées présentent des risques de sécurité plus importants en demandant davantage d'équipements ce qui alourdit le poids final du réservoir. Troisièmement, les limites de l'augmentation de la pression semblent presque atteintes. La compression à 700 bars consomme déjà 10% du contenu énergétique initial de l'hydrogène. Finalement, les coûts sont encore quelque peu supérieurs au prix concurrentiel ce qui exige plus de recherche dans le domaine de la conception et des matériaux de manière à faire baisser les prix.

- **stockage d'hydrogène cryogénique** : une autre voie souvent utilisée est le stockage de l'hydrogène cryogénique (liquide). L'avantage de cette méthode est la réduction de la taille des réservoirs. Les inconvénients sont variés. D'une part, la liquéfaction de l'hydrogène à -252°C prend 30% du contenu énergétique initial. D'autre part, une partie de l'hydrogène redevient gazeux quotidiennement et doit être relâché de manière à ne pas augmenter la pression dans le réservoir. Le taux d'évaporation est de 1 à 3% de la masse stockée par jour selon que la taille du réservoir est plus grande (moins de déperdition) ou plus petite.
- **stockage solide d'hydrogène** : le grand espoir pour l'accomplissement des objectifs quant au stockage de l'hydrogène réside dans les matériaux solides comme les nanostructures de carbone et les hydrures métalliques. Ceux-ci sont moins volumineux, utilisent de plus faibles pressions (l'efficacité énergétique est alors augmentée), en permettant un degré de pureté élevé de l'hydrogène ce qui convient particulièrement à la PEM. Cela reste toutefois en phase de recherche et de développement et les premières applications pratiques ne doivent pas apparaître avant 2015. Avant le passage à la phase de production, plusieurs problèmes doivent être résolus : le poids doit être considérablement réduit ; le remplissage doit être facile et rapide ; le matériel doit être durable à plusieurs cycles de rechargement ; le coût du réservoir doit continuer à baisser.

L'autonomie moyenne des dernières voitures à hydrogène s'approche des objectifs officiels, entre 320 et 500 km (Fuel Cell Today, 2009a). En général, les questions de coût, volume et poids, restent à résoudre. Le stockage sous forme comprimée et liquide sont, à l'heure actuelle, les manières les plus économiques d'emmagasiner l'hydrogène. Les coûts du stockage restent toutefois très élevés. Par exemple, l'option la moins chère, les réservoirs de gaz comprimé à 350 bars, coûte entre 500-600 \$/kg d'hydrogène. L'objectif est de ramener ces coûts à 200-500 € par unité, alors qu'il est de 25.000€ actuellement.⁷⁶ La production en masse est nécessaire pour réduire les coûts des réservoirs. Des avancées technologiques sont indispensables dans toutes les méthodes de stockage de l'hydrogène pour que son utilisation ne soit pas trop pénalisée en termes de coût et de performance (AIE, 2006a).

Selon Roads2HyCom (2009a), le stockage, plus que le carburant, va dicter la meilleure technologie pour les voitures (batteries ou hydrogène). A condition que les progrès récemment annoncés dans la pile à combustible se concrétisent.

⁷⁶ Cf. WETO-H2, 2007, p.82.

Section 2. La pile à combustible

La conversion de l'hydrogène (énergie chimique) en énergie mécanique peut emprunter plusieurs voies. Dans le domaine des applications mobiles, deux technologies sont en concurrence : le moteur à combustion interne (moteur à combustion) ; et la pile à combustible.

Le moteur à explosion est la technologie qui domine actuellement. Elle bénéficie de plus de 100 ans d'améliorations et de compétences généralement dispersées. Le remplacement de l'essence par l'hydrogène comme carburant principal accroît de 20 à 25% l'efficacité énergétique de la voiture en raison d'un meilleur ratio carburant/air. Cela permettrait aussi de résoudre le problème du coût additionnel de la pile à combustible pendant les premières années, en laissant seulement la question du surcoût du réservoir d'hydrogène. En 2007, BMW a présenté une flotte de voitures de gamme supérieure (« Série 7 ») équipées d'un moteur à explosion pouvant à la fois fonctionner à l'essence ou à l'hydrogène liquide.⁷⁷ La possibilité d'utiliser l'infrastructure actuelle est un autre argument de force de cette voiture.

Cependant, il est peu probable qu'on assiste au développement de cette voie « hydrogène+moteur à explosion » dans l'avenir et cela pour plusieurs raisons.⁷⁸ Premièrement, la combustion d'hydrogène dans un moteur à explosion produit des NOx, un gaz polluant, ce qui réduit l'intérêt environnemental de l'hydrogène. Deuxièmement, le moteur doit être plus lourd et plus coûteux pour compenser un taux de compression plus faible. Finalement, le rendement du moteur à combustion est relativement faible. A cela s'ajoutent toutes les pertes énergétiques au long de la chaîne de production et de distribution de l'hydrogène. Etant donné que l'efficacité de la voiture moteur à explosion à hydrogène représente 60% de celle de la voiture pile à combustible (EUCAR-CONCAWE-JRC, 2008), il sera nécessaire de stocker plus d'hydrogène à bord pour réaliser la même distance. Cela doit limiter l'entrée de ces voitures dans le marché. Ainsi, l'utilisation de l'hydrogène ne se justifie que pour les conversions ayant un rendement énergétique élevé : c'est le cas de la pile à combustible.

Cette section commence par la description des principes de fonctionnement de la pile à combustible (2.1.), puis elle se poursuit par l'analyse aux applications mobiles (2.2.) où les bénéfices des piles sont le plus attendus, et se termine avec l'application aux usages stationnaires et portables (2.2.).

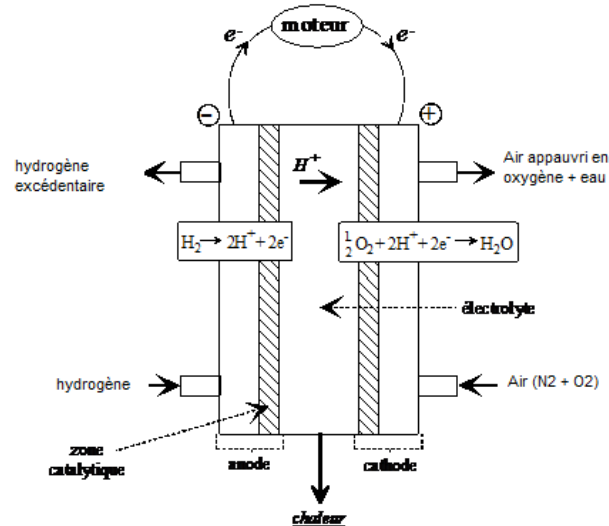
2.1. Principes de fonctionnement et différents types de piles à combustible

La pile à combustible (PAC) reproduit le processus inverse de l'électrolyse, c'est-à-dire qu'elle combine l'hydrogène et l'oxygène en produisant eau et électricité (graphique 25).

⁷⁷ Le réservoir de la BMW 7 'dual-fuel' a la capacité pour stocker 8 kg d'hydrogène liquide, ce qui lui permet de parcourir 200 km en mode hydrogène, plus 500 km en mode essence. Voir : Fuel Cell Today (2007), "Hydrogen-powered sedan from BMW", Daily Newsletter January 22, <http://www.fuelcelltoday.com/online/news/articles/2008-01/Hydrogen-powered-sedan-from-BMW>

⁷⁸ Pour une analyse critique de cette option technologique, voir par exemple NRC, 2008.

Graphique 25. Le principe de fonctionnement de la pile à combustible



Adapté d'Association Française d'Hydrogène, <http://www.afh2.org>.

Le principe général de fonctionnement est le suivant. Deux électrodes alimentées par l'hydrogène (anode) et par l'oxygène (cathode) sont séparées par un électrolyte solide ou liquide. L'hydrogène fait l'objet d'une réaction électrochimique d'oxydation à l'anode, d'une part ; et une autre réaction électrochimique à la cathode de réduction de l'oxygène, d'autre part. La réaction des deux côtés est déclenchée par un catalyseur. Cette réaction produit une charge électrique, de l'eau et de la chaleur.

Il existe plusieurs piles à combustible selon le type d'électronique utilisée, la température de fonctionnement et la puissance sortante. Cela détermine les applications dans lesquelles les piles peuvent être utilisées. Les PAC fonctionnant à des températures moins élevées sont généralement adaptées aux applications portables et mobiles, tandis que les systèmes fonctionnant à plus hautes températures sont plus utilisés dans les applications stationnaires de génération d'électricité et de chaleur. Le tableau ci-après présente les types de piles qui focalisent le plus l'attention actuellement.

Tableau 9. Comparaison entre les différents types de Piles à Combustible

Type de Pile à Combustible	Electrolyte	Température	Puissance	Efficiene	Efficiene avec récupération de chaleur (CHP)	Applications
Alcaline (<i>Alkaline Fuel Cell AFC</i>)	Potasse (liquide)	90 – 100°C	10kW – 100kW	60%	>80%	- Militaire (portable) - Espace
Acide phosphorique (<i>Phosphoric Acid PAFC</i>)	Acide phosphorique (liquide)	150 – 200°C	50kW – 1MW (250kW typiquement)	>40%	>85%	- Génération distribuée
Acide polymère (<i>Polymer Electrolyte Membrane PEM</i>)	Polymère (type Nafion®) (solide)	50 – 100°C	<1kW – 250kW	53 – 58% (transports) 25 – 35% (stationnaire)	70-90%	- Générateur de secours (<i>backup</i>) - Portable - Petite génération distribuée - Transport - Véhicules spéciaux
Carbonates fondus (<i>Molten Carbonate MCFC</i>)	Sels fondus (liquide)	600 – 700°C	<1kW – 1MW (250kW typiquement)	45 – 47%	>80%	- Grosse génération distribuée
Oxyde Solide (<i>Solid Oxide SOFC</i>)	Céramique (oxydes solides)	600 – 1000°C	<1kW – 3MW	35 – 43%	<90%	- Source auxiliaire de pouvoir - Grosse génération distribuée

Source : DOE, « Comparison of Fuel Cell Technologies », <http://www.hydrogen.energy.gov> Décembre, 2008.

Polymer Electrolyte ou Proton-Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

Ce type de pile est le plus prometteur à l'heure actuelle. La PEMFC dispose d'une densité énergétique très élevée, pour un volume et un poids plus faibles en comparaison avec les autres piles. L'utilisation d'un électrolyte solide (la membrane Nafion® qui a été développée par le chimiste américain Du Pont de Nemours) réduit les problèmes de corrosion. Cela rend aussi plus facile la conception de la pile et permet d'espérer une diminution des coûts. La PEMFC utilise l'air et l'hydrogène lequel peut être stocké dans un réservoir ou reformé à bord.

Le fonctionnement à des températures relativement faibles (aux alentours de 80°C) permet un démarrage rapide (moins de temps pour réchauffer le système), ainsi que moins de composants auxiliaires ce qui réduit le prix et augmente la durabilité de tout le système. Cependant, le catalyseur nécessaire pour séparer l'électron du proton des molécules d'hydrogène requiert l'utilisation d'un matériau rare : le platine. De plus, ce catalyseur est très sensible à l'empoisonnement par monoxyde de carbone (CO) ce qui oblige à l'utilisation d'un hydrogène très pur (>99%) et donc plus coûteux. La recherche actuelle tente de remplacer le platine par d'autres matériaux moins onéreux comme le ruthénium.

La PEMFC est envisagée particulièrement dans les transports, mais aussi dans les applications stationnaires et mobiles. La densité énergétique, le volume, le poids, le coût, et surtout les basses températures, expliquent l'intérêt des constructeurs d'automobiles par ce type de PAC. Elle équipe actuellement la quasi totalité de voitures PAC à hydrogène en démonstration dans le monde.

Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)

La DMFC est une sous-catégorie des PEMFC qui utilise directement le méthanol comme carburant. Le méthanol est un carburant liquide plus dense énergétiquement que l'hydrogène et donc plus facile à transporter et à stocker. Le méthanol est liquide à conditions normales de température et de pression, ce qui dispense le recours à de fortes pressions et basses températures pour emmagasiner un contenu énergétique suffisant. Cette pile est toutefois moins efficace par rapport à la PEMFC à hydrogène, mais sa capacité à stocker l'énergie dans des faibles volumes permet de fournir une quantité d'énergie intéressante sur une longue période ce qui convient aux applications portables (téléphones, ordinateurs portables,...). Un autre problème est la toxicité du méthanol - très soluble dans l'eau et difficilement détectable par la saveur -, lequel peut s'avérer un poison très puissant.

Alkaline Fuel Cell (AFC)

Les piles AFC ont été les premières piles à être développées et elles ont également été les premières à équiper les navettes spatiales dans leurs missions dans l'espace. Elles continuent à être présentes dans les navettes mais sont graduellement remplacées par les PEMFC. L'AFC utilise un électrolyte à base d'une solution alcaline aqueuse, normalement de la potasse. Ces piles n'ont pas besoin d'utiliser des matériaux rares comme catalyseur ce qui réduit leur coût. En plus, l'AFC a un potentiel de rendement très élevé. Cependant, l'électrolyte a l'inconvénient d'empoisonner en présence de CO₂ en obligeant à l'utilisation d'hydrogène et d'oxygène à haut degré de pureté. Cela limite la période de vie de la pile et alourdit les coûts.

Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)

Cette pile utilise un électrolyte liquide à base d'acide phosphorique et des électrodes contenant du platine. La PAFC tolère un hydrogène ayant un degré de pureté moins élevé par rapport à la PEMFC, ce qui rend plus simple la reformation de carburants fossiles. C'est la raison pour laquelle ces piles sont normalement alimentées par l'hydrogène réformé à partir du gaz naturel.

La PAFC est déjà en commercialisation dans plusieurs applications. Elles sont normalement utilisées pour la génération électrique industrielle, ainsi que dans certains projets de démonstration de bus à hydrogène. A cet état, leur diffusion est limitée par une série de facteurs. Premièrement, la performance énergétique élevée (80%) est possible sous condition de la récupération de chaleur. Pour la génération stationnaire d'électricité uniquement, l'efficacité énergétique est bien inférieure (40%) ce qui la rapproche de l'efficacité des générateurs actuels à explosion. Deuxièmement, l'utilisation du platine rend le coût de la pile très élevé. Finalement, en raison de sa plus faible densité énergétique, la PAFC est plus grande et plus lourde en comparaison avec la PEMFC.

Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

La MFCF est une pile à haute température (650°C en moyenne) utilisant un électrolyte liquide composé d'un mélange de carbonates (lithium et potassium) suspendus dans une matrice céramique isolante et chimiquement inerte à base d'oxyde de lithium et d'aluminium (LiAlO₂). Les hautes températures permettent l'utilisation de matériaux non précieux comme catalyseurs à l'anode et à la cathode, en réduisant ainsi les coûts de production de la pile. La haute température permet aussi la

reformation interne de carburants fossiles comme le charbon - pour la production électrique et d'hydrogène - ce qui réduit les coûts avec le carburant.

Cette pile atteint des rendements énergétiques élevés (45–47%) en particulier en comparaison avec la PAFC. L'efficacité peut être supérieure à 80% avec la récupération de chaleur notamment grâce au couplage avec une turbine. Les carburants normalement utilisés sont le gaz naturel, le charbon et l'hydrogène. Les applications envisagées pour les piles de ce type sont la génération électrique et la chaleur pour les puissances moyenne et forte ; et la propulsion des navires. Pour ce qui est des premières applications, la société Fuel Cell Energy⁷⁹ est le leader mondial en produisant les piles à combustible *Direct FuelCells*[®] avec le montage de modules de 300 kW (jusqu'à 2,4 MW). Elle est associée en Europe avec l'allemand MTU⁸⁰ qui produit le *HotModule*[®].

Néanmoins, l'électrolyte liquide est sensible à des problèmes de corrosion ce qui réduit la période de vie de la pile en comparaison avec la SOFC (électrolyte solide).

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

Il s'agit d'un autre modèle de pile fonctionnant à très haute température (aux alentours de 1000°C). Elle utilise un électrolyte céramique (solide) et le processus à haute température permet l'utilisation de catalyseurs moins onéreux que le platine pour les PEMFC. La SOFC fonctionne à hydrogène et à d'autres hydrocarbures. La température élevée de fonctionnement permet le reformage direct du gaz naturel à l'anode.

Ce type de pile atteint des efficacités de 40% pour la génération isolée d'électricité (des rendements de 40-50% sont attendus dans le futur), et de presque 90% avec la récupération de chaleur (turbine à gaz, turbine à vapeur, récupération des calories à basse température pour la distribution de chaleur).

La modularité de la SOFC transparaît dans la gamme de puissances disponibles : dès les petites puissances pour les applications domestiques ; à la génération auxiliaire d'énergie dans les voitures ; jusqu'à la puissance de quelques MW pour la génération stationnaire d'électricité.

Le fonctionnement à très haute température a toutefois des inconvénients, dont les principaux sont les suivants : la longue période de démarrage qui rend non-viable l'utilisation de la SOFC comme unité principale dans les transports et petites applications portables ; les procédures supplémentaires pour la gestion de la chaleur ; l'utilisation de matériaux capables de fonctionner à ce niveau de température ce qui augmente les coûts ; et la fatigue des composants qui réduit la durabilité de la pile. La recherche est actuellement orientée vers le développement de piles à plus basses températures (500-600°C) et l'utilisation de matériaux métalliques moins onéreux comme catalyseurs.

2.2. Applications mobiles

La voiture pile à combustible à hydrogène est une voiture électrique qui, à la différence d'une voiture électrique à batterie, produit sa propre électricité à bord. L'hydrogène est mélangé avec l'oxygène dans une pile à combustible en produisant eau et électricité sans émission de gaz à effet de serre.

⁷⁹ <http://www.fuelcellenergy.com>

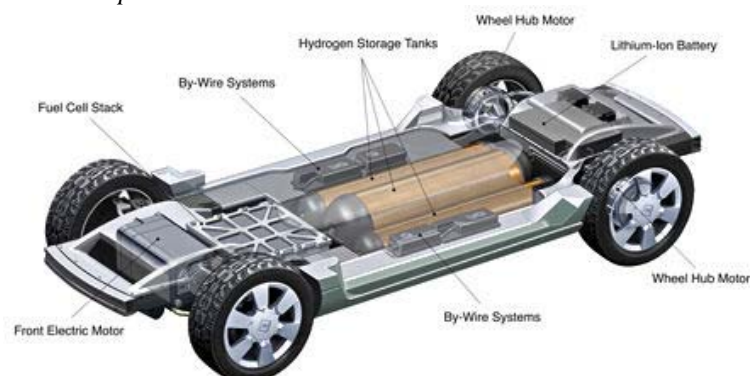
⁸⁰ <http://www.mtu-friedrichshafen.com>

L'intérêt pour les PAC dans les usages mobiles est expliqué par une série de raisons. Premièrement, la voiture PAC à hydrogène améliore considérablement le rendement énergétique par rapport à une voiture conventionnelle. Deuxièmement, elle fonctionne de manière silencieuse et sans émissions à l'endroit de la consommation en contribuant aussi bien à la réduction des émissions de gaz à effet de serre qu'à la qualité de l'air dans les villes. Troisièmement, cette voiture permet une utilisation similaire à celle de la voiture conventionnelle : elle peut être rechargée très rapidement, pour une autonomie supérieure en comparaison avec la voiture électrique à batterie. Quatrièmement, la voiture à PAC dispose d'un plus grand torque (mesure de pouvoir instantané), ce qui améliore le plaisir de conduite. Enfin, la suppression d'organes mécaniques élimine les frottements responsables d'une plus grande usure des matériaux, en diminuant les nécessités d'entretien.

Au-delà de la propulsion, la voiture PAC possède d'autres attributs qui peuvent être également appréciés par les automobilistes. Il s'agit spécialement du concept d'« électricité mobile » (*'mobile electricity'*). En effet, la capacité de générer l'électricité à bord ouvre un vaste ensemble d'opportunités (Williams et Kurani, 2006). La voiture est ainsi en mesure de fournir le courant pour alimenter tout type d'électronique portable (téléphone, ordinateur, etc.) et électroménagère (machine de café, sèche cheveux etc.). Elle peut fournir l'électricité à des endroits éloignés du réseau électrique tels que les maisons de montage et les campingcar. Le véhicule peut encore être connecté à la résidence ou à un bâtiment commercial et fonctionner comme générateur d'appui en cas d'interruption de courant ; ou vendre l'énergie à la compagnie électrique en aidant à amortir l'investissement initial.

Les constructeurs trouvent aussi des intérêts dans la technologie PAC en termes de flexibilité dans la conception de la voiture. Actuellement, le design du véhicule doit prévoir l'intégration d'un moteur à explosion et des composantes auxiliaires (transmission, radiateur, etc.). Le système de propulsion PAC simplifie le processus de conception de la voiture. Les piles sont plus compactes que le moteur à combustion et peuvent être rangées dans plusieurs endroits de la voiture de la manière la plus convenable (p.ex. en dessous des sièges). Dans ce sens, GM a présenté un concept novateur de châssis, le « skateboard », lequel intègre la PAC et les systèmes auxiliaires (batteries, réfrigération,..) dans une seule plateforme (graphique 26).

Graphique 26. Le concept de châssis "skateboard" de GM



Source : General Motors (GM)®, http://www.gm.com/experience/education/images/gallery_sequel/slide_5.html

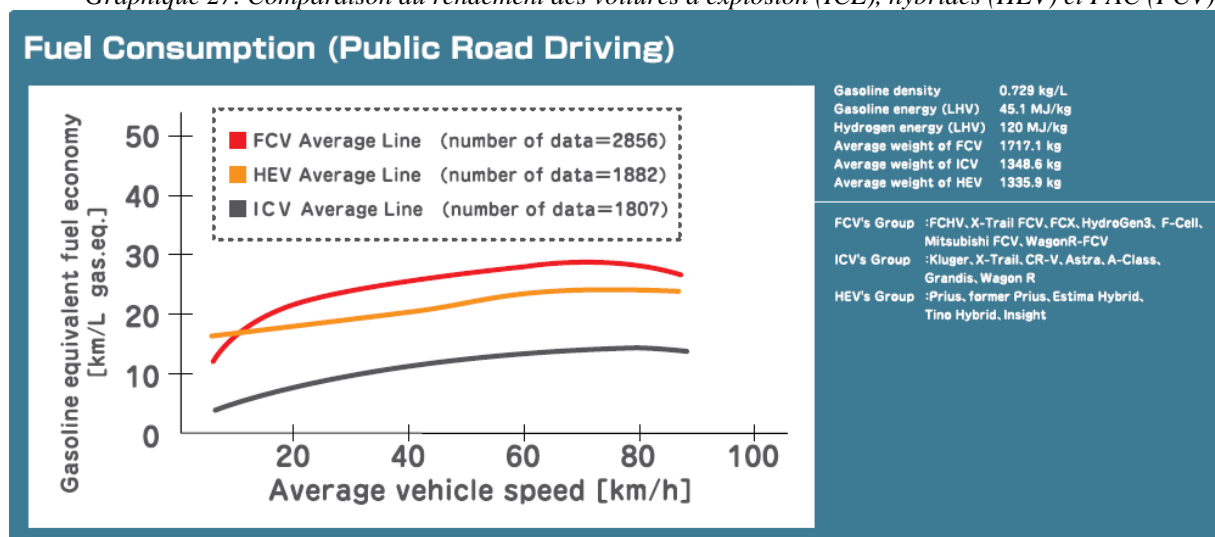
Les moteurs électriques sont intégrés dans les roues en rendant superflue la transmission et alors la voiture devient plus légère. Ce nouveau concept permet la construction de plusieurs types de voitures de manière plus économique puisqu'ils sont assis sur la même structure standardisée et

produite en masse. Cette nouvelle technologie ouvre aussi la possibilité de concevoir différemment l'intérieur de la voiture comme par exemple le positionnement du conducteur, ce qui permettrait la création de voitures personnalisées.

2.2.1. Efficience énergétique

Le rendement technique des véhicules PAC dépend de (1) l'efficacité de la pile à combustible et (2) du système de propulsion électrique, lequel est composé essentiellement de moteurs et de batteries. Durant les deux dernières décennies, plusieurs centaines de voitures PAC ont été produites et exposées dans le monde. Le graphique suivant compare l'efficacité énergétique des plusieurs technologies de propulsion à partir des données réelles du programme japonais de démonstration de voitures PAC.

Graphique 27. Comparaison du rendement des voitures à explosion (ICE), hybrides (HEV) et PAC (FCV)



Source : JHFC, 2008.

Les voitures PAC (FCV en anglais) ont présenté un rendement 1,8 à 2 fois supérieur à celui de la voiture conventionnelle à essence (ICE en anglais), alors que la meilleure voiture PAC est 3 fois plus efficace que l'ICE conventionnelle. Le programme prévoit que l'efficacité de la PAC soit 4 fois supérieure à celle de l'ICE conventionnelle dans le futur.

La voiture à essence qui a été testée présente une efficacité de 40% dans la plage d'utilisation optimale du moteur à explosion. Toutefois, ces valeurs tendent à diminuer considérablement avec une conduite différente. En particulier, l'efficacité de la voiture est fortement affectée (moins de 25%) à un niveau moins intensif d'utilisation du moteur ce qui correspond en gros à la conduite en ville. L'efficacité globale ne dépasse pas en moyenne les 23%, le reste de l'énergie est perdue sous la forme de chaleur.

Les voitures hybrides (HEV en anglais) peuvent contourner ce problème. A très bas régime d'accélération, elles fonctionnent en mode électrique très économe. En outre, elles peuvent

recupérer l'énergie du freinage et la stocker dans la batterie. Ainsi, l'efficacité est améliorée en se rapprochant des valeurs des voitures PAC.⁸¹

Il est difficile de prévoir avec précision l'évolution de l'efficacité de chaque technologie. Le passage du moteur à combustion pour la voiture électrique (EV, HEV, PHEV, FCV) correspond à un grand changement de la structure de la voiture. Plusieurs études ont estimé les possibilités d'améliorations des nouvelles technologies par rapport à la voiture conventionnelle à essence. Le tableau suivant présente quelques estimations d'amélioration mesurées en termes de l'efficacité énergétique du réservoir à la roue ('tank-to-wheel').

Tableau 10. Perspectives d'amélioration de l'efficacité technologique par rapport à la voiture à essence conventionnelle (2002-2005)

	2005	2010	2020	2025-30	2050
ICE essence	1	0,85-0,94	0,71	0,47-0,71	0,55-0,74
ICE diesel	0,74-0,85	0,71-0,85	0,52	0,40-0,54	0,53-0,68
HEV essence	0,47-0,69	0,43-0,83	0,43	0,31-0,46	0,40-0,60
HEV diesel	0,4-0,69	0,41-0,64	0,37	0,28-0,40	0,45-0,60
PHEV				0,21-0,22	
EV	0,17-0,22	0,18	0,2	0,21	0,21
FCV	0,33-0,42	0,37-0,61	0,26-0,30	0,28-0,46	0,23-0,40
FCV-hybride		0,27-0,48	0,22-0,25	0,4	
Références	(1-8)	(6-9)	(9-10)	(11,1,3-4,7,9)	(12,1,9)

Sources : (1) TechPoles, 2008 ; (2) NRC, 2004 ; (3) NRC, 2008ab ; (4) Kromer et Heywood, 2007 ; (5) Ogden et al., 2004 ; (6) EUCAR-CONCAWE-JRC, 2008 ; (7) JHFC, 2006 ; (8) HyWays, 2008 ; (9) Kobayashi et al., 2009 ; (10) Heywood et Weiss, 2006 ; (11) Schäfer et al., 2006 ; (12) AIE, 2005.

Toutes les technologies doivent progresser substantiellement dans les prochaines décennies. Toutefois, le tableau ne montre pas cette évolution de manière continue parce qu'il est construit à partir de différentes sources littéraires.

La diffusion des nouvelles technologies dépend de sa compétitivité face à la voiture conventionnelle. Le principe est que la technologie entre dans le marché au fur et à mesure qu'elle devient compétitive avec la technologie dominante. D'où l'importance des améliorations incrémentales, lesquelles permettent d'abaisser les coûts opérationnels (carburant, entretien) de manière à compenser le coût additionnel de la voiture. Ceci devient alors un paramètre clé de la diffusion technologique.

Ainsi, il est raisonnable d'espérer que les voitures diesel dans une première phase, puis les voitures hybrides (d'abord à essence et après à diesel), augmentent progressivement leur part de marché (Plotkin et al., 2009). Les coûts additionnels des voitures électriques à batterie, hybrides, hybrides rechargeables, et piles à combustible, doivent diminuer à la suite des dépenses en R&D, de la

⁸¹ La voiture hybride rechargeable n'est pas analysée ici en raison de l'incertitude quant à sa configuration future. De même, la voiture électrique ne fait pas l'objet de révision car elle ne se qualifie pas encore comme une voiture multifonctions. En particulier, cette voiture ne passe pas le critère de l'autonomie. D'autres études incluent déjà les voitures électriques (p.ex. JHFC, 2006) toutefois avec une mention sur le problème de l'autonomie.

production de masse, et des économies d'apprentissage.⁸² En outre, l'augmentation du prix du pétrole et la nécessité de réduire drastiquement les émissions (dans le cas où le phénomène du changement climatique s'avère plus important que prévu) peuvent agir de concert pour accélérer la transition technologique.

La voiture électrique à batterie est probablement la meilleure technologie en termes de rendement énergétique. Il s'agit d'une technologie connue depuis au moins un siècle. En 2050 elle sera presque 4 fois plus efficiente que la voiture à essence contemporaine, et encore plus efficiente que la voiture PAC. Les défenseurs de la voiture électrique – normalement critiques vis-à-vis de la solution PAC à hydrogène – argumentent que son bilan énergétique de 86% (93% charge de la batterie et 93% décharge de la batterie) est très supérieur à 38% (70% de rendement de l'électrolyse, 90% du compresseur et 60% de la pile) de la voiture PAC à hydrogène (Bougnoux et Douaud, 2009 ; Bossel et al., 2003).

Cependant, la voiture électrique souffre des limites des batteries en termes de stockage de l'énergie, ce qui limite la vitesse de pointe et réduit drastiquement son rayon d'action.⁸³ A moins d'un saut technologique majeur dans les batteries, il semble peu probable que la voiture électrique atteigne une autonomie supérieure à 300 kilomètres. Alors, l'intérêt pour la voiture électrique à batterie et son éventuelle diffusion ne peut pas être expliqué par la comparaison technologique mais par un changement au niveau de la conception sociale de la mobilité urbaine. Sinon, il faudra rendre la voiture conforme aux préférences historiquement révélées par les automobilistes (performance, vitesse, autonomie). Une solution possible passe par l'intégration d'un moteur à combustion qui recharge la batterie à bord et assure la propulsion pour les trajets plus longs, ce qui est le principe des voitures hybrides (HEV) et hybrides rechargeables (PHEV en anglais).

La voiture hybride rechargeable associe un moteur à combustion conventionnel à des moteurs électriques alimentés par des batteries. A la différence de la HEV, les batteries peuvent aussi être rechargées sur une arrivée de courant domestique ou à une borne publique. Cette configuration permet dans la pratique d'augmenter les performances (autonomie, vitesse, etc.) des voitures électriques. Pour cela, la PHEV utilise une batterie plus grande par rapport à la HEV, mais moins importante que celle qui équipe la voiture électrique pure ce qui diminue les barrières techniques en termes de densité énergétique, poids et taille de la batterie.

Néanmoins, on peut argumenter que les voitures hybrides (HEV, PHEV) ne correspondent pas à un vrai changement technologique parce qu'elles ne coupent pas complètement avec la dépendance aux hydrocarbures. Une solution qui a été proposée passe par l'utilisation de biocarburants. Cette solution pourrait réduire la consommation d'énergies fossiles tout en garantissant un bilan carbone neutre (Romm, 2004). Encore faut-il que le biocarburant soit produit d'une manière durable.

⁸² Le coût attendu de la voiture électrique est de 45.000 US\$(2005) en 2025 et 37.000 US\$(2005) en 2050 ; alors que celui de la voiture PAC est espéré à 80.000 US\$(2005) en 2025, 44000 US\$(2005) en 2050 (TechPoles, 2009).

⁸³ La nouvelle « Leaf » présentée par Nissan le 1^{er} août 2009 est une voiture de 5 places équipée avec les dernières technologies de batteries d'ions de lithium disposant d'une densité énergétique de 0,14 kWh/kg. La vitesse maximale est de 140 km/h, et l'autonomie annoncée est de 150 km. Pour la comparaison, les caractéristiques minimales considérées par le consortium EUCAR-CONCAWE-JRC (2008) comme nécessaires pour satisfaire les attentes des consommateurs est une vitesse de pointe supérieure à 180 km/h et une autonomie de plus de 600 km. L'entrée en commercialisation de la « Leaf » est espérée pour 2010. Voir : <http://www.autoblog.com/2009/08/01/2010-nissan-leaf-electric-car-in-person-in-depth-and-u-s-b/>

A moyen et long termes, la lutte pour le marché des transports individuels semble alors être entre les voitures PHEV et PAC à hydrogène. Etant donnée l'incertitude sur l'évolution des voitures, il est difficile de comparer l'efficacité des deux technologies PHEV et PAC. En 2050, les deux options technologiques doivent être 4 à 5 fois plus efficaces que les voitures d'aujourd'hui, et entre 3 à 4 fois plus efficaces que les voitures à essence contemporaines. Le tableau 10 n'est pas clair relativement à la comparaison entre les voitures PAC (ou FCV) et les PHEV. Il y a raison de croire que la voiture PAC est plus efficace que la PHEV même si celle-ci fonctionne avec le moteur électrique en ville. En effet, le rendement de la voiture PHEV est pénalisé par les pertes énergétiques du moteur thermique.

Cette analyse du rendement énergétique des voitures ne prend en compte que l'efficacité de consommation du carburant par le véhicule ('tank-to-wheels') ; l'énergie nécessaire à la production de ce carburant mesurée en termes du puits au réservoir ('well-to-tank') doit être aussi analysée. Une évaluation complète doit alors inclure aussi bien la consommation énergétique et l'impact environnemental de la production et distribution du carburant, que son utilisation au niveau de la voiture. C'est-à-dire une analyse dite du « puits à la roue » ('well-to-wheels'). A cet égard, les avantages environnementaux des nouvelles technologies par rapport à la voiture conventionnelle ne sont pas les mêmes lorsque l'hydrogène ou l'électricité sont produits à partir d'énergies fossiles (p.ex. charbon sans séquestration du carbone).

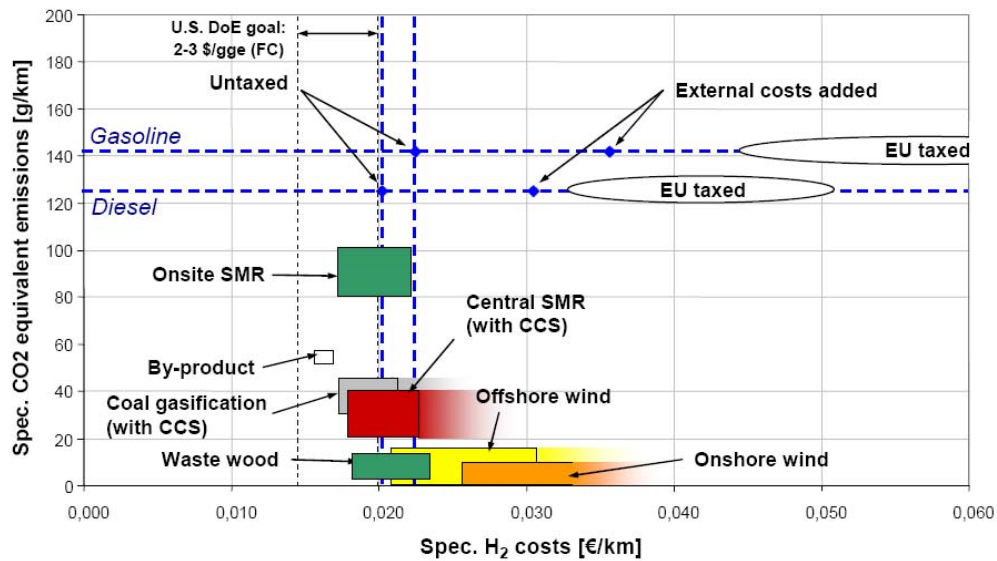
2.2.2. L'impact environnemental

En 2004, le secteur des transports a été responsable de 26% des émissions de CO₂ en Europe, 24% de composés organiques volatiles, 44% de NO_x, et 50% de CO (AEE, 2006). Le CO₂ est le premier gaz responsable du changement climatique. Les trois autres types d'émissions sont des gaz toxiques responsables de la pollution de l'air dans les villes laquelle provoque annuellement 4 millions de décès en Europe (UE-27).

L'impact de la voiture sur l'environnement a un rapport direct avec l'efficacité des véhicules. Généralement, plus la voiture est efficace, moins de carburant est nécessaire pour effectuer le même parcours, et moins d'émissions sont rejetées dans l'atmosphère.

La voiture PAC est efficace, silencieuse et « zéro émission » sur le lieu d'utilisation. La pile combine oxygène et hydrogène pour produire l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule avec le seul rejet de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Ainsi, cette technologie peut contribuer à réduire significativement les émissions de CO₂ et d'autres gaz polluants. Cependant, pour avoir une image complète, les émissions lors de la production et distribution de l'hydrogène doivent être aussi prises en compte. Le graphique suivant compare l'hydrogène produit à partir de différentes filières industrielles (fossiles et non-fossiles) avec l'essence et le diesel.

Graphique 28. Bilan environnemental et coût de plusieurs méthodes de production d'hydrogène en Europe et comparaison avec l'essence et le gasoil



Source : HyWays, 2008, p.21, à partir des données de EUCAR-CONCAWE-JRC.

Plusieurs points sont à retenir à la lecture au graphique 28:

- l'internalisation des coûts externes des hydrocarbures rend immédiatement compétitives les voitures PAC à hydrogène dans les transports ;⁸⁴
- plusieurs méthodes de production d'hydrogène sont économiquement viables au prix actuel des carburants fossiles (ajusté par la plus grande efficacité des PAC) ;
- l'utilisation de l'hydrogène disponible ('by-product') doit être un bon compromis - économique et écologique - pendant la phase initiale ;
- la production d'hydrogène à partir d'énergies fossiles permet de réduire les coûts, mais le bilan environnemental est aussi moins avantageux. En particulier, l'hydrogène produit à partir du charbon est une option économiquement intéressante et permet de réduire la dépendance de l'Europe aux importations d'hydrocarbures, à condition que les techniques de capture et de séquestration soient mises au point.

Le projet européen HyWays (2008) a estimé l'impact sur l'environnement de l'introduction de l'hydrogène dans les transports. Cela aurait comme effet une réduction des émissions de CO₂ entre 30 et 60% en 2050 par rapport au scénario tendanciel.⁸⁵ De plus, l'hydrogène permettrait de réduire de 70% les émissions annuelles de NO_x en 2050.

2.2.3. Coût et compétitivité dans les transports

La pile à combustible remplacera les moteurs à explosion si son utilisation est plus économique. Le coût du moteur à explosion est actuellement estimé à 30€/KW. Etant donné que la pile est 2 à 3 fois plus efficace que le moteur conventionnel, son coût doit se situer entre 50 et 100\$/KW de façon à devenir compétitive. Aux Etats-Unis, l'objectif officiel a été fixé à 50\$/KW (DOE, 2007). En Europe, le

⁸⁴ Voir par exemple, Ogden et al, 2004.

⁸⁵ Cette large plage de résultats est expliquée par les différents scénarios de pénétration de l'hydrogène dans le marché.

« Snapshot 2020 » (HFP, Implementation Plan, 2006) a établi l'objectif à 100€ pour que la pile devienne compétitive dans le marché des voitures et bus.

Les dernières estimations rendent compte d'une baisse importante des coûts en les rapprochant des objectifs de commercialisation. Ces estimations prennent toutefois l'hypothèse de production de 500.000 piles à combustible. Le prix des prototypes et des premières unités est actuellement estimé à plus de 500€/kW, ce qui est à mettre en perspective avec le prix de 3000€/KW, 5 ans auparavant (Roads2HyCom, 2009a). Les coûts avec la membrane de Nafion® et la platine constituent plus de la moitié du coût global du système PAC.

L'utilisation de matériaux rares comme le platine est un frein important à la baisse des prix. Cela pose la question de la durabilité de la filière. Un rapport de l'*US Geological Survey*⁸⁶ estime à 13.000 tonnes les réserves de platine dans la planète lesquelles sont situées surtout en Afrique du Sud. Ces réserves sont évaluées à 55 ans de production au rythme actuel (240 tonnes par an).⁸⁷ La PAC actuelle utilise 0,6 grammes de platine par kW. Un des champs de recherche prioritaires consiste à réduire le contenu en platine à 0,2 grammes/kW par l'augmentation de la température de fonctionnement de la pile et sa substitution par des matériaux moins rares. Des avancées techniques sont encourageantes. Le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) vient d'annoncer que l'objectif de 1 gramme/kW est possible à atteindre dans les 5 prochaines années.⁸⁸

Un autre aspect important tient à la durabilité de la pile. La pile à combustible doit avoir une durabilité de 5000 heures ce qui est équivalent à 200.000 km. Les voitures PAC actuelles présentent une durabilité de 1900-2000 heures (Roads2HyCom, 2009a ; DOE, 2007 – mise à jour en avril 2009). Les derniers modèles ont une durabilité (attendue) plus grande. Par exemple, la dernière Mercedes B-Class F-Cell est annoncée avec 5000 heures de durabilité.

L'autonomie est un argument important de la voiture PAC à hydrogène notamment par rapport à la voiture électrique à batterie. L'état actuel des batteries ne permet pas un grand stockage d'énergie (ce qui est partialement compensé par une plus grande efficacité énergétique de la voiture électrique). La voiture hybride rechargeable ('plug-in hybrid electric vehicle' PHEV) est une solution possible pour la voiture multi-utilisations grâce à son moteur thermique alimenté par un carburant liquide (fossile ou biomasse) qui permet de grands déplacements. La PHEV est alors un sérieux concurrent de la voiture PAC. Néanmoins, la configuration technique d'un tel véhicule avec deux moteurs (thermique et électrique) et deux types d'énergie (électricité et le carburant liquide) peut s'avérer très complexe.

Entre-temps, une solution plus simple a été proposée qui mélange le concept PHEV avec celui de la pile à combustible.⁸⁹ Il s'agit de la *voiture hybride à hydrogène*. Au lieu d'un moteur thermique (peu

⁸⁶ Cité par Bougnoux et Douaud, 2009.

⁸⁷ La consommation mondiale est actuellement répartie de la manière suivante : industrie automobile pour le traitement des gaz sortant des voitures (54%) ; joaillerie (15%) ; microélectronique (5%) ; chimie (5%) ; autres (21%). Source : Bougnoux et Douaud (2009) à partir de données du US DOE.

⁸⁸ Bougnoux et Douaud (2009) font le point de la situation de l'utilisation du platine dans les PAC pour les transports.

⁸⁹ Pour une discussion, voir : Bougnoux et Douaud (2009). L'utilisation de la PAC comme prolongateur d'autonomie de la voiture électrique ouvre la porte à des nouveaux modèles commerciaux. Nous pouvons penser, par exemple, au cas où le conducteur achète la voiture électrique et loue la PAC à chaque fois qu'il veut faire des grands déplacements.

efficace et lié à la domination des carburants pétroliers), la voiture hybride à hydrogène utilise une pile à combustible pour étendre le rayon d'action de la voiture électrique.

La voiture hybride à hydrogène n'a pas les mêmes exigences techniques que la voiture PAC pure. La PAC fonctionne ici comme un auxiliaire de puissance et non pas comme l'unité principale de propulsion ce qui diminue les exigences en termes de performance de la pile (une puissance de 10 KW au lieu de 70-80 kW serait suffisante) et de stockage d'hydrogène (1 kg d'hydrogène au lieu de 5 kg).⁹⁰ Les infrastructures initiales nécessaires seraient également allégées, dans le sens où un réseau de stations service au long des principales autoroutes pourrait desservir aisément les premières voitures à hydrogène. En bref, cette option est à pondérer surtout pendant la phase initiale de la transition.

2.2.4. Les marchés potentiels

Les attributs de la pile à combustible à hydrogène (efficacité, zéro émissions, énergie mobile, etc.) peuvent être un atout important pour ouvrir une série de marchés mobiles. Ensuite, nous passons en revue quelques marchés considérés comme prometteurs.

Voitures personnelles : la dépendance du secteur au pétrole, les problèmes environnementaux et l'augmentation attendue du parc automobile mondial, rendent obligatoire un changement de paradigme dans le marché des transports personnels. Propre, efficace et confortable, la voiture à hydrogène possède les atouts nécessaires pour conquérir le marché, à condition que les coûts soient compétitifs. Cela n'est pas gagné d'avance : d'une part, les voitures électriques (hybrides, hybrides rechargeables, électriques pures) sont aussi en course pour le remplacement des moteurs à explosion ; d'autre part, la voiture à hydrogène reste pénalisée par les coûts élevés de la PAC. Le résultat de cette bataille technologique dépendra dans une large mesure de la capacité de chaque option à stocker de l'énergie. Pour l'instant, les constructeurs comme Mercedes et GM réalisent des démonstrations de quelques centaines de voitures PAC à hydrogène. Honda a même commencé à produire et à vendre (en Californie et au Japon) une voiture PAC à hydrogène (la FCX Clarity) à petite échelle (200 espérées avant 2011).⁹¹

Bus : les bus, taxis, et autres flottes captives constituent un marché initial particulièrement intéressant pour la voiture PAC à hydrogène. Premièrement, chaque flotte est normalement ravitaillée au même endroit ce qui diminue les nécessités d'infrastructure. Cela peut également créer les premières stations d'hydrogène. Deuxièmement, l'entretien est fait de manière centralisée et les flottes sont gérées par des gens plus spécialisés, susceptibles d'être plus sensibles aux avantages de la voiture à hydrogène en termes de coût du cycle de vie de la voiture (plus grand coût de capital initial ; moindre coût opérationnel). Troisièmement, les voitures des flottes sont normalement plus utilisées que les voitures particulières permettant d'amortir plus vite les coûts initiaux. Enfin, le gouvernement peut exiger aux flottes de véhicules (surtout publiques) l'achat obligatoire d'une part de voitures à hydrogène dans les nouvelles acquisitions, ainsi qu'attribuer des incitations à l'achat. En

⁹⁰ Une voiture électrique a actuellement une autonomie de 150 km. Cette autonomie peut être prolongée de 75-100 km par une PAC de 5 à 10 kW (au lieu de 80 kW pour la voiture PAC uniquement) et en stockant 1 kg d'hydrogène (au lieu de 5 kg). Voir : Perrin J. (2008), « L'Economie de l'hydrogène : mythe ou futur possible ? », Environord, Lille, 10 juin.

Par ailleurs, le groupe PSA a déjà démontré quelques petites voitures utilitaires employant ce concept.

⁹¹ Voir Fuel Cell Today, 2009a.

somme, les flottes captives peuvent être une porte d'entrée importante de l'hydrogène dans le marché des transports avant de passer au segment principal de la voiture individuelle.

Voitures spéciales (scooters, chaise roulantes,..) : il s'agit d'un marché en expansion dans le monde, en particulier dans les pays en développement (comme la Chine et l'Inde). La nécessité de réduire les émissions polluantes et les gaz à effet de serre est un facteur décisif pour l'entrée de systèmes de mobilité plus propres. La recharge rapide et l'autonomie sont d'autres atouts importants notamment dans le cas des chaises roulantes.⁹² Les exigences pour les piles à combustible en termes de performances et de coûts sont moins contraignantes que pour le marché principal de voitures particulières, ce qui permet d'envisager ce segment comme un marché initial pour l'hydrogène. Le projet HyChain est consacré à l'utilisation d'hydrogène et PAC dans les voitures spéciales (minibus, voitures de propreté, scooters, chaises roulantes,..) dans plusieurs villes européennes (p.ex. Grenoble), ainsi que le développement d'une infrastructure innovante et pratique pour la distribution d'hydrogène.

Chariots élévateurs ('forklifts') : l'hydrogène et les PAC permettent une utilisation silencieuse et zéro émissions ce qui est un avantage par rapport au moteur à explosion. De plus, les chariots élévateurs PAC peuvent être opérés presque de manière continue, à des coûts opérationnels plus faibles, et nécessitant moins d'équipements (moins de place) en comparaison avec les chariots électriques à batterie. Il s'agit d'un marché déjà important pour l'hydrogène et les PAC. En 2007 et 2008, 50 unités environ ont été vendues dans le monde par an, dans la quasi-totalité des PEMFC (Fuel Cell Today, 2008a).

Unités génératrices auxiliaires ('auxiliary power unit' APU) : les dispositifs destinés à fournir une énergie embarquée supplémentaire sont un marché important qui devient rapidement compétitif dans le segment des loisirs et du luxe avec des milliers d'unités vendues par an (Fuel Cell Today, 2008b). Les applications maritimes sont un marché en plein essor en particulier pour les piles de la technologie DMFC. La croissance du marché est liée aux attributs des APU en termes de fonctionnement propre, silencieux, efficient et une grande autonomie, très prisés par la navigation de loisir. Les consommateurs sont disposés à payer une prime pour avoir accès aux avantages des piles par rapport aux générateurs actuels et aux batteries. De plus, la pression réglementaire pour réduire les émissions dans certaines rivières et lacs (p.ex. Allemagne) et en mer crée un contexte favorable au développement du marché. Un autre marché important pour les APU réside dans les transports routiers. En particulier, les poids lourds ayant un besoin d'énergie lorsqu'ils sont immobilisés. Trois technologies sont à l'étude dans ce secteur : PEMFC ; DMFC ; et SOFC. Malgré les avantages des piles en termes d'absence de bruit, de zéro émissions et de qualité du courant par rapport à la génération d'électricité par le moteur principal, la taille des APU reste très encombrante (Agnolucci, 2007a). La puissance et la densité énergétique doivent être augmentées d'un facteur 4 de manière à satisfaire les exigences du marché (DOE, 2007). Une autre application pour les APU (surtout du type PEMFC) est dans le secteur de l'aviation. Des systèmes APU hybrides sont attendus en 2020 pour l'aviation commerciale. En outre, des systèmes militaires d'aviation de surveillance non pilotés peuvent constituer un marché initial de grande ampleur pour les APU.

⁹² En 2008, 100 unités de chaises roulantes ont été vendues aux Etats-Unis (Fuel Cell Today, 2008a).

2.3. Applications portables et stationnaires

L'intérêt pour les PAC stationnaires est expliqué par un concours de circonstances favorables à son développement dans le marché.⁹³ Premièrement, la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et des polluants de l'air local. A cela s'ajoute la tendance à l'utilisation de combustibles moins carbonés (décarbonisation) et éventuellement l'hydrogène. Deuxièmement, l'effet conjoint de la raréfaction des sources fossiles et de l'augmentation de la demande d'électricité rend nécessaire une plus grande efficacité énergétique. Troisièmement, le mouvement de dérégulation des marchés électriques qui a ouvert la porte à l'entrée de nouveaux acteurs et à la production décentralisée. Enfin, la volonté des gouvernements de privilégier le développement des énergies renouvelables. Cela pose notamment la question de l'intégration des sources intermittentes (éolien, solaire,..) et des équipements nécessaires à l'équilibrage du réseau.

La pile à combustible dispose de plusieurs atouts : un taux élevé de disponibilité (>95%) ; un fonctionnement fiable (>99%) ; un entretien moins onéreux ; un fonctionnement silencieux et sans vibration ; une efficacité énergétique très élevée pouvant aller jusqu'à 80-90%. (Voir point 2.1.)

Les marchés de la génération décentralisée et de la cogénération d'électricité et chaleur offrent toutefois des perspectives moins intéressantes pour les PAC en comparaison avec le marché des transports. Dans ce secteur, les piles font face à une plus large concurrence de technologies matures (turbines, générateurs diesel,..), mais les exigences en termes de coûts et de performances sont moins contraignantes.

2.3.1. Efficacité et impact environnemental

L'efficacité des piles à combustible stationnaires dépend de la taille et du type de système. Les applications demandant plus de puissance ont généralement un rendement plus élevé. Ainsi, l'efficacité théorique des piles à combustible stationnaires est de 40% pour les piles ayant entre 1-100 kW ; 50% pour les piles de 100 kW-1MW ; 60% pour celles de 1-10MW ; et plus de 70% pour les applications plus larges avec récupération de la chaleur.⁹⁴ L'expérience réelle fournit des informations mitigées quant à l'efficacité des PAC. Les micros systèmes PAC de cogénération domestique déjà installés ont atteint des performances décevantes de l'ordre de 26%, loin des 40% d'efficacité théorique. Des signes positifs existent toutefois quant au rendement de la prochaine génération de piles suite à l'installation d'un module de cogénération de l'entreprise MTU-CFC à Hambourg lequel a atteint une efficacité électrique de 46%.⁹⁵

L'impact environnemental varie selon la source d'énergie utilisée. Actuellement les piles à combustible utilisent surtout du gaz naturel en profitant de l'infrastructure existante. Les émissions de CO₂ sont légèrement plus faibles en comparaison avec les systèmes conventionnels de cogénération au gaz naturel. Cependant, des bénéfices environnementaux importants ont été signalés en termes de réduction des émissions d'oxydes de soufre (SO_x), d'oxyde nitrique (NO_x) et de particules. L'avantage des piles est maximal lorsque l'hydrogène est produit à partir d'une source

⁹³ Pour une analyse de l'environnement concurrentiel dans les applications stationnaires, voir Powell et al., 2004.

⁹⁴ Pour une révision des études sur l'efficacité et la performance environnementale des PAC stationnaires, voir Powell et al. (2004).

⁹⁵ Information sur le « Hot module » de MTU-CFC installé à Hambourg: <http://www.mtu-cfc.com/en/hotm/hotm.htm>

renouvelable (éolien, solaire, biomasse,..). De cette manière, les émissions de gaz à effet de serre au long de la chaîne industrielle (de l'énergie primaire à la production d'électricité et de chaleur) sont pratiquement nulles.

Selon les estimations du projet HyWays (2008), la diffusion des PAC à hydrogène dans les applications stationnaires en Europe permettrait de diminuer les émissions annuelles de CO₂, entre 25 et 50 millions de tonnes en 2050, par rapport au scénario de base.

2.3.2. Coût des piles à combustible

Dans le secteur stationnaire, les PAC font face à la concurrence d'autres technologies (e.g. moteurs et turbines à gaz, générateurs à diesel, microturbines). Le type de PAC, la taille, et les seuils de compétitivité varient selon le marché. La plateforme industrielle européenne pour le soutien de l'hydrogène et les piles à combustible⁹⁶ a fixé comme objectifs pour 2020 ('Snapshot 2020 targets') : 2000€/kW pour les applications stationnaires inférieurs à 100kW ; et 1500-2000 €/kW pour les applications d'une puissance plus importante (HFP, 2007). Le coût des piles à combustible MOFC et PAFC pour le secteur stationnaire est estimé à 2000€/kW pour les années 2009-11 (Roads2HyCom, 2009a).

Tableau 11. Coût actuel des PAC stationnaires et objectifs pour le futur

Coûts (€/kW)	Coûts actuels	Objectif de coût			
		Portable	Transport	Micro stationnaire (<100 kW)	Stationnaire (>100 kW)
DMFC	.	1-2 €/W	.	-	-
AFC	.	-	-	2000	-
PAFC	2000	-	-		1000-1500
MOFC	2000	-	-		
SOFC	.	-	-		
PEMFC	500	-	<100		
PEMFC stationnaire	1500				

Source : Roads2HyCom, 2009a ; DOE, 2007.

Pour être compétitives, les PAC stationnaires doivent avoir une durée de 90.000 heures pour une période de vie de 10 ans de fonctionnement continu. Les piles actuelles en production sur large échelle (MW) ont une période de vie de 60.000 heures avec un taux de disponibilité de 95-98%.⁹⁷ La situation est moins bonne pour les systèmes plus petits, lesquels ont actuellement une période de vie de moins de 5000 heures (à comparer avec l'objectif de 40.000-50000 heures) pour une disponibilité moyenne de 60%.

2.3.3. Marchés à court et moyen termes

Les usages portables : l'électronique grand public (pc portable, téléphone,..) est devenu un marché important dans le monde ; il est aussi un marché initial pour les micro PAC (<1kW). Les principaux

⁹⁶ « European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform » (HFP) devenu le « Joint Technology Initiative on Fuel Cells and Hydrogen » : http://ec.europa.eu/research/fch/index_en.cfm

⁹⁷ Les informations concernant la durabilité et la disponibilité ont été retirées de Roads2HyCom (2009).

avantages des micros piles est la fourniture d'une plus grande quantité d'énergie permettant une autonomie substantiellement accrue (plus de 20 heures pour un pc portable à comparer avec 3-5 heures des batteries Li-ion), et un rechargement rapide prenant seulement quelques minutes au lieu de plusieurs heures pour les batteries. Ces qualités sont très appréciées aussi bien par les utilisateurs d'ordinateurs et de téléphones portables que pour les applications militaires. Cependant, pour que la micro pile devienne compétitive, la durabilité et la fiabilité doivent être améliorées, et la taille et le prix doivent diminuer (Agnolucci, 2007a). En particulier, la densité énergétique des piles doit être multipliée par 3 pour rester compétitive avec les batteries (DOE, 2007). Les coûts sont moins un problème pour les applications militaires (appareils de détection, électronique portable,...) puisque la légèreté, la grande densité d'énergie embarquée et le fonctionnement sans bruit sont des caractéristiques très recherchées dans ce domaine. Ceci est un débouché initial important car le secteur militaire est disposé à payer un prix élevé (marché « premium ») pour les attributs de la PAC.

Les générateurs d'appui et les alimentations sans interruptions ('Uninterruptible Power Supply' UPS) : une défaillance électrique, même très courte, peut provoquer des coûts énormes pour les entreprises utilisatrices d'applications sensibles telles que les entreprises informatiques, les assurances ou les banques. La PAC fournit une énergie de haute qualité, fiable et avec un taux de disponibilité très élevé (au dessus des 99%). Ainsi, le critère de coût est moins important que dans d'autres secteurs. En 2008, 4000 piles à combustible pour les usages UPS et systèmes domestiques de cogénération ont été vendues dans le monde dont 95% était des PEMFC (Fuel Cell Today, 2009b). En particulier, le marché des UPS présente une croissance soutenue. Idatech a vu récemment confirmée la commande de la société indienne ACME pour la fourniture de 310 piles en 2009 destinées à alimenter un réseau d'antennes de télécommunications mobiles. Cette commande fait partie d'un contrat plus vaste de 30.000 unités de 5kW chacune avant 2013, sous condition de performances minimales.

Systèmes domestiques de cogénération d'électricité et de chaleur : les piles pour la cogénération d'électricité et chaleur ('combined heat and power', CHP) se rapprochent rapidement de la commercialisation. La production sur une large échelle est attendue vers 2012 (Roads2HyCom, 2009a). Deux compagnies ont reçu des commandes de plusieurs milliers d'unités⁹⁸ sous condition d'accomplissement des objectifs de performance et de coût (Fuel Cell Today, 2008c). En plus, le marché est tiré par les incitations gouvernementales. Le gouvernement japonais a lancé le plus grand programme de démonstration des PAC stationnaires au monde dans lequel il accorde des subventions à l'achat de systèmes domestiques. En 2008, deux programmes de démonstration de systèmes de micro cogénération PAC en Europe ont été mis en place : le programme Callux en Allemagne et le programme résidentiel danois. Une plus grande diffusion des piles sur le marché dépend de la poursuite des améliorations techniques, notamment au niveau de la durabilité et de la fiabilité.

La génération stationnaire d'électricité pour l'industrie et le commerce : la libéralisation des marchés électriques et la tendance à la décentralisation de la production a créé un contexte favorable au déploiement des PAC. Ce marché englobe des situations très différentes ; nous distinguerons le segment de marché entre 250-400 kW (hôpitaux, bâtiments, prisons,..) du marché des puissances supérieures à 1MW (p.ex. centrales électriques). Ce dernier progresse aussi bien en

⁹⁸ L'anglaise Centrica a récemment commandé 32.000 unités à sa compatriote Ceres Power. Pour sa part, la hollandaise Nuon a passé une commande de 50.000 unités à l'australienne Ceramic Fuel Cells.

termes d'unités vendues que de taille des installations. Ceci dit, il reste encore confiné à certaines régions dans le monde qui octroient de fortes subventions à l'achat comme les états américains de la Californie ou du Connecticut. Le marché des piles 250-400 kW est actuellement le plus dynamique en raison du resserrement de la réglementation environnementale pour les bâtiments (Fuel Cell Today, 2008c). En termes technologiques, la MOFC et la PAFC dominent pratiquement le marché. Cependant, les coûts des piles devront continuer à baisser et à se rapprocher des 2000€/kW de manière à devenir compétitives avec les technologies concurrentes de génération d'électricité.

Tableau 12. Synthèse de l'état de commercialisation des PAC dans les différents marchés

Secteur	Produit en vente	Profitabilité estimée	Production en masse
Voiture	2012-2015	2025-30	2015-25
Bus	Petites commandes	2020-25	2015-25
Voitures spéciales	Petites commandes	2010-15	2015-20
Chariot élévateur	Petites commandes	2012-17	2012-15
APU	En vente	Profitable	Potentiel limité
Usages portables	En vente	2009	Annoncé 2009
UPS	Petites commandes	2010-15	Annoncé 2010
MicroCHP	Annoncé pour 2011	2010-15	2011-2012
CHP industriel	Petites commandes	2010-15	Annoncé 2010

Adapté de Roads2HyCom, 2009a.

Les piles à combustible stationnaires doivent commencer par utiliser du gaz naturel. Toutefois, les nécessités en termes de réduction d'émissions de gaz à effet de serre et de diminution des importations énergétiques, jouent en faveur de l'utilisation de l'hydrogène. Ceci est spécialement vrai pour le carburant des piles dans les applications mobiles. Alors, une nouvelle filière industrielle doit être mise au point pour rendre disponible le nouveau carburant.

Section 3. Organisation de la nouvelle filière hydrogène pour approvisionner les piles à combustible

Cette section examine l'ensemble de la chaîne afin d'estimer le coût de l'hydrogène rendu au consommateur par l'intégration de chaque étape de la chaîne d'hydrogène. Une attention particulière sera portée aux applications mobiles en raison de leur importance dans l'économie de l'hydrogène.

L'analyse de la filière est un exercice complexe. L'hydrogène peut être produit en site ou ailleurs à partir de plusieurs matières premières, en employant différentes méthodes de production, et stocké et expédié de différentes façons. Il existe alors un grand nombre de combinaisons possibles de

techniques de production et de transport pour délivrer l'hydrogène au consommateur. Cela oblige à établir des critères transparents et à faire le choix des combinaisons les plus pertinentes à étudier.⁹⁹

La section commence par présenter le coût de l'hydrogène à la pompe selon les différents sentiers technologiques (3.1.). Ensuite, nous traitons les défis du développement de la demande et des infrastructures pendant la période de transition (3.2.). La section conclut avec la présentation des principaux programmes d'hydrogène actuellement mis en œuvre dans le monde (3.3.).

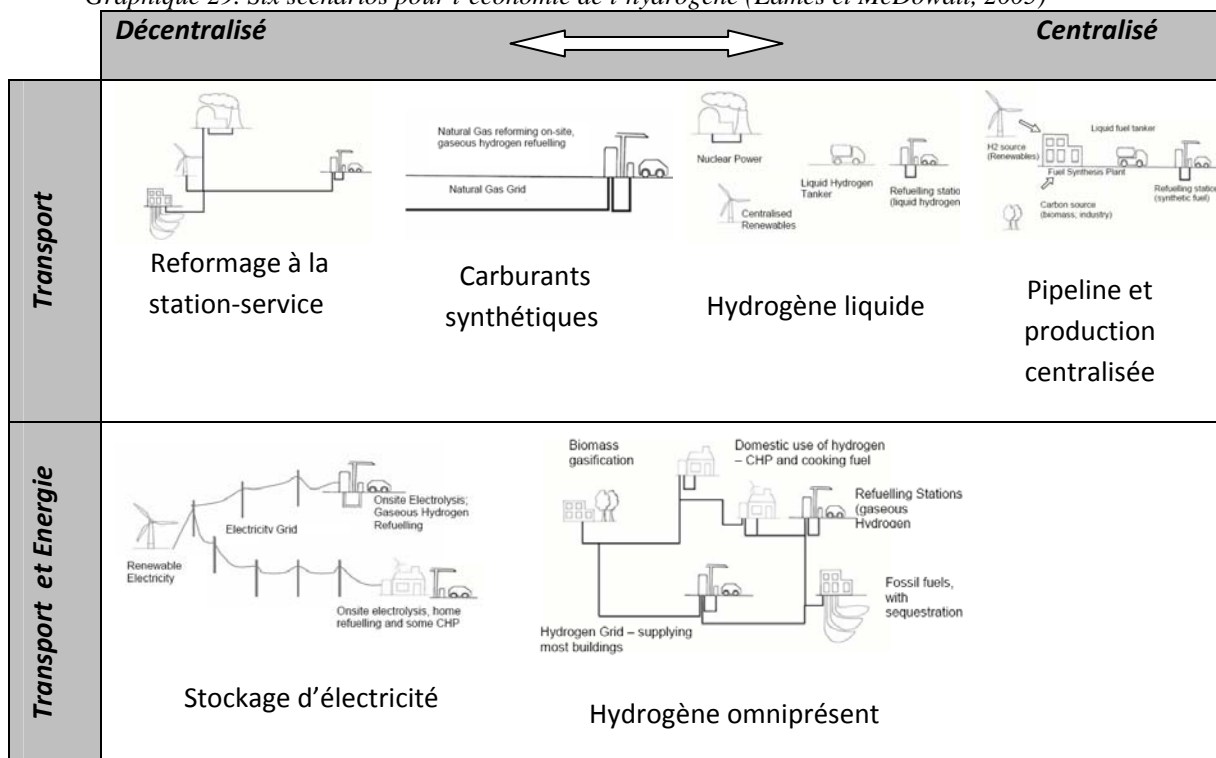
3.1. Coût de l'hydrogène à la pompe selon les différents sentiers technologiques

L'analyse commence par présenter les scénarios envisagés dans la littérature pour l'économie de l'hydrogène (3.1.1), pour ensuite estimer le coût de l'hydrogène à la pompe et évaluer l'impact sur les coûts des différentes configurations de technologies (3.1.2.).

3.1.1. Scénarios envisageables pour l'infrastructure

Le graphique suivant présente quelques visions considérées dans la littérature de l'économie de l'hydrogène.

Graphique 29. Six scénarios pour l'économie de l'hydrogène (Eames et McDowall, 2005)



Ensuite, nous passons par une brève description de chacun des scénarios pour l'hydrogène :¹⁰⁰

⁹⁹ Souvent, le choix de la combinaison des technologies au long de la filière est basé sur les résultats des études préliminaires réalisés à ce propos ou des réunions avec les acteurs (industriels, gouvernement, experts, etc.). Par exemple, Wietschel et al. (2006) analyse les sentiers et définit des scénarios pour la demande et l'infrastructure à partir des résultats d'une réunion d'experts réalisée au préalable.

- *Reformage à la station-service* : l'hydrogène produit localement à partir du gaz naturel est le principal carburant pour les transports. Le réseau de gaz naturel actuel fournit les entrants, et l'hydrogène est généré par le vaporeformage du méthane à la station de ravitaillement (Rifkin, 2002) ;
- *Carburants synthétiques* : L'hydrogène produit à partir des ressources renouvelables comme la biomasse fournit le principal carburant pour les transports. Dans ce cas, il est approvisionné sous forme de synthèse d'hydrocarbures liquides, tels que le méthanol, afin de surmonter les difficultés de stockage d'hydrogène et l'absence de l'infrastructure de distribution (Beuzit, 2007 ; Bossel et al., 2003 ; Arnasson et Sigfusson, 2000) ;
- *Hydrogène liquide* : l'hydrogène liquide produit par les installations nucléaires et renouvelables à grande échelle est devenu le principal carburant. Il s'agit d'un scénario de substitution, les paradigmes énergétique et de transport actuels restant inchangés (Ogden, 1999a) ;
- *Pipeline et production centrale* : l'hydrogène est le carburant dominant dans les transports. Il est produit centralement à grande échelle à partir du charbon et autres combustibles fossiles (avec séquestration du carbone), électricité nucléaire, et énergies renouvelables. L'hydrogène est distribué sous forme gazeuse par un système de pipelines dédiés (Tzimas et al., 2006 ; E4Tech, 2005 ; Ogden, 1999a,b) ;
- *Stockage d'électricité* : l'hydrogène, produit sur place par le biais de l'électrolyse, est le principal carburant pour les transports. Il joue également un rôle important d'aide aux énergies renouvelables pour surmonter les problèmes d'intermittence dans le système électrique. La production d'hydrogène est flexible et peut répondre aux conditions variables de production électrique, ce qui facilite l'équilibrage du réseau. Étant donné que l'hydrogène est produit sur place, il ne requiert aucune infrastructure de distribution. Il est stocké localement et sert d'alimentation de secours pour les unités de cogénération, lesquelles peuvent aussi vendre l'électricité en période de pointe lorsque la demande est élevée et l'offre limitée (Sørensen, 2005 ; Clark et al., 2005 ; Lipman et al., 2002) ;
- *Hydrogène omniprésent* : l'hydrogène produit à partir des énergies renouvelables est un vecteur d'énergie pour la génération de chaleur et d'électricité, ainsi que le carburant dominant dans les transports. Un réseau de canalisations dessert la plupart des bâtiments en hydrogène. Les secteurs résidentiel et commercial utilisent les systèmes de cogénération piles à combustible à hydrogène, et il est commun de réapprovisionner le véhicule en carburant à la maison. L'infrastructure de production est composée d'un mix de grandes unités centralisées et de plus petites unités utilisant les énergies renouvelables et la biomasse (Rifkin, 2002, 2007 ; Lovins et Williams, 1999).

Les visions différentes de la transition s'accordent toutefois quant à l'évolution de l'économie de l'hydrogène (McDowall et Eames, 2006). D'une part, l'infrastructure doit commencer avec une

¹⁰⁰ Il s'agit des scénarios qui ont été construits à partir des visions et des travaux prospectifs existant dans la littérature avec le propos de définir des sentiers pour l'économie de l'hydrogène au Royaume-Uni (UK Sustainable Hydrogen Energy Consortium (UKSHEC)). Voir : McDowall et Eames, 2006 ; Eames et McDowall, 2005, 2006.

configuration décentralisée et passer à une production centralisée – moindres coûts unitaires et possibilité de séquestration du carbone – avec l'augmentation de la demande (Ogden, 1999a, Plotkin, 2007). D'autre part, les principales sources de production doivent être les énergies fossiles, dans un premier temps, et évoluer vers les énergies renouvelables avec la diminution des coûts de ces dernières à long terme. Dans certaines études, les énergies fossiles et nucléaires ont un rôle de transition avant l'arrivée massive des énergies vertes (Clark et Rifkin, 2006 ; Sørensen, 2005).

3.1.2. Le coût de l'hydrogène livré

Les méthodes de production sélectionnées pour cette étude technico-économique présentent une probabilité élevée d'être mises en place entre 2010 et 2020. Les coûts de production sont présentés dans le paragraphe relatif à la production d'hydrogène (1.1.). Le choix technologique doit être adapté à la spécificité régionale. Cependant, le reformage du gaz naturel (SMR) devrait être la première technologie employée pour la production d'hydrogène. Elle est aussi la plus utilisée par l'industrie chimique actuellement. Cependant, le caractère économique de cette filière est confronté au défi de l'augmentation du prix du gaz naturel. La gazéification du charbon doit être une solution importante en présence de larges réserves de charbon et lorsque la capture et le stockage du charbon seront possibles. La transformation de la biomasse est une voie prometteuse pour la production d'hydrogène mais elle est actuellement soumise à beaucoup d'incertitudes, spécialement les nouvelles technologies telles que la pyrolyse. L'utilisation d'électricité peu chère (hydraulique, éolien ou nucléaire, en période creuse) peut rendre intéressante l'alternative de l'électrolyse. Sinon, les coûts de cette technologie restent très élevés.

L'hydrogène peut être produit en site en évitant ainsi les coûts de transport qui sont très élevés en raison de sa faible densité. A ce jour, la technologie disponible à des conditions économiques est le reformage du gaz naturel, toutefois à un coût plus élevé que pour une échelle de production plus grande. En effet, la production à petite échelle (entre 100 et 20 000 Nm³/h) est 2 à 3 fois plus chère que la production à grande échelle (entre 20.000 Nm³/h et 350.000 Nm³/h).¹⁰¹ En outre, le coût de l'électrolyse doit baisser et devenir compétitif à l'horizon 2020-2030.

Le stockage de l'hydrogène peut être fait de plusieurs manières : souterrain dans des cavernes ou autres formations géologiques ; comprimé ; liquide ; ou dans des hydrures métalliques. (Voir 1.2.1.) Actuellement, la manière la plus utilisée est la compression ou le stockage liquide, bien que ces deux options restent très chères. La compression est le meilleur compromis entre coût et densité énergétique. Dans l'avenir, de nouvelles technologies de stockage chimique et métallique doivent être mises au point.

Pour le transport, l'hydrogène est actuellement acheminé par pipeline et par route (sous forme liquide ou gazeuse). Le transport par pipeline est le moins dispendieux mais exige une demande suffisante capable d'amortir l'investissement initial très élevé. Le transport par camion est plus flexible pendant les premières années : il est particulièrement adéquat pour le transport de faibles quantités, sur courtes distances (voir 1.1.2.). Dans cette étude, nous considérons que l'hydrogène est transporté par camion et parcourt une distance de 50 km.

¹⁰¹ Cf. WETO-H2, 2007, p.72.

Finalement, la station de ravitaillement fournit hydrogène liquide ou comprimé (350 bars ou 700 bars) qui a été produit ailleurs et ramené à la station. Alternativement l'hydrogène peut être produit en site en utilisant l'infrastructure existante de gaz naturel ou d'électricité. (Voir 1.1.3.) Nous considérons ici une grande station (1000 kg hydrogène) qui distribue l'hydrogène amené par camion et comprimé à haute pression (600-700 bars) en site pour remplir le réservoir de la voiture en 3 minutes.¹⁰²

Le tableau suivant présente le coût de l'hydrogène selon les différents sentiers technologiques.

Tableau 13. Coût de l'hydrogène à la pompe en fonction de la technologie de production (€2007/GJ)

	Centralisé				Sur site	
	SMR Gaz naturel	Gazéification Charbon avec CCS	Gazéification Biomasse	Electrolyses (éolien)	SMR gaz naturel	Electrolyse
Production	6,00	11,00	10,50	40,00	22,00	60,00
Stockage	4,00	4,00	4,00	4,00		
Transmission^a	7,82	7,82	7,82	7,82		
Station	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
Coût total	31,82	36,82	36,32	65,82	36,00	74,00
Coût unitaire total (€/kg)	3,82	4,42	4,36	7,90	4,32	8,88

^a Transport par camion « tube trailer », 50 km.

Le coût de l'hydrogène à la pompe est situé entre 32 et 74 €₂₀₀₇/GJ. Cela est à comparer avec l'essence dont le coût à la sortie de la raffinerie est de \$18 €/GJ (AFH2, 2006b) et le prix de vente au public est de l'ordre de 38€/GJ.¹⁰³ Le coût de l'hydrogène HT est alors compris entre le prix de l'essence à la sortie de la raffinerie et le prix final de l'essence TTC. Néanmoins, ces valeurs ne sont pas ajustées à la plus grande efficacité des piles à combustible. Les PAC sont 2 à 3 fois plus efficaces que les voitures conventionnelles et 1,5 environ par rapport à une voiture hybride (point 2.1.1.). Les politiques d'incitation fiscale comme la détaxation de l'hydrogène peuvent contribuer à la diffusion rapide de l'hydrogène.

Le coût final de production sur site est identique au prix de l'essence au consommateur. Elle a l'avantage de rendre disponible les faibles quantités initiales d'hydrogène sans avoir besoin des investissements lourds dans l'infrastructure de transport. Le coût de l'hydrogène diminue lorsqu'il est produit dans de grandes unités. Pour cela, il faut une demande suffisante pour justifier les investissements dans l'usine et la mise en place des infrastructures.

L'augmentation du prix des énergies fossiles et la réduction des coûts de la gazéification et de la capture et stockage du carbone doivent rendre cette technologie plus économique d'ici 2030. Des investissements en R&D sont encore nécessaires de manière à diminuer le coût de l'électrolyse de l'électricité renouvelable et nucléaire.

Globalement, les coûts doivent baisser pour parvenir aux objectifs du DOE pour 2015 (2-3\$/kg) et de la plateforme européenne de l'hydrogène et piles à combustible (<2,5€/kg). En particulier, les coûts

¹⁰² Nous suivons ici les hypothèses d'AFH2 (2006b) et Bounoux et Douaud (2009).

¹⁰³ Cela correspond à la moyenne arithmétique des prix de l'essence sans plomb 95 en France depuis 2002 laquelle est de 1,20 € TTC par litre.

de la station représentent presque la moitié du coût de l'hydrogène. Une partie importante de ces coûts est liée à la compression de l'hydrogène pour le livrer à la voiture.

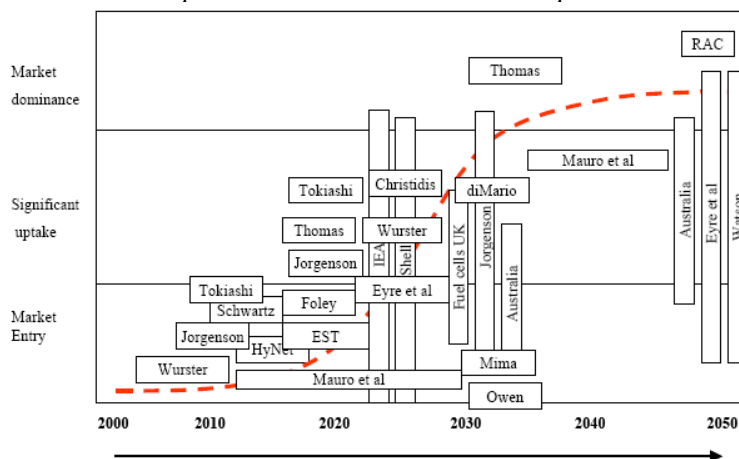
3.2. Le développement de la demande et de l'infrastructure

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique exige la mise en place d'infrastructures de production et de distribution. Celles-ci ne se construiront pas en absence de demande, d'une part ; et le marché pour l'hydrogène ne se développera pas sans l'infrastructure, d'autre part. Ainsi, l'offre et la demande doivent évoluer ensemble de manière à réduire les risques et rendre possible les investissements.

3.2.1. Horizons temporels

Le graphique 30 synthétise les estimations réalisées par quelques études sur l'hydrogène pour la transition vers les voitures PAC à hydrogène (McDowall et Eames, 2006).

Graphique 30. Dates estimées pour la transition vers les voitures piles à combustible dans les transports



Source : McDowall et Eames, 2006, p.1246.

Il convient de noter la diversité de visions dans la littérature concernant le développement de l'hydrogène sur le marché. Bien que le graphique ait un sens plutôt heuristique, on peut cependant conclure que la plupart des études passées en revue indiquent que l'économie de l'hydrogène doit prendre un poids important à partir de 2020, particulièrement entre 2020 et 2030.

Plus récemment, une série d'études prospectives anticipent l'entrée en masse de l'hydrogène sur le marché plus tardivement, à partir de 2050. L'étude World Energy Technology Outlook - WETO H2 (2007) prévoit, dans son scénario de référence, que l'hydrogène ne dépassera pas les 2 % de la consommation énergétique mondiale d'ici 2050 (3 % en Europe). Dans le scénario « hydrogène », caractérisé par une contrainte carbone et des hypothèses optimistes de réduction des coûts, la part de l'hydrogène atteint 13 % de la consommation énergétique mondiale (7 % en Europe). Les analyses du Project Mengtech (Criqui et Mima, 2008) indiquent une diffusion rapide des voitures à hydrogène à partir de 2050. Les voitures électriques doivent dominer le marché à ce moment. Cependant, le développement de l'hydrogène est bloqué par le « lock in » à la voiture électrique dans un scénario marqué par les améliorations technologiques majeures dans les batteries.

3.2.2. Estimations du coût de l'infrastructure

Le choix de l'architecture de la filière dépend particulièrement des prix des entrants, du flux de production, de la densité de la demande, et du coût de production en site.¹⁰⁴ De cette manière, on comprend que le choix de la filière est fait en accord avec les spécificités locales, et la transition sera différente selon les régions.

Dans sa vision pour l'hydrogène en Europe, le Groupe de haut niveau chargé de l'analyse de l'hydrogène et des piles à combustible¹⁰⁵ considère la pénétration suivante de l'hydrogène dans les transports: 5 % des nouvelles voitures à l'horizon 2020 (soit 2 % du parc automobile) ; 25 % d'ici 2030 (soit 15 % du parc automobile) ; et 35 % d'ici à 2040 (soit 32 % du parc automobile).

Le projet « HyWays » a élaboré une feuille de route pour l'introduction de l'hydrogène en Europe (HyWays, 2008). Plus précisément, ce travail a consisté à : identifier les premiers centres de consommation ; analyser la mise en place de l'infrastructure au niveau régional ; évaluer les investissements nécessaires dans le temps. Ces analyses ont pris en compte, d'une part, le profil des états-membres en termes d'infrastructures, ressources domestiques, données socio-économiques, acteurs, etc. ; et d'autre part, les objectifs de la politique européenne en matière de pénétration de l'hydrogène, de réduction des émissions, de diversification du bilan énergétique, et d'incorporation de ressources renouvelables. Les modèles « HyWays » assument que le déploiement de l'hydrogène suivra une succession de trois phases : phase I, pré-commerciale (jusqu'à 10.000 véhicules), marquée par quelques grands centres de démonstrations en Europe ; phase II, commercialisation initiale (10.000-500.000 véhicules), il existe 2 à 5 centres de consommation d'hydrogène par pays, et les stations d'hydrogène commencent à se construire dans les principaux axes routiers ; phase III, celle de la commercialisation à grande échelle (500.000-16.000.000 véhicules), la couverture de l'hydrogène s'élargit et entre dans de nouvelles régions.

Le coût d'investissement cumulé à la fin de la phase III (2027) a été estimé à 60.000 M€. ¹⁰⁶ L'hydrogène a le potentiel de réduire de moitié les émissions de CO₂, et de 40 % la consommation de pétrole dans les transports d'ici 2050.

D'autres études qui ont été réalisées pour l'Europe confirment les grands investissements dans l'infrastructure. Pour les mêmes taux de pénétration utilisés par « HyWays », Tzimas et al. (2006) estime un investissement cumulé entre 700.000 M€ et 2.200.000 M€ jusqu'à 2050, pour le scénario le plus optimiste de pénétration dans le marché. Une étude du cabinet de conseil E4Tech (2005) pour le gazier allemand Linde AG a analysé les besoins en infrastructure pour approvisionner 40 millions de véhicules à hydrogène en Europe avant 2030. Selon les différents choix portant sur les sentiers de production et distribution (centralisée ou décentralisée), et sur les premières régions à desservir, l'étude aboutit à un coût compris entre 6.000 et 24.000 M€. Par ailleurs, Wietschel et al. (2006) a estimé les coûts annuels de l'infrastructure de l'hydrogène à 0,3% du PIB des pays UE-25, dans le scénario de 20% de pénétration du marché en 2030 et de production centralisée à partir du gaz

¹⁰⁴ Voir point 1.1.

¹⁰⁵ High Level Group for Hydrogen and Fuel Cells (HLG, 2003).

¹⁰⁶ Pour 8 % de part de marché. Ce chiffre est à comparer avec les 4.300 M€ d'investissements globalement nécessaires dans l'industrie pétrolière jusqu'à 2030 de façon à maintenir les niveaux actuels de production (AIE, 2006b).

naturel. Enfin, le consortium HyNet (2004) avait estimé le coût des infrastructures entre 4 et 15 milliards d'euros (5.000-10.000 stations-service, soit 4-8% de toutes les 135.000 de stations service d'Europe) pour desservir 2 à 9 millions de voitures en 2020. Le tableau suivant présente les résultats de quelques études sur le coût de l'infrastructure pour l'hydrogène.

Tableau 14. Synthèse des estimations du coût de l'infrastructure pour l'hydrogène

	Pays concernés	Usages	Demande	Type de modélisation	Investissements cumulés
HyWays (2008)	10 pays (Finlande, France, Allemagne, Grèce, Italie, Hollande, Norvège, Pologne, Espagne, R-U.)	Transport	HLG (2003) 500.000 véhicules (2027)	Modélisation par scénarios : demande ; <i>policy support</i> , <i>technological learning</i> ; et par configuration (distribué et concentré)	60.000 M€ (2027)
Tzimas et al. (2006)	UE25	Transport, stationnaire	HLG (2003)	Modélisation par scenario (%pénétration de marché)	700.000 – 2.200.000 M€ (2050)
Wietschel et al. (2006)	UE25	Transport, stationnaire	Sc.A « high » 20% ; Sc.B « low » 5%	Modélisation par scenario (demande ; type de production)	60.000 M€ (2030, sc.A)
E4Tech (2005)	Autriche, Belgique, République Tchèque, Danemark, Finlande, France, Allemagne, Grèce, Hongrie, Irlande, Italie, Hollande, Portugal, Pologne, Suède, Espagne, Suisse, R-U.	Transport	« High » 40m H ² véhicules ; «low» 20m	Modélisation par scenario (demande ; type de production ; « population density » ; « automotive »)	(sc. «High» ; « automotive » ; prod.centralisée ; 2030) Stations H ² : 6.000 M€ Production et distribution : 11.000 M€
HyNet (2004)	UE25	Transport	“High”(HLG, 2003): 9 millions de voitures en 2020 “Low” : 2 million	Estimations des coûts de l'infrastructure pour desservir la demande estimée	Stations H ² : 4-15.000 M€ (4-8% des ~135.000 stations-service UE)
Mintz et al. (2002)	Etats-Unis	Transport	“High” 130m H ² vehicles ; “Low” 20m (2030)	Modélisation par scenario : demande ; efficacité PAC ; configuration (décentralisée ; centralisée à la proximité de la ville ; centralisée à la ressource)	(scenario « High ») 600-800.000 M€

Les différentes études insistent sur l'importance du soutien public aux projets de démonstration de voitures et d'infrastructures pour entamer la transition. Elles signalent également que la production d'hydrogène à des conditions économiquement et environnementalement satisfaisantes dépend des

avancées dans les énergies renouvelables et dans les technologies de capture et stockage de carbone.

3.2.3. Stratégies envisageables pour démarrer la transition

Le développement de l'hydrogène sur le marché est freiné par un attentisme simultané de la demande et de l'offre. Les investisseurs potentiels dans l'infrastructure ne sont pas incités à engager des sommes considérables en capital avant la formation de la demande pour l'hydrogène ; et les consommateurs n'adhèrent pas à la nouvelle technologie sans avoir la garantie d'un confort identique à celui de la technologie conventionnelle. Il s'agit du dilemme de « l'œuf et de la poule » (Sperling et Cannon, 2004 ; Sperling, 1990).

Ce dilemme est connu dans la littérature anglo-saxonne sous le terme « chicken-or-egg stasis » et se caractérise par (Sperling, 1990) : (i) l'incompatibilité entre la nouvelle technologie et l'infrastructure existante, ce qui empêche la formation du marché ; (ii) le prix du carburant alternatif est plus élevé que celui du carburant dominant ; (iii) une longue période sépare le moment de la prise de décision des investissements de la formation du marché ; (iv) les économies d'échelle au niveau de la production, de l'infrastructure ou des applications finales ; et (v) la rareté des marchés niches où l'innovation peut pénétrer le marché et bénéficier des avancées incrémentales.

Une action coordonnée est alors nécessaire entre les différents acteurs (stations, constructeurs, consommateurs, gouvernement) pour la mise en place des premiers projets, à l'instar des partenariats public-privés en Californie ou au Japon (Sperling et Ogden, 2006 ; Melaina, 2005).

La mise en place de l'infrastructure légèrement en avance par rapport à la demande peut être la clé du dilemme de « l'œuf et de la poule » (Sperling et Ogden, 2006 ; Farrell et al., 2003). L'expérience avec les carburants alternatifs dans le passé renforce cette hypothèse. Green et Hu (2009) ont analysé la diffusion de voitures à gaz de pétrole liquéfié (GPL) dans une série de pays. Les auteurs ont trouvé que le nombre de stations a un impact plus important pour la diffusion que le nombre de véhicules.¹⁰⁷ Une étude sur la diffusion des voitures à gaz naturel en Amérique du nord a conclu que la couverture insuffisante de stations-service a été le grand responsable de l'échec de cette technologie dans le marché (Flynn, 2002).

La stratégie adoptée pendant la phase de transition doit permettre la mise en place des infrastructures pour l'hydrogène, la création de la demande et d'un groupe d'intérêts capable de promouvoir sa diffusion sur le marché (Sperling, 1990). Ensuite, nous passons en revue les principales stratégies évoquées dans la littérature pour contrecarrer le problème de l' « œuf et de la poule ».

A. Les « ponts » technologiques

Les changements technologiques majeurs susceptibles de modifier le système technologique existant trouvent souvent des barrières à leur développement dans les intérêts divergents des acteurs liés à l'ancienne technologie. Une façon de réduire cette résistance est l'adoption d'une stratégie qui concilie la nouvelle technologie et l'ancienne technologie (Kemp, 1994). Il s'agit de la stratégie d'

¹⁰⁷ Néanmoins, les deux élasticités sont inférieures à l'unité, ce qui rappelle la nécessité d'une approche globale de soutien au développement de carburants alternatifs.

hybridation, c'est-à-dire un processus par lequel la nouvelle et l'ancienne technologie se mélangent pour former un design technique hybride (Raven, 2007). On utilise aussi le terme de pont technologique pour designer les modifications apportées aux innovations pour les adapter à l'ancienne technologie de manière à pouvoir pénétrer le marché. Plus tard, les innovations se détachent des technologies conventionnelles au fur et à mesure qu'elles ont plus de conditions (infrastructures, savoir-faire, etc.) pour le développement indépendant dans le marché. A ce moment, l'innovation majeure devient le design dominant et l'ancienne technologie est confinée à des niches de marché. L'exemple historique de cette stratégie est la diffusion de la turbine à gaz laquelle était initialement un auxiliaire de la machine à vapeur avant de s'imposer sur le marché de la génération d'électricité (Islas, 1997). Dans le cas de l'hydrogène, celui-ci peut être utilisé dans les moteurs à explosion ou emprunter l'infrastructure actuelle des hydrocarbures, avec quelques adaptations.

L'utilisation de l'hydrogène dans les moteurs à explosion (également appelé hydrogène thermique) a l'avantage de ne pas dépendre de la baisse du coût de la pile à combustible pour démarrer la transition. Cela se fait toutefois au prix de performances énergétiques moins bonnes, comparables même à celles des voitures actuelles.¹⁰⁸ La voiture 'dual-fuel' la plus fameuse est la BMW Série 7, laquelle brûle indifféremment l'essence ou l'hydrogène dans un moteur à explosion. Un autre exemple de ponts technologiques réside dans les voitures hybrides, telles que la Prius de Toyota et la Honda Civic, qui utilisent un moteur à combustion avec un moteur électrique. Ces plateformes hybrides permettent d'électrifier les transports et de progresser dans la production de composantes auxiliaires lesquelles sont aussi utilisées dans la voiture pile à combustible (Lovins, 2003).

La production d'hydrogène pour alimenter la pile à combustible par le biais d'un réformateur d'hydrocarbures installé à bord du véhicule a l'avantage d'utiliser l'infrastructure actuelle d'hydrocarbures (Beuzit, 2007). Toutefois, les performances énergétiques globales de la voiture PAC seraient affectées à la baisse par rapport à l'utilisation directe de l'hydrogène. De même, les avantages en termes environnementaux seraient moindres (EUCAR-JRC-CONCAWE, 2006 ; Thomas et al., 1998).¹⁰⁹

Les stratégies que l'on vient de présenter, loin d'être techniquement optimales, ne sont pas dénuées de sens dans un scénario où les moyens alloués au développement de l'hydrogène sont limités et où la transition se fait lentement et de façon décentralisée. L'intérêt de ces projets serait aussi à trouver dans les adaptations graduelles de l'infrastructure à la nouvelle énergie et dans l'acceptabilité sociale de l'hydrogène. Cependant, la focalisation dans les niches de marché peut bloquer le développement de l'innovation dans les marchés principaux. L'hybridation temporaire risque de devenir permanente ce qui empêcherait la technologie d'utiliser tout son potentiel technique.¹¹⁰

¹⁰⁸ Voir par exemple EUCAR-JRC-CONCAWE, 2006.

¹⁰⁹ Au-delà d'autres problèmes avec l'utilisation d'une substance très toxique comme le méthanol. A ce sujet, voir l'analyse comparative entre les carburants hydrogène et méthanol (point 1.1.3.).

¹¹⁰ « *The niche accumulation strategy offers a great potential for learning about new market/technology combinations, but has the pitfall of getting stuck in small niche markets. The hybridisation strategy offers the potential of an easier fit with existing regimes (in particular in cases of infrastructural regimes), but has the pitfall of getting stuck into the existing regime without a radical transformation of that regime towards sustainability.* » (Raven, 2007, p.2399)

B. Conversion de flottes de voitures publiques et privées

La part des flottes publiques et privées dans l'ensemble du parc automobile n'est pas négligeable. La conversion de flottes de voitures à hydrogène peut être une façon de démarrer la transition technologique dans les transports (HLG, 2003 ; Farrell et al., 2003 ; Sperling, 1990).¹¹¹

Les arguments généralement invoqués pour la conversion de flottes de voitures aux carburants alternatifs sont les suivants (Nesbitt et Sperling, 1998 ; Farrell et al., 2003 ; Sperling, 1990) : (i) la centralisation de la gestion du parc automobile (ravitaillement, parking, entretien) ; (ii) les flottes tendent à emprunter les mêmes itinéraires ce qui réduit les nécessités d'infrastructure ; (iii) l'utilisation intensive des voitures permet d'amortir les coûts initiaux plus rapidement, et rend plus importants les coûts opérationnels ; (iv) les gestionnaires des flottes accordent plus d'importance au coût complet de la voiture ('*lifecycle cost* ') et pas seulement au prix à l'achat ; (v) les répartitions publiques sont normalement moins concernées par la valeur résiduelle de la voiture à la fin de la période de vie ; (vi) les bénéfices en termes d'image de l'achat.

Cependant, toutes les raisons invoquées ne font pas l'objet d'un consensus. Une enquête parmi 2.700 gestionnaires de flottes en Californie a montré la portée limitée de certains des arguments (Nesbitt et Sperling, 1998). Peu de flottes utilisent exclusivement leur propre station, elles sont aussi ravitaillées ailleurs. Les gestionnaires des flottes, - en particulier des plus petites, - préfèrent attendre que les nouvelles technologies soient adoptées plutôt que de prendre le risque d'être le pionnier. Enfin, la valeur de revente de la voiture a été jugée importante dans le cas des flottes privées.

Le déploiement sur le marché permet les améliorations incrémentales nécessaires pour rendre la technologie compétitive, ainsi que pour assurer la mise en place graduelle de l'infrastructure. Le gouvernement peut alors obliger les services publics à acheter un pourcentage minimal de voitures zéro émission lors du renouvellement de la flotte, en mettant simultanément en place des incitations à la conversion des flottes privées (transporteurs, poste, électriciens, etc.).

C. Conversion des infrastructures de gaz naturel

L'utilisation des infrastructures comme celles du gaz naturel permet de réduire les coûts de la transition et d'éviter les coûts échoués avec les équipements existant. Le réseau de gaz naturel peut être à l'origine du réseau de gazoducs d'hydrogène naissant (McDowall et Eames, 2006).

L'hydrogène peut être mélangé avec le gaz naturel dans les gazoducs à l' hauteur de 20% environ.¹¹² Au-delà il existe le risque que les tuyaux, compresseurs et valves deviennent friables au contact de l'hydrogène. Ce mélange peut être utilisé soit directement dans les appareils de consommation finale comme la pile à combustible stationnaire ; soit l'hydrogène est séparé du gaz mélangé avant

¹¹¹ « *The introduction of hydrogen vehicles is expected to start with centrally operated fleets of buses and city goods delivery vehicles in densely settled mega-cities, followed by private cars. Urban buses are attractive due to the centralised re-fuelling facilities, the availability of skilled personnel, the engineering tradition of public transport companies, the intensive service schedule under arduous, congested conditions, and for promotion of public awareness. A trans-European Hydrogen energy network can then be progressively grown from these strategically sited nuclei.* » (HLG, 2003, p.11)

¹¹² Les travaux du projet européen NaturalHy, lesquels analysent la faisabilité technique de l'utilisation des infrastructures du gaz naturel pour le transport et distribution d'hydrogène, ont montré que l'hydrogène peut être mélangé en sécurité à l' hauteur de 25% du volume de gaz. Voir <http://www.naturalhy.net> .

d'alimenter un équipement exigeant un taux de pureté élevé tel que la pile du type PEM pour les utilisations mobiles.¹¹³

La conversion à grande échelle des réseaux de gaz naturel est un scénario possible dans le cas d'un changement majeur pour l'hydrogène. Tzimas et al. (2006) ont analysé les nécessités en termes d'infrastructure de transmission dans le cas d'une pénétration importante de l'hydrogène dans les transports, l'industrie et le marché domestique. L'étude considère que le réseau d'hydrogène commence au niveau local/régional à l'instar de la transition du gaz de ville pour le gaz naturel. Au début, les tuyaux d'hydrogène coexistent avec ceux du gaz naturel. Plus tard, les gazoducs sont graduellement convertis à l'hydrogène en commençant par les tuyaux de moyenne pression et finalement par la conversion des tuyaux de transport à haute pression. A terme, l'augmentation du prix du gaz naturel réduit sa consommation et augmente simultanément le flux d'hydrogène dans le réseau (lequel sera produit à partir d'énergies renouvelables). Les auteurs ont conclu que la mise en place d'une infrastructure d'hydrogène en Europe doit coûter entre 700 mille à 2,2 milliards d'euros.

La libéralisation des marchés du gaz naturel en Europe pose un défi supplémentaire à la commercialisation de l'hydrogène par l'injection dans les réseaux de gaz naturel. D'une part, l'hydrogène sera probablement plus cher à produire que le gaz naturel. D'autre part, à contenu énergétique constant, l'hydrogène est trois fois plus volumineux que le gaz naturel ; pour le même volume de gaz, l'hydrogène est quatre fois moins riche énergétiquement. Cela implique que le mélange reviendra plus cher que le gaz naturel. Sans la définition de politiques contraignantes, il est peu probable que les acteurs (entreprises et consommateurs) soient intéressés à développer cette voie pour l'hydrogène (Haeseldonckx et d'Haeseleer, 2006). Le gouvernement peut alors mettre en place des mesures comme les standards obligeant les entreprises à un pourcentage minimal d'hydrogène ; ou la compensation du surcoût avec le gaz mélangé par le biais de la fixation d'une taxe environnementale sur le gaz naturel ou d'une subvention à la consommation d'hydrogène.

D. La mise en place d'infrastructures essentielles

Certaines infrastructures possèdent des externalités importantes, ce qui peut justifier l'intervention du gouvernement afin d'accélérer la diffusion de l'hydrogène. Dans le passé, la mise en place des gazoducs de transport de gaz naturel (principaux éléments du réseau) a permis la connexion de réseaux de distribution régionaux et locaux. Ainsi, la construction de pipelines de transport d'hydrogène ou d'autres infrastructures de base peut servir de catalyseur pour le développement des projets privés autour de ces éléments essentiels de l'infrastructure.

Selon le projet HyWays (2008), le développement de l'hydrogène dans les transports peut être entamé par la construction graduelle d'un réseau de stations de ravitaillement dans les principales villes et autoroutes européennes. Une telle infrastructure ouvrirait la voie à l'arrivée de nouvelles stations privées, en dynamisant ainsi la pénétration de l'hydrogène dans le marché.

¹¹³ Par exemple, les mélanges de l'hydrogène et méthane (Hythane® : 80% de gaz naturel pour 20% d'hydrogène pur) sont utilisés en démonstrations dans les transports comme le projet « Alt-Hy-Tude » des bus à Hythane®, démarré en juin 2005 à Dunkerque et à Toulouse avec la coordination de GDF. Voir : <http://www.althytude.info>

3.3. La transition dans le monde

Dans les points précédents, nous avons montré que l'hydrogène devient rapidement compétitif avec l'essence, ainsi que les stratégies pour organiser la nouvelle filière énergétique. De nombreuses incitations sont déjà en place dans le monde pour préparer la transition vers ce nouveau combustible.

3.3.1. Les grands programmes d'hydrogène et piles à combustible dans le monde

Les zones du globe les plus actives dans le domaine de l'hydrogène et des piles à combustible ont mis en place des objectifs ambitieux de R&D et de déploiement de la technologie. Ensuite nous passons en revue les programmes américains, japonais et européens.¹¹⁴

Etats-Unis

Le Département de l'énergie DOE gère le programme américain d'hydrogène en coopération avec l'industrie, les laboratoires nationaux, les universités, et les organismes gouvernementaux. La décision de commercialisation doit être prise par l'industrie selon la compétitivité des PAC et de l'hydrogène. Cette décision est envisagée pour 2015 moyennant la réalisation d'objectifs technologiques. Pour les véhicules utilitaires légers, le programme vise à réduire le coût des piles à combustible à 30 \$/kW, développer une PAC avec 5.000 heures (200.000 km) d'autonomie, et élaborer des technologies de stockage d'hydrogène à bord permettant plus de 300 miles (480 km) d'autonomie d'ici 2015. Pour les PAC stationnaires, l'objectif est de réduire le coût des piles à 750\$/kW, et de développer une pile PEMFC de génération décentralisée avec une longévité de 40.000 heures et 40% de rendement électrique d'ici 2011.

Pour atteindre les objectifs, un plan de R&D et de démonstration a été mis en place en 2004. Un budget de 1,7 milliard de dollars a été investi pendant cinq ans, partagé entre l'initiative hydrogène, PAC et infrastructures (\$1,2 milliard) et le 'FreedomCar'¹¹⁵ (\$0,5 milliards).¹¹⁶ Actuellement, la démonstration aux Etats-Unis comprend 200 voitures PAC, 20 bus à hydrogène et 60 stations-service.¹¹⁷

Japon

Le Japon est un des leaders dans le domaine de l'hydrogène et piles à combustible. Son rôle actif s'explique par la dépendance énergétique du pays et les récents objectifs officiels (JHFC, 2008) : amélioration de l'efficacité énergétique de 30% entre 2003 et 2030 ; réduction des émissions de CO₂ de 50% en 2050 ; diminution de la dépendance vis-à-vis des importations de pétrole de 47% à 40% d'ici 2030 (de 97% à 80% dans les transports).

¹¹⁴ Cette révision est réalisée à partir de Salomon et Banerjee (2006), de l'AIE (2004), et complétée avec les dernières informations disponibles sur les sites des programmes nationaux d'hydrogène.

¹¹⁵ Une collaboration entre les constructeurs d'automobiles américains, le DOE et les compagnies pétrolières, pour la R&D dans les voitures à hydrogène et dans l'infrastructure pour l'hydrogène, http://www.uscar.org/guest/view_partnership.php?partnership_id=1

¹¹⁶ La poursuite de cet effort fait actuellement l'objet de discussions au gouvernement et au Sénat américain, le secrétaire à l'énergie, Steven Shu, disant vouloir mettre un terme au financement des programmes hydrogène et PAC pour les transports. Voir : Fuel Cell Today, « US Energy Secretary Announces \$41.9 Million for Fuel Cells », 19 avril 2009.

¹¹⁷ http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/doe_h2_program.pdf (Mars 2009).

En 1993 démarre le 'World Energy Network' (We-Net) lequel a été le premier grand programme national pour l'hydrogène et les piles à combustible. Ceci a été permis par une coopération entre le gouvernement, les instituts de recherche et l'industrie, gérée par la 'New Energy and Industrial Technology Development Organisation' (NEDO). Ce programme avait comme but la planification et la mise en place de la R&D pour les technologies de l'hydrogène. Dans la première phase (1993-1998), le programme a été orienté vers la recherche, et la construction d'une vision pour l'hydrogène au Japon. Dans la deuxième phase (1999-2002), le projet a aussi eu comme priorité la démonstration de la technologie et des infrastructures. Les dépenses en R&D pendant les deux phases ont été de l'ordre de 200 millions de dollars (Salomon et Banerjee, 2006).

Un partenariat public-privé ('Joint Fuel Cell Hydrogen' JHFC) a été lancé en 2002 pour l'expérimentation de l'hydrogène dans les transports.¹¹⁸ L'objectif initial était la commercialisation de 5 millions de voitures pile à combustible et 10 GW de PAC stationnaires en 2020 (AIE, 2004). Actuellement, le JHFC cible en priorité le début de la commercialisation des voitures à hydrogène en 2015 (JHFC, 2008). Le programme inclut aussi la mise en place de stations d'hydrogène ayant plusieurs configurations techniques. Une installation de production d'hydrogène liquide a également été construite. En 2007, la démonstration a inclu 60 voitures à hydrogène et 12 stations-service (JHFC, 2008).

En outre, le gouvernement japonais a mis en place des subventions pour le déploiement à large échelle de PAC stationnaires de petite taille (1kW) pour le secteur résidentiel. Ce programme a démarré en 2005 avec une durée prévisionnelle de 3 ans. Le NEDO finance le déploiement de 6.400 piles à combustible au total. Les compagnies d'énergie participantes sont appelées à payer la différence entre le prix des PAC et le coût de production (y compris la subvention).¹¹⁹

Europe

L'Union Européenne a envisagé une pénétration de 5% de l'hydrogène dans les transports en 2020 (HLG, 2003). Cet objectif a été plus récemment revu à la baisse par la Plateforme européenne pour l'hydrogène et les piles à combustible (HFP) dans son rapport 'Deployment Strategy' (HFP, 2005), et confirmé par les objectifs fixés pour 2020 dans le 'Snapshot 2020' (HFP, 2007). La diffusion ciblée est maintenant de 1 à 3% du marché européen des voitures particulières en 2020, ce qui correspond à 0,5-1,8 million d'unités vendues par an. Récemment, l'Union Européenne a démarré un partenariat public-privé ('Joint Technology Initiative' JTI) pour le déploiement de technologies PAC à hydrogène selon les objectifs de commercialisation définis dans le plan de mise en œuvre (HFP, 2007). La Commission met à disposition 470 millions d'euros pouvant être dépensés entre 2008-2012, à condition que les industriels contribuent à une hauteur similaire.¹²⁰ Ce projet prévoit l'expérimentation de 100 véhicules et 100 bus en 2010, puis de 500 véhicules et 500 bus en 2013.

¹¹⁸ Il s'agit d'un partenariat entre le gouvernement (Ministère de l'Economie du Commerce et de l'industrie "METI), les universités et les entreprises pour promouvoir l'hydrogène et les piles à combustibles au Japon. Les activités comprises dans le partenariat sont: les recherches techniques ; les séminaires de recherche et de planification ; les événements pour le grand public. En 2003, huit compagnies – formés de constructeurs automobiles et de piles à combustible - ont participé à une démonstration d'hydrogène sur les routes japonaises. Voir : <http://www.jhfc.jp/e/>

¹¹⁹ Voir par exemple le rapport « Small Stationary Survey 2009 » in <http://www.fuelcelltoday.com>

¹²⁰ Le JTI s'insère dans une nouvelle logique européenne destinée à soutenir l'innovation technologique et la compétitive industrielle, notamment en matière de technologies propres, en accord avec le Plan stratégique

En mai 2007, le Parlement européen a adopté une déclaration écrite ¹²¹inspirée des prescriptions de Rifkin (2007) sur la nécessité de lancer une troisième révolution industrielle et particulièrement une économie « verte » de l'hydrogène. Selon le Parlement, les Etats membres devraient prendre des mesures pour mettre en place une infrastructure décentralisée pour l'hydrogène à l'horizon 2025.

En outre, l'initiative européenne CUTE (*'Clean Urban Transportation for Europe'*) qui s'est étalée durant la période 2002-2006 a été une des plus grandes démonstrations d'hydrogène dans le monde (27 bus PAC dans 9 villes européennes). Un nouveau programme plus ambitieux nommé « Hydrogène pour les transports » a pris le relais. Dans ce cadre, 200 véhicules à hydrogène seront exploités, ainsi que leur infrastructure d'approvisionnement. Le programme est réparti entre plusieurs projets : HyFLEET:CUTE (poursuite de la démonstration de l'hydrogène dans les transports urbains) ; ZERO REGIO (flotte de voitures et infrastructure avec station-service dans les régions de la Lombardie et Rhin-Main) ; et HyCHAIN:MINITRANS (voitures spéciales utilisant PAC à hydrogène de faible puissance).

L'Allemagne a le principal programme d'hydrogène en Europe avec des projets de démonstration très importants comme le *'Clean Energy Partnership'* à Berlin. Le pays prévoit la construction à grande échelle de stations publiques avec l'objectif de 1000 stations d'ici 2020.¹²² Le gouvernement allemand prétend investir 1,5 à 2 milliards € jusqu'en 2017 et espère avoir suffisamment de stations-service d'ici 2013 pour rendre possible la liaison du nord au sud du pays en voiture, environ 870 km. En outre, la Commission Européenne et les Etats-membres sont très actifs dans les instances internationales de coopération dans le domaine de l'hydrogène et des PAC.

3.3.2. La coordination au niveau international

Les principales instances de coordination internationale dans le domaine de l'hydrogène et des piles à combustible sont les Accords technologiques de l'Agence Internationale de l'Energie et le partenariat international pour l'économie de l'hydrogène.

L'*Implementation Agreement* de l'AIE sur les technologies de l'hydrogène a été lancé en 1977.¹²³ Par ce projet, l'AIE reconnaît que la production et l'utilisation de l'hydrogène permet l'approvisionnement en énergie propre et durable, lequel peut jouer un rôle clé dans toute l'économie. L'Accord est actuellement orienté vers la recherche fondamentale et le développement de technologies avancées, de manière coopérative entre les Etats signataires, pour la production d'hydrogène, le transport, la distribution, l'application finale et le stockage d'énergies intermittentes d'origine renouvelable. Cela concerne en particulier les systèmes de production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire, le stockage dans des hydrures métalliques à basse température et dans des

européen pour les technologies énergétiques (*'European Strategic Energy Technology Plan'* ou SET-plan). D'autres initiatives similaires ont été établies dans le domaine de l'Aerospace, médecine innovante, réseaux et systèmes, et nanoélectronique.

¹²¹ European Parliament, « WRITTEN DECLARATION on establishing a green hydrogen economy and a third industrial revolution in Europe through a partnership with committed regions and cities, SMEs and civil society organisations », n°0016/2007.

¹²² Fuel Cell 2000 (2009), « Hydrogen Infrastructure Continuing to Grow », Quarterly 12 (2).

¹²³ <http://www.ieahia.org/>

Actuellement, les pays signataires sont : l'Australie, le Canada, le Danemark, la Finlande, la France, l'Allemagne, la Grèce, l'Islande, l'Italie, le Japon, la Corée du Sud, la Lituanie, les Pays-Bas, la Nouvelle-Zélande, la Norvège, l'Espagne, la Suède, la Suisse, la Turquie, le Royaume-Uni, et les Etats-Unis.

nanostructures de carbone. La commercialisation de ces technologies est attendue à moyen et long termes.

Les activités internationales pour la transition à plus brève échéance sont coordonnées dans le cadre de l'*International Partnership for the Hydrogen Economy* (IPHE).¹²⁴ La formation de l'IPHE en 2003 est due à l'initiative du Département américain de l'Énergie et du ministère américain des transports pour favoriser la coopération internationale sur l'hydrogène et les piles à combustible dans la R&D, la mise en place de codes et standards communs, et le partage d'expérience sur le développement des infrastructures. Cela permet notamment à l'Union Européenne (ensemble avec les Etats membres) de coordonner ses efforts avec les principaux acteurs mondiaux dans le domaine (Etats-Unis et Japon).

3.3.3. Les partenariats publics-privés pour l'ouverture des stations de démonstration

L'existence de stations-service est fondamentale pour le développement de l'hydrogène dans les transports. Des travaux théoriques et empiriques ont montré que la conversion de 5 à 10% du réseau actuel de stations est suffisante pour assurer une utilisation confortable de la voiture à hydrogène pendant les premières années de la transition (Kurani et Sperling, 1988 ; Ogden, 2006). Ainsi, chaque nouvelle station est nécessaire pour rendre viable cette alternative au pétrole.

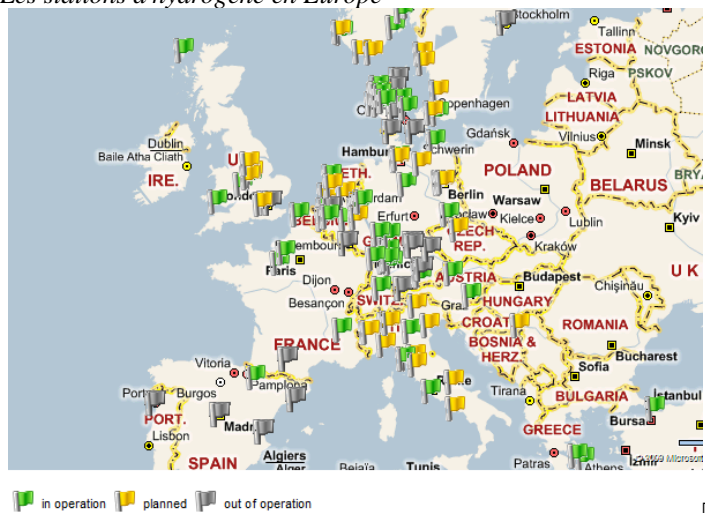
L'intérêt social des projets de démonstration de l'hydrogène peut justifier l'intervention du gouvernement (Agnolucci, 2007b ; Melaina, 2005). La mise en place de partenariats avec les entreprises pour la démonstration technologique permet un partage de risques entre les intervenants ce qui peut lever les barrières pour les investissements initiaux.

Des initiatives régionales ont vu le jour principalement en Europe, en Amérique du Nord et au Japon (graphique 31). Il s'agit des projets qui montrent à la fois l'ampleur des investissements nécessaires pour démarrer la transition, la volonté des industriels européens à dynamiser la filière, et l'implication des pouvoirs publics pour faire sortir ces technologies du laboratoire.

¹²⁴ <http://www.iphe.net/>

Les participants dans le partenariat sont : l'Australie ; le Brésil, le Canada, la Chine, la Commission Européenne, la France, l'Allemagne, l'Islande, l'Inde, l'Italie, le Japon, la Corée du Sud, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, la Russie, le Royaume-Uni et les États-Unis.

Graphique 31. Les stations d'hydrogène en Europe



Source : <http://www.netinform.net/H2/H2Stations/H2Stations.aspx?Continent=EU> , © LBST, 25/08/2009.

Des nombreux projets de démonstration des voitures à hydrogène et de l'infrastructure sont actuellement actifs dans le monde.¹²⁵ Ensuite, nous présentons brièvement six partenariats publics-privés, dont quatre sont situés en Europe.

La première économie de l'hydrogène au monde : The Icelandic New Energy (Islande)¹²⁶

En 1999, un partenariat a été établi entre le gouvernement islandais, Shell, Norsk Hydro, Ford et l'Université de Reykjavik. Il s'agit d'une initiative pionnière visant la création de la première économie de l'hydrogène au monde vers 2040 (Dunn, 2000). Le projet vise à promouvoir l'indépendance énergétique du pays par la valorisation des vastes ressources renouvelables de l'île comme la géothermie ou l'hydraulique. Ce faisant, il prétend réduire la dépendance au pétrole, en particulier dans les transports (y compris la flotte de pêche), à travers l'utilisation de carburants alternatifs comme l'hydrogène. Des stations et des voitures à hydrogène ont été expérimentées et une expansion du réseau de stations de service au-delà de la capitale est actuellement à l'étude. L'Islande a aussi participé au projet européen ECTOS de démonstration de bus à hydrogène. En 2003, le pays inaugure la première station à hydrogène au monde pour ravitailler les 3 bus à hydrogène qui ont fonctionné dans le cadre du programme ECTOS jusqu'à la fin 2006. En 2007, une nouvelle phase de démonstration a démarré avec 13 voitures modèles SMART-H2 et des bateaux à hydrogène.

Les projets Californiens pour l'hydrogène et les piles à combustible dans les transports

La Californie est probablement la région qui a le plus investi au monde dans les technologies de l'hydrogène et les piles à combustible. Actuellement, cet état américain compte 26 stations

¹²⁵ La première station d'hydrogène en France a été inaugurée en septembre 2002 par la société Air Liquide sur son site à Sassenage. Il s'agit d'une station de démonstration et de tests. Depuis 2006 elle fournit de l'hydrogène comprimé jusqu'à 70 MPa. Air Liquide a déjà conçu, construit et mis en service d'autres stations à : Madrid, Kawasaki, Luxembourg, Shanghai, Singapour (avec BP). Voir : <http://www.airliquide.com>

Encore en France, une autre station est en opération depuis 2006 à La Ferté Vidame. Celle-ci fournit de l'hydrogène comprimé à 35 et 70 MPa aux véhicules test du groupe Peugeot Citroën PSA. En 2007, une nouvelle station a ouvert les portes au dépôt de bus Atlanta à Toulouse. Elle dessert les bus en Hythane® (20% de CH₂ et 80% de CH₄) à 20 MPa. L'hydrogène est produit en site par reformage de gaz naturel. Voir : <http://www.h2stations.org> .

¹²⁶ <http://www.newenergy.is/newenergy/en/>

d'hydrogène qui ont été construites dans le cadre du projet « California Hydrogen Highway » promu par le gouverneur Arnold Schwarzenegger. Les projets de démonstration sont gérés par le partenariat pour la promotion de l'hydrogène en Californie ('California Fuel Cell Partnership' ou CaFCP).¹²⁷ Ce partenariat a été établi en avril 1999 entre les compagnies Ballard Power Systems, DaimlerChrysler et Ford Motor Company, BP, Shell Hydrogen, et Chevron (anciennement ARCO), et les agences californiennes (California Air Resources Board et California Energy Commission). Sa mission est de faciliter la commercialisation des piles à combustible pour les transports. Depuis lors, le CaFCP a soutenu la mise en place des stations et expérimenté plus de 170 véhicules à hydrogène. Les stations sont normalement cofinancées par le gouvernement de l'Etat.

Le gouvernement californien s'est donné comme objectif de construire 100 stations d'hydrogène, dont 61 nouvelles stations, dans les principales villes, ainsi que 1.200 voitures PAC à hydrogène en 2010 et 50.000 à la fin 2017.¹²⁸ Cela fait partie de l'obligation des constructeurs d'automobiles de présenter un pourcentage minimal de voitures zéro-émission ('Zero Emission Vehicle Program' ZEV) dans leurs ventes annuelles dans l'état de Californie. Cette réglementation unique au monde s'est avérée efficace pour augmenter à 193 voitures le nombre de voitures PAC en démonstration actuellement (CaFCP, 2009). Cependant, le nombre de voitures PAC requises pour la période 2012-2014 par le programme a été récemment revu à la baisse.¹²⁹

Le projet européen de démonstration de l'hydrogène dans les bus :HyFLEET CUTE

Ce programme a été créé avec le soutien financier de la Commission Européenne à travers le 6ème Programme cadre pour la recherche. Le projet rassemble 31 partenaires entre l'industrie, les universités et le gouvernement.

La plupart des stations en Europe ont été construites dans le cadre du projet européen CUTE ('Clean Urban Transportation for Europe') de démonstration de 27 bus PAC à hydrogène dans 9 villes européennes (Amsterdam, Barcelone, Hambourg, Londres, Luxembourg, Madrid, Porto, Stockholm et Stuttgart). A cela s'ajoute 6 bus qui ont été mis en circulation dans le cadre des projets associés tels que le projet ECTOS (« Ecological City Transport System ») à Reykjavik (Islande) et le projet STEP ('Sustainable Transport Energy for Perth') à Perth (Australie). En 2005, la ville de Péquin (Chine) s'est associée à l'initiative. Au-delà de la démonstration de la technologie PAC dans les 33 bus et 11 villes initiales (plus Péquin), le projet a également permis la mise en place de l'infrastructure de support, notamment une station d'hydrogène dans chaque ville participante. Le choix de l'infrastructure a été fait de façon à tester - en conditions réelles d'opération - différents types d'infrastructures telles que la production in situ d'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau et du reformage de gaz naturel, ou la production externe. Les objectifs principaux du projet étaient de : démontrer la faisabilité d'opérer une flotte de bus à hydrogène sous différentes conditions ; augmenter la visibilité et l'acceptation des technologies PAC à hydrogène ; mettre en place l'infrastructure ; et créer des codes et standards pour les stations d'hydrogène.

¹²⁷ <http://www.cafcp.org>

¹²⁸ Fuel Cell Today, 2006, p.5; p.16.

¹²⁹ Le programme ZEV exige que tous les constructeurs automobiles produisent 25.000 voitures zéro-émission (voitures électriques ou à hydrogène) entre 2012-2014, et 50.000 entre 2015-2017. La dernière mise à jour du mandat ZEV date de février 2009. Le nombre de véhicules FCV demandé a été abaissé à 4.307 (auparavant 25.000, il était déjà descendu à 7.500 en 2008). La majorité des véhicules devraient être des voitures hybrides rechargeables. Pour plus d'information, voir : CaFCP, 2009.

Le projet CUTE a démarré en 2001 (si bien que les bus ont seulement circulé à partir de 2003) est arrivé à échéance en mai 2006. Depuis, il a donné lieu au « HyFLEET CUTE » qui est venu réorganiser les projets précédents. Ce projet englobe 9 villes : Amsterdam, Barcelone, Pékin, Hambourg, Londres, Luxembourg, Madrid, Perth, et Reykjavik. Ce projet a permis d'ajouter 14 nouveaux bus à hydrogène équipés d'un moteur à explosion aux 33 bus PAC déjà en opération.¹³⁰

Le partenariat berlinois pour la promotion des énergies propres dans les transports : CEP

Le partenariat berlinois pour le développement des énergies propres (« Clean Energy Partnership », CEP) a été lancé en 2002. Il s'agit d'une coopération internationale entre BMW Group, Berliner Verkehrsbetriebe BVG, Daimler, Ford, GM, Hamburger Hochbahn, Linde, Shell, StatoilHydro, Total, Vattenfall Europe et Volkswagen. L'objectif du projet est de montrer la sécurité d'utilisation de l'hydrogène, ainsi que l'utilisation d'énergies renouvelables dans les transports. De nombreuses stations ont été ouvertes depuis pour approvisionner quelques flottes de voitures à hydrogène.

En novembre 2004, le CEP a ouvert la première station d'hydrogène à Berlin.¹³¹ Cette station fournit à la fois l'hydrogène liquide (LH2) et comprimé (CH2, de 35 à 75 MPa) à 350 véhicules par jour environ. L'hydrogène est en partie produit in situ par l'électrolyse de l'eau, et l'autre partie est livrée sous forme liquide. A son tour, Total a ouvert une station à Berlin-Spandau en 2006. La station fournit du CH2 et du LH2. Le CH2 est produit in situ à partir du reformage du gaz de pétrole liquéfié (GPL). Plus tard, il sera aussi produit à partir du Bio-Di Methyl ether (DME) avec capture et séquestration du CO₂. Le LH2 est délivré par Linde. Un électrolyseur produit de l'électricité pour la station, en particulier pour le magasin, à partir de l'hydrogène liquide échoué (le « boil-off »). En outre, la compagnie pétrolière française a converti une station à Munich pour la fourniture du LH2 (et LH2 gazéifié) à côté des combustibles traditionnels.¹³²

Scandinavian Hydrogen Highway Partnership

Le projet Scandinave de démonstration d'hydrogène ('Scandinavian Hydrogen Highway Partnership')¹³³ a été fondé par les entreprises, associations et programmes nationaux d'hydrogène en Norvège (HyNor), Suède (Hydrogen Sweden) et Danemark (HydroLink). Le but est d'impulser la transition dans cette région par la validation de la viabilité de l'utilisation de l'hydrogène dans le quotidien. La démonstration comprend 500 voitures à hydrogène, 100 bus et 500 voitures spéciales pendant la période 2012 à 2015. Le projet phare est la mise en place de stations d'hydrogène au long de l'autoroute entre les villes d'Oslo et Stavanger, en Norvège, et l'élargissement de cette route à la Suède et au Danemark. Le partenariat prévoit la construction de 15 stations capables de produire l'hydrogène sur place, ainsi que 15 autres satellites situés dans les zones rurales.

Le projet HyChain

Le projet européen HyChain constitue le projet pionnier dans le monde pour la démonstration de piles à combustible de faible puissance (jusqu'à 10 KW) dans les flottes captives de mini-voitures et véhicules spéciaux (scooters, chaises roulantes, véhicules de propreté, minibus). Une infrastructure novatrice d'utilisation facile sera mise à disposition des usagers dans les régions adhérentes : Rhône-Alpes (France) ; Emilia Romagna (Italie) ; Modena (Italie) ; Castilla y Leon (Espagne) ; et Nordrhein

¹³⁰ <http://www.global-hydrogen-bus-platform.com>

¹³¹ <http://www.cep-berlin.de/>

¹³² Fuel Cell Today, 2006; <http://www.global-hydrogen-bus-platform.com> ; www.h2stations.org.

¹³³ <http://www.scandinavianhydrogen.org/>

Westfalen (Allemagne). Ce projet a une durée estimée de 5 ans (2006-2010) et la phase de démonstration durera jusqu'en Janvier 2011.

Le tableau 15 résume le nombre de voitures prévues par les différents projets de démonstration.

Tableau 15. Le nombre de voitures prévues dans les projets de démonstration

Projet	Région	Plan de déploiement	Nombre prévu de stations	Période
California Fuel Cell Partnership (CaFCP)	California (USA)	4,307 voitures PAC 50.000 voitures PAC	100 stations	2012-2014 2015-2017
Joint Technology Initiative	UE	100 véhicules, 100 bus 500 véhicules, 500 bus		2010 2013
Icelandic New Energy	Islande	3 bus (2003-2006) 13 Smart-H2 1 bateau	1 station	2007-2010
Clean Energy Partnership (CEP) Phase II Phase III	Berlin, Hambourg (Allemagne)	40 véhicules Non spécifié	5 stations	2008-2010 2011-2016
JHFC Phase II Phase III	Japon	60 véhicules En discussion	20 stations	2006-2010 En discussion
Scandinavian Hydrogen Highway	Norvège, Suède, Danemark	500 voitures, 500 voitures spéciales, 100 bus	15 stations 30 stations satellites	2015
HyChain	France, Italie, Espagne, Allemagne	150 voitures spéciales		2006-2010

Conclusion du chapitre 1

L'avenir de l'hydrogène comme vecteur énergétique dépend dans une large mesure de la performance des piles à combustible. Ces dernières sont des technologies modulaires (<1kW à 3MW), flexibles (tout type d'usages portables, stationnaires et mobiles), propres et très efficaces. Dans les applications mobiles, elles sont trois fois plus efficaces que les moteurs à explosion, et une fois et demie plus efficaces que les voitures à essence hybrides. Lorsque la pile est alimentée par de l'hydrogène, elle n'émet pas de gaz carbonique ou autres gaz polluants.

Nous avons montré que l'hydrogène peut être déjà fourni à des conditions compétitives avec les carburants actuels. Les méthodes de production les plus économiques sont actuellement le reformage du gaz naturel et la gazéification du charbon. Cependant, pour préserver les vertus environnementales, la production d'hydrogène à partir du charbon ne doit se faire que lorsque la capture et séquestration du carbone est possible. A long terme, l'hydrogène peut être produit par électrolyse d'énergies renouvelables ce qui réduira drastiquement les émissions de carbone dans les transports. Une autre alternative « zéro émission » est la voiture électrique. Celle-ci est plus efficace que la PAC et requiert une infrastructure moins coûteuse. Toutefois, la capacité de stockage des batteries réduit considérablement le rayon d'action de la voiture, ainsi que son confort et sa sécurité. A l'inverse, la voiture PAC à hydrogène permet une utilisation similaire à la voiture conventionnelle, mais l'infrastructure pour l'hydrogène (transport, stockage, distribution, stations-service) est très intensive en capital.

La demande reste la variable critique des investissements. L'infrastructure doit être déployée légèrement en avance de manière à ne pas freiner le développement de la demande. Les perspectives de marché sont essentielles pour entamer ce processus. Néanmoins, les montants en jeu et le risque associé découragent les sociétés privées à entreprendre les investissements.

Les deux prochains chapitres s'arrêtent sur ces deux aspects essentiels de l'économie de l'hydrogène. Ainsi, le chapitre 2 étudie le développement des infrastructures énergétiques comme les réseaux d'électricité et de gaz naturel dans le passé. Le chapitre 3 évalue l'impact du comportement incertain de la demande sur les investissements.

CHAPITRE 2

Analyse prospective de la mise en place des infrastructures pour l'hydrogène à partir des exemples historiques de l'électricité et du gaz naturel

L'hydrogène produit à partir de sources renouvelables et utilisé dans les piles à combustible a le potentiel pour révolutionner le secteur de l'énergie de manière durable, en particulier dans les transports. Même si la production d'hydrogène reste plus chère que l'essence, les derniers progrès technologiques et l'augmentation du prix du pétrole ont amélioré sa compétitivité (NRC, 2008a). De plus, les coûts et performances des piles à combustible s'approchent d'un niveau compétitif et plusieurs projets de démonstration ont vu le jour dans le monde. Néanmoins, sans infrastructures, il est peu probable que l'hydrogène puisse se diffuser sur le marché. D'une part, la demande ne peut pas se développer en l'absence d'un réseau de stations-service permettant une utilisation confortable. D'autre part, l'inexistence d'une demande empêche la construction d'infrastructures. De cette manière, les constructeurs automobiles ne seront pas disposés à investir dans le processus de production de la voiture pile à combustible si la vente n'est pas assurée. Cela renvoie au paradoxe de la « poule et de l'œuf » (Sperling et Cannon, 2004), i.e. de qui, de la demande ou de l'offre, vient en premier.

Le problème de l'infrastructure n'est pas nouveau dans l'histoire des industries de réseau. Plusieurs exemples montrent que les nouvelles infrastructures ont été construites lorsqu'il a fallu surmonter un besoin stratégique. Ce fut le cas des interconnexions pour les télécommunications, les chemins de fer et même le réseau d'électricité ou de gaz naturel dans le secteur de l'énergie. Ces infrastructures ont des coûts initiaux élevés, l'incertitude sur l'évolution de la demande et un délai très long de récupération des investissements. Cela n'incite pas les sociétés privées à prendre en charge les investissements. Ainsi, l'Etat a traditionnellement supporté la construction des réseaux en respect de l'argument de l'intérêt commun (Angelier, 2007; Bergougnoux, 2000).

Dans le nouveau cadre libéralisé européen, la contrainte financière des Etats, ainsi que les règles de la concurrence internationale, rendent peu probable la perspective de voir le gouvernement supporter la totalité des investissements dans la mise en place de la nouvelle infrastructure. En même temps, ce n'est pas encore clair comment le marché peut réaliser les investissements nécessaires et qui sera chargé d'orienter la transition. La pression concurrentielle affecte la façon dont les firmes préparent l'avenir et les oriente vers les projets d'investissement les plus profitables à court terme (*'cherry picking'*).

Ce chapitre discute de la mise en place des infrastructures d'hydrogène pendant les premières années de la transition dans un cadre concurrentiel. Plus particulièrement, l'analyse se focalise sur les deux questions suivantes: quelles sont les caractéristiques économiques des infrastructures et comment doivent-elles évoluer? et quel devra être le rôle des pouvoirs publics pendant la transition?

L'hydrogène est analysé comme une nouvelle industrie de réseau énergétique. Dans la première section, nous exposons le cadre théorique des industries de réseau. Dans la seconde, nous appliquons ce cadre à l'étude de l'évolution de l'industrie électrique et gazière en Europe. Nous terminons par une perspective du futur de l'hydrogène à partir des enseignements tirés des sections précédentes. L'argument principal est que l'intervention publique est nécessaire de manière à promouvoir le nouveau système énergétique.

Section 1. Les industries de réseau énergétique

Les industries de réseau apparaissent souvent dans la littérature économique comme un exemple typique de l'application des idées de l'école Walras-Pareto et de l'économie du bien-être à propos du rôle de l'Etat dans l'activité économique. Selon cette approche, le marché est la forme la plus efficiente d'allocation des ressources. Toutefois, en présence d'externalités, de biens publics, ou de monopoles naturels, le marché ne permet plus l'obtention d'un équilibre optimal au sens de Pareto (Musgrave et Musgrave, 1973). Ces situations sont appelées des « défaillances de marché » car ce dernier est incapable de donner un résultat situé sur la frontière des possibilités de production (où la position d'un agent ne peut pas être améliorée sans dégrader la position d'un autre agent). De cette façon, l'Etat doit intervenir en assumant la gestion des secteurs où le marché se montre « défaillant ».¹³⁴

Les industries de réseau sont particulièrement marquées par les externalités technologiques et de consommation lesquelles sont à la base d'un problème d'indivisibilité. Une fois le réseau en place, le coût marginal de production est très faible. La question posée est donc celle du financement des biens collectifs.¹³⁵

¹³⁴ Richard Musgrave, fondateur de l'économie publique, identifie trois fonctions économiques de l'Etat : la stabilisation de l'activité économique, particulièrement en évitant les déséquilibres de sous-emploi ; la cohésion sociale ; et l'allocation des ressources dans le cas de rendements croissants lorsque le marché est défaillant à affecter les ressources de manière efficace.

¹³⁵ La distinction entre bien privé et bien public pur a été premièrement établie par Samuelson (1954). Les « biens collectifs » ou « biens publics purs » se distinguent des « biens privés » (e.g. nourriture, habillement) par l'impossibilité d'*exclusion* des consommateurs et par l'*indivisibilité* du propre bien ou service. Il est impossible

En Europe, l'intervention publique a été fondamentale pour le développement de réseaux tels que les routes, la distribution d'eau, les services postaux, l'électricité et le gaz naturel. Des considérations stratégiques et politiques étaient à la base de cette décision comme le bien-être des citoyens, la cohésion sociale, la continuité et l'intégrité du territoire (Angelier, 2007).

Plus récemment, l'organisation traditionnelle verticalement intégrée a été contestée et un nouveau modèle s'est imposé un peu partout venant ouvrir les industries de réseau à la concurrence. Ce changement est le résultat de la conjugaison de deux effets. D'une part, les difficultés des économies occidentales à partir des années 1970 (l'inflation, le chômage, les difficultés budgétaires) ont remis en cause le bien fondé de l'intervention de l'Etat dans l'économie. D'autre part, l'arrivée à maturité des industries de réseau. La stabilisation des marchés intérieurs poussent les compagnies à l'expansion de l'activité à l'international, alors que le statut d'entreprise privée peut lever des obstacles à ce mouvement (Angelier, 2007). Le progrès technique a réduit l'importance de la production à grande échelle (e.g. centrales à cycle combiné de génération d'électricité) et permis l'interopérabilité entre services (p.ex. le câble électrique qui passe à la fois voix et données). Cela a favorisé la concurrence et l'entrée des nouveaux acteurs.

Bien que l'industrie de l'hydrogène puisse bénéficier des synergies avec les industries énergétiques actuelles (e.g. pétrole, gaz, électricité), il s'agit d'une nouvelle filière et des investissements spécifiques doivent être mis en place. La problématique est alors celle du démarrage d'une nouvelle industrie de réseau énergétique, comme dans le passé, avec des coûts initiaux très importants et une incertitude de marché.

Premièrement, nous allons présenter les caractéristiques économiques des industries de réseau. Deuxièmement, nous analysons la dynamique de croissance des réseaux comme clubs de consommation. Enfin, nous étudions le changement organisationnel récemment survenu dans les industries de réseau énergétique, et les nouveaux défis posés par l'investissement.

1.1. Caractérisation économique des industries de réseau

Un réseau est une interconnexion spatiale d'activités et d'équipements complémentaires techniquement compatibles (Economides, 1996). Il est traditionnellement composé d'une multitude de composantes complémentaires nécessaires pour la réalisation du service. Alors ces composantes doivent être facilement combinables pour produire le service final, c'est-à-dire, elles doivent être compatibles.

Curien (2005) considère que les réseaux sont génériquement constitués par trois couches superposées : l'*infrastructure* ; l'*infostructure* ; et les *services finals*. L'*infrastructure* peut être de nature matérielle (e.g. les pipelines, les gazoducs) ou immatérielle (e.g. un logiciel informatique). Elle est marquée par des coûts fixes élevés – surtout dans le cas des infrastructures matérielles – et donc

d'exclure les consommateurs additionnels d'un bien lorsque la nature du bien est telle que la simple production profite à tous les consommateurs indépendamment de leur volonté (e.g. l'armée). L'impossibilité d'exclusion peut aussi être motivée par des raisons de coût, lorsqu'il serait trop cher de mettre en place un système de paiement du bien ou service (e.g. l'accès aux pâturages communaux). Une autre caractéristique des biens collectifs est son indivisibilité ou la non rivalité : la consommation du bien par un consommateur n'empêche pas sa consommation par un autre (e.g. éclairage de la voie publique).

par des économies d'échelle potentiellement importantes. Ce poids des coûts fixes est favorable à une structure concentrée et stable de l'industrie.

La demande joue aussi un rôle très important pour l'accroissement de l'efficacité dans l'utilisation de l'infrastructure et du réseau. D'une part, un accroissement de la demande permet que la production bénéficie d'avantage des économies d'échelle (rétroactivité sur les coûts et les prix). D'autre part, la (grande) taille de la demande augmente les bénéfices pour les usagers du réseau. Il s'agit des externalités positives liées à la demande (effets de club et d'envergure).

L'*infostructure* correspond aux services intermédiaires de contrôle-commande du réseau. Sa fonction est d'optimiser l'utilisation de l'infrastructure (*e.g.* le gestionnaire du réseau de transport de l'électricité). Le *service final* est le but de tous les réseaux et se caractérise par la fourniture de certain(s) service(s) (*e.g.* de fourniture d'eau, de gaz naturel, d'électricité) aux clients finals. A ce stade, les économies d'échelle sont moins importantes par rapport aux deux autres strates précédentes. Cependant, les réseaux ont souvent été développés en Europe dans le cadre de monopoles publics intégrés verticalement tout au long de la chaîne de valeur, soit dans les activités en monopole naturel (infrastructure et infostructure), soit dans les autres (de service final). Curien (2005) donne l'exemple des réseaux de télécommunications, dont les interconnexions ont bénéficié d'une politique publique volontariste.

1.1.1. Externalités de réseau

Un réseau est une interconnexion spatiale d'activités et d'équipements complémentaires techniquement compatibles.¹³⁶ Les biens-réseau sont un type de biens dont la valeur est fonction des interactions créées entre les agents économiques. Cela nous ramène à la notion d'externalités ou d'effets externes non capturés par le mécanisme de marché. Un effet externe ou externalité est produit lorsque l'activité d'un agent économique bénéficie ou impose des coûts à un autre agent, sans pour autant que prenne place la rémunération du bénéfice ou la compensation des surcoûts occasionnés. La non prise en compte de tous les coûts et bénéfices fait que l'équilibre concurrentiel de marché - l'optimum privé - ne coïncide pas avec l'optimum social.

Les industries de bien-réseau (ou industries de réseau) sont caractérisées par l'existence d'externalités de réseau non prises en compte par le marché. Ces effets externes peuvent être *directement* dégagés par l'augmentation de la demande (les effets de club), mais aussi *indirectement* par la diminution des prix à travers la réalisation d'économies d'échelle, ou l'amélioration de la qualité par la diversification des services disponibles (Economides, 1996). Enfin, le développement des réseaux entraîne encore des effets dynamiques positifs sur l'ensemble de l'économie.¹³⁷

¹³⁶ cf. Angelier, 2005, p.16.

¹³⁷ Liebowitz S.J. et Margolis S.E. (1994) contestent l'argument que l'existence *per se* des réseaux est responsable d'externalités qui empêchent une allocation optimale par le marché (*market failure*), ce qui aura des répercussions particulièrement en termes de propriété du réseau, de l'organisation verticale et de l'intervention de l'Etat. Pour cela, les auteurs font la différence entre le concept « effets de réseau » (le nombre d'agents valorise le réseau) et « externalités de réseau » (une catégorie dans les « effets de réseau » dont l'équilibre de marché présente des gains inexploités concernant la participation dans le réseau). Les « externalités de réseau » seraient ainsi des effets directs de réseau. Quant aux effets indirects de réseau, les auteurs distinguent entre les « externalités technologiques » (lorsque les bénéfices ou coûts de production sont d'origine externe aux mécanismes de marché), et les « externalités pécuniaires » (lorsqu'une part du marché – par exemple celle des

A. Externalités de demande et effets de club

La définition des *effets de club* a été établie par Buchanan (1965) pour les biens et services dont l'utilité de consommation dépend du nombre d'utilisateurs. *"For any good or service, regardless of its ultimate place along the conceptual public-private spectrum, the utility that an individual receives from its consumption depends upon the number of other persons with whom he must share its benefits."* (Buchanan, 1965, p.3) Dans le cas des biens club, le niveau de satisfaction de l'individu augmente avec le nombre de consommateurs du bien (jusqu'à atteindre le seuil de saturation à partir duquel l'effet de club cesse de se faire sentir).

Les effets de club sont des externalités de la demande qui caractérisent les biens-réseau. Katz et Shapiro (1985) ont défini les *externalités de réseau* comme les biens pour lesquels le niveau de satisfaction des usagers augmente avec le nombre d'adhérents au réseau :

"The surplus that a consumer derives from buying a unit of the good depends on the number of other agents who join the network associated with that product. When the good is durable, an individual's consumption benefits will depend on the future size of the relevant network. Consumers will base their purchase decisions on expected network sizes." (Katz et Shapiro, 1985, p.426)

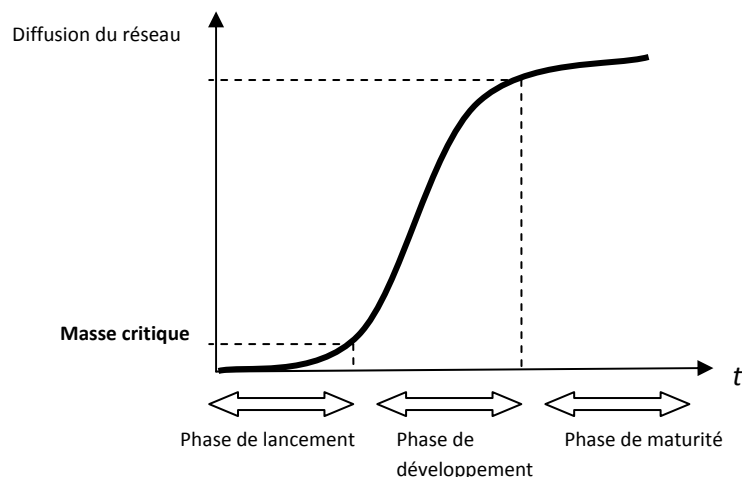
Les auteurs mettent l'accent sur les anticipations sur la taille future pour l'attractivité du réseau. Une base installée plus large procure une satisfaction plus élevée aux usagers. L'augmentation de la taille du réseau rend disponible plus de services aux adhérents (plus il y a d'abonnés internet, plus de personnes peuvent être contactées par email) ; ou l'amélioration de la qualité des infrastructures et des infostructures (plus de services sont proposés aux cybernautes).

En particulier, les effets de club conditionnent le développement du réseau. Les externalités de réseau sont à l'origine des rendements croissants dans l'adoption, ce qui fait que la diffusion du bien-réseau ne suit pas une trajectoire linéaire mais plutôt une courbe sinusoïdale (Shapiro et Varian, 1998 ; Arthur, 1989). (Voir graphique 32). Plusieurs équilibres stables sont alors possibles, selon que la masse critique est atteinte ou non. Ainsi, les effets de club expliquent aussi bien la diffusion rapide des réseaux que leur échec lorsqu'ils n'arrivent pas à dépasser le seuil critique et à se diffuser à partir de là (Curien, 2005).

acheteurs - bénéficie des pertes de l'autre part - par exemple celle du vendeur). Ces dernières externalités ne sont pas des vraies externalités. Donc, les auteurs restreignent l'application des solutions exposées ci-dessous en cas d'industries de réseau (l'intégration, l'intervention de l'Etat, etc.) aux situations de défaillance manifeste de marché en raison d'externalités de réseau et d'externalités technologiques.

Nous notons cette discussion et surtout la distinction entre les concepts. Mais, pour une question de simplification, nous considérons les effets de réseau directs comme des effets de club et des externalités de réseau ; et les effets de réseau indirects comme des externalités technologiques dérivées des économies d'échelle, d'envergure et de système. Dans les deux cas, on considère qu'il s'agit des externalités qui correspondent à des situations où le marché se montre défaillant. (Economides, 1996)

Graphique 32. La diffusion d'un bien-réseau en présence des effets de club



La diffusion d'un réseau est généralement marquée par la succession de trois périodes différentes (Shapiro et Varian, 1998) : (i) une période lente de démarrage jusqu'à atteindre un niveau minimum (masse critique) ; (ii) une fois la masse critique atteinte, la « base installée » d'adhérents augmente l'attractivité du réseau. L'arrivée de nouveaux usagers provoque un *effet de feed-back* ou de boule de neige permettant une diffusion plus rapide du réseau ; (iii) dans un troisième moment, le potentiel de croissance étant épuisé, le réseau arrive au point de saturation et la maturité de l'industrie est atteinte.

La diffusion et la survie du bien-réseau dépendent alors du dépassement de la masse critique. Donc, les promoteurs d'un nouveau réseau doivent viser comme objectif minimal ce niveau critique, celui-ci devant être atteint d'un seul coup (« *in one jump* »). Autrement, le seul équilibre stable sera l'absence du réseau (Curien 2005; Economides, 1996 ; Katz et Shapiro, 1985). De plus, l'augmentation du nombre d'utilisateurs permet un partage des coûts fixes entre un nombre plus grand d'utilisateurs.¹³⁸

B. Effets d'échelle et d'envergure

Le caractère hautement capitalistique des industries de réseau est source de nombre d'effets au niveau de la production, lesquels peuvent être pleinement exploités par l'intégration de la chaîne. Nous allons considérer particulièrement deux de ces effets : les économies d'échelle ; et les économies d'envergure. Les *économies d'échelle* existent lorsque les coûts moyens diminuent avec l'échelle ou le volume de production (Braeutigam, 1989). Cette caractéristique est présente dans les industries de réseau telles que les télécommunications, l'électricité et le gaz naturel.

En effet, le développement des réseaux nécessite normalement la mise en place d'une structure technique très capitalistique qui ne peut pas être redéployée dans une autre activité. Ces coûts échoués (*sunk cost*) ont un poids très important dans le prix final à l'utilisateur. Les coûts fixes de démarrage sont source de rendements croissants et d'augmentation de la taille efficiente de production. (Curien, 2005 ; Lévêque, 2004). Par ailleurs, le coût marginal de la fourniture des services

¹³⁸ Curien (2005) signale l'importance du prix initial. Il se peut que le réseau ne se développe pas en raison d'un prix trop élevé.

est souvent constant, voire décroissant, dans l'intervalle des quantités demandées par le marché. L'essentiel du réseau étant établi, l'arrivée d'un nouvel adhérent ne contribue pas à augmenter les coûts d'exploration mais plutôt à élargir les bénéfices en termes d'effets de club et de partage de coût.

Les *économies d'envergure* sont obtenues grâce à la production et à l'offre conjointe de biens ou services différents, au sein de la même firme, par des processus de production différents mais qui partagent un entrant commun. En présence d'économies d'envergure, la production isolée de n biens ou services différents est plus chère que leur production *commune* grâce à l'existence de synergies dans la production (Baumol et al., 1982).

Les industries de réseaux sont fortement marquées par les *économies d'envergure*. En effet, un grand réseau peut attirer la création d'activités et services connexes lesquelles valorisent le propre réseau. Un exemple récent d'économies d'envergure dans les industries de réseau est l'émergence des distributeurs multi-produits (les *multi-utilities*) (Angelier, 2007). Ainsi, les distributeurs de téléphone, gaz, électricité, etc., proposent la fourniture d'une multitude de produits au-delà de leur produit base. Cela permet au distributeur d'optimiser l'utilisation de son infrastructure, ainsi que d'élargir l'éventail de services proposés aux usagers.

C. Les effets dynamiques sur l'économie

Les théories de la croissance endogène défendent que l'investissement dans les infrastructures, telles que les routes ou les réseaux d'énergie, sont porteurs d'externalités positives pour l'économie (Barro, 1990). Etant donné le rôle traditionnel que les dépenses publiques ont eu dans le développement des structures physiques des industries de réseau, une large littérature a analysé les effets de l'investissement public sur l'emploi et la croissance économique.¹³⁹ Ainsi, l'investissement en infrastructures affecte le produit de façon directe par l'augmentation des investissements, et en particulier parce que l'investissement public peut être considéré comme un facteur de production additionnel de l'économie. D'autre part, les nouvelles infrastructures génèrent des externalités positives au niveau de la production agrégée de l'économie. En effet, les infrastructures permettent un fonctionnement plus efficace des marchés, ce qui bénéficie à toute activité économique et aux citoyens. Enfin, les investissements en nouvelles infrastructures entraînent des effets indirects sur l'économie par le biais des effets sur les facteurs de production privés (travail et capital). Bien que l'afflux de capitaux publics puisse provoquer une diminution de la demande des facteurs privés dans un premier temps, les premiers contribuent aussi à l'augmentation de la productivité des seconds. Cela se traduit par une diminution des coûts et ainsi une augmentation de la production globale.

1.1.2. Le monopole naturel

Une industrie fonctionne dans une situation de monopole naturel si la production est faite à moindre coût par une seule entreprise plutôt que par la combinaison d'entreprises plus petites.¹⁴⁰ Dans le cas de l'industrie électrique, la duplication des réseaux de transport pour contester le monopole du

¹³⁹ Pour une révision de la littérature et des résultats des études empiriques, voir: Hulten et Schwab, 1993. Pour la thèse des dépenses en infrastructures comme facteur de croissance endogène, voir : Barro, 1990.

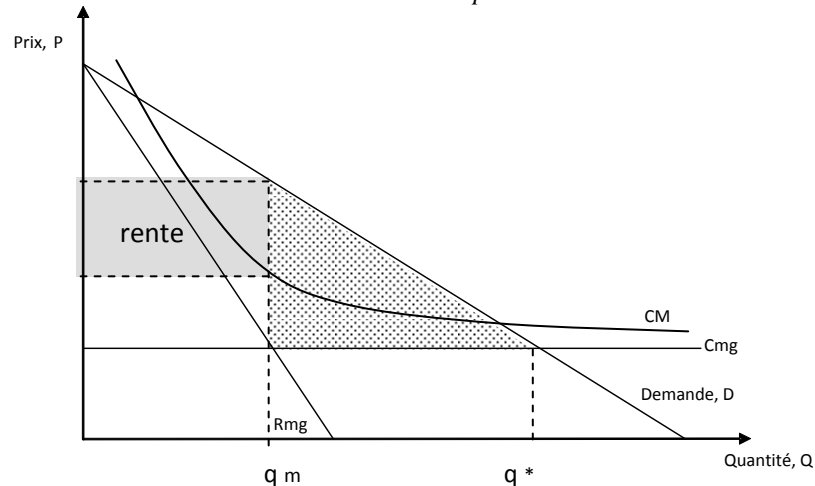
¹⁴⁰ Lévêque, 2004, p.51; Braeutigam, 1989, p.1294.

transport ne serait pas économique. Dans ce cas, la concurrence ne produit pas un équilibre efficient et entraîne plutôt des effets pervers au niveau de l'instabilité des prix. La « main invisible » du marché fait défaut (*market failure*) et l'intervention publique devient alors nécessaire.

Le monopole naturel peut avoir différentes sources, la plupart d'entre elles sont liées aux externalités technologiques dans la production. Ainsi, il peut être induit par l'existence de fortes *économies d'échelle* (dues au poids des coûts fixes et à la diminution des coûts moyens avec l'augmentation de la production) ; à des *économies d'envergure* (liées aux coûts variables et à la diminution des coûts moyens avec la diversification de la production finale) ; et à des *économies de réseau* (liées aux questions d'interconnexion et d'effet de taille) ; ou encore de la conjugaison de tous ces effets (Baumol *et al.*, 1982 ; Curien, 2005).

Dans une industrie fonctionnant en situation de monopole naturel stable (coûts décroissants pour les quantités de marché), l'efficacité peut se voir sévèrement affectée (graphique 33).

Graphique 33. La structure des coûts et la rente du monopole naturel avec rendements constants



Le monopole maximise son profit en égalisant la recette marginale au coût marginal. Ainsi, il restreint la quantité de marché à (q_m) pour un prix supérieur au prix concurrentiel, ce qui lui assure une rente. Toutefois, cette quantité offerte est inférieure au niveau qui optimise le surplus social (q^*). Alors, d'un point de vue social, il serait souhaitable d'augmenter la production jusqu'à ce que le coût de la dernière unité égale la disponibilité à payer de la société, en augmentant ainsi le surplus social par l'aire en gris. Dans ce cas, l'Etat doit intervenir de manière à augmenter le surplus social. Son intervention peut prendre une des deux voies suivantes : le monopole public ou la réglementation du monopole privé.

En somme, les arguments de l'économie d'échelle, de l'économie d'envergure et de système (coordination), peuvent expliquer la décision publique d'intégrer verticalement les industries de réseau (électricité, gaz, ferroviaire, télécommunications) au moment de l'expansion à l'échelle nationale, afin de faire jouer au plus vite les externalités de la demande et de l'offre de manière à dépasser la masse critique et consolider la diffusion du réseau.

1.2. La dynamique de croissance des réseaux

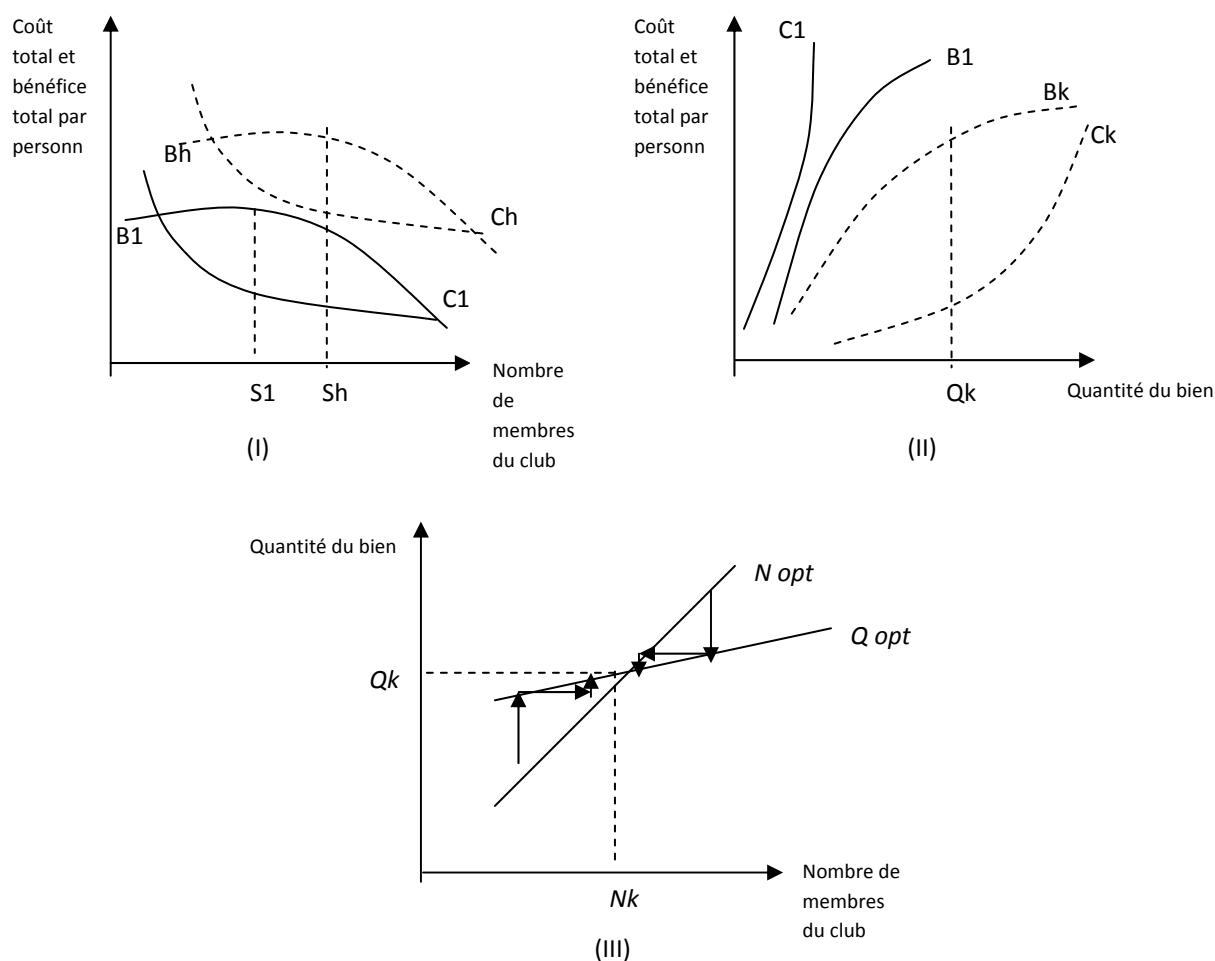
Les caractéristiques des biens-réseau affectent la façon comme ceux-ci se constituent et se développent. La période initiale est normalement le moment critique de la création des réseaux, lorsque les investissements nécessaires et les avantages de l'adhésion se réalisent principalement dans le futur. A la différence des biens privés, le démarrage d'un réseau nécessite une certaine taille critique ce qui pose des défis techniques, économiques et organisationnels importants. Cela exige une évaluation complexe des bénéfices privés et publics du réseau.

1.2.1. Interactions entre l'offre et la demande

Les industries de réseau partagent les caractéristiques conceptuelles des « biens clubs » (Angelier, 2007 ; Samuelson, 1954). D'une part, le bien est de nature indivisible ou non rival pour des raisons techniques. La structure des coûts est dominée par les coûts initiaux avec la mise en place du réseau (coûts échoués ou *sunk costs*) et le coût d'un consommateur additionnel est très faible ou presque nul. D'autre part, il est possible au producteur de faire payer à l'utilisateur un prix correspondant au bien ou service, c'est-à-dire que l'exclusion par le prix est possible. Les autoroutes à péage, les réseaux d'électricité, de gaz, d'eau, de téléphones, etc., sont des exemples d'industries de réseau.

L'analyse du développement des industries de réseau peut alors prendre le cadre théorique de la théorie des clubs, formalisée par Buchanan (1965) (graphique 34). L'objectif de cette théorie est la détermination de la quantité (ou taille) optimale du club, ainsi que du nombre optimum de membres avant que les effets de congestion ne se fassent sentir.

Graphique 34. La détermination de la taille optimale d'un club



Source : Buchanan, 1965.

Le graphique (I) montre que le coût moyen par personne $C1$ diminue avec l'accroissement du nombre d'adhérents au réseau. Pour un réseau électrique donné, il est plausible que le coût moyen supporté par chacun des adhérents diminue à mesure que le nombre d'adhérents augmente. Le bénéfice moyen par personne est représenté par la courbe $B1$. Le comportement de la courbe varie avec la taille du réseau. Ainsi, celle-ci peut augmenter initialement en raison d'une amélioration du service fourni par plus de membres dans le réseau (e.g. la disponibilité de services aux usagers du réseau électrique peut être plus large avec l'augmentation du nombre d'adhérents au réseau). Toutefois, à partir d'un moment donné, l'augmentation du nombre de membres du réseau peut entraîner une diminution de la satisfaction moyenne par personne en raison des effets de congestion (e.g. un nombre d'usagers du réseau électrique trop important par rapport à la taille du réseau peut provoquer des altérations importantes au niveau du courant électrique qui peuvent dégénérer en pannes électriques comme celle survenue en novembre 2006 en Europe). Lorsque la quantité du bien ou taille du réseau est égale à 1, le nombre optimal de membres du club (donné par la différence maximale entre les courbes de bénéfices et de coûts moyens) est $S1$. Si la quantité du bien s'élève à h , les coûts totaux par personne augmentent ainsi que les bénéfices retirés d'une plus grande quantité consommée. Alors, le nombre optimal de membres serait Sh (plus grand que $S1$). Pour chaque quantité différente du bien il y a un nombre optimal de membres du club. A partir des résultats différents du nombre optimal de membres à chaque niveau de quantités du bien, on peut construire la droite $N\ opt$ dans le graphique (III).

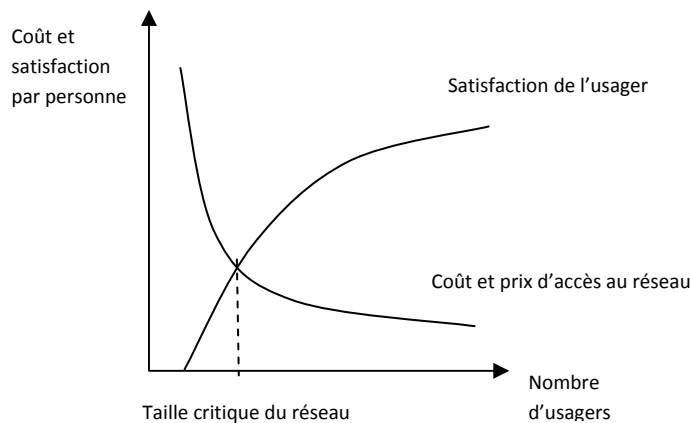
Dans le graphique (II) on prend un nombre donné de membres du réseau. On commence par considérer la situation où le réseau n'aurait qu'une seule personne. Dans une telle situation, les bénéfices (ou satisfaction) B_1 que l'individu retirerait de la consommation du bien ne seraient pas suffisants pour compenser les coûts C_1 et il serait donc probable que l'utilisateur ne consomme aucune unité du bien (e.g. il est probable qu'un seul consommateur, bien qu'il soit une industrie très importante, ne justifie pas isolément la mise en place d'un réseau électrique). Toutefois, si un groupe de personnes forme un club pour produire le bien, les coûts moyens C_k s'allégeraient par personne, alors que les bénéfices moyens B_k ne diminueraient pas autant par l'effet de la non rivalité dans la consommation. Ainsi la quantité optimale du bien qui maximise les bénéfices moyens nets serait Q_k . A chaque nombre de membres du réseau correspond une quantité optimale différente, ce qui permet de construire la droite Q_{opt} dans le graphique (III).

Le graphique (III) est construite à partir des deux graphiques précédents et il permet de comprendre comment le nombre optimum de membres et la taille optimale du club sont trouvés simultanément. En effet, dans cette formulation l'équilibre (N_k, Q_k) est stable et convergent : à une certaine quantité du bien correspond un nombre optimum de membres, ce qui à son tour va correspondre à une quantité optimale différente de la première, ainsi jusqu'à ce que la quantité optimale et le nombre optimal de membres s'égalise par un procès itératif. Ainsi, le développement des réseaux peut être vu comme un processus itératif marqué par des moments de recherche de membres pour l'optimisation de la taille du réseau, suite à des moments d'élargissement de la taille du réseau pour mieux desservir un certain nombre d'utilisateurs. En d'autres termes, *à un mouvement de l'offre pour attirer la demande fait suite un mouvement de la demande pour attirer l'offre, jusqu'à ce que le niveau optimal soit atteint.*

1.2.2. Le moment critique du démarrage du réseau

La création et le développement d'un réseau sont très dépendants du comportement pendant les phases initiales. En effet, la mise en place de l'infrastructure nécessaire au démarrage du réseau demande la mobilisation d'importantes ressources financières. Au début, les coûts d'investissement doivent être amortis par un petit nombre d'utilisateurs payant un droit d'accès élevé. En effet, la taille réduite du réseau conditionne la réalisation des effets externes positifs (ou externalités) de production et de consommation liés aux biens de réseau, ce qui limite la satisfaction des utilisateurs. Un réseau petit peut alors disparaître s'il n'atteint pas rapidement une taille supérieure à la masse critique (Curien, 2005 ; Katz et Shapiro, 1986). Une fois dépassée cette taille, le coût moyen et les prix d'accès au réseau baissent alors que les externalités de consommation font augmenter la satisfaction des consommateurs. Le réseau devient alors plus attractif et plus d'utilisateurs arrivent au réseau, ce qui rend le réseau davantage intéressant en créant ainsi un effet « boule de neige » (graphique 35).

Graphique 35. La taille critique du réseau



Adapté d'Angelier, 2007, p.14. ; Buchanan, 1965.

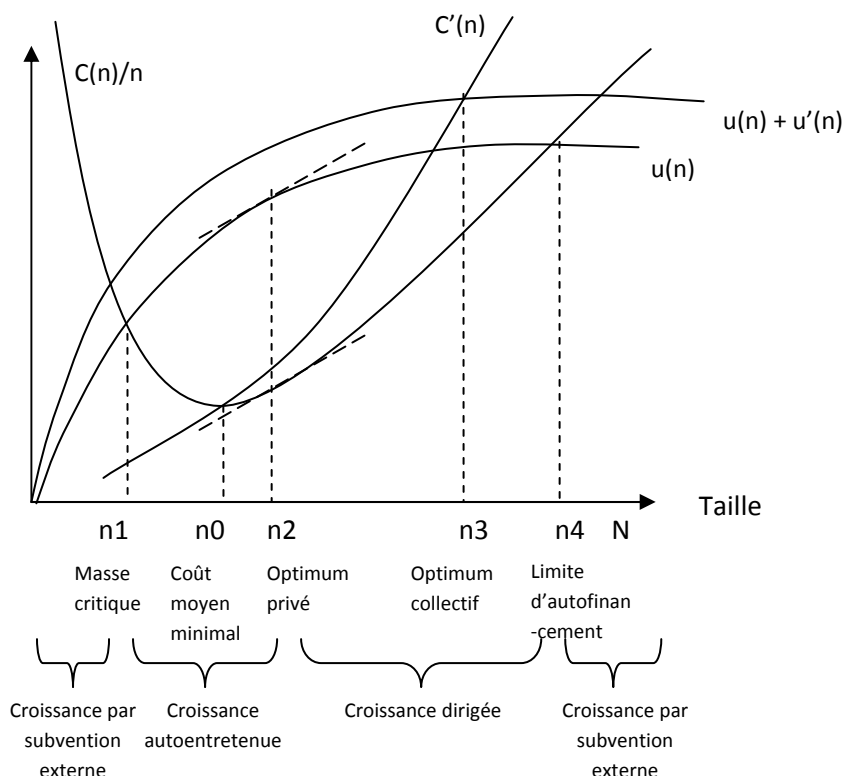
La dynamique non linéaire des réseaux gagne particulièrement de l'importance lorsque les investissements initiaux sont lourds et sujets à de longs délais de récupération. D'une part, les bénéfices sont à trouver à plus long terme, après l'élargissement du réseau, alors que les investissements dans les structures de base sont à prévoir dans l'immédiat. D'autre part, le prix d'adhésion au réseau ne peut pas être très élevé ce qui empêcherait son développement (voir point suivant). Ainsi, l'intervention publique peut se justifier dans la mesure où elle permettrait de passer d'emblée le seuil de la taille critique du réseau, ce qui serait difficile à faire par le seul jeu du marché.¹⁴¹ En fait, la propriété et la structure de l'industrie ne sont pas sans influence pendant la phase de développement du réseau. Des exemples historiques existent dans différentes industries de réseau (e.g. électricité, gaz naturel, ferroviaire) qui démontrent l'efficacité historique du modèle caractérisé par un pilotage public d'une structure intégrée (Bergougnoux, 2000).

1.2.3. Le problème de la construction et de l'expansion de réseaux privés : Le modèle de Noam (1992)

Le modèle de Noam, - initialement développé pour l'analyse de l'industrie des télécommunications, - explique l'évolution des réseaux depuis leur formation jusqu'à la désintégration en multiples réseaux. Le réseau est vu comme un arrangement entre usagers pour partager l'utilité et les coûts d'un bien (*cost-sharing arrangement*), ce qui le rapproche de la problématique des biens club. De cette manière, l'analyse de Noam peut être entendue comme un prolongement du modèle de Buchanan (1965) pour expliquer l'évolution des grands réseaux (graphique 36).

¹⁴¹ cf. Angelier, 2007, p. 13-14.

Graphique 36. Le modèle de Noam (1992)



Source : Noam, 1992, p.32.

Au moment du démarrage, la satisfaction des usagers est limitée par le nombre réduit d'adhérents. Un réseau téléphonique plus large, par exemple, permet aux usagers de contacter avec plus de personnes, ce qui rend le service plus attractif. De plus, les coûts à partager par les usagers restent encore trop élevés. Dans une telle situation, les coûts l'emportent sur les bénéfices et le réseau ne peut pas démarrer. Ce n'est que par une subvention interne par les membres du réseau ou surtout externe – par exemple, l'Etat crée les infrastructures sous l'argument des externalités pour l'économie - que le réseau peut atteindre la taille critique $n1$, le niveau auquel le coût supporté par chaque individu égalise les bénéfices individuels.

$$u(n) = c(n)/n$$

A partir de ce niveau, le réseau entre dans une période de *croissance autoentretenu* puisque les nouveaux entrants apportent un bénéfice net positif à tous les membres du réseau. Les membres du réseau sont alors incités à accepter les nouvelles adhésions vu que la satisfaction individuelle de chaque usager se voit augmenter avec le nombre d'adhérents. En plus, les coûts sont partagés par un nombre plus grand d'usagers, ce qui permet une diminution des coûts moyens par usager ($c(n)/n$). Cette situation dure jusqu'à ce que le bénéfice marginal net soit maximal.

$$\max (n) S = u(n) - c(n)/n \Leftrightarrow u'(n) = [c'(n) - c(n)/n]/n$$

Graphiquement, il s'agit de la taille $n2$ pour laquelle les tangentes de la courbe du coût moyen et de la courbe de l'utilité individuelle sont égales. De signaler que la taille de l'optimum privé est supérieure à celle qui réalise l'efficacité productive (minimum du coût moyen), en raison des externalités de réseau.

A partir de la taille du réseau n_2 , les membres du réseau ne sont plus incités à accepter une augmentation du réseau puisque les nouvelles adhésions augmenteraient les coûts du réseau relativement plus que la satisfaction n'est augmentée. Cependant, la taille correspondant à l'optimum privé ne coïncide pas avec la taille qui maximise le surplus collectif. Au point qui maximise le surplus collectif, le coût pour connecter le dernier adhérent au réseau est égal à l'utilité marginale collective.

$$\max (n) SC = n \cdot u(n) - c(n) \Leftrightarrow u(n) + n \cdot u'(n) = c'(n)$$

L'utilité marginale collective est composée par l'utilité du dernier adhérent $u(n)$ augmentée de l'utilité des individus déjà connectés du fait de l'adhésion $[(n \cdot u'(n))]$. La taille optimale collective n_3 est dans ce cas supérieure à la taille du réseau optimale sur le plan privé. L'Etat peut alors forcer l'expansion du réseau jusqu'à n_3 .

Au-delà de l'optimum collectif, l'Etat peut encore obliger le réseau à s'élargir tant que les bénéfices d'une nouvelle adhésion restent positifs. Dans ce cas, le réseau doit s'élargir jusqu'à ce que le bénéfice marginal net soit nul (n_4). Enfin, l'Etat peut considérer le réseau comme un service universel et dans une telle situation personne ne doit se voir exclu de la consommation. Ainsi, et étant donné qu'il n'est pas financièrement viable de fournir les derniers adhérents, il faudra prévoir une subvention externe.

En somme, le réseau s'élargit d'abord par une question économique et technique et puis par une question de choix politique. Néanmoins, l'expansion du réseau produit un effet de redistribution des bénéfices et des coûts entre membres du réseau. Au fur et à mesure que le réseau accroît et dépasse le niveau optimal privé, il devient plus difficile de maintenir la redistribution de satisfaction et de coûts entre les usagers du réseau. A un moment donné, et s'il n'y a pas un empêchement juridique à la formation de nouveaux réseaux, il sera plus profitable à une minorité d'usagers de quitter le réseau et de fonder un autre réseau. Cet éclatement peut s'enchaîner à partir du moment où le réseau atteint la taille double de la masse critique. A partir de ce point, une minorité est incitée à quitter le réseau principal et à constituer un autre réseau plus petit de façon à s'affranchir des charges individuelles devenues plus lourdes en raison de l'expansion du réseau principal. Le réseau unique risque ainsi de s'éclater en multiples autres réseaux.

1.3. Changement institutionnel et nouveaux défis pour l'investissement

A partir des années 1970 les industries de réseaux énergétiques connaissent une transformation importante. Ce changement commence d'abord dans les pays anglo-saxons et se propagent aux économies industrielles du vieux continent.

1.3.1. Les facteurs à la base du changement institutionnel

A l'issue de la crise des années 1970, un mouvement croissant conteste les politiques interventionnistes de l'Etat dans l'économie. Le contexte économique et idéologique est bouleversé par la crise de stagflation. D'une part, l'Etat est incapable de gérer les déséquilibres macroéconomiques (inflation, chômage). D'autre part, il se débat avec des problèmes budgétaires

sérieux. Les critiques de l'intervention étatique, prônant les « défaillances de l'Etat », deviennent alors de plus en plus influentes dans la pensée économique contemporaine.¹⁴²

A. Les développements théoriques: marchés contestables et économie néo-institutionnelle

Les développements au niveau de l'analyse de l'organisation industrielle, d'une part, et de l'économie néo-institutionnelle, d'autre part, ont eu une influence décisive pour la théorisation d'un modèle organisationnel nouveau pour les industries de réseaux énergétiques basé sur le principe de l'ouverture et de la concurrence.¹⁴³

Les travaux de Bain (1956) sont à l'origine de la théorie des barrières à l'entrée. La concurrence dépend plus des conditions d'entrée que de la concentration des entreprises. Déjà Chamberlain (1933) avait remarqué que l'existence de produits substitués réduit le pouvoir de marché des monopoles. Ainsi, les autorités de concurrence devraient lever toute sorte de barrières à l'entrée de nouvelles firmes sur le marché de façon à créer une menace crédible de « concurrence potentielle » qui puisse discipliner le comportement du monopole installé et ainsi parvenir à une solution efficiente. Lorsque la rente de l'acteur dominant - considérée comme l'écart entre le prix de marché et le coût de l'unité marginale - est significative, les firmes voient une opportunité de faire des profits en entrant sur le marché. L'entrée de nouveaux concurrents entraîne une diminution des prix et des profits des entreprises. Pour éviter cela, le monopole réduit son prix en le fixant à un niveau proche du coût moyen ce qui annule les profits de toutes les firmes sur le marché et aussi l'attractivité de l'entrée.

La théorie des barrières à l'entrée est à la base de la théorie des marchés contestables de Baumol *et al.* (1982). Selon cette approche, la menace d'entrée est efficace (marchés contestables) en absence de barrières à l'entrée et à la sortie (quand les pertes de la sortie de l'entreprise sont supérieures à la décision de rester dans le marché). Cela concerne en particulier l'existence de coûts échoués (*'sunk costs'*). Lorsque les coûts irrécupérables sont importants, la concurrence potentielle hésitera à s'engager dans le secteur. Ainsi, ce sont les *sunk costs* et non les économies d'échelle qui empêchent les firmes d'entrer sur le marché. Ces coûts sont normalement associés aux barrières technico-économiques qui font que la concurrence ne produit pas un résultat efficient (p.ex. la duplication des réseaux électriques). Le rôle du régulateur doit alors être confinée aux activités essentielles (*'essential facilities'*), de manière à garantir l'efficacité de production et le droit d'accès à toutes les entreprises ; la concurrence doit être la règle dans les autres activités de la chaîne.

Ainsi, les nouveaux travaux de l'économie industrielle montrent que la concurrence peut exister même dans les secteurs dominés par un petit nombre d'offres. Le monopole naturel peut être maintenu, il suffit de rendre crédible la menace de concurrence potentielle ou de produits substitués. En plus, le monopole naturel doit être restreint aux activités pour lesquelles la concurrence ne produit pas un résultat efficace (normalement les infrastructures physiques). Ces activités « essentielles » doivent alors être régulées et leur accès ouvert à toutes les entreprises. La mise en

¹⁴² Voir: Guesnerie, 2006; Lévêque, 2004.

Pour une analyse des «défaillances de l'Etat», ce qui a notamment ouvert la voie à l'école du «Public Choice»: Buchanan et Tullock, 1962.

¹⁴³ Pour une synthèse de la littérature économique sur la réglementation des réseaux énergétiques, voir : Angelier, 2007 ; Lévêque, 2004 ; Percebois, 1999.

place de la nouvelle structure organisationnelle et l'incitation des acteurs vers un comportement socialement souhaitable ont bénéficié des apports de la nouvelle économie institutionnelle.

L'approche néo-institutionnelle analyse l'organisation de l'industrie à travers l'étude de l'environnement de la transaction. L'analyse transactionnelle retrouve ses fondements dans le concept de coûts de transaction proposé par Coase. Dans son article séminal de 1937, Coase suggère une explication alternative des organisations, lesquelles existeraient pour minimiser les coûts de transaction et augmenter l'efficacité économique.

Cette analyse entre en confrontation avec les théories néoclassiques de l'économie du bien-être lesquelles défendent que les externalités existantes dans les industries de réseau justifient leur intégration dans le secteur public. Cela suppose que les coûts de coordination à l'intérieur du secteur public sont nuls pour justifier l'efficacité de cet arrangement organisationnel. Coase (1937) considère que le monopole public n'est pas toujours efficace et l'action publique entraîne aussi des coûts de transaction (recherche et d'information ; négociation ; contrôle) lesquels doivent être comparés à des solutions alternatives (Coase, 1960). Dans son article de 1960, Coase argumente par ailleurs que les externalités sont un problème de définition des droits de propriété. Dans un monde où ceux-ci sont bien définis et en absence de coûts de transaction, les acteurs trouvent intérêt à internaliser les effets externes par la voie de la négociation.

Williamson (1993, 1985) prolonge le concept de coûts de transaction et particulièrement son application à la comparaison des structures industrielles alternatives. L'unité d'analyse est le contrat et la prise en compte de la rationalité limitée et de l'opportunisme des acteurs rend la transaction plus complexe. Le choix du mode de coordination est alors fait selon la règle de *l'efficacité comparative de coûts de transaction*. Dans le cas des industries de réseau, la nature de la transaction - incertitude d'investissements, spécificité des actifs et fréquence de transaction - demanderait la conclusion d'un grand nombre de contrats individuels lorsque la coordination est faite par le marché. Ainsi, une organisation hybride (entre l'intégration et le marché) serait préférable avec la médiation d'un régulateur.

Demsetz (1968, 1970) va plus loin en défendant que le monopole naturel peut être efficace sans avoir recours à une agence de régulation. Pour cela, il suggère l'attribution de concessions par un système d'enchères où chaque firme est en concurrence pour l'accès au marché. Le principe est le suivant : l'agent le plus efficace peut retirer plus de bénéfices de la concession et ainsi il est disposé à payer plus par l'enchère. L'Etat bénéficie du fait que le service public est réalisé à la plus grande efficacité possible.

Un autre argument pour la libéralisation totale a été développé par les théories des groupes de pression et de la capture du régulateur. Ces théories sont développées dans le cadre de l'analyse des « défaillances de l'Etat » par l'école du 'Public Choice' (Buchanan et Tullock, 1962). Stigler (1971) considère que les décisions des agences de régulation sont influencées par les intérêts des acteurs du secteur et une déréglementation complète des marchés serait plus efficace pour l'économie. Cette position part du constat que les producteurs ont un intérêt énorme à influencer les agences régulatrices de manière à obtenir des bénéfices dans leur activité ou à se protéger de la concurrence ; alors que les citoyens n'ont qu'un intérêt très faible pour chaque décision du régulateur. Cette divergence d'intérêts rend possible la capture des instances de réglementation par

les firmes qu'elles sont supposées réguler.¹⁴⁴ Par ailleurs, les activités de lobbying entraînent des coûts ('coûts d'influence') pour les firmes qui pourraient être affectés à l'amélioration de l'efficacité de production (Milgrom et Roberts, 1990). Les agences de régulation souffrent encore d'autres problèmes : manque de moyens humains et financiers ; système incitatif difficile de mettre en place ; asymétrie d'information et incertitude. Un nouveau courant théorique s'est entretemps développé ayant comme but la création d'instruments efficaces pour la réglementation des services publics.

La théorie de l'agence permet de comprendre la dynamique des relations contractuelles entre les agents dont les intérêts sont divergents. Cette dynamique doit être comprise dans un environnement marqué par l'*asymétrie d'information* et par l'*incertitude*. La théorie de l'agence trouve son origine dans les travaux de Berle et Means (1932) qui ont étudié le problème de la délégation de pouvoir entre les actionnaires et les managers, lorsque les deux groupes poursuivent des stratégies divergentes. Ainsi, la firme est traversée par un système de relations à la fois coopératives et conflictuelles entre les acteurs qui la composent. Jensen et Meckling prolongent l'analyse de Berle et Means, en introduisant les concepts de *principal* (donneur d'ordres) et d'*agent* (exécuteur d'une tâche). L'agent dispose de plus d'information que le principal sur ses propres capacités et sur l'effort qu'il est nécessaire d'entreprendre pour accomplir une tâche donnée. Le principal va mettre en place un contrat réduisant cette asymétrie et incite l'agent à la réalisation des objectifs.

La nouvelle théorie de la réglementation emprunte les instruments de la théorie des contrats (notamment la théorie de l'agence) afin de mettre en place des mécanismes incitatifs capables d'améliorer l'efficacité économique, productive et la redistribution (Laffont et Tirole, 1993). Cela se heurte au problème de l'antisélection et de l'aléa moral. D'une part, l'*antisélection* parce que le régulateur (principal) ne dispose pas de toute l'information concernant les caractéristiques de la firme régulée (agent). D'autre part, l'*aléa moral* car le régulateur n'observe pas tous les efforts de l'entreprise réglementée pour augmenter l'efficacité productive et la qualité de service. Le régulateur va alors proposer des menus de contrats incitatifs à l'entreprise régulée qui consistent en un barème de transferts linéaires lesquels diminuent avec le coût observé : les firmes les plus efficaces choisissent les contrats les plus incitatifs ; les moins efficaces s'assurent de récupérer leurs coûts.

Cela montre une évolution du rôle et comportement du régulateur (Lévêque, 2004). Au lieu de prendre les décisions à la place du monopole réglementé (p.ex. en imposant une tarification), le régulateur cherche maintenant à influencer les décisions des monopoles naturels en agissant sur leur environnement.

Par ailleurs, l'analyse transactionnelle explique la dynamique des structures de gouvernance par le changement dans les attributs des transactions (incertitude, fréquence, spécificité de l'actif) qui accompagnent le passage entre différents stades de maturité de l'industrie. En particulier, une

¹⁴⁴ La question des ressources humaines est un problème sensible des agences de régulation. D'une part, les compétences nécessaires à la réglementation peuvent être très spécifiques et seuls les professionnels du secteur sont capables de les assumer à court-terme. Dans ce cas, il est probable que l'agence régulatrice soit constituée d'anciens fonctionnaires des firmes régulées. D'autre part, la place de direction de l'agence est normalement limitée dans le temps. Si rien n'est contracté en inverse, cette personne peut assumer des fonctions dans la firme régulée, ce qui pose des questions additionnelles sur l'indépendance des décisions du régulateur. Ce cas s'applique également aux bureaucrates qui vont travailler dans les entreprises qui ont été concernées par leurs décisions, une fois terminé leur mandat.

évolution de l'organisation traditionnelle vers une organisation concurrentielle sera d'autant plus justifiée que la spécificité de l'actif se réduit.

B. L'arrivée à maturité des industries de réseau

Les années 1980 coïncident avec l'arrivée à maturité de plusieurs industries de réseaux publics (transport aérien, télécommunication, énergie, eau). Les décennies précédentes ont été marquées par un progrès énorme dans ces industries, en termes techniques et d'expansion géographique.¹⁴⁵ La couverture nationale des réseaux de télécommunications, électricité ou gaz naturel, est devenue presque universelle et l'investissement en infrastructures a cédé la place à l'efficacité productive dans l'échelle des priorités nationales. De plus, le développement des marchés financiers a facilité l'accès au financement et l'Etat n'est plus seul à disposer des capacités financières importantes (Angelier, 2007).

L'évolution technologique a changé l'environnement institutionnel de la transaction. La maturité de certaines filières de l'industrie et le progrès technique au niveau des technologies de l'information et de la communication ont permis l'augmentation des relations contractuelles via le marché (Brand, 1990). En général, les actifs sont devenus moins spécifiques ce qui a rendu possible un plus grand recours au marché.

Dans le cas de l'électricité, la stabilisation de la demande a été un facteur important pour l'excès de capacité de production au moment de l'ouverture (Angelier, 2005 ; Chevalier, 2004). Cela rend possible l'ouverture du marché à la concurrence de manière à utiliser au mieux les capacités existantes et de diminuer les prix aux consommateurs. Par ailleurs, les progrès techniques au niveau de la production ont rendu compétitives des technologies plus flexibles et moins intensives en capital comme les centrales à gaz cycles combinés (Islas, 1997). Le rôle des économies d'échelle dans la production devient alors moins important et la taille de production efficace est réduite. Le développement d'unités de petite taille permet l'arrivée de nouveaux acteurs dans la production électrique comme les gaziers. Plus récemment, le boom de la production renouvelable a ouvert une possibilité d'entrer à de nouveaux agents dans l'industrie. Dans l'avenir, les unités de génération de quelques KW à la maison et la connexion avec un réseau intelligent poursuivent la tendance vers la concurrence et la décentralisation des réseaux (Rifkin, 2007). En somme, le progrès technique est venu remettre en cause l'architecture centralisée des réseaux ce qui a favorisé la concurrence dans le secteur.

Dans le cas de l'industrie gazière, le transport et la distribution du gaz par gazoducs revêtent une spécificité relativement élevée. Toutefois, l'interconnexion croissante des réseaux a réduit la spécificité des actifs, ce qui fait que les contrats du type « *take or pay* » se justifient moins et le recours à un marché spot (avec couverture de risque sur un marché à terme) devient possible (Chevalier, 2004 ; Percebois, 1999 ; Quast, 1999).

¹⁴⁵ Pour une analyse spécifique à l'industrie électrique, voir : Hughes, 1983. Pour une analyse à l'évolution du réseau électrique français : Bouneau, Derdevet et Percebois, 2007.

C. La nouvelle organisation des industries de réseau énergétiques

Amorcée dès la fin des années soixante-dix aux Etats-Unis avec la libéralisation de l'industrie aérienne, la libéralisation des industries de réseau a atteint dans les années 1980 le Royaume-Uni, puis sous l'impulsion des directives européennes, la presque totalité des pays européens (Newbery, 1999). En fait, le Traité de Rome signé par les six pays fondateurs de l'Europe établit les bases pour le marché commun.¹⁴⁶ Ce marché unique doit être caractérisé par la libre circulation des hommes, des marchandises, des capitaux et des services, et tous les obstacles à cette libre circulation doivent être levés. Le principe général de fonctionnement du marché unique est la concurrence. Selon la théorie économique, celle-ci est de nature à faire baisser les coûts et les prix, et à accélérer les progrès technique et l'innovation.¹⁴⁷

Les directives communautaires électricité et gaz de 1996 et 1998, respectivement – révisées toutes deux en 2003 -, sont venues décomposer les différents segments d'activité, tout au long de la chaîne de valeur, et introduire la concurrence partout où elle était possible. Les directives européennes ainsi que les différentes expériences de déréglementation sont articulées autour de quelques principes communs : l'ouverture à la concurrence ; la dissociation des activités ; l'accès de tiers aux réseaux ; la création d'autorités indépendantes de régulation.

La réglementation des industries de réseau doit répondre à des critères d'efficacité, de répartition et d'autres d'ordre non économique (e.g. environnement, santé). Historiquement, la frontière du monopole historique dans les industries de réseaux a dépassé celle du monopole naturel, en incluant aussi les obligations de service public et les objectifs de redistribution (Lévêque, 2004). L'ouverture du marché soulève la question du financement du service public et de l'innovation.

1.3.2. Les défis posés par la libéralisation

La liaison entre structure de marché et incitation à innover fait l'objet d'un débat théorique important au sein de la science économique. La question est de savoir si les firmes sont plus innovantes en situation de monopole ou dans le cadre d'un marché concurrentiel. Les premiers travaux ont étudié la question en comparant les profits avant et après innovation. Les analyses se sont focalisées sur deux effets contradictoires : l'« effet de remplacement » selon lequel la firme concurrentielle a plus d'incitations à innover que le monopole parce que l'innovation peut lui permettre de sortir d'un cadre où elle ne réalise qu'un profit nul (Arrow, 1962) ; et l'« effet d'efficacité » qui met en évidence que la firme en monopole est capable d'obtenir une rémunération supérieure pour son innovation que celle évoluant dans un cadre concurrentiel (Gilbert et Newbery, 1982). Les travaux récents prennent en compte les effets dynamiques des décisions d'innovation et de la concurrence, ils font alors la distinction entre : l'« effet schumpétérien » selon lequel les incitations à innover sont plus faibles dans les industries plus concurrentielles (Dasgupta et Stiglitz, 1980) ; et l'« effet darwinien » où l'innovation apparaît comme une stratégie de survie de l'entreprise concurrentielle et d'isolement face à la concurrence (Calderini et Garrone, 2001).

¹⁴⁶ Le traité fondateur de la Communauté Economique Européenne - CEE (1957) a créé un marché commun pour les industries et pour les politiques agricoles, mais il ne comprenait pas les services. Le pas décisif pour l'ouverture du marché unique a été franchi lors de la signature de l'Acte unique (1986) et renforcé par le traité de Maastricht (1992) qui constitue l'UE et l'Union Economique et Monétaire - UEM.

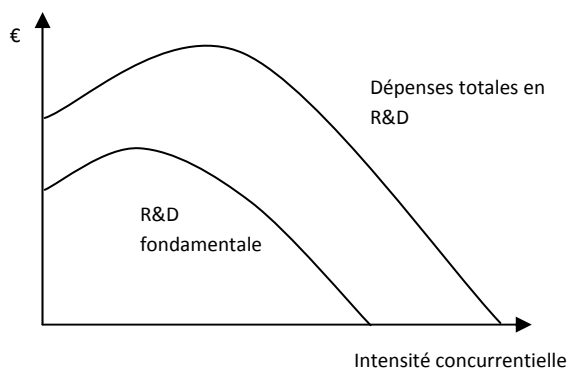
¹⁴⁷ cf. Chevalier, 2004, p.154.

Le premier effet s'inspire directement des travaux de Schumpeter (spécifiquement de la période surnommé Schumpeter II) et met en exergue les rendements croissants de l'innovation réalisée dans les laboratoires des grandes entreprises (équipement, ressources humaines, ...). Le second effet souligne la nécessité pour les entreprises d'innover davantage pour échapper à la faillite en présence de forces concurrentielles importantes.

La thèse de la « *courbe en U inversé* » assure la compatibilité entre ces deux visions contradictoires. A partir d'une analyse empirique, Aghion et al. (2005) montrent que, en partant d'une situation de monopole, une augmentation de la pression concurrentielle entraîne initialement des « effets darwiniens » plus importants, mais que les « effets schumpetériens » prennent le dessus à partir d'un certain seuil concurrentiel. C'est-à-dire que l'introduction de la concurrence dans un marché monopolisé fait augmenter les dépenses en R&D jusqu'à atteindre un niveau maximal au-delà duquel la poursuite de l'ouverture fait diminuer ces dépenses. Mais cette analyse ne donne des indications que pour le niveau des investissements.

Calderini et Garrone (2001) analysent le changement de la structure des dépenses en R&D en réponse à l'augmentation de la pression concurrentielle. La concurrence induit le problème de l'appropriabilité des investissements en R&D, ce qui réduit les dépenses en recherche fondamentale et appliquée. Cependant, l'« effet darwinien » contribue à augmenter les dépenses en R&D appliquée. Par conséquent, le poids des dépenses en recherche appliquée augmente au détriment de la recherche fondamentale. Ainsi, l'ouverture des anciennes industries intégrées provoque une augmentation initiale des dépenses en recherche, toutefois les investissements en R&D fondamentale sont plus sensibles à l'« effet schumpétérien » et son poids relatif diminue (graphique 37).

Graphique 37. Courbe en U inversée et changements structurels des dépenses en R&D



Le secteur des télécommunications et information (TIC) en Europe offre un champ d'étude de l'impact de la libéralisation sur l'innovation. Flacher et Lestage (2009) proposent une analyse comparative entre la France et la Corée du Sud en termes d'évolution des dépenses d'investissement en infrastructures et de dépôt de brevets pendant la dernière décennie. Les auteurs concluent que la politique industrielle coréenne a contribué à ce que le secteur présente une dynamique plus importante en Corée que celle observée en France. En particulier, le fait que le régulateur sectoriel se focalise plutôt sur les baisses de prix que sur les dépenses de long terme (comme en R&D ou infrastructures) a ralenti le rythme d'innovation dans le secteur des télécommunications en France.

En ce qui concerne les industries énergétiques, la nouvelle organisation de marché doit assurer la durabilité du secteur. Un système énergétique soutenable prend en compte plusieurs dimensions : indépendance énergétique ; environnement ; et économique (Pérez-Arriaga et Buquin, 2009 ; Green et al., 2009). Le premier concerne le risque de la dépendance aux importations d'énergie de l'extérieur (Percebois, 2006). Il comprend aussi la diversification des sources énergétiques de manière à gérer le risque de la dépendance à une seule source primaire. L'environnement est une composante importante pour l'avenir principalement en termes de lutte contre le changement climatique et de la pollution de l'air. En particulier, la progression de la part des énergies renouvelables dans le mix de production est une garantie de sécurité et de soutenabilité pour l'avenir. Enfin, les capacités de production et de transport doivent se mettre en place de manière à accompagner l'évolution de la demande et à assurer la fourniture d'énergie à des conditions compétitives. Pour que cela soit possible, les investissements sont nécessaires, ainsi que des dépenses en R&D de technologies capables de répondre aux défis de long terme.

L'ouverture du marché a démarré dans un contexte général de surcapacité (Chevalier, 2004). La gestion optimale des infrastructures existantes et la concurrence peuvent ramener à une réduction de la capacité excédentaire à terme (Newbery, 1999). De plus, la réforme est venue amplifier les incertitudes – notamment réglementaires et de marché – ce qui alourdi les coûts en capital. Ainsi, les investissements seront probablement inférieurs au niveau socialement optimal ce qui ne peut mettre en cause la sécurité des réseaux. Un système d'incitation et de sanction est alors nécessaire pour garantir la mise en place des capacités de production et de transport adéquates à moyen et long termes.

Un autre défi à la libéralisation est le maintien, voire l'augmentation, de l'effort d'innovation (Green et al., 2009). Ces dépenses sont nécessaires de manière à réduire les coûts de production et à rendre disponible la technologie nécessaire pour l'avenir. Dans le cas du marché électrique, la réforme a coïncidé avec une diminution des dépenses des firmes en R&D, spécialement en matière de recherche fondamentale (Jamassb et Pollitt, 2005a). Plusieurs facteurs expliquent cette baisse.¹⁴⁸ D'abord, la diminution de la taille des entreprises a pu entraîner une diminution des activités innovantes. Les grandes entreprises énergétiques profitent souvent de rendements croissants dans la R&D. Elles mènent simultanément plusieurs projets ce qui leur permet de gérer le risque spécifique à chacun des projets. Puis, la pression concurrentielle a ramené les entreprises aux activités à plus forte valeur ajoutée, voire à leur cœur de métier, en dépit des investissements plus risqués pour l'avenir. Enfin l'aspect financier joue aussi un rôle important. Dans le cadre d'une firme privée - spécialement lorsqu'elle est cotée en bourse - les dépenses en R&D doivent disputer les ressources internes avec les budgets d'investissement et les dividendes.

Par ailleurs, la baisse attendue des prix de l'énergie par l'effet de l'augmentation de la concurrence risque de devenir un obstacle à l'adoption des nouvelles technologies. Une attention particulière est donnée aux technologies de production décentralisée (p.ex. la micro cogénération). Reste que cette diminution n'a pas eu encore lieu dans le marché européen.¹⁴⁹

¹⁴⁸ Pour une discussion sur les facteurs, voir Jamassb et Pollitt, 2005.

¹⁴⁹ Plusieurs raisons expliquent la non concrétisation de la baisse des prix de l'électricité : l'augmentation des prix des énergies fossiles ; le prix des permis d'émission de carbone ; le comportement stratégique des producteurs qui enlève des capacités de production quand le marché est en tension ; le pouvoir de marché des

Section 2. Le développement historique des réseaux électrique et gazier en Europe

La présente section examine l'évolution de l'électricité et du gaz naturel en Europe. L'analyse se focalise sur l'effet des externalités de réseau sur le développement de ce type d'industries, et le rôle de l'Etat pour le développement des biens clubs. En outre, l'introduction de l'hydrogène aurait de multiples interactions avec tous les deux secteurs, en particulier celui du gaz naturel.

2.1. La mise en place d'un réseau universel : le cas de l'électricité

L'évolution des systèmes comme le système électrique ne se résume pas à une simple question de changement des techniques, le contexte sociopolitique est également important. Hughes (1983) parle de *systèmes socio-technologiques* pour souligner l'interaction des éléments internes et externes sous-jacent à l'évolution de l'industrie électrique.

En effet, l'évolution des systèmes électriques n'est ni totalement autonome ni dépendant de toute influence non-technique. D'une part, ils ont été marqués par leurs propres dynamiques internes de croissance et de résolution des « verrous » technologiques qui se posaient à chaque étape de leur développement. Le passage d'une phase à l'autre est fait grâce à la résolution de problèmes techniques (saillant rentrant) dans la production et la transmission (Hughes, 1998). Les innovateurs et les promoteurs des réseaux électriques tentent de renforcer et de dépasser les points les plus faibles du réseau.¹⁵⁰ En le faisant, ils ouvrent de nouvelles perspectives pour la diffusion du réseau électrique.

D'autre part, la diffusion des systèmes électriques est guidée par des choix sociaux tels que le développement régional ou l'indépendance énergétique nationale. Les facteurs externes tels que la culture, les guerres et les chocs dans les marchés de l'énergie expliquent également la diversité de systèmes nationaux. De cette façon, on parle plutôt de *systèmes sociotechniques* parce qu'ils évoluent selon la structure institutionnelle et législative, l'intensité capitaliste et l'expertise technique (Hughes, 1983, 1998). A un moment ou à l'autre, les différents systèmes électriques ont adopté un standard technique et puis centré leurs efforts dans l'expansion du réseau. C'est ainsi que les réseaux électriques les plus importants ont été normalisés et interconnectés à partir des années vingt.

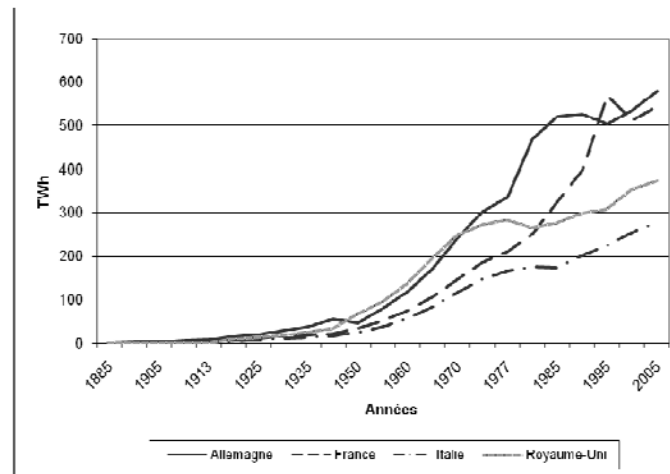
La naissance de l'industrie électrique dans les quatre principales économies de l'Europe de l'Ouest (l'Allemagne, la France, l'Italie et le Royaume-Uni) date du début des années 1880. La période de diffusion plus intense s'est produite entre 1950 et 1980. Le développement de l'industrie électrique en Europe peut être décomposé en quatre étapes distinctes : (i) l'émergence de l'électricité, dès les années 1880 jusqu'au début de la Première Guerre mondiale ; (ii) l'élargissement des marchés et début des politiques électriques pendant la période de l'entre-deux-guerres ; (iii) l'harmonisation du

acteurs dominants ; les ententes explicites et implicites entre les entreprises pour la tarification à un prix supérieur au coût moyen et le partage des rentes. Voir : Percebois, 2008.

¹⁵⁰ Hughes, 1998, p. 843.

fonctionnement et croissance des industries nationales, à partir de la Seconde Guerre mondiale ; et (iv) l'arrivée à la maturité et déréglementation après le début des années 1990 (graphique 38).

Graphique 38. L'évolution de la production électrique en Europe : 1885-1980



Source : EIA, 2006 ; Mitchell, 1980.

Depuis son introduction, l'industrie électrique a connu des rythmes et des modalités de croissance différentes selon les pays. Ces spécificités nationales à la base des différences de performances résultent notamment de trois facteurs (Lanthier, 2006 ; Angelier et Lalanne, 1979): (i) les conditions de base physico-économiques des pays ; (ii) l'origine des capitaux engagés et ses modalités de valorisation; et (iii) l'implication des autorités publiques pendant le développement de l'industrie.

2.1.1. La naissance de l'industrie : 1880 - 1913

A l'origine, l'industrie électrique a été basée sur la production thermique et la production hydraulique. Le but de l'électricité était de transformer l'énergie thermique en une forme d'énergie convenant mieux à certains besoins énergétiques, d'une part ; et de substituer l'énergie importée par la valorisation des ressources nationales telles que l'hydraulique, d'autre part. Jusqu'à la Première Guerre, les principaux débouchés de l'électricité sont l'éclairage et les transports publics.

Avant la Première Guerre, l'industrie électrique reste généralement confinée aux principaux centres urbains et industriels, zones de forte consommation et où la consommation s'étale sur l'ensemble de la journée. La structure de l'industrie est variable selon les pays : très concentrée en Allemagne et Italie ; très atomisée au Royaume-Uni ; en France elle est caractérisée par une forte concentration dans les grands centres consommateurs (Bergougnoux, 2000 ; Stoffaës, 1994). L'industrie allemande est la plus développée parmi les pays considérés, en termes de production électrique, coûts de production et prix de l'électricité, l'étendue géographique des réseaux et diversification du mixte de production (Angelier et Lalanne, 1979).

2.1.2. L'élargissement de l'industrie électrique : 1913-1938

La deuxième phase du développement de l'industrie électrique en Europe correspond aux années de l'entre-deux-guerres. Pendant cette phase, l'industrie électrique est marquée par les progrès

techniques au niveau du transport et de la production. Désormais, l'énergie électrique peut être transportée sur de longues distances et dans des conditions plus économiques. Cela a permis une expansion géographique des réseaux locaux à un cadre régional et, plus tard, national avec l'interconnexion des différents réseaux régionaux. L'élargissement du marché est aussi associé à l'augmentation de la taille de production et à l'introduction de nouvelles technologies de génération électrique (p.ex. turbine).¹⁵¹ Celles-ci améliorent l'efficacité dans l'utilisation du combustible en rendant ainsi possible une réduction substantielle du prix à la consommation (p.ex. le prix constant de l'électricité à Paris a été divisé par 5 entre 1914 et 1939). Par conséquent, l'électricité devient accessible à une plus vaste population, et elle peut enfin progresser sur le marché (Stoffaës, 1994).

Pendant cette période, l'électricité s'intègre largement dans la consommation énergétique des pays et contribue à leur compétitivité et croissance économique. Elle devient tout d'abord une forme d'énergie à usage industriel. La demande industrielle représente plus des deux tiers de la consommation électrique (en exceptant le Royaume-Uni où elle n'était que de 50%) dans la période de l'entre-deux-guerres (Angelier et Lalanne, 1979). En fait, la croissance des industries électriques a été liée à l'aptitude du moteur électrique à se substituer à la machine à vapeur pour les usages industriels.

Les progrès techniques au niveau du transport et la disparition de la contrainte du marché permettent l'exploitation des avantages économiques de la production dans les unités de grande taille. Toutefois, la mise en place d'un réseau de transport à l'échelle nationale et des usines de génération de grande taille demande des investissements colossaux. Cela a eu des répercussions sur la structure de l'industrie (vers une plus grande concentration), ainsi que sur le rôle de l'Etat.

L'intervention économique de l'Etat dans l'industrie électrique pendant la période de l'entre-deux-guerres a pris des modalités et des rythmes différents selon les pays. En Allemagne, les entités publiques telles que les Etats et les communes sont très actives et disposent de participations financières dans une grande partie de l'industrie électrique (renforcé après les crises économiques de 1919 et 1923 lorsqu'elles rachètent des parts de capital pour sauver les entreprises en difficulté), ou encore par un plus grand contrôle de l'Etat fédéral sur l'ensemble de l'industrie. En Italie, l'Etat est amené à racheter les actifs industriels (dont électriques) à trois grandes banques de dépôts italiennes pour éviter leur faillite à l'issue de la crise de 1933. Les actifs sont placés dans une holding: l'Institut pour la Reconstruction Industrielle, IRI. Cette holding devient un organisme public en 1937, notamment chargé de la gestion de l'industrie électrique. Au Royaume-Uni, l'Etat est à la base de la création du réseau de transport. De même, il restructure l'industrie de façon à introduire une plus grande concurrence entre les municipalités et les compagnies privées. En France, l'Etat n'intervient pas directement dans l'allocation des ressources. L'industrie est organisée autour de 8 réseaux régionaux de production-consommation intégrant toutes les activités de la chaîne industrielle (production, transport, distribution).¹⁵² L'intervention publique reste plutôt administrative de façon à orienter les décisions des compagnies. Elle devient importante plus tard pour l'interconnexion des réseaux régionaux.

¹⁵¹ Notamment par l'augmentation des pressions et des températures dans les chaudières ainsi que par l'accélération des vitesses de rotation des turbo-alternateurs.

¹⁵² Au tournant des années 1920 et 1930, les grands groupes régionaux sont : Midi, Sud-Est, Alpes et Saint-Etienne, Centre, Bourgogne, Est, Nord et Ouest. Voir : Bouneau et al., 2007.

En effet, l'industrie électrique française démarre à une échelle locale pour transiter pour une échelle régionale entre les années 1920, et tendre vers l'interconnexion nationale à partir de la fin des années 1930 (graphique 39). Le réseau ferroviaire a eu un rôle important pour entamer la connexion des unités de production géographiquement séparés. La recherche des marchés solvables des grandes villes (principalement Paris) et les crises de surcapacité des années 1930 ont poussé les compagnies régionales - particulièrement celle du Midi Central - à rechercher l'interconnexion avec les réseaux voisins. L'interconnexion contribue aussi à diversifier les sources énergétiques, en combinant la tradition charbonnière du Nord du pays avec la production hydroélectrique excédentaire du Sud. Ainsi, les années 1930 et 1940 sont marquées par la réalisation des grandes interconnexions à destination de la capitale (Rhin-Paris, Massif Central-Paris, Alpes-Paris). Le kilométrage des lignes de transport à très haute tension augmente de 33% entre 1939 et 1944 (Bouneau et al., 2007).

Graphique 39. De l'interconnexion régionale à l'interconnexion nationale entre 1925 et 1935



Source : Bouneau et al., 2007.

Bien que de manière très approximative, les performances des industries électriques nationales peuvent se comparer par les coûts de l'électricité et l'étendue des réseaux de transport et de distribution. Les prix pratiqués en Allemagne étaient parmi les moins chers en Europe (Angelier et Lalanne, 1979). A la veille de la Seconde Guerre, ce pays dispose d'un réseau de transport interconnecté à l'échelle nationale, ainsi que d'un réseau de distribution très étendu. Le Royaume-Uni aussi disposait d'un réseau de transport et de distribution parmi les meilleurs d'Europe. Enfin, le parcours plus « régionaliste » de la France ne l'empêche pas d'avoir le réseau à haute tension le plus dense du monde avec 22,5 km de lignes pour 1000 km², contre 18 Km pour l'Allemagne, 15 km pour la Grande Bretagne, et 5 km pour les Etats-Unis (Bouneau et al., 2007).

2.1.3. La croissance des industries électriques nationales : 1945 - 1980

Après la Seconde Guerre, la demande électrique a connu une progression importante. La part des secteurs tertiaire et domestique dans la demande électrique augmente d'environ un cinquième en 1950 à la moitié en 1977 (Angelier et Lalanne, 1979). Cette évolution structurelle s'explique, d'une part, par l'extension des réseaux de distribution permettant de desservir une partie plus large de la population ; et, d'autre part, par la place grandissante des services dans les économies occidentales.

La troisième phase de l'évolution de l'industrie est caractérisée par des unités de génération d'électricité de grande taille, très intensives en capital. Cela posait des problèmes de mobilisation de

capitales dans une période de reconstruction des économies. L'Etat semble alors être pratiquement le seul acteur en condition de financer un tel chantier.

Face à l'augmentation rapide de la demande et à la fragmentation des réseaux électriques, des organisations nationales sous le contrôle croissant de l'Etat furent créées en Europe ayant comme mission l'harmonisation technique et l'électrification nationale. Des facteurs ont été à la base de cette décision (Lanthier, 2006 ; Angelier, 2005 ; Angelier et Lalanne, 1979) :

- l'importance stratégique de l'industrie électrique pour la fourniture de l'énergie nécessaire à la reconstruction des économies ;
- le progrès technique a changé l'organisation économique de la production et du transport de l'électricité, désormais assise sur l'exploitation des avantages économiques et techniques des unités de production de grande taille et du transport de l'électricité à l'échelle nationale ;
- les changements survenus au niveau de la production et du transport rapprochent l'industrie d'une situation de monopole naturel ;
- l'accélération de l'électrification nationale nécessite une action concertée ;
- l'industrie électrique est un instrument de politique économique et de régulation de l'activité économique par les Etats.

L'électricité est un facteur de production important pour l'industrie au moment de l'internationalisation des économies. Elle devient alors un facteur de compétitivité de l'industrie en particulier, et des économies en général. L'industrie électrique soutient l'industrie des biens d'équipement par le biais des commandes, et valorise les combustibles nationaux tels que le charbon. La périodisation des commandes était un outil de relance de l'économie en période de crise. De plus, la tarification de l'électricité pouvait être manipulée comme une politique conjoncturelle de lutte contre l'inflation.

Ainsi, les cas de nationalisation des industries électriques se multiplient en Europe. Les pouvoirs publics prennent un pouvoir croissant en France et au Royaume-Uni. En Italie, l'Etat « nationalise » l'industrie par un procédé de rachat progressif de participations financières des compagnies électriques. Cette reprise en main de l'industrie électrique par l'Etat se fait de façon progressive. A contrario, l'ancienne RFA, et plus particulièrement son Etat central, a cédé une partie de ses participations publiques dans les holdings électriques nationales aux compagnies privées, particulièrement les banques de dépôts.

En France, l'Etat crée la compagnie publique nationale EDF à la fin du conflit afin de concentrer l'industrie et d'accélérer l'électrification.¹⁵³ Dans les décennies suivantes, le réseau de transport et de distribution va connaître une révolution qui commence par l'achèvement en 1958 du super-réseau

¹⁵³ Le monopole du transport d'électricité a été réservé à EDF, un établissement public national de caractère industriel et commercial créé par la loi du 8 avril 1946. Au niveau de la production, EDF produit la majeure partie de l'électricité du pays (85,2 % en 1977 avec la Compagnie Nationale du Rhône, entreprise d'économie mixte), la loi de nationalisation n'épargnant que les petites sociétés électriques (production inférieure à 12 GWh), les autoproducteurs et les sociétés d'économie mixtes. Pour ce qui est de la distribution, EDF assure 96% de la distribution électrique en 1977 (Angelier et Lalanne, 1979).

400 000 V, un pilier du réseau de transport français (Bouneau et al., 2007). Dans la production, l'hydraulique (50% de la production pendant les années 1940 et 1950) accélère son développement après la nationalisation. Le programme électronucléaire est un autre fait marquant de cette période.

En 1973 la France importe 77% de son approvisionnement énergétique (essentiellement pétrole). Suite au choc pétrolier, le gouvernement de Pierre Messmer décide le lancement par EDF de 19 réacteurs de 900 MW de puissance sur deux ans. Entre 1974 et 1984, quatre réacteurs de 1300 MW sont construits par an. En 1993 les 56 réacteurs nucléaires français ont une puissance totale de 56500 MW et assurent trois quarts de la production électrique nationale.¹⁵⁴ Tout cela contribue à l'augmentation de la consommation électrique laquelle est multipliée par 6 en trente ans (entre 1950 et 1980).

¹⁵⁴ Pour un résumé du programme électronucléaire français : Stoffaës, 1994. Une discussion sur l'influence de la « rente nucléaire » sur l'ouverture du marché français : Boiteux, 2007.

Tableau 16. Comparaison de la structure et de la performance des industries électriques des quatre pays européens et Etats-Unis entre 1880-1980

	Dotation physique	Structure de l'industrie	Le rôle de l'Etat	Performance (coûts, prix et réseaux)
Allemagne	Charbon	Oligopoles régionaux <i>Utilities</i> municipales (communes et états (Länder); compagnies électromécaniques et industrie)	Entrepreneur (entreprises communales) Entreprises de capitaux mixtes Contrôle au niveau fédéral (phase 2)	Diversification du mixte Coûts moyens Prix concurrentiels Réseau étendu (depuis phase 1)
France	Hydraulique	Oligopoles (groupes financiers) Monopole public national (> phase 3)	Administratif (phase 1 et 2) Entrepreneur (phase 3)	Coûts élevés Prix élevés Réseaux locaux, régionaux, national (phase 1, 2 et 3 respectivement)
Italie	Hydraulique (au nord)	Oligopoles (groupes industriels et financiers) Monopole public national (> phase 3)	Passive (phase 1 et 2) Entrepreneur (phase 3)	Coûts bas Prix élevés Réseau peu étendu (en partant du nord)
Royaume-Uni	Charbon	Atomisée (Municipalités ; concessions privées)	Entrepreneur (« socialisme municipal » ; « Grid » phase 2)	Coûts élevés (bas pour les sociétés privées) Prix élevés Réseau étendu (depuis phase 2)
Etats-Unis	Charbon	Oligopoles intégrés régionaux Compagnies locales (publiques et privées)	Régulateur (Etats; Etat fédéral) Entrepreneur (hydro, phase 2)	Coûts moyens Prix d'oligopole, régulés, concurrentiels (phase 1 et 2, 3, et 4, respectivement) Réseaux régionaux interconnectés (PJM,...)

Phase 1 (1880-1913) ; Phase 2 (1914-1938) ; Phase 3 (1945-1980) ; Phase 4 (>1980).

2.1.4. L'arrivée à maturité et la déréglementation à partir des années 1980

Les deux chocs pétroliers en 1973 et en 1979 et la crise de stagflation dans les économies occidentales sont à la base de la décélération de l'industrie électrique à partir des années 1980. Une décennie après sa naissance, 30 ans après le début de sa diffusion de masse, elle donne des signes d'arrivée à la phase de maturité. D'une part, l'augmentation du coût des combustibles ainsi que l'inflation élèvent le coût de production et d'investissement. D'autre part, la demande progresse à des rythmes moins soutenus. En France, le rythme annuel de croissance de la demande passe de 7% avant 1981 à 4% à compter de cette date (EIA, 2006). Entre-temps, de nouvelles centrales sont entrées en production, ce qui a provoqué un suréquipement général des capacités de production.

Les réseaux (locaux, régionaux et nationaux) étant pour l'essentiel installés, les pays accordent plus d'importance à l'interconnexion avec les régions voisines de manière à renforcer la sécurité du réseau (Bouneau et al., 2007). En outre, le progrès technologique évolue dans le sens de l'utilisation de techniques moins intensives en capital, plus flexibles et propres, ce qui rend moins nécessaire l'intégration de la filière pour profiter des économies d'échelle. C'est le cas notamment de la mise au point des centrales à gaz à cycles combinés, très flexibles en termes de production (taille, vitesse de démarrage) et surtout moins chères que les centrales nucléaires (Islas, 1997 ; Martin, 1996). A cela s'ajoute les critiques de l'efficacité de la gestion publique, en créant le contexte favorable à la mise en place des réformes dans le secteur électrique censées réduire le prix et améliorer la qualité du service (Bergougnoux, 2000).

Les premières réformes ont commencé aux Etats-Unis. Le *Public Utilities Regulatory Policies Act* – PURPA (1978) constitue le premier pas vers la remise en cause de l'exclusivité de production des *utilities*. Ce changement a été confirmé et amplifié par le *Energy Policy Act* - EPA (1992) ouvrant définitivement la production à la concurrence, ainsi que l'accès non discriminatoire aux réseaux de transport (mais pas de distribution) à tous les producteurs électriques. En Europe, le Royaume-Uni (1990) et les pays scandinaves (1991) ont été les premiers à réformer leur industrie électrique (Newbery, 2005). La libéralisation de l'industrie électrique a été organisée autour de deux directives adoptées en 1996 et en 2003, respectivement.¹⁵⁵ Les deux directives ont jeté les bases de l'ouverture : la dissociation (*unbundling*) des activités au long de la chaîne de valeur entre les activités concurrentielles (négoce, production et fourniture) et les facilités essentielles au niveau de l'infrastructure de transport qui relèvent du monopole naturel ; l'accès de tiers aux réseaux ; la mise en place de régulateurs indépendants pour la surveillance de la concurrence et le fonctionnement des activités restées en monopole ; l'ouverture progressive des marchés électriques qui a été conclue en juillet 2007. La mise en place des réformes n'est toutefois pas homogène entre les pays ce qui explique la diversité des situations existantes, alternant entre marchés très compétitifs (Royaume-Uni et Italie) et d'autres restant très concentrés (Allemagne et France).¹⁵⁶

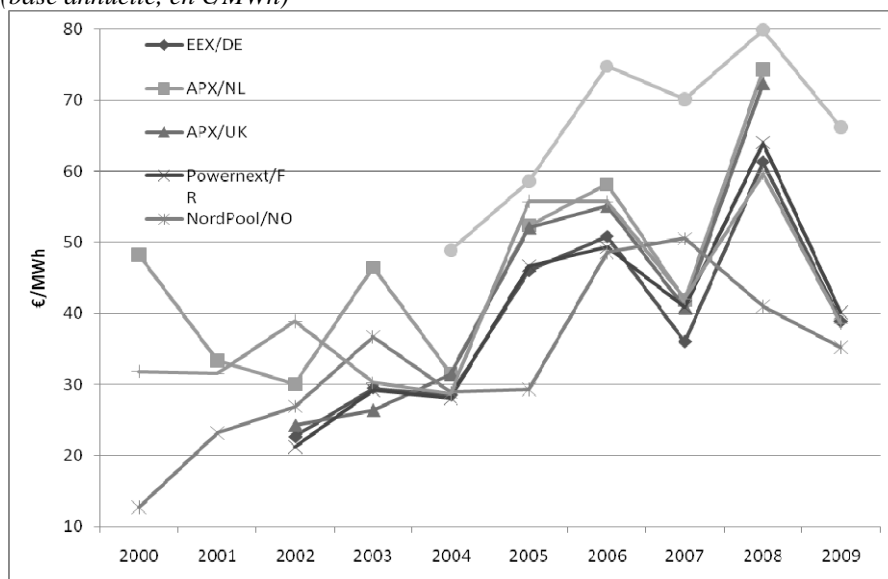
Malgré l'introduction de la concurrence, les prix de l'électricité sur les marchés *spot* (au comptant) n'ont pas baissé, bien au contraire (graphique 40). Cette augmentation s'explique par une série de raisons : l'augmentation des cours des matières premières ; la rareté conjoncturelle ou structurelle (le manque de capacité dans la production et/ou transmission) ; et l'existence d'un pouvoir de marché.¹⁵⁷ Etant donné que la libéralisation a démarré dans une période de surcapacité générale, l'explication de l'augmentation des prix doit être trouvée dans les facteurs conjoncturels.

¹⁵⁵ La directive électricité de 1996 est transposée en France par la loi du 10 février 2000 qui met en place la libre concurrence, le responsable indépendant du réseau de transport, et le régulateur du marché. Elle est complétée par la loi du 3 janvier 2003.

¹⁵⁶ Voir par exemple Finon et Midttun, 2004.

¹⁵⁷ cf. Percebois, 2008, p. 17.

Graphique 40. L'évolution des prix au comptant de l'électricité sur les marchés de gros européens entre 2000 et 2009 (base annuelle, en €/MWh)



Source : Enerdata, 2009 ; Commission Européenne, Energy Sector Inquiry 2005/2006.

A court et à moyen termes, les prix *spot* sont sensibles aux variables qui conditionnent la demande pour l'électricité telles que la météorologie et l'activité industrielle. De plus, en raison du poids des sources fossiles et charbon dans la production électrique européenne, le prix *spot* doit intégrer aussi le prix des permis d'émission de CO₂ suite à la mise en place du marché d'échange de permis d'émission (*European Trading System – ETS*). De même, l'augmentation des prix des énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon) a eu un impact très important sur les prix finals de l'électricité. Néanmoins, cette augmentation ne peut expliquer complètement la hausse des prix de l'électricité.

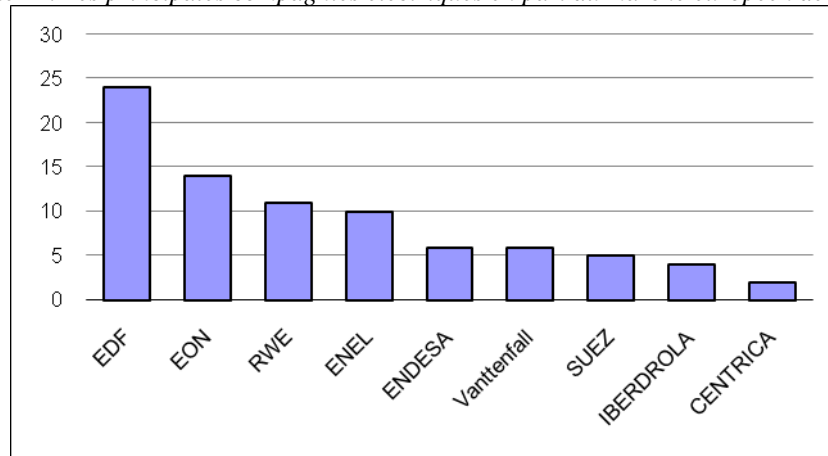
En fait, la récente augmentation des prix de l'électricité a été aussi accompagnée par une plus grande volatilité. D'une part, les variations du prix du CO₂ ont contribué à la volatilité du prix final de l'électricité. D'autre part, cela peut être lié à l'exercice de pouvoir de marché par les grandes entreprises électriques. L'électricité n'étant pas un bien (facilement) stockable, l'équilibre entre l'offre et la demande doit être assuré à tout moment sous peine d'écroulement du réseau. Les grands électriciens sont incités à adopter des comportements stratégiques de manière à augmenter artificiellement les prix tels que le retrait de capacité de production en période de pointe (Boiteux, 2007 ; Percebois, 2008). Et aussi en période creuse comme Marques et al. (2008) ont pu démontrer dans le cas du marché ibérique.

Le secteur a été récemment secoué par un mouvement de concentration à l'échelle continentale. Il reste marqué par la présence des anciens monopoles (graphique 41). En effet, les grandes entreprises électriques européennes ont adopté des stratégies de redéploiement géographique et de diversification de l'offre de services, ainsi que de croissance externe par des fusions et acquisitions.¹⁵⁸ Par ailleurs, les fusions-acquisitions témoignent de l'intérêt des anciens monopoles

¹⁵⁸ Depuis 1998, quatre groupes ont été à l'origine de la moitié des fusions et acquisitions (EDF, EON, RWE, Suez). En France, EDF a pris le contrôle des électriciens allemand EnBW et anglais Centrica, et dispose de participations dans le capital de nombre d'autres entreprises européennes comme l'électricien italien Edison. En Allemagne, le premier électricien, EON, rachète Ruhrgas et acquiert une position importante dans le marché du gaz. Son rival RWE a pour sa part acheté Thyssengas. En 2007, l'ancien monopole italien Enel s'associe au groupe espagnol Acciona et ensemble prennent le contrôle de l'électricien espagnol Endesa, à la fin d'un

publics gaziers à entrer dans le marché de l'électricité en élargissant ainsi leur domaine d'action, simultanément à l'intérêt réciproque des électriciens pour le marché du gaz.

Graphique 41. Les principales compagnies électriques en part du marché européen de 2006 (en %)



Source : Percebois, 2008.

Les effets de la concentration sur les prix dans l'avenir sont incertains. D'une part, l'exercice du pouvoir de marché peut contraindre la concurrence et augmenter les prix (Tirole, 1988). D'autre part, l'intégration peut baisser les coûts par un effet d'internalisation de la double marge et de l'augmentation de l'efficacité de production et de coordination (Tirole, 1988 ; Baumol et al., 1982 ; Williamson, 1971). Une autre question importante est l'effet de la concentration sur les investissements et sur l'innovation.

Les capacités excédentaires sont en train de se réduire depuis le début de la libéralisation et des investissements en nouvelles capacités de production sont nécessaires pour assurer la sécurité d'approvisionnement dans les décennies à venir. De plus, les réseaux de transmission européens ont bientôt besoin d'être modernisés. Les équipements ont un cinquantaine d'années en moyenne, ce qui commence à se traduire par une perte de la qualité du service.¹⁵⁹ L'augmentation de la production décentralisée et le raccordement de la production intermittente créent des difficultés supplémentaires au niveau du pilotage du réseau. Par conséquent, les pannes, ruptures et défaillances du réseau sont devenues plus fréquentes. On se souvient des pannes électriques survenues à Londres et en Italie en 2003. Plus récemment, le 4 novembre 2006, un problème d'intégration de l'énergie éolienne (intermittente) dans le réseau allemand a plongé dans le noir une large partie de l'Europe centrale.

En ce qui concerne l'innovation, les premières années de l'ouverture ont été marquées par une réduction des dépenses en R&D (Jamasp et Pollitt, 2005ab). Selon l'argument « Schumpétérien », le retour aux compagnies électriques de grande taille peut être favorable pour les activités innovantes. La grande entreprise serait disponible pour investir d'avantage dans les innovations plus risquées

processus commencé par une offre publique d'achat (OPA) hostile d' EON sur Endesa et qui a toujours reçu la désapprobation du gouvernement de Madrid. Cela fait suite à des rumeurs d'OPA qu' Enel aurait essayé de lancer contre sur le groupe franco-belge Suez, lesquels ont précipité la fusion de Suez avec Gaz de France. Là aussi l'intervention du gouvernement (cette fois français) a été fondamentale pour l'achèvement de l'opération. Voir Percebois, 2008.

¹⁵⁹ En France, les interruptions de courant se font de plus en plus souvent et sont en moyenne plus longues (Angelier et al., 2008).

mais à grand potentiel pour l'avenir (e.g. l'hydrogène et les piles à combustible). L'innovation est une composante très importante à moyen et long termes pour diminuer les coûts de production et elle est précisément celle dont le schéma d'incitations est le plus touché par la libéralisation.

En conclusion, la naissance et le « take-off » de l'industrie électrique ont pris plus de 60 ans dans les pays d'Europe occidentale. Depuis la naissance jusqu'à la diffusion après la Seconde Guerre, les industries électriques nationales connaissent des situations différentes concernant la demande, l'offre (structure et technologie) et la configuration institutionnelle. L'Etat a généralement eu un rôle important pour le développement des réseaux. Ce rôle a été central en Allemagne et au Royaume-Uni. A partir de la fin de la Seconde Guerre, au moment de la croissance forte de l'industrie électrique, l'Etat devient l'acteur principal de cette industrie un peu partout en Europe. Il a intégré l'ensemble de la chaîne de façon à lever les goulets d'étranglement à la croissance (notamment par la standardisation de la technologie) et faire jouer au mieux les effets positifs (effets de club et d'envergure) et ainsi dépasser plus vite la taille critique. Plus récemment, avec l'arrivée à maturité, les effets positifs étant pour l'essentiel établis, les désavantages de l'intégration verticale deviennent plus importants (diminution de la spécificité de l'actif et inefficiences d'une organisation bureaucratique). A ce moment, le bien fondé de l'existence d'un agent unique est remis en question et les conditions sont réunies pour que le secteur soit ouvert aux compagnies privées.

Les réformes mises en place ont accru la concurrence dans l'industrie, mais elles n'ont pas pu empêcher l'apparition de nouveaux dysfonctionnements (augmentation des prix, pannes plus fréquentes, concentration du marché, etc.). En septembre 2007, la Commission Européenne a présenté le troisième train de propositions législatives parmi lesquelles figure la séparation des activités de production et de distribution d'électricité.

Tableau 17. Synthèse du développement de l'industrie électrique en Europe depuis 1880

	Principaux usages	Technologies d'utilisation	Acteurs	Technologies de production	Evolution du réseau
Phase de naissance : 1880-1913 <i>Enfance</i>	Eclairage Transports publics	Lampe à incandescence Moteur électrique	Etats Communes Compagnies électromécanique Industrie Banques	Thermique (charbon) Hydraulique	Petits réseaux urbains
Phase d'élargissement : 1914-1938 <i>« take –off »</i>	Industrie	Moteur électrique	Etat Communes	Thermique Hydraulique (grande échelle)	Interconnexion des réseaux régionaux
Phase de croissance : 1945-1980 <i>Diffusion</i>	Domestique services	Electroménager Electronique	Etat Communes (compagnies d'économie mixte en Allemagne)	Thermique Hydraulique Nucléaire	Réseaux de transport national Réseaux de distribution étendus
Phase de maturité : >1980 <i>Déréglementation</i>	Domestique services	Electroménager Electronique	Sociétés privées, sociétés publiques-privées	Thermique (cycles combinés) Hydraulique Nucléaire Renouvelable	Interconnexions internationales (réseau continental)

2.2. L'importance de la coordination des acteurs pour la réalisation des investissements : le cas de l'industrie gazière

L'analyse de la formation de l'industrie gazière permet de comprendre les cheminements probables du développement de l'hydrogène en Europe. En fait, l'hydrogène et le gaz naturel partagent beaucoup de points en commun. Premièrement, il s'agit tous les deux de vecteurs énergétiques gazeux aux caractéristiques identiques (haut pouvoir énergétique; faible contenu énergétique par volume) qui conditionnent les besoins en termes d'infrastructure. Deuxièmement, l'infrastructure de l'hydrogène peut dans certains cas emprunter l'actuelle infrastructure du gaz naturel avec quelques adaptations. Troisièmement, le gaz naturel peut être davantage propre par capture, stockage du carbone et utilisation de l'hydrogène restant pour les usages énergétiques. Quatrièmement, l'hydrogène n'existant pas à l'état pur, il doit être produit. Au jour actuel, 95% de l'hydrogène est produit à partir du vaporeformage dans le monde.¹⁶⁰ Cinquièmement, l'hydrogène ne doit pas coûter plus cher que les autres carburants (ajusté en fonction du rendement énergétique de la pile à combustible), à l'exemple du gaz naturel qui ne dispose pas non plus d'usage captif. Enfin, les principales raisons expliquant l'intérêt pour l'hydrogène - sécurité énergétique (par la valorisation des sources énergétiques domestiques), environnement et efficacité énergétique -, ont déjà été évoquées lors de l'introduction du gaz naturel dans le marché, un demi-siècle auparavant. La spécificité technique de l'industrie gazière conditionne toutefois la planification des investissements.

La grande difficulté de l'industrie du gaz naturel est le transport du gaz. Ce dernier doit être amené depuis les endroits de production parfois très éloignés, ce qui présuppose l'existence d'une infrastructure ralliant les régions de production aux zones de consommation. Cela demande des

¹⁶⁰ <http://www.iea.org/Textbase/techno/essentials.htm> (accès du 2 mai 2008).

investissements en gazoducs, centrales de compression, etc., avant le début de l'exploitation commerciale. L'industrie gazière est alors une industrie fortement capitalistique marquée par des coûts fixes irrécupérables ('*sunk costs*') à long délai de récupération et des économies d'échelle importantes. L'échelle et le risque des investissements dans les projets de gazoducs rendent leur financement complexe et dépendant des perspectives de demande (Percebois, 1989). L'existence de débouchés solvables est une condition primordiale pour la réalisation des investissements. En pratique, les projets ne seront viables que si un niveau de demande suffisante est assuré dès le départ. Sans une coordination entre les acteurs (producteurs, transporteurs, consommateurs), il est difficile que le gazoduc voie le jour. Les nécessités de financement et de coordination ont été à la base de la prise en main des investissements par l'Etat dans le passé.

Dans ce chapitre, nous cherchons à comprendre comment l'infrastructure de gaz a pu se mettre en place afin de tirer des leçons pour le développement de l'hydrogène. Dans un premier temps, nous allons étudier les caractéristiques économiques du gaz naturel et ses impacts sur l'organisation de l'activité pour ensuite analyser les principales étapes de l'évolution de l'industrie gazière en Europe, depuis l'époque du gaz de ville jusqu'à l'arrivée à la maturité du gaz naturel. Des comparaisons entre les pays sont faites de façon à comprendre les différents profils d'intervention de l'Etat pendant la diffusion du gaz sur le marché.

2.2.1. L'économie du gaz naturel

L'industrie gazière est très capitalistique surtout au niveau du transport. Cette caractéristique conditionne la manière dont les investissements sont entrepris. Ceux-ci doivent être assurés des débouchés avant que l'infrastructure soit mise en place.

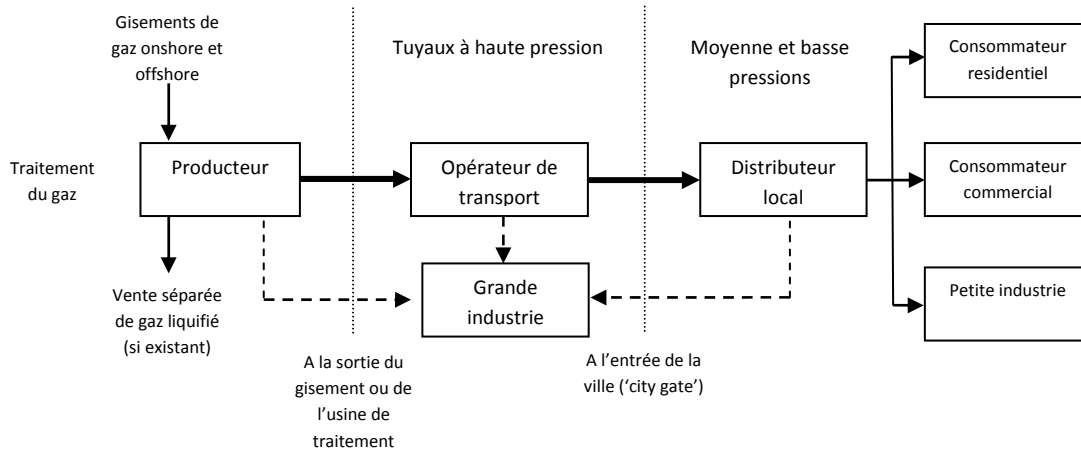
A. Coût de transport, prix et demande

Le graphique 42 présente la structure classique de l'industrie du gaz naturel lorsqu'il est transporté par pipeline. Le prix au consommateur est très influencé par les coûts techniques, dont les trois quarts correspondent à l'amortissement des coûts fixes (essentiellement liés au transport et à la distribution).¹⁶¹ Ainsi, le gaz ne peut être produit et consommé que dans les régions pour lesquelles la demande est assez dense et située suffisamment proche des gisements.¹⁶²

¹⁶¹ cf. Angelier, 1994, p20.

¹⁶² cf. Julius et Mashayekhi, 1990, p. 59.

Graphique 42. La chaîne classique du gaz naturel

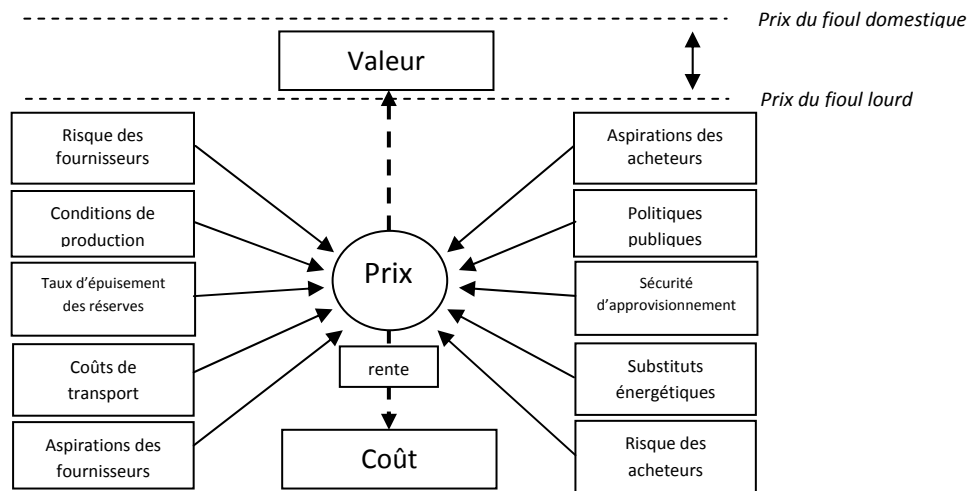


Adapté de Peebles, 1992.

Du fait de son état gazeux, le gaz naturel possède une densité énergétique inférieure à celle de ses substituts. Le contenu énergétique du pétrole est 1000 fois supérieur au gaz naturel à l'état gazeux. Ce dernier est 7 à 10 fois plus cher à transporter que le pétrole (Chevalier, 2004). De plus, son transport n'est pas aisé comme pour les hydrocarbures liquides. En effet, avant que les premiers mètres cubes de gaz puissent être livrés, il faut mettre en place un support physique sophistiqué et coûteux ralliant les zones de production aux zones de consommation. Cela demande des investissements lourds en gazoducs, centrales de compression, trains de liquéfaction et de regazéification dans le cas du transport de gaz naturel liquéfié par méthanier, etc., avant le début de l'exploitation commerciale. Dans le cas des gazoducs, les coûts dépendent principalement du diamètre du pipeline, lequel est fonction du pic de la demande et de la longueur du pipeline (Julius et Mashayekhi, 1990). Les droits de passage sont aussi une composante très importante. L'industrie gazière est ainsi une industrie fortement capitalistique marquée par des coûts fixes irrécupérables à long délai de récupération (Peebles, 1992). Les coûts échoués sont alors à l'origine d'importantes économies d'échelle réalisables uniquement pour un niveau de demande dense et assez large.

Le prix est un argument fondamental pour la diffusion du gaz sur le marché. A l'inverse de l'électricité pour l'éclairage ou du pétrole pour les transports, le gaz naturel ne dispose pas d'un marché captif. En l'absence de marchés captifs, le prix du gaz naturel ne peut pas être supérieur aux prix de ses substituts proches sinon il ne trouve pas de débouchés. La formulation du prix a historiquement suivi une logique « netback » où la rente totale est calculée en déduisant les coûts au prix maximum de marché (Angelier, 1994). Même dans les marchés arrivés à maturité, dont le marché nord américain et le marché britannique, les grands mouvements des prix de court-terme évoluent entre un maximum fixé par le prix du fioul domestique (*crude oil*) et un minimum fixé par le fioul lourd (*fuel oil*).

Graphique 43. La formation du prix de gaz naturel



Adapté de Peebles, 1992, p.230.

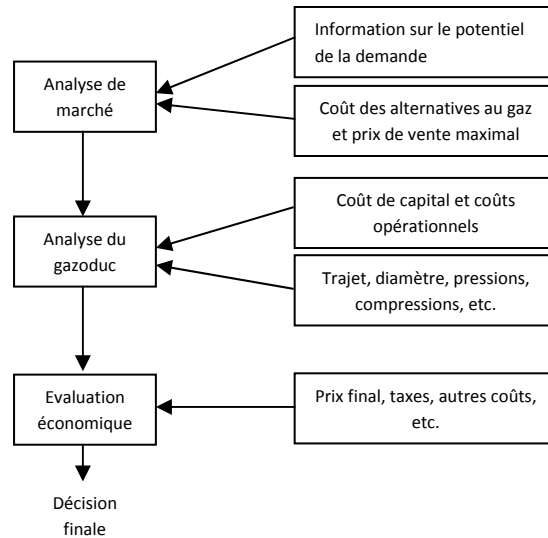
Le prix est également affecté par d'autres éléments comme le risque et les aspirations des fournisseurs et acheteurs, ainsi que la rente et la fiscalité (Peebles, 1992). La rente du pétrole est traditionnellement plus élevée que celle du gaz (Angelier, 1994). Plusieurs facteurs expliquent cette différence comme par exemple le désir de valorisation du gaz disponible par un pays producteur, ou de diversification énergétique d'un pays consommateur. Quant à la fiscalité, il s'agit d'un outil important de politique énergétique qui permet d'influencer la compétitivité des énergies en fonction des intérêts environnementaux, de sécurité énergétique, d'efficacité technique, de service public, des effets dynamiques dans l'économie, etc.

En raison des investissements lourds, la mise en place des infrastructures doit être rapide - de façon à ne pas retarder la pénétration du gaz naturel dans le marché - et, en même temps, les capacités doivent être utilisées au maximum (Julius et Mashayekhi, 1990). L'existence de débouchés initiaux sûrs et stables est une condition *sine qua non* pour la concrétisation du projet.

B. La planification des gazoducs

La mise en place de nouveaux réseaux de gaz naturel oblige à l'analyse simultanée des ressources disponibles et des coûts de fourniture, d'une part ; et des études de marché pour estimer les volumes demandés et d'élasticité au prix, d'autre part (graphique 44).

Graphique 44. Planification d'un investissement dans un gazoduc



Adapté de Peebles, 1992, p. 204.

La demande totale de gaz naturel peut être divisée en trois grands secteurs : le secteur résidentiel et commercial ; le secteur industriel ; et le secteur de la production d'électricité (Julius et Mashayekhi, 1990 ; Peebles, 1992). Le secteur résidentiel et commercial utilise le gaz principalement pour le chauffage de l'espace et de l'eau et pour la cuisson. Dans chaque région du globe, la pénétration du gaz dans ce secteur est conditionnée par des variables comme le standard de vie, les revenus, le type de construction, la densité de la demande, le climat, etc. Il s'agit d'un secteur financièrement très intéressant (« premium ») où les qualités du gaz en termes de propreté, de sécurité et de pouvoir calorifique sont le plus valorisées (Cassidy, 1979). Toutefois, les coûts d'approvisionnement sont plus élevés par rapport aux autres segments de marché (Peebles, 1992). D'une part, un réseau local de distribution à basse pression (plus étendu que le réseau de transport) est nécessaire pour acheminer le gaz jusqu'à l'endroit de consommation ce qui augmente considérablement les coûts.¹⁶³ D'autre part, la fluctuation saisonnière de la demande rend plus difficile la gestion du système (notamment pour le stockage du gaz et la gestion des pointes de consommation).

Le secteur industriel utilise le gaz naturel pour un grand nombre d'applications, étant donné ses propriétés calorifiques, environnementales et de sécurité très appréciées. Dans la plupart des applications, le gaz peut être remplacé par un grand nombre de sources ou vecteurs énergétiques. Son prix est alors plus faible dans le secteur industriel en raison de la concurrence inter-combustible permise par la flexibilité des processus productifs. Néanmoins, cette flexibilité est mise à profit par les entreprises gazières à travers la signature de contrats interruptibles. C'est-à-dire que l'industriel accepte de se voir couper le gaz pendant les périodes de pointe en échange d'un prix plus attractif. Pour la compagnie gazière, il est plus rentable de vendre le gaz à des prix très bas que de devoir le stocker.

Enfin, les avancées techniques dans la construction de centrales à cycles combinés et de cogénération de chaleur et électricité ont rendu le gaz naturel davantage important pour la production électrique (Islas, 1997 ; Martin, 1996). Plus flexible en termes de construction, de mise en

¹⁶³ La densité de la demande est une variable très importante : le coût de fourniture d'une zone peu dense est 5 fois plus élevé que pour une région très dense (Julius et Mashayekhi, 1990).

production, et de coûts de capital, il est aussi moins polluant que le charbon et le fioul. La consommation de gaz dans le secteur électrique a historiquement suivi celle du secteur industriel. Ici, le gaz est surtout utilisé pour la génération d'électricité dans les périodes de moyenne charge (*middle load*) et de pointe (*peak load*).

En somme, la segmentation du marché permet aux entreprises gazières à la fois l'optimisation des recettes et une certaine souplesse dans la planification des investissements (Peebles, 1992). Les grands acheteurs industriels et le secteur électrique assurent les quantités nécessaires pour mettre en place l'infrastructure initiale, laquelle sera élargie par la suite. L'entrée dans le marché résidentiel et commercial - où le prix du gaz est plus élevé - se fait de manière plus lente parce que la demande dépend de la construction du réseau de distribution. L'existence de chauffage collectif et de réseaux de gaz de ville peuvent toutefois permettre au gaz d'atteindre plus rapidement ces marchés « premium ».

Le développement du gaz naturel est également marqué par les relations contractuelles de long terme entre les parties, particulièrement dans les réseaux de transport. Les apports en capital nécessaires sont freinés par le coût intensif de l'infrastructure et le fait qu'une fois mise en place, elle ne peut que très difficilement servir à approvisionner un autre débouché.

2.2.2. La spécificité des investissements et la recherche d'arrangements institutionnels hybrides

La nature complexe de la transaction peut rendre très coûteux, voire impossible, le recours au marché. L'intégration et la quasi-intégration verticale sont alors les alternatives possibles pour la réalisation des investissements.

Coase (1937) introduit la notion de coûts de transaction pour expliquer l'existence de formes organisationnelles alternatives au marché. L'internalisation des activités dans l'entreprise ou le recours à des formes hybrides (p.ex. contrats à long terme) peuvent être des arrangements plus efficaces que le marché, justifiés par la diminution des coûts de transaction. Dans son analyse de 1960, Coase établit une typologie des coûts de transaction sur le marché liés à l'utilisation du mécanisme prix : coûts de recherche et d'information ; coûts de négociation ; et coûts de surveillance. Par ailleurs, l'auteur rappelle que le mécanisme d'allocation des ressources au sein d'une firme n'est pas le système prix mais la hiérarchie. Cette forme d'allocation entraîne des coûts d'internalisation et d'organisation interne qu'il faut prendre en compte lors de la décision de l'arrangement institutionnel adéquat pour la transaction.

Un apport substantiel au cadre théorique développé par Coase a été amené par Williamson (1985). L'unité d'analyse n'est plus la transaction mais le contrat. Au delà de la rationalisation et de l'élargissement rationalisé et étendu du concept de coûts de transaction, Williamson a introduit une nouvelle notion d'importance majeure, celle de l'*actif spécifique* sous-jacent à la transaction, et qui aura un rôle clé pour le choix de la forme opportune de coordination : marché à gré (*spot*) ; configuration hybride (p.ex. contrats de long terme) ; ou hiérarchie (firme).

Le choix entre le marché ou la hiérarchie résulte de l'analyse comparative des coûts de transaction associés à chacune des formes de gouvernance. Selon l'analyse de Williamson (1994), le choix de la structure de coordination se fait à partir de la règle de l'*efficacité comparative des coûts de*

transaction. Ainsi, l'organisation interne sera préférable lors d'une transaction complexe nécessitant la conclusion d'un grand nombre de contrats par le marché.

La comparaison des modes contractuels est déterminée par les attributs de la transaction. Williamson (2005, 1985) décompose ses attributs en : spécificité des actifs ; incertitude ; et fréquence des transactions. La spécificité de l'actif ensemble avec l'incertitude sont particulièrement importants (Williamson, 2005).

Un actif est spécifique lorsque la transaction demande la mise en place d'investissements durables et non redéployables dans une autre activité sans une perte substantielle de valeur (Williamson, 1985, 2005).¹⁶⁴ Dans son travail de 1985, Williamson a détaillé ce concept en attirant l'attention sur différents genres de spécificité des actifs. Parmi les dimensions identifiées, on retrouve : *la spécificité de site* (le résultat de la production n'est pas facilement déplaçable) ; *la spécificité des actifs physiques* (le procédé ou le produit ont été conçus « sur mesure ») ; *l'actif dédié* (la capacité de production n'a pas d'autres débouchés) ; *la spécificité temporelle* (l'ajustement de la production à la consommation dépend de leur synchronisation).

Les transactions entraînent de l'incertitude parce que le monde est complexe et évolue de façon imprévisible. Il est impossible de pronostiquer toutes les situations possibles. Tout d'abord, l'encadrement institutionnel peut rendre plus ou moins prévisible le déroulement de la transaction (North, 1990). De plus, les agents agissent de manière rationnelle mais de façon limitée, car ils ne disposent ni de toute l'information ni de toute la connaissance sur la transaction (Simon, 1959, 1991). Par conséquent, les contrats ne sont pas complets ce qui laisse place à des comportements opportunistes. L'opportunisme est une deuxième marque de l'analyse comportementale chez Williamson. Les agents ont intérêt à biaiser, voir cacher l'information pertinente de façon à induire délibérément en erreur leur contrepartie et mieux servir leurs intérêts propres, ce qui rend l'information stratégique et plus coûteuse pour la contrepartie. Le risque de comportements opportunistes augmente l'incertitude et ainsi les coûts de transaction.¹⁶⁵

Lorsque la transaction demande la mise en place d'investissements durables, donc très spécifiques, une des parties peut se retrouver dans la dépendance contractuelle de sa contrepartie. Williamson (1995) surnomme « transformation fondamentale » ce changement entre les phases *ex ante* et *ex post* au contrat. La probabilité de comportements opportunistes est plus grande. L'augmentation des coûts de transaction rend la gouvernance par le marché plus difficile (Williamson, 1985). Les formes de contrôle adoptées sont donc plus contraignantes (Ménard, 2004).

Un engagement coopératif peut alors se mettre en place de façon à gérer les problèmes avec l'opportunisme et l'incertitude. Cette coopération entre les parties (forme hybride) est généralement encadrée par un contrat afin de rendre possible la transaction. Cela concerne particulièrement le cas des « réseaux », définis comme tous les arrangements rassemblant un ensemble de relations contractuelles entre les entités autonomes (Ménard, 2004).

¹⁶⁴ « (...) *la spécificité de l'actif est la grande locomotive à laquelle l'économie des coûts de transaction doit beaucoup de son contenu prédictif. Si cette condition est absente, le monde du contrat est amplement simplifié.* » (Williamson, 1985, p. 56)

¹⁶⁵ « *The general proposition here is that when the gains to be had by insistence upon the literal enforcement of the contract exceed the discounted value of continuing the exchange relationship, defection from the spirit of cooperation can be anticipated (...)* » (Williamson, 1991, p. 273).

Les arrangements hydrides existent parce que les marchés sont perçus comme incapables de réunir les ressources et capacités adéquats (Teece et Pisano, 1994). Cela concerne en particulier la mise en commun de ressources (*'pooling ressources'*) pour la réalisation d'un investissement nécessaire à la transaction. Cette relation doit logiquement perdurer dans le temps, ce qui demande coopération et coordination entre les entités partenaires.

Dans le cas de l'industrie gazière, l'investissement en capitaux physiques accroît la spécificité de la transaction (spécificité de site, actif dédié). De plus, une entité privée n'est pas capable à elle seule d'apporter le montant d'investissements nécessaire au démarrage de la filière (spécialement les réseaux de transport), ce qui rend la fourniture du bien plus complexe. Une fois l'infrastructure mise en place, elle ne peut que très difficilement servir à approvisionner un autre débouché. En raison de cette spécificité des investissements, le producteur devient vulnérable au comportement de l'acheteur (Williamson, 1985, 2005). A son tour, l'acheteur est aussi concerné par l'opportunisme du producteur, lorsqu'il ne peut pas recourir à un autre fournisseur à des conditions économiques (Percebois, 1989). Afin de réduire le risque des comportements opportunistes - dits de « hold-up » - des deux cotés, les parties signent des contrats de long terme. Ainsi, les gazoducs d'importation de gaz en Europe ont été mis en place dans le cadre de consortiums internationaux entre les entreprises gazières des pays importateurs et les monopoles publics des pays exportateurs, structurés par des contrats à long terme avec des clauses de contrôle (p.ex. « take or pay », prix). Les contrats de long-terme permettent de réduire l'incitation aux comportements déviants, ainsi que de partager les risques d'investissement entre les parties contractuelles. Les clauses « take or pay » (payer la quantité prélevée dans tous les cas) pèsent sur l'acquéreur à l'avantage du producteur alors que les clauses de stabilité des prix et d'indexation au prix du pétrole réduisent le risque-prix de l'acquéreur, au détriment du producteur. Les arrangements contractuels ont ainsi permis d'instaurer la confiance entre les parties et d'entamer les investissements.

2.2.3. Démarrage et évolution de l'industrie gazière en Europe

L'industrie du gaz naturel trouve son origine dans le gaz de ville du XIXe siècle et de la première moitié du XXe.¹⁶⁶ Le gaz de ville a d'abord établi les premiers réseaux dans les grandes villes et puis dans les villes de taille plus modeste. L'éclairage public et privé a constitué son premier grand marché. A la fin du XIXe siècle, ce débouché se voit menacé par l'introduction de l'éclairage électrique. La lutte technologique se poursuit jusqu'à ce que l'industrie gazière trouve dans les usages calorifiques son élan de croissance suivant. A partir des années 1920, les avancées technologiques et les excédents de production vont permettre de rationaliser la production dans des unités de grande taille plus efficaces ; ils sont aussi à la base de la création des premiers réseaux de transport au niveau régional (Paquier et Williot, 2005). Néanmoins, après les années 1930, la modernisation de la production n'a pas été suffisante pour empêcher le déclin du gaz manufacturé en raison de la raréfaction du charbon et de la concurrence de l'électricité et du pétrole (Odell, 2001).

¹⁶⁶ Pour une histoire du gaz de ville en Europe : Paquier et Williot, 2005.

A. L'émergence du gaz naturel dans les années 1950 et 1960

Le gaz naturel apparaît dans un contexte difficile pour le gaz de ville. Depuis les années 1930 et après la Seconde guerre mondiale, le gaz de ville ne cessait pas de perdre des parts du marché au profit de l'électricité et du pétrole. Le gaz naturel vient alors relancer l'industrie du gaz. Plus propre et ayant un pouvoir calorifique supérieur, le gaz naturel est aussi une énergie très compétitive grâce aux importantes découvertes de gisements des années de 1950 et 1960 un peu partout en Europe : entre 1938 et 1952, dans la vallée de Pô en Italie ; en 1951 le gisement de Lacq en France ; et celui de Slochteren en Groningue (Pays-Bas), en 1959. En 1965, le gisement West Sole est découvert dans les eaux anglaises de la Mer du Nord. En 1969, le gisement Ekofisk est découvert dans le plateau continental norvégien de la mer du Nord. A la fin des années 1950, l'Italie devançait la France, l'Autriche, et l'Allemagne en production de gaz naturel.¹⁶⁷

A l'issue de la Seconde Guerre, la reconstruction économique avait besoin d'énergie, ce qui explique le soutien public à la nouvelle source (Smit, 2006 ; Angelier, 1994). Les premiers réseaux de transport et de distribution de gaz naturel voient alors le jour. Ceux-ci partent des zones de production pour atteindre les grands centres de consommation. L'introduction du gaz naturel dans les grandes villes fût facilitée par l'infrastructure du gaz de ville, laquelle a permis une progression plus rapide du « nouveau » gaz sur le marché (Paquier et Williot, 2006 ; Angelier, 1994).

La résurgence de l'industrie gazière grâce au gaz naturel est accompagnée d'un changement institutionnel radical qui facilite la transition énergétique (Odell, 2001 ; Angelier, 1994). En effet, les grandes entreprises nationales du gaz sont nées après le conflit telles que GDF en France, British Gas au Royaume-Uni, ENI en Italie ou Gasunie aux Pays-Bas.

En France, la loi de nationalisation de l'électricité et du gaz du 8 avril 1946 créa une entreprise nationale pour l'électricité (Electricité de France ou EDF) et une autre pour le gaz (Gaz de France ou GDF). GDF est le résultat de la fusion des sociétés gazières (en excluant les sociétés d'économie mixte) et les régies municipales. En Grande-Bretagne, le *Gas Act* de 1948 nationalise l'intégralité de l'industrie du gaz de cokerie britannique et la divise en une douzaine de régions de distribution (*'area boards'*) placées sous la coordination du *Gas Council*. En 1973, les régions de distribution et le conseil du gaz fusionnent pour donner place à l'entreprise publique du gaz « British Gas Company». En 1953, l'Etat italien crée la compagnie d'hydrocarbures nationale ENI (*'Ente Nazionale Idrocarburi'*) qui réorganise le secteur du pétrole et du gaz en Italie, en intégrant notamment la compagnie chargée du transport et de la distribution du gaz naturel, la SNAM (*Società Nazionale Metanodotti*). En 1963, l'Etat néerlandais en partenariat avec Exxon et Shell crée Gasunie, compagnie chargée de l'exploitation et du transport de gaz naturel provenant du gisement de Groningue.

Dans l'ancienne République fédérale d'Allemagne, l'industrie du gaz naturel se développe sur une base plus régionale. Elle est traditionnellement composée par les compagnies d'importation et de transport de gaz (Ruhrgas en tête), les transporteurs régionaux et les *utilities* locales (*'Stadtwerke'*) dont la propriété est dans la plupart des cas publique. Les contrats de démarcation géographique entre transporteurs, ainsi que les concessions attribués aux compagnies locales, ont créé des monopoles territoriaux en bloquant la concurrence (Teece, 1990).

¹⁶⁷ cf. Williot, 2005, p.69.

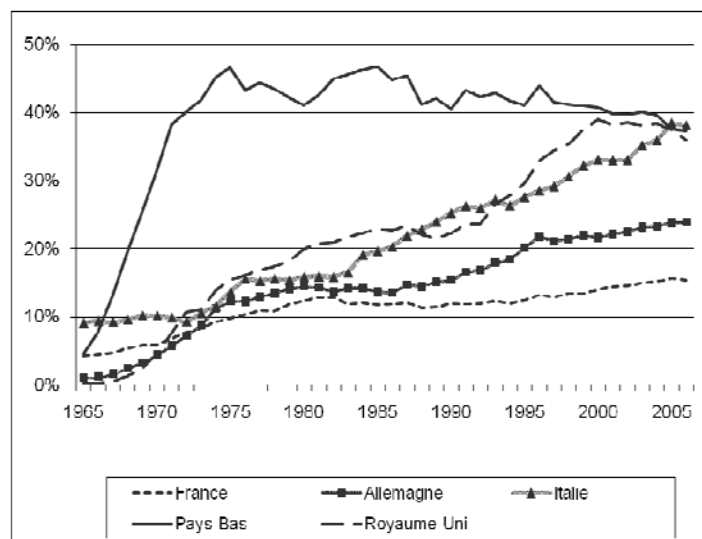
Les entreprises nationales vont tout d'abord moderniser les réseaux de gaz de ville et simplifier la procédure de rattachement des réseaux interrégionaux. Plus tard, elles procèdent à la conversion des réseaux de gaz de ville et à la mise en place des gazoducs de transport pour le gaz naturel.

Contrairement au gaz de ville, dont la pénétration a été limitée à un cadre local (éventuellement régional), l'industrie du gaz naturel s'est développée dans un cadre national. De fait, l'intervention des pouvoirs publics a joué un rôle important dans le démarrage et la diffusion du gaz naturel. Cela attire l'attention sur les faiblesses de la concurrence pendant la phase de croissance des industries réseaux. En effet, la recherche d'une demande solvable permettant la meilleure rémunération des capitaux investis se fait souvent sans tenir compte des externalités de croissance et des investissements de long terme.¹⁶⁸

B. La croissance des industries gazières nationales en Europe après les années 1960

Après les années 1960, le gaz naturel progresse rapidement dans les bilans énergétiques des principaux pays de l'Europe de l'Ouest grâce aux importantes découvertes et à l'évolution technologique dans la construction de gazoducs. La montée des pressions dans les tubes a permis de transporter le gaz de manière plus économique et depuis des origines plus éloignées (graphique 45).

Graphique 45. La part du gaz naturel dans la consommation énergétique primaire en Europe



Calculs de l'auteur à partir de BP (2007).

Au début des années 1960, l'industrie gazière européenne est en plein démarrage, alors qu'elle est déjà une industrie consolidée aux Etats-Unis, jouissant du tiers du bilan énergétique nord américain. En Europe, c'est en Italie que le gaz naturel détient le plus grand poids, en satisfaisant 10% de la consommation énergétique. La France et les Pays-Bas apparaissent au deuxième rang en termes de pénétration du gaz naturel, alors que ce dernier n'a pas encore de place significative au Royaume-Uni et en Allemagne.

La première phase, que l'on peut situer entre les années 1965 et 1975, est marquée par le rythme de croissance le plus élevé de l'histoire de l'industrie gazière européenne, particulièrement en

¹⁶⁸ cf. Angelier, 2007, p.65.

Allemagne, au Royaume-Uni et aux Pays-Bas. Pour ce dernier, la part du gaz naturel dans le bilan énergétique est passée de 5 % à presque 50 % entre 1965 et 1975. Le cas néerlandais montre une véritable révolution énergétique à la suite de la découverte du gisement de Groningen, en 1959 (encadré 2).

Encadré 2. Une révolution gazière rendue possible par la coopération entre l'Etat et les entreprises privées aux Pays-Bas

Cette transition énergétique a été organisée dans le cadre d'un partenariat entre l'Etat et les entreprises privées. Cela s'explique par la situation budgétaire difficile de l'Etat suite aux découvertes de gaz. Selon la loi néerlandaise, les ressources souterraines appartiennent à l'Etat, à condition qu'il achète les réserves de gaz d'avance ce qui signifie dans la pratique la faillite de l'Etat après les découvertes de Groningen (Smit, 2006). Un arrangement entre les acteurs impliqués a dû être trouvé pour contourner cette situation.

Ainsi, le développement du gaz naturel se fait autour de la compagnie N.V. Nederlandse Gasunie (ou Gasunie). Gasunie a été créée en 1963 pour mettre en place et opérer les infrastructures de transport de gaz naturel. Il s'agit d'une joint venture formée entre les entreprises privées Shell (25%), Exxon (25%) et l'Etat (50%). La participation des compagnies pétrolières était censée apporter l'expertise et l'efficacité productive, alors que la présence publique serait concernée par les questions de sécurité d'approvisionnement, de prix, de crédibilité publique et d'exploitation soutenable de la ressource. Particulièrement, la participation de l'Etat permet de simplifier la procédure de négociations et d'autorisations nécessaire pour la construction des gazoducs, ce qui accélère la construction du réseau de transport.¹⁶⁹

Le prix du gaz a été le miroir de la politique de promotion des ressources internes, focalisée sur la consommation du secteur résidentiel. Aux municipalités, lesquels géraient déjà l'industrie du gaz de ville, a été accordée la distribution du gaz naturel fourni par Gasunie. Les prix et les profits étant contrôlés par l'Etat. En ce qui concerne les autres secteurs (industrie et électrique), la compétitivité du gaz est assurée par une formule indexée sur les prix des combustibles substituts.

En somme, le succès du développement du gaz naturel aux Pays-Bas s'explique par : la grande disponibilité de la ressource ; une demande dense (bien qu'éloignée du centre de production) ; un rôle actif de l'Etat qui a établi un encadrement politique à long terme stable et un partenariat entre le public et le privé qui a pu montrer une bonne performance, notamment grâce à un meilleur partage de l'information entre les acteurs.¹⁷⁰

La période entre 1975 et 1985 est marquée par une progression plus modérée du gaz naturel dans les bilans énergétiques européens. Le Royaume-Uni est le seul pays à connaître une progression marquée du gaz naturel dans le bilan énergétique, passant de 16 % à 23 % pendant cette période, laquelle coïncide avec de nombreuses découvertes et mises en production de gisements en Mer du Nord.

La troisième phase, à partir de 1985, est marquée par une reprise de la croissance à un rythme toutefois moins élevé que celui de la première phase. Le Royaume-Uni reste le pays enregistrant la plus grande progression en Europe. L'augmentation à partir du début des années 1990 est

¹⁶⁹ Smit, 2006, p.6.

¹⁷⁰ Smit, 2006, p.9.

principalement due à la production d'électricité laquelle est montée au deuxième rang en termes de volume de consommation par secteur (DTI, 2007). Pourtant cette évolution générale devient plus instable dans la période récente avec l'arrivée à maturité de certains gisements en Mer du Nord. Le gaz naturel connaît une progression soutenue en Italie, de 28% en 1995 à 38 % en 2006, aussi portée par la consommation de l'industrie électrique (AIE, 2007). En Allemagne, suite à une période de croissance très soutenue comparable à celle des années 1965-1975, la part de marché du gaz naturel a grimpé de 14 % à 22 % entre 1985 et 1996 (AIE, 2007). Le rythme de croissance a depuis ralenti et la part de marché ne s'est accrue que très légèrement, portée surtout par la consommation résidentielle et commerciale. En France, la part du gaz n'a augmenté que de très peu entre 1986 (12 %) et 2006 (15 %) (DGEMP, 2007). Cette situation est due principalement au choix politique de développer le nucléaire aux lendemains des chocs pétroliers des années 1970.

Le gaz naturel a progressé rapidement dans les bilans énergétiques européens en couvrant 10% de la consommation primaire en 10-15 ans en moyenne. Ce rythme a été rendu possible grâce à la construction rapide des réseaux. Le tableau 18 présente le rythme de construction des gazoducs de transport dans quatre pays européens, entre 1970 et 1990.

Tableau 18. Taille du réseau de gazoducs à haute pression en Europe (1000 km)

	1970	1975	1980	1990	1990/1970
France	15,8	18,4	23,6	30,1	1,91
Allemagne	32,3	38,8	51,7	77,2	2,39
Italie	8,5	10,7	15,1	23,1	2,72
Pays-Bas	8,4	8,8	9,5	10,5	1,25
Royaume-Uni	2,5	5,7	12,1	13,5	5,40

Source : Estrada et al, 1995, p.321.

Le Royaume-Uni a multiplié par 5 son réseau de transport au cours de la période 1970-1990, à la suite de la diffusion du gaz naturel sur le marché et du rythme de mise en production des puits découverts dans la plate-forme britannique de la Mer du Nord. En Allemagne et en Italie, la longueur des pipelines de transport a également progressé très rapidement au cours de la période. Aux Pays-Bas, l'infrastructure principale a été construite juste après la découverte de Groningen, dans les années 1960, et le gaz naturel assure désormais un rôle majeur dans le bilan énergétique national. En France, le rythme de construction de pipelines de transport était plus stable par rapport à d'autres pays, reflétant l'évolution lente du gaz naturel dans ce pays.

Comparativement aux États-Unis, l'industrie gazière européenne est historiquement plus concentrée. Dans le premier pays, le transport est traditionnellement organisé au sein de monopoles privés sous le contrôle d'un régulateur fédéral, tandis que la distribution est gérée par des sociétés privées ou municipales sous le contrôle de la Commission publique des *utilities* de l'Etat correspondant (Angelier, 1994). Après la fin des années 1970, dans un contexte d'excédant généralisé (« bulle de gaz »), les prix et les tarifs ont été déréglementés et l'industrie a été restructurée, en séparant le transport et les activités de négociation. Par conséquent, les réseaux ont été ouverts aux producteurs et aux consommateurs, ce qui a conduit au développement de marchés spot aux principaux points d'interconnexion gaziers 'hubs' (MacAvoy, 2001; Teece, 1990).

En Europe, les entreprises ont rapidement constaté que les réserves nationales n'étaient pas suffisantes pour couvrir une demande croissante, il était donc nécessaire de bâtir une infrastructure coûteuse pour acheminer le gaz à partir de gisements lointains. Ces infrastructures ont été

construites entre les compagnies nationales des pays exportateurs et les consortiums internationaux formés par les sociétés gazières européennes. Les transporteurs des pays européens se sont mis ensemble de manière à agréger les différentes demandes de gaz requises pour justifier le lancement des projets d'importation (Estrada et al., 1995).

La production reste concentrée dans les mains d'un nombre réduit de producteur-exportateurs, pour l'essentiel des compagnies publiques : de l'Algérie (Sonatrach), de la Norvège (Statoil), de la Russie (Gazprom) et des Pays-Bas (Gasunie). La mise en place des gazoducs est accompagnée de la signature de contrats d'importation à long terme (20-25 ans) avec des clauses d'indexation sur le prix du brut et d'obligation d'achat (« take-or-pay »). Ces clauses sont censées partager le risque entre les intervenants, notamment le risque de l'évolution des prix (risque-prix) et le risque des quantités consommées (risque-marché). Cette architecture institutionnelle - oligopole dans la production et importation; marchés nationaux fermés à l'aval - a permis un développement stable des approvisionnements en Europe (Odell, 2001).

C. Les changements institutionnels à partir des années 1990

Les structures intégrées sont actuellement remises en question par le mouvement de libéralisation du marché gazier européen lequel se structure autour de deux directives, la directive 98/30 de juin 1998 et la directive 2003/55 de juin 2003. Ces directives ont introduit les principes suivants : la séparation (*unbundling*) de l'infrastructure essentielle des activités concurrentielles (surtout dans la production et distribution) ; l'accès de tiers aux réseaux ; et la tarification régulée des activités restant en monopole. Le but est de créer un marché gazier européen qui puisse mettre en concurrence les différents fournisseurs (la concurrence « gaz-gaz »), capable de garantir à la fois la sécurité énergétique et l'approvisionnement des consommateurs européens à des conditions plus avantageuses.

Bien que des progrès aient été enregistrés (p.ex. la durée des contrats a été réduite), les marchés sont encore loin d'une concurrence effective. Dans la plupart des cas, le marché national reste marqué par le poids de l'ancien monopole public. C'est le cas en France (avec GDF) et en Italie (ENI). Par ailleurs, dans les pays où l'Etat est moins présent sur le marché gazier (e.g. au Royaume-Uni), la structure de marché est moins intégrée en l'aval (Finon et Midttun, 2004). En outre, les ressources intérieures sont de plus en plus rares dans un contexte de croissance structurelle de la demande. Les pays européens doivent augmenter leurs importations de gaz ce qui soulève des questions de sécurité d'approvisionnement et d'investissement dans les infrastructures nécessaires pour amener ce gaz, lesquelles doivent être résolues par les agents publics et privés dans les années à venir.

L'ouverture est venue poser de nouvelles incertitudes pour les investissements. Par exemple, l'élimination de la clause « take or pay » peut augmenter la concurrence entre les fournisseurs et réduire les prix à court terme. Cela augmente toutefois le risque des investissements dans la mise en production des nouveaux gisements, lesquels seront probablement plus coûteux et éloignés des infrastructures existantes.¹⁷¹ Une réduction des investissements pourrait se traduire par une augmentation du prix à long terme, voire même menacer la sécurité d'approvisionnement de l'Europe.

¹⁷¹ Par exemple, dans le permafrost de la presqu'île de Yamal ou dans l'*offshore* des mers arctiques en Russie. Voir : Garanina, 2009.

En conclusion, les réseaux gaziers sont le résultat d'un processus historique et industriel (tableau 19). Ceux-ci se forment typiquement à partir des poches de production et de consommation et s'élargissent comme des gouttes d'huile aux gazoducs voisins en formant des réseaux régionaux. L'augmentation de la consommation oblige au remplacement des premiers gisements, entretemps arrivés à l'épuisement, par des sources plus lointaines. Des réseaux nationaux viennent alors donner une cohérence à l'ensemble des réseaux régionaux. Plus tard, les réseaux continentaux sont mis en place pour l'importation de manière à faire face à l'augmentation prévue de la demande de gaz. Ces investissements ont pu se faire grâce à la coordination des intervenants (producteurs, transporteurs, consommateurs), notamment par le biais des contrats à long terme.

L'expérience du gaz en Europe est une illustration de la faiblesse du marché dans l'élaboration de réseaux nationaux. Alors que l'industrie du gaz de ville a été généralement limitée à une échelle locale, l'industrie du gaz naturel s'est développée dans un cadre national et international. Dans les premières années, les États ont intégré toute la filière dans les entreprises nationales afin de faire jouer les économies d'échelle, d'envergure et de système, de manière à accélérer le développement de l'industrie. Dans un environnement concurrentiel comme celui du gaz de ville, la recherche d'une demande solvable pour maximiser le retour sur l'investissement est souvent faite sans tenir compte des externalités de réseau et des besoins d'investissements à long terme (Angelier, 2007; Noam, 1992). Ce comportement limite l'expansion du réseau au niveau national. L'intervention publique est alors nécessaire pour élargir les réseaux, en particulier pour interconnecter les réseaux régionaux fragmentés dans un grand système national (tableau 20).

Ainsi, l'intégration verticale et les contrats à long terme ont facilité la croissance de l'industrie gazière en Europe. A l'instar d'autres industries, à partir d'un certain niveau la consommation se stabilise et l'industrie entre dans une phase de maturité. A ce moment, les caractéristiques de l'industrie changent et l'efficacité de la structure industrielle précédente est remise en question. L'essentiel de l'infrastructure étant déjà installé, les agents cherchent maintenant plus de flexibilité et de transparence dans le marché de manière à pouvoir bénéficier de la concurrence pour à la fois, écouler la production et s'approvisionner au moindre coût. Cette volonté se heurte au monopole des compagnies de transport de gaz, le plus souvent de propriété publique en Europe. L'Etat entrepreneur cède alors la place à l'Etat régulateur, veillant à ce que la concurrence mène à des résultats efficaces (en termes de prix, quantités, qualité du service, service public, sécurité d'approvisionnement).

Tableau 19. Synthèse du développement de l'industrie gazière en Europe

	Principaux usages	Demande	Facteurs	Principales technologies	Acteurs majeurs	Evolution du réseau
Phase I. Naissance de l'industrie : 1800-1930 <i>Gaz manufacturé</i>	Eclairage (public, privé) Usages calorifiques (cuisson, chauffage, chauffe-eau)	Résidentiel Commercial Communes	Revenu Prix Mimétisme Haussmannisation	Lampe au gaz (Murdoch, Bunsen, Auer,..) Bec Bunsen Contrôle de Thermostat L'étanchéité des conduits	Concessions privées (F, I, UK) Capitaux mixtes et régies municipales (D)	Petits réseaux de distribution urbains (îlots de production et consommation)
Phase II. Déclin du gaz de ville : 1930-1950 <i>Gaz manufacturé</i>	cuisson chauffage chauffe-eau	Résidentiel Commercial	Prix Usages calorifiques	Compression à haute pression Conduites en acier	Sociétés privées Communes	Expansion des réseaux locaux Premiers réseaux régionaux
Phase III. Rénovation et diffusion : 1950-1980 <i>Transition vers le gaz naturel</i>	Production électrique (turbine à vapeur) Cuisson Chauffage (central ou collectif) Chauffe-eau	Industrie Production électrique Résidentiel Commercial	Ressources/Prix Densité de la demande Climat Revenu Propreté Efficience Sécurité énergétique Croissance économique	Transport (conduites, compression)	Entreprises publiques nationales Etat Communes	Conversion et expansion des réseaux de distribution Interconnexion des réseaux régionaux Création des réseaux de transport national
Phase IV. Expansion et arrivée à la maturité : 1980-20.. <i>Gaz naturel</i>	Production électrique (cycles combinés) Cuisson Chauffage (central ou collectif) Chauffe-eau	Résidentiel Commercial Production électrique Industrie	Importation Ressources/Prix Densité de la demande Climat Revenu Propreté Efficience Sécurité énergétique Croissance économique	Centrale électrique à cycles combinés	Privatisations Régulateur indépendant Etat	Expansion des réseaux de distribution et de transport Réseaux de transport à l'échelle continentale Gaz naturel liquéfié (GNL)

Tableau 20. Le développement des principales industries gazières nationales en Europe et aux Etats-Unis

	Allemagne	Pays-Bas	France	Italie	Royaume-Uni	Etats-Unis
Type de pays	Importateur	Producteur ; Exportateur	Importateur (initialement producteur)	Producteur ; Importateur	Producteur Exportateur (récemment importateur)	Producteur Importateur
Moteurs de la demande	1° Industrie 2° Production électrique 3° Résidentiel et commercial	1° Résidentiel et commercial 2° Industrie ; Prod.électrique	1° Industrie ; énergie 2° Résidentiel-tertiaire ; Industrie	1° Industrie 2° Résidentiel et commercial 3° Prod.électrique	1° Résidentiel 2° Industrie 3° Prod.électrique	1° Industrie 2° Résidentiel et commercial 3° Production électrique
Structure de l'industrie	Intégrée (transport/importation) ex.: Ruhrgas Distributeurs communales	Entreprise à capitaux mixtes (Gasunie) Distribution communale	Entreprise publique intégrée (GDF)	Entreprise publique intégrée (ENI)	1° Gas Act 1948 : <i>Area Boards</i> (12), <i>Gas Council</i> ; 2° Gas Act 1972: Entreprise publique intégrée (British Gas) 3° Privatisation et démembrement de British Gas (1980s, 1990s)	<i>Local distribution companies</i> (LDC) privées Transporteurs privés (pipelines)
Le rôle des acteurs publics	Régies locales Distributeurs à capitaux mixtes	Etat-partenaire Distributeurs municipaux	Etat-entrepreneur	Etat-actionnaire Distributeurs municipaux	Etat-proprétaire Etat régulateur (plus tard)	Etat régulateur (PUC ; FERC)
Phase de développement ¹⁷²	Transition vers la maturité	Maturité	Transition vers la maturité	Transition vers la maturité	Maturité	Maturité
Diffusion (nombre d'années avant atteindre 10% du bilan énergétique)	15 ans (1960-1974)	7 ans (1960-1967)	24 ans (1951-1975)	16 ans (1952-1968)	5 ans (1967-1972)	10 ans (1920-1930)

¹⁷² Selon la méthodologie d'Estrada et al. (1995) et les indicateurs de mise en place de la concurrence (part de marché, séparation des activités de transport...) des pays, à partir de l'information disponible dans les sites de la Commission de Régulation de l'Energie (www.cre.fr) et du groupe de régulateurs européens de l'électricité et du gaz (www.ergreg.org).

2.3 Perspectives pour la transition vers l'hydrogène

Dans le cas de l'électricité et du gaz, les industries ont tout d'abord atteint la masse critique avant que leur part de marché augmente rapidement par l'effet des externalités de réseau. Le gaz naturel a pu se diffuser plus rapidement grâce à l'infrastructure du gaz de ville dans les principales zones urbaines et industrielles et aux découvertes de gisements après la période 1950. L'électricité a bénéficié du transport à haute tension et de la mise en place de turbines autour des années 1920. Dans les deux cas, les réseaux ont commencé de façon décentralisée et puis se sont interconnectés pour former des systèmes régionaux, et ensuite nationaux. Cela a pris environ 60 ans pour l'électricité avant que celle-ci atteigne la masse critique et se diffuse à grande échelle. Le gaz de ville a échoué à devenir une énergie nationale et il a finalement été remplacé par le gaz naturel, lequel a eu besoin de quelques décennies seulement pour se diffuser en Europe.

La diffusion de l'électricité a bénéficié de la reconnaissance publique de la supériorité des technologies électriques par rapport à celles du gaz pour l'éclairage et pour les applications électroménagères. La supériorité du moteur électrique sur le moteur à vapeur a été déterminante pour l'augmentation de la consommation électrique dans le secteur industriel, laquelle a été le principal moteur de progression de l'électricité dans le marché au cours de la première moitié du XXe siècle. Les progrès techniques dans la production et la transmission ont jeté les bases pour le développement à l'échelle nationale. Le progrès technique est également important dans le cas du gaz naturel. En effet, sans les progrès dans la sidérurgie – particulièrement dans la construction de pipelines - la généralisation du réseau de gaz naturel ne serait pas possible.

Dans les deux situations, l'Etat a joué un rôle fondamental dans la création des premières infrastructures. Dans le domaine électrique, des compagnies nationales ont été créées pour harmoniser le fonctionnement et organiser la croissance de l'industrie. Dans le domaine du gaz naturel, les compagnies gazières nationales avaient comme objectifs la production de gaz et la mise en place des infrastructures (tableau 21). Il est vrai que le gaz naturel a bénéficié de circonstances favorables (découvertes locales, demande croissante d'énergie, infrastructures du gaz de ville, etc.) Néanmoins, nous pouvons poser la question suivante: est-ce que la diffusion du gaz naturel en Europe a été relativement rapide en raison de l'intervention précoce de l'Etat?

Le développement de réseaux énergétiques demande de lourds investissements avec de longues périodes de récupération, avant que ceux-ci atteignent la masse critique et se diffusent par l'effet des externalités de réseau. L'organisation du réseau d'hydrogène a des points en commun particulièrement avec les projets de gazoducs : une infrastructure initiale doit être mise en place laquelle va s'élargir plus tard avec l'augmentation de la demande ; à court terme, la difficulté est de trouver des débouchés suffisants pour justifier les premiers investissements. En effet, le tron principal de transport est porteur de grandes externalités positives pour le développement du système, ce qui le rend presque un bien public. Dans ce contexte, il est peu probable que les entreprises privées investissent seules dans l'infrastructure nécessaire pour élargir l'utilisation de l'hydrogène à l'échelle nationale. L'intervention de l'État est alors nécessaire pour soutenir les premiers projets de déploiement de l'infrastructure.

Tableau 21. Synthèse des besoins en infrastructures des différentes transitions

Transition d'infrastructure	Coût de capital initial	Effet de l'incertitude de la demande	Supériorité technologique reconnue	Prix	Externalités (environnement, diversification, etc.)	Nouveaux équipements requis	Compatibilité avec réseau précédent	Temps de diffusion (ans)
Electricité	--	+	++	.	++	-	--	60 *
Gaz naturel	--	.	.	++	+	-	++	15 **
Hydrogène	--	-	--	--	++	-	+	.

(++): grand avantage; (+): avantage; (.): effets compensés ou non applicable; (-) désavantage; (--): barrière sérieuse.

* avant d'atteindre le point de déclenchement des externalités de rétroaction positives ou "tipping point"; ** temps pris en moyenne avant atteindre 10% du mix énergétique national des pays européens analysés ci-dessus.

L'économie de l'hydrogène peut interagir avec l'électricité et le gaz naturel de diverses manières. Electricité et hydrogène sont deux vecteurs énergétiques complémentaires mais qui ont des caractéristiques distinctes, lesquelles ramènent à des utilisations légèrement différentes (notamment l'hydrogène est un carburant plus adéquat pour les transports). Néanmoins, plusieurs convergences sont possibles entre l'hydrogène et l'électricité (Yang, 2008). D'une part, l'hydrogène peut utiliser l'infrastructure électrique pour la production en site par électrolyse de l'eau, ce qui réduit les besoins en infrastructure pendant la phase initiale de la transition. A une échelle plus grande de production, les nouvelles centrales à charbon à cycle combiné avec capture et séquestration de CO₂ peuvent produire à la fois du courant pour le marché électrique et de l'hydrogène pour les transports, selon les prix dans un marché ou dans l'autre (Ball et Wietschel, 2009). D'autre part, l'hydrogène offre un moyen de stockage pour l'énergie électrique : le surplus d'électricité est transformé en hydrogène et stocké, lequel sera plus tard utilisé dans une pile à combustible afin de produire de l'électricité pour couvrir les pointes de consommation.

Le gaz naturel est un autre substitut de l'hydrogène dans quelques applications, par exemple dans les piles à combustible pour les usages stationnaires. Par ailleurs, l'hydrogène peut être produit de manière plus économique pendant les premières années par le reformage de gaz naturel. En outre, le réseau de gaz naturel peut servir (au moins théoriquement) au transport d'hydrogène.¹⁷³

Les technologies de l'hydrogène telles que les piles à combustible doivent aussi être prêtes à entrer sur le marché. L'hydrogène est en concurrence avec les carburants fossiles dans les transports, et notamment avec le gaz naturel pour les usages stationnaires. Ainsi, il doit être plus compétitif que ses concurrents de manière à pouvoir entrer sur le marché. Les piles à combustible et les équipements de stockage à bord de l'hydrogène sont actuellement développées par les entités publiques et privées dans le monde. Des progrès ont été récemment annoncés, particulièrement en termes de durabilité et de robustesse de la pile à combustible (voir chapitre suivant). Le niveau compétitif reste cependant loin d'être atteint et la phase de recherche et développement (R&D) dure depuis des décennies sans que la pile entre dans le marché.¹⁷⁴

Dans le cas d'une innovation radicale comme l'hydrogène, l'intervention publique est indispensable à trois niveaux. En premier lieu, pour soutenir la technologie pendant la phase qui précède l'entrée dans le marché (recherche, développement et démonstration) de manière à la rendre compétitive

¹⁷³ www.naturalhy.net

¹⁷⁴ Latin and Utgikar (2007) présentent les principaux moments du développement de l'hydrogène et des piles à combustible aux Etats-Unis depuis les années 1970s. Les auteurs concluent que l'intervention du gouvernement est nécessaire pour que la transition devienne possible.

face aux technologies conventionnelles. En second lieu, pour aider l'innovation à entrer sur le marché notamment par l'investissement dans l'infrastructure.¹⁷⁵ Enfin, pour internaliser les externalités environnementales et sociales afin d'équilibrer les « règles du jeu » (*'level the playing field'*) de la concurrence avec les technologies traditionnelles et ainsi créer les conditions pour la diffusion sur le marché (Bourgeois et Mima, 2003).

¹⁷⁵ Le développement de la technologie et l'entrée sur le marché est d'habitude supporté par les investissements privés dans le cas des innovations incrémentales. (Bourgeois and Mima, 2003, p.11). Melaina (2003) signale que le développement de l'infrastructure automobile aux Etats-Unis a été généralement supporté par l'investissement privé. Bouwcamp (2004) prend l'exemple du développement des réseaux de téléphonie portable pour montrer que (i) le meilleur standard est retenu par le marché ; et (ii) les sociétés privés sont en mesure d'investir dans l'infrastructure. Toutefois, dans les deux exemples présentés (le réseau de stations d'essence aux Etats-Unis et le développement des réseaux de téléphonie portable), l'infrastructure n'est pas entièrement nouvelle. Dans le cas des stations d'essence, celle-ci reprend l'ancienne distribution de l'essence pour des applications stationnaires. Dans le cas de la téléphonie portable, elle reprend beaucoup de technologies et d'infrastructures de télécommunication existantes.

Conclusion du chapitre 2

L'expérience du gaz naturel et de l'électricité en Europe, ainsi que les analyses technico-économiques, convergent vers la même vision de l'évolution des infrastructures de l'hydrogène. Ainsi, les premières infrastructures sont créées dans les zones densément peuplées, présentant un grand potentiel de demande. La production d'hydrogène est d'abord décentralisée puis elle évolue vers une configuration centralisée au fur et à mesure que la demande augmente. L'énorme investissement et l'incertitude quant au comportement de la demande rendent improbable le fait que les sociétés privées soient intéressées à déployer l'infrastructure nécessaire pour surmonter le paradoxe de l' "œuf ou la poule ". Le même problème s'est produit dans le passé lorsqu'il existait un besoin stratégique de développer les réseaux d'énergie comme les pipelines pour le gaz naturel ou les réseaux électriques. Des raisons économiques, telles que les économies d'échelle et d'envergure, les effets de club et la croissance économique ont poussé alors l'État à prendre en main la construction des réseaux.

Par conséquent, les pouvoirs publics ont un rôle important à jouer pendant la transition de l'hydrogène. Ils sont en mesure d'intervenir de façon à rendre le contexte plus favorable à l'introduction de l'hydrogène par : la subvention de la R&D, les instruments économiques (e.g. taxes carbone, permis d'émission); les politiques de commande et de contrôle (e.g. efficacité énergétique, le pourcentage minimal d'énergies renouvelables); l'éducation du public; et la création de codes et de standards pour les technologies de l'hydrogène. Les exemples du gaz et de l'électricité en Europe confirment l'importance de l'intervention publique pour la diffusion des réseaux. Cette intervention est actuellement limitée par la situation budgétaire des gouvernements et la conception de l'Etat comme régulateur de l'activité économique plutôt que comme investisseur.

Les partenariats entre l'industrie et les pouvoirs publics au niveau local peuvent être très importants pour créer un climat favorable au déroulement des investissements dans les premières infrastructures. Cela peut réduire les incertitudes qui pèsent sur les investissements, en incitant ainsi le déploiement des infrastructures nécessaires au développement initial de la demande d'hydrogène.

CHAPITRE 3

Les incertitudes relatives à l'investissement en infrastructure de distribution de l'hydrogène pour les transports : l'importance de la demande

L'hydrogène peut être produit sans émission de gaz à effet de serre et est susceptible d'approvisionner en énergie un large ensemble d'applications grâce à la technologie des piles à combustible, d'une efficacité énergétique particulièrement élevée. C'est sur son adoption par le secteur des transports que reposent les espoirs les plus grands, la filière hydrogène devant contribuer à apporter une réponse aux menaces que représentent la pollution locale, la dépendance pétrolière et le changement climatique.

Malgré ce potentiel, le développement de la filière hydrogène et piles à combustible se heurte aujourd'hui à des obstacles importants. Les principaux défis sont l'accession à la maturité des technologies de production et d'emploi (en termes de coût, performance, durée d'utilisation des équipements), et la mise en place d'une infrastructure de distribution. Un large réseau de stations de ravitaillement en hydrogène est en effet indispensable pour que les principaux acteurs concernés, constructeurs automobiles et automobilistes, s'impliquent dans la filière.¹⁷⁶

Plusieurs programmes de démonstration de l'hydrogène dans les transports sont aujourd'hui en œuvre à travers le monde. Selon la feuille de route européenne pour la mise en place d'une économie de l'hydrogène (*The European Hydrogen Energy Roadmap*), de plus grands projets de démonstration prendront place à partir de 2010, plus d'un millier de véhicules à hydrogène devant

¹⁷⁶ Dans ce chapitre, nous définissons la filière hydrogène comme l'ensemble de la chaîne industrielle composée des activités de production, stockage, transport et distribution de ce vecteur énergétique.

circuler en Europe d'ici 2015 (HyWays, 2008).¹⁷⁷ Mais une mise en place coordonnée de la filière s'avère délicate dans la mesure où les différents acteurs impliqués n'ont pas tous la même fonction objectif. Si les constructeurs automobiles et les fabricants de piles à combustible ont avantage à se positionner tôt dans la nouvelle vague technologique que représente l'hydrogène, en revanche, les investisseurs potentiels en infrastructure de distribution que sont les compagnies pétrolières préfèrent continuer à amortir les actifs qu'ils ont engagés dans la filière des carburants pétroliers, et cela d'autant plus que pendant les premières années de la probable transition vers l'hydrogène, la demande sera faible et l'investissement peu rentable.¹⁷⁸ Mais ces premiers projets sont porteurs de nombreuses externalités positives, d'où l'intérêt de comprendre les enjeux qui se posent à l'investisseur potentiel.

Nous concentrerons ici notre attention sur la question de la rentabilité de l'investissement dans l'infrastructure de distribution de l'hydrogène, au cours des premières années de mise en place de cette filière dans le secteur des transports. Il s'agira tout d'abord de rappeler le contexte dans lequel s'effectue la percée de l'hydrogène, les risques liés à des investissements nouveaux. Puis nous exposerons une méthodologie d'appréciation de la rentabilité d'un projet de station de distribution d'hydrogène, méthodologie prenant en compte les incertitudes inhérentes à cette filière technologique nouvelle et montrant son caractère compétitif. De l'analyse, il ressort que la demande est le facteur-clé de succès. Les stratégies pour la commercialisation de l'hydrogène et des piles à combustible seront analysées dans la deuxième partie de la thèse.

Section 1. Les incertitudes relatives au développement de la filière

Les technologies basées sur l'hydrogène sont une innovation radicale avec le potentiel de révolutionner le secteur de l'énergie (Freeman, 1986). L'hydrogène est mélangé avec l'air dans une pile à combustible en dégageant électricité et chaleur sans émission de carbone. Cette électricité peut servir pour alimenter les applications mobiles, les appareils fixes et portables.

Le développement d'une innovation suit différentes phases avant la commercialisation qui sont normalement synthétisées en quatre étapes (Rotmans et al., 2001 ; Rogers, 1995): pré-développement, décollage, accélération et stabilisation. Les premières étapes sont cruciales. Pendant la phase de pré-développement, l'idée originale est améliorée de manière à donner lieu à une application pratique. La résistance au changement à ce niveau peut entraver les efforts visant à développer une nouvelle technologie. En particulier dans les technologies de l'énergie où un verrou technologique au carbone s'est formé par un sentier historique qui empêche la diffusion de technologies plus propres (Unruh, 2000, 2002). Dans la phase de décollage, il est important que les entreprises ne prennent pas une direction différente de l'industrie en raison des interconnexions technologiques, des économies de réseau et d'apprentissage (Arthur, 1989).

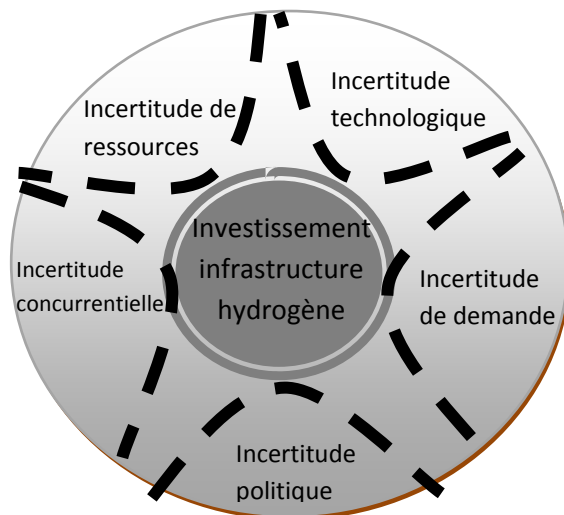
Différents types d'incertitudes dominant selon la phase de la diffusion et le rôle des acteurs dans l'innovation. Les incertitudes peuvent avoir plusieurs origines. Dans ce chapitre, nous suivons la

¹⁷⁷ 300 programmes de démonstrations ont été répertoriés dans le monde, portant sur 500 véhicules dont 100 autobus. Voir : <http://www.iphe.net/newatlas/atlas.htm>; <http://www.h2mobility.org>.

¹⁷⁸ Nous développons cet argument dans la section 3 du chapitre 4.

typologie proposée par Meijer et al. (2005). Ainsi, les principales incertitudes affectant la filière hydrogène portent sur les avancées des technologies clé, la disponibilité de l'infrastructure, l'évolution de la demande, les politiques, la compétitivité, et l'existence de ressources physiques (graphique 46).

Graphique 46. Identification des incertitudes dans l'investissement en infrastructures de l'hydrogène



1.1. Les incertitudes d'ordre technologique

La filière hydrogène et piles à combustible en est aujourd'hui à la phase de pré-commercialisation. La technologie n'est pas encore mûre mais les progrès annoncés permettent d'affirmer qu'elle est proche du seuil de compétitivité. Les principales incertitudes technologiques qui freinent actuellement les investissements se trouvent au niveau de la production d'hydrogène, du stockage à bord et de la pile à combustible.

Chaque année, 65 000 tonnes d'hydrogène sont produites dans le monde, dont 95 % à partir de sources fossiles.¹⁷⁹ La production centralisée à partir du gaz naturel est la moins coûteuse. La gazéification du charbon peut être une option commercialement disponible pour la production à bas coûts à l'horizon 2020 (NRC, 2008a). La production centralisée ne doit pas être possible pendant les premières années en absence de l'infrastructure de transmission pour l'hydrogène. De plus, si l'objectif est de réduire les émissions de CO₂ des transports, le carbone émis pendant la production doit être capturé et stocké dans les formations géologiques. Les technologies de capture et séquestration en sont au stade de démonstration à grande échelle ; reste encore à démontrer la capacité et la sécurité du stockage de carbone (NRC, 2008a). A court terme, l'hydrogène doit être produit sur site par le reformage du gaz naturel à un coût compris entre 2,5 et 4 €/kg (NRC, 2008a ; AIE, 2005). La compétitivité de cette méthode reste toutefois menacée à terme par la montée du prix du gaz naturel, lequel est liée aux cours du brut. D'autres techniques basées sur des sources non fossiles et non émettrices de gaz à effet de serre existent comme l'électrolyse de l'eau à partir d'électricité d'origine nucléaire ou renouvelable, mais elles restent pénalisées par le coût de l'électricité renouvelable (solaire surtout) et le coût des électrolyseurs (Roads2HyCom, 2009b). La

¹⁷⁹ <http://www.iea.org/Textbase/techno/essentials.htm> (accès du 2 mai 2008).

valeur qui sera donnée au carbone pèsera fortement sur les résultats de la concurrence entre les technologies alternatives de production d'hydrogène (AIE, 2005).

Les choix quant à la logistique de distribution de l'hydrogène dépendent de la technique retenue pour le stockage à bord de véhicules dont l'autonomie devrait atteindre 500 km (Schlapbach et Zuttel, 2001). Des voitures dotées d'une telle autonomie existent, mais sont encore d'un encombrement, d'un poids ou d'un coût jugés excessifs (NRC, 2008a). Des avancées technologiques importantes sont en cours dans plusieurs modalités de stockage (hydrogène comprimé, liquide, absorbé dans des matériaux solides) qui sont censés résoudre le défi du stockage embarqué (AIE, 2005).

En ce qui concerne les piles à combustible et malgré les progrès réalisés ces dernières années, des améliorations substantielles en termes de performance, durée de fonctionnement des équipements et coût sont encore attendues pour atteindre le seuil de compétitivité (NRC, 2008a). Pour ce qui est du coût, les piles à combustible approchent déjà les objectifs espérés dans les applications stationnaires. Et le coût des piles à membranes échangeuses de protons (Proton Exchange Membrane Fuel Cell—PEMFC), les plus prometteuses d'un point de vue efficacité pour les applications mobiles, est estimé à \$ 100/kW - ou 50€/kW la pile seulement (Roads2HyCom, 2009a) - pour une production à grande échelle (500.000 unités). Mais dans d'autres circonstances, le coût s'élève encore à \$ 500/kW (Roads2HyCom, 2009a), ce qui pose la question sur qui va payer pour les premières unités plus chères. Le tableau 22 fait le point sur l'état des techniques de la filière, comparant la situation actuelle et les objectifs officiels.

Tableau 22. Les différentes technologies d'hydrogène et pile à combustible pour les transports : coûts et performances actuels, objectifs officiels

	L'objectif du DOE à 2015	L'objectif européen "Snapshot 2020 (2030)"	Situation actuelle
Coût de l'hydrogène à la pompe (hors taxe)	\$2-3/kg	2,5 €/kg ^a	\$4-5/kg
Stockage de l'hydrogène à bord	\$2/kWh	10 €/kWh (5 €/kWh)	\$15-18/kWh ^{b, c} >\$60/kWh
Coût de la pile à combustible pour les transports	\$30/kW	<100€/kW (<50€/kW)	\$100/kW ^c >\$500/kW
Efficience énergétique	60%	-	37-41%
Durée de fonctionnement	5 000 heures	5 000 heures	2 000 heures
Coût du système des piles à combustible stationnaires	\$750/kW ^d	2 000 €/kW (Micro) 1,000-1,500 €/kW (CHP industriel)	\$2 500/kW
Durabilité (stationnaire)	40 000 heures ^d		20 000 heures

(^a) Entre 2 et 5 € pour l'hydrogène produit à partir des sources durables telles que solaire et éolien (HFP, 2007).

(^b) 5kg d'hydrogène comprimé à 350-700 bar.

(^c) Pour une production annuelle de 500 000 unités (ou 50 €/KW la pile seulement).

(^d) L'objectif du DOE pour 2011.

Source: AIE, 2005; DOE, 2007; HFP, 2007; HyWays, 2008; NRC, 2008ab; Roads2HyCom, 2009a; <http://www.StorHy.net>.

Des réductions de coûts sont donc encore nécessaires sur l'ensemble de la filière pour que l'hydrogène devienne compétitif. Comme c'est le cas dans toute avancée technologique, on sait que la pénétration des voitures à hydrogène sur le marché accélérera les améliorations techniques et la réduction des coûts du fait des économies d'échelle et d'apprentissage qui l'accompagneront (Kemp et al., 1998 ; Arthur, 1989 ; Arrow, 1962a). L'augmentation de la production est décisive pour que l'hydrogène s'impose sur le marché face aux innovations concurrentes.

Mentionnons enfin les incertitudes qui pèsent sur l'évolution des autres solutions alternatives pour les transports, la filière hydrogène se trouvant en concurrence avec les biocarburants et les voitures électriques (Demirdoven et Deutch, 2004). Par rapport à ces autres solutions, l'hydrogène présente

un avantage en termes de performances environnementales, mais est encore handicapé par les coûts de l'ensemble de la filière et par l'absence d'une infrastructure de distribution. Une comparaison des différentes solutions alternatives aux carburants pétroliers dans les transports est esquissée dans le tableau ci-après.

Tableau 23. Les solutions alternatives aux carburants pétroliers dans les transports

	Biocarburants	Voiture électrique	Hydrogène
Coûts	Presque compétitive	Reste chère	Reste très chère
Infrastructure et besoins R&DD*	Petites adaptations de l'infrastructure R&DD nécessaire pour développer les biocarburants de 2 ^{ème} génération	R&DD encore nécessaire dans les batteries Adaptations de l'infrastructure	Des investissements lourds en R&DD et en infrastructure sont nécessaires
Performances	Equivalentes à la voiture conventionnelle	Limitées par l'autonomie des batteries et le temps de charge	Potentiellement supérieures à la voiture conventionnelle
Sources d'énergie	Ressources limitées Les impacts économiques et environnementaux ne font pas consensus	Peut utiliser l'électricité produite à partir de n'importe quelle source primaire dont les énergies renouvelables Pollution nulle au point d'utilisation	L'hydrogène peut être produit à partir de plusieurs sources primaires dont les renouvelables Efficience énergétique moindre par rapport à la voiture électrique du fait des pertes dans les conversions énergétiques

* R&DD : recherche, développement et démonstration.

Adapté de Roads2Hycom (2007a), *Hydrogen and Fuel Cells - A Handbook for Communities*, www.roads2hy.com

L'évolution imprévisible des technologies concurrentes contribue à amplifier les incertitudes et à entraver la pénétration de l'hydrogène dans le marché. Les caractéristiques techniques des différentes technologies évoluent au cours du temps grâce à l'apprentissage (Arrow, 1962a), à la vitesse d'amélioration, et à l'arrivée sur le marché principal (Kemp et al., 1998). Tout cela conditionne les possibilités de chacune des nouvelles technologies à remplacer les technologies plus anciennes.

Les carburants alternatifs comme l'hydrogène ne sont pas susceptibles de pénétrer le marché seulement sur la base des avantages environnementaux et énergétiques. Le prix du pétrole est un autre facteur-clé à prendre en compte. Si un cours élevé du pétrole (plus de \$ USD 60-70/barril) n'est

pas perçu comme durable, l'intérêt pour les solutions alternatives risque de diminuer (HyWays, 2008; Leiby et Rubin, 2004; Sperling et Ogden, 2006). Hansen (2009) a calculé le prix du pétrole à partir duquel l'hydrogène devient compétitif dans les transports. Selon la méthodologie suivie par l'auteur, l'hydrogène produit à partir de sources non fossiles devient compétitif à un prix du baril supérieur à 100\$. Ce seuil descend à 80-90\$ le baril dans le cas où les taxes sur le carburant et sur le carbone en vigueur en Europe sont totalement prises en compte.

1.2. Les incertitudes relatives à l'évolution de l'infrastructure et de la demande

La mise en place d'une infrastructure de distribution d'hydrogène nécessite des investissements de départ très élevés, caractérisés par un long délai de récupération. Leur rentabilité est également sensible à ce que sera une demande dont l'évolution est difficilement prévisible (Melaina, 2003). Or, sans une infrastructure suffisante, les constructeurs ne proposeront pas de voitures à hydrogène, la demande ne sera pas tirée par l'offre de véhicules ; et sans une demande suffisante, l'infrastructure ne sera pas rentable. Pour sortir de ce cercle vicieux, il est donc indispensable d'amorcer une coordination entre constructeurs automobiles et consommateurs potentiels d'une part, investisseurs en infrastructure d'autre part, de façon à harmoniser les premiers projets de démonstration et poser la première pierre de l'infrastructure de distribution.

1.2.1. Les incertitudes liées à l'infrastructure

Cette infrastructure est susceptible de prendre plusieurs formes : l'hydrogène peut être produit sur le lieu de distribution en site, ou bien de manière centralisée dans une unité de grande taille puis distribué par camion, train ou gazoduc. Un consensus globalement partagé sur l'économie de l'hydrogène ne s'impose pas encore, mais une conception commune émerge toutefois quant à l'architecture probable de la filière. Pendant les premières années, il serait moins cher de produire l'hydrogène en site afin de desservir une demande faible mais croissante. Puis, la demande étant devenue suffisamment importante, l'hydrogène pourrait être produit à grande échelle de manière centralisée à coût unitaire plus bas, puis transporté jusqu'au point d'utilisation (NRC, 2008a). Cette transition peut être très rapide ne laissant pas le temps de récupérer les capitaux investis (Plotkin, 2007). Cela doit contribuer à retarder les investissements dans les premières infrastructures, puisque les investisseurs ont peur de se retrouver très vite avec des actifs échoués.

Cette architecture dépend aussi du procédé qui s'imposera pour le stockage de l'hydrogène embarqué (comprimé, liquide, solide). La plupart des stations à hydrogène récemment ouvertes fournissent de l'hydrogène comprimé.¹⁸⁰ Des avancées technologiques sont en cours, relatives à ces différentes méthodes de stockage, et tant que l'une de ces méthodes ne s'impose pas, l'investissement en infrastructure reste risqué (AIE, 2005).

Dans certains cas, il est envisagé d'utiliser l'infrastructure existante du gaz naturel pour transporter l'hydrogène, ce qui réduirait les besoins initiaux en capital. A long terme, on peut envisager la conversion des actuels gazoducs au transport de l'hydrogène (McDowall et Eames, 2005). Mais cela

¹⁸⁰ Voir le rapport « 2008 Hydrogen Infrastructure Survey », in <http://www.fuelcelltoday.com/media/pdf/surveys/2008-Infrastructure-Free.pdf> (accès du 15 août 2008).

n'est pas sans danger quand on sait que l'hydrogène est susceptible de réagir à certains matériaux utilisés dans les gazoducs et pourrait provoquer des accidents. Des études ont montré que l'hydrogène peut être mélangé en toute sécurité au flux de gaz naturel à hauteur de 25%.¹⁸¹ Plus de recherches doivent encore être entreprises pour évaluer la vraisemblance de cette option.

Enfin, les investissements dans l'infrastructure seront guidés par les prévisions de la demande. A partir de l'analyse de l'expérience des carburants alternatifs aux Etats-Unis, McNutt et Rodgers (2004) concluent que les acteurs privés ne supporteront pas les coûts initiaux élevés des infrastructures d'hydrogène sans être sûrs de la demande.

1.2.2. Les incertitudes relatives au comportement de la demande

L'investissement dans une technologie nouvelle est guidé par la perception que l'investisseur a de la demande future (Christensen, 1997). Dans le cas de la filière hydrogène et piles à combustible, il est encore difficile de prévoir la date et le rythme de pénétration sur le marché, et d'envisager ce que sera le palier de stabilisation à long terme de la demande.

La diffusion des technologies est complexe et souvent dominée par des circonstances historiques particulières qui affectent le sentier du changement technologique (David, 1985). La présence de rendements croissants d'adoption rend incertain le résultat de la concurrence entre technologies : l'augmentation de l'échelle de production (économies d'échelle) et l'augmentation de la production cumulée (économies d'apprentissage) réduisent en général les coûts moyens. Par ailleurs, une fois qu'une technologie nouvelle est adoptée et mise en œuvre, les incertitudes pesant sur sa qualité s'en trouvent réduites (Arthur, 1989) : le bénéfice que le consommateur retire du bien ou service augmente avec le nombre de consommateurs qui utilisent la même technologie (effets de club) (Katz et Shapiro, 1986).

Mais un obstacle s'oppose au développement de ces externalités positives induites par la diffusion progressive des technologies alternatives aux carburants pétroliers : il s'agit du verrouillage technique et institutionnel que constitue l'existence de la filière des carburants pétroliers ('*carbon lock-in*') ; même si les technologies alternatives sont plus performantes, les barrières à la sortie ('*sunk costs*') restent élevées pour la technologie actuellement dominante (Unruh, 2000, 2002).

L'incertitude sur le comportement de la demande est d'avantage importante dans le cas de changements techniques radicaux. L'évolution de la demande à moyen et long termes est difficile à anticiper parce qu'elle est conditionnée par plusieurs variables qui sont directement (comme l'évolution des préférences ou les besoins) ou indirectement (par exemple, l'évolution de variables macro-économique comme la démographie ou la croissance économique) liées à l'innovation. Selon Rogers (1995), l'adoption dépend spécifiquement de facteurs tels que l'avantage relatif de l'innovation, la compatibilité avec les technologies conventionnelles, la complexité, l'expérimentation et enfin l'observabilité.¹⁸²

Dans le cas de l'hydrogène et piles à combustibles, qui essaye de répondre aux défis énergétiques et environnementaux à moyen et long termes, l'incertitude sur la demande est plus grande.

¹⁸¹ Voir par exemple : <http://www.naturalhy.net/> (accès du 2 mai 2008).

¹⁸² *Relative advantage ; compatibility ; complexity ; triability ; and observability* (Rogers, 1995).

Premièrement, l'avantage relatif de cette technologie par rapport à ses compétiteurs (notamment l'autre vecteur énergétique qui est l'électricité) ne fait pas de concurrents (Demirdoven et Deutch, 2004). Deuxièmement, la faible compatibilité avec l'infrastructure existante crée des difficultés additionnelles et des résistances à surmonter. Troisièmement, les projets de démonstration sont à l'état de démarrage et dans la plupart des cas concentrés dans des niches (bus, petites flottes, etc.) ce qui ne permet ni l'expérimentation ni l'observabilité convenable à la diffusion en masse.

Ajoutons que l'adoption de la filière hydrogène dépend aussi de l'importance que la société accorde aux problèmes de la pollution locale de l'air, de la sécurité énergétique, du changement climatique (HyWays, 2008; McNutt et Rodgers, 2004). Tous ces éléments conditionnent l'évolution de la demande d'hydrogène sur le marché des transports, et en rendent la prévision délicate.

Une manière de prévoir l'évolution de l'hydrogène et piles à combustible sur le marché est de comparer avec la diffusion de la voiture à essence au XXe siècle. Pourtant cette technologie a dû s'imposer à la concurrence des voitures à vapeur et électrique. Ces deux types de motorisations connaissaient même un avantage sur le moteur à combustion pendant les premières années 1900 (Geels, 2005 ; Grübler, 1999). Toutes les deux étaient plus connues que la technologie à combustion ; elles disposaient aussi comme atouts la faible pollution et un temps de démarrage acceptable (Shell, 2001 ; Unruh, 2000). Toutefois, deux facteurs auront une influence décisive pour le choix de la technologie : le coût de la voiture ; et l'existence d'un réseau de distribution (Grübler, 1999). D'une part, la décision de Henry Ford de produire en masse la Ford T équipée d'un moteur à combustion a fait considérablement baisser les coûts de la voiture à essence et a ainsi élargi l'accès à la voiture à un plus large public. D'autre part, l'existence d'un réseau de distribution d'essence pour les applications domestiques assurait un niveau de confort intéressant aux premiers acheteurs de la voiture équipée d'un moteur à combustion (Melaina, 2007). A ceci s'ajoute la volonté de l'industrie pétrolière de promouvoir les voitures à essence, désireuse d'élargir leurs débouchés solvables. Enfin, des caractéristiques comme une plus grande efficacité, vitesse, souplesse d'utilisation dans les pires endroits et autonomie, ont été valorisées par les consommateurs ce qui a accordé un avantage décisif à la voiture à essence (Bouwkamp, 2004).

1.3. L'incertitude d'ordre politique

Une évolution incertaine du cadre légal et réglementaire augmente également les risques de l'investissement. Cette incertitude politique peut provenir de l'inconsistance ou du manque de normes, ou encore d'un comportement hésitant des autorités politiques. Ainsi, le développement et la diffusion des technologies propres connaissent un handicap dans la mesure où elles sont en concurrence avec les technologies conventionnelles dont les coûts sociaux (pollution de l'air, changement climatique) ne sont guère pris en compte par le marché. En particulier, la diffusion de technologies très faiblement émettrices de CO₂ dépend de la valeur qui sera donnée au carbone (Neuhoff, 2008).¹⁸³

¹⁸³ La définition d'une valeur pour le carbone est incertaine et dépendra de la manière comment la dégradation environnementale sera évaluée, en particulier quant à l'irréversibilité des impacts (Arrow et Fischer, 1974). Heal et Kröstrom (2002) analysent l'incertitude dans le domaine du changement climatique. Les auteurs distinguent trois catégories d'incertitudes : (1) l'incertitude scientifique sur les conséquences physiques du changement climatique ; (2) l'incertitude sur leur impact économique ; et (3) l'incertitude politique quant à la

Des orientations politiques changeantes augmentent encore l'incertitude qui pèse sur les investissements (Meijer et al., 2005). Le passage à l'hydrogène est un mouvement à l'échelle mondiale qui a été annoncé à partir du début des années 2000. L'Union européenne sous la présidence de Romano Prodi a annoncé à la fin 2002 un programme de plusieurs milliards d'euros pour soutenir l'émergence de l'économie de l'hydrogène (HLG, 2003). La déclaration du Parlement Européen (Parlement Européen, 2007) fixe des objectifs précis à 2025 et considère la création de l'autoroute de l'hydrogène comme une composante clé de la transition. En octobre 2008, la Commission lance un partenariat avec l'industrie avec un budget de 1 milliard d'euros à dépenser dans les 6 prochaines années de manière à permettre la diffusion de l'hydrogène et des piles à combustible sur le marché avant 2020.

La transition vers l'hydrogène ne pourra se faire sans un encadrement stable et une vision claire de la part des pouvoirs publics, facteur nécessaire pour surmonter les défis technologiques et logistiques énormes qui s'opposent encore à cette transition (Leiby et Rubin, 2004). Par exemple, si la négociation d'un crédit d'impôt dure trop longtemps, les firmes auront intérêt à attendre dans la mesure où les coûts d'investissement sont susceptibles de diminuer dans l'avenir (Dixit et Pindyck, 1994). L'intervention publique est fondamentale, permettant aux firmes de s'approprier les bénéfices de leurs innovations et les incitant à innover.

Les effets de la réglementation font l'objet d'un débat dans la littérature. Porter et van der Linde (1995) font valoir que la réglementation de l'environnement contribue à renforcer l'avantage concurrentiel des entreprises parce que la réglementation va les obliger à améliorer l'efficacité ou améliorer leurs produits. Selon les auteurs, l'absence de réglementation apporte des incertitudes pour les investissements dans les technologies « vertes ».

Cependant, il existe une tension entre la volonté de promouvoir une alternative technologique pour échapper au « lock-in » au pétrole et le risque de choisir la technologie gagnante picking winners (McDowall et Eames, 2006). D'une part, dans un contexte technique très mouvant, il est possible que le gouvernement soutienne la mauvaise technologie avec des coûts élevés et peu d'avantages (Leiby et Rubin, 2004). D'autre part, la diffusion des nouvelles technologies peut être bloquée par les mécanismes de renforcement (infrastructures, biens complémentaires, etc.) de la technologie dominante et donc un soutien spécifique des nouvelles technologies devient nécessaire de manière à surmonter le verrouillage technologique. Les investissements devraient alors incorporer la valeur de la création de diversité technologique, en tenant compte les effets d'irréversibilité et du « lock-out » technique qui à long terme limitent l'efficacité (van den Bergh et Kemp, 2006). En plus, l'incertitude entourant les causes et conséquences du changement climatique justifient l'action des gouvernements pour préserver l'existence d'un portefeuille de technologies (Eames et McDowall, 2006).

formulation de politiques climatiques à partir de différentes prospectives sur le réchauffement de la planète. A ces trois incertitudes s'ajoute l'incertitude sur la progression des technologies très faiblement émettrices de CO₂ (Rosenberg, 1998). Il s'agit de l'imprédictibilité sur les performances réelles des innovations futures ; sur l'utilisation des innovations actuellement en gestation ; et encore sur la progression des technologies qui sont aujourd'hui à l'état de développement.

1.4. L'incertitude concurrentielle

Dans un cadre concurrentiel, l'efficacité de l'action des firmes est contingente, dépend des stratégies des firmes rivales. Lors d'un changement technologique rapide, les nouveaux entrants ont un avantage sur les firmes en place car ils ne supportent pas les coûts en développement de la technologie. Les firmes hésitent ainsi entre s'engager tôt dans la nouvelle technologie en réalisant des investissements risqués, ou, au contraire, supporter le coût d'opportunité d'une entrée tardive sur le marché (Katz et Shapiro, 1986).

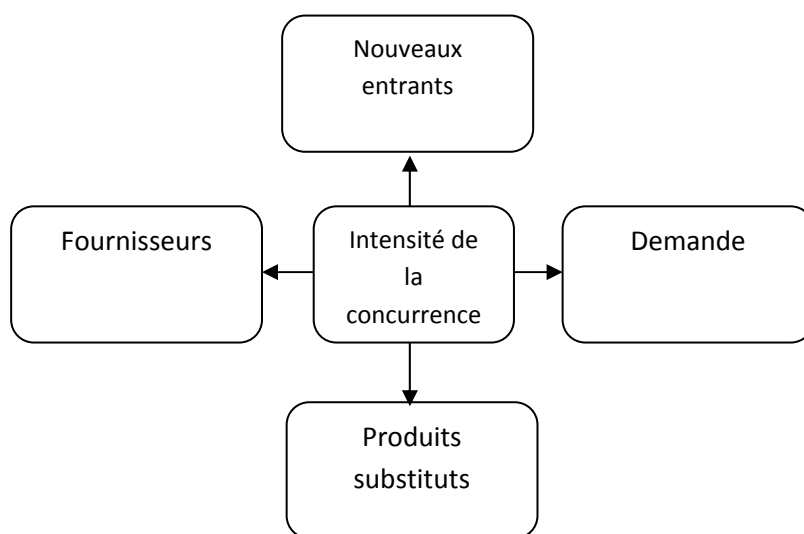
Nous analysons ensuite l'environnement concurrentiel de l'entreprise et son influence pour la définition des stratégies d'innovation. Nous concluons avec la discussion des avantages et inconvénients associés à une stratégie de « premier entrant » (*'first-mover'*).

1.4.1. Analyse de l'environnement concurrentiel à l'aide du modèle des cinq forces de Porter

Le modèle des cinq forces concurrentielles de Porter (1986) est un outil de base d'analyse de l'environnement de marché dont l'utilisation sert à mieux comprendre la nature de la concurrence. La maîtrise des forces concurrentielles est fondamentale autant pour le succès des firmes que pour l'introduction des projets innovants. Cette analyse permet de hiérarchiser les éléments concurrentiels les plus importants dans le secteur et à partir de cela, de construire un avantage concurrentiel.

Selon Porter (1986), la stratégie choisie doit permettre à la firme de s'isoler des forces concurrentielles et si possible agir sur l'environnement en sa faveur. Les cinq déterminants de la performance des projets sont (graphique 47) : le pouvoir de négociation des clients ; la menace de nouveaux entrants ; la concurrence de produits ou service de substitution ; le pouvoir de négociation des fournisseurs ; la concurrence entre les firmes établies.

Graphique 47. Les forces concurrentielles de Porter (1986)



- *le pouvoir de négociation des clients* a un effet direct sur les quantités, les prix et les conditions de vente, et donc sur la rentabilité du projet. Cela dépend spécialement de la concentration relative de la demande par rapport à l'offre. Un acheteur unique faisant face à une multitude d'offres aura beaucoup de pouvoir pour fixer les termes de la négociation. Le pouvoir de marché de la demande dépend aussi d'autres facteurs tels que la disponibilité de produits de substitution.
- *la menace de nouveaux entrants* est une autre force concurrentielle importante. L'entrée de nouveaux compétiteurs attirés par les profits du marché fait diminuer la rentabilité. Le degré de la menace dépend des caractéristiques du secteur et des barrières à l'entrée (intensité capitalistique et économies d'échelle, coûts de conversion, courbe d'apprentissage).
- *la concurrence de produits ou services de substitution* élargit les alternatives des consommateurs en les rendant plus sensibles aux augmentations de prix. Les coûts de conversion élevés et une faible propension des consommateurs au changement rendent cette force concurrentielle moins importante, et *vice-versa*.
- *le pouvoir de négociation des fournisseurs* à imposer leurs conditions a un effet comparable au pouvoir de négociation des clients. Ici, les coûts de changement de fournisseur sont une variable clé, ils dépendent notamment de l'existence de fournisseurs alternatifs.
- enfin, le degré de *concurrence dans le secteur* qui est simultanément le résultat des quatre autres forces de marché. Une concurrence plus forte signifie généralement moins de profits. La position du secteur par rapport au cycle de vie du produit est un autre élément important pour l'intensité de la concurrence (secteur en croissance ou en stagnation; phase d'innovation du produit ou des améliorations des procédés; nombre de firmes élevé ou réduit).

Les cinq forces concurrentielles ne sont pas déconnectées mais plutôt liées entre elles. Ainsi, l'environnement propice à l'introduction d'une nouvelle technologie est composé par un grand nombre d'acheteurs sans grand pouvoir de négociation; l'absence de produits substitués; l'abondance de sources externes de matières premières, de biens intermédiaires, de main d'œuvre et de services; et finalement une faible concurrence entre les firmes installées (comme par exemple l'innovateur réussit à avoir le monopole d'un marché rentable dont les profits récompensent les risques pris initialement).

La situation actuelle des technologies de l'hydrogène et des piles à combustible peut être évaluée à partir de la comparaison avec l'environnement idéal que l'on vient de décrire. Premièrement, la substitution technologique vers l'hydrogène doit faire face à la résistance des technologies établies, en particulier le verrou aux carburants fossiles dans les transports. Deuxièmement, une transition technologique de cette ampleur dans les transports ne s'est jamais produite dans le passé et donc le comportement de la demande reste très incertain. Les expériences échouées de la mise en place des carburants alternatifs dans le passé montrent bien le caractère crucial de la demande (Leiby et Rubin, 2004).

Du côté de l'offre, de nombreuses compagnies sont actives dans la production et le transport de l'hydrogène dans le monde. Il en va de même pour les piles à combustible qui comptent déjà un

nombre appréciable de fabricants. Toutefois, une transition à large échelle en faveur de l'hydrogène, comme il a été suggéré par plusieurs auteurs,¹⁸⁴ pose la question de la disponibilité de ressources telles que la main d'œuvre compétente où le platine.

1.4.2. L'incertitude face aux ressources disponibles et au comportement des fournisseurs

Le développement d'innovations radicales, tel l'hydrogène, est susceptible de se heurter à un manque de ressources financières, humaines, et de matières premières. Ces problèmes doivent se poser de manière plus importante pendant la phase pré-commerciale lorsqu'il est difficile de prévoir tous les ressources nécessaires à la réalisation du projet.

Les besoins financiers nécessaires au développement technologique et d'infrastructure de l'hydrogène sont énormes, et les firmes impliquées auront d'autant plus de mal à accéder à des financements externes que la rentabilité de la filière est encore incertaine. Cela est plus important pendant la phase pré-commerciale pendant laquelle des dépenses importantes sont à engager dans l'immédiat pour des revenus qui seront à dégager dans le futur (Murphy et Edwards, 2003). A ce niveau de l'innovation, l'une des situations suivantes est possible : la firme dispose d'une situation financière lui permettant de financer les projets – particulièrement à partir de capitaux propres - sans tenir compte du risque associé à chacun des investissements ; la firme est obligée de faire appel au financement externe, en restant ainsi dépendante de sa disponibilité et des conditions de remboursement qui peuvent compromettre la profitabilité du projet ; enfin, la firme n'est pas en mesure de financer le développement de l'innovation soit par des capitaux propres, soit par du financement externe, et donc le financement dépend exclusivement des subventions publiques. Cette dernière situation peut s'avérer très instable car les priorités du gouvernement peuvent changer d'une année à l'autre et menacer la continuité des projets (voir incertitude politique).¹⁸⁵

Le problème financier est particulièrement ressenti au niveau des piles à combustible. Cette industrie très fragmentée est composée majoritairement par des unités de petite et moyenne taille, dans la majorité des cas présentant des pertes annuelles chroniques et hautement dépendantes des subventions publiques. L'objectif de ces industriels est de rendre la technologie compétitive le plus rapidement possible de manière à entrer dans le marché, réduire les pertes et s'appuyer d'avantage sur les revenus dégagés par le marché pour le financement des dépenses en développement. D'ici là, les dépenses en R&D sont dépendantes du financement publique et des projets particuliers de démonstration.¹⁸⁶

Les innovations radicales telles que les piles à combustible requièrent également de nouvelles compétences humaines qui parfois n'existent pas encore et doivent donc être formées. La rareté des ressources humaines est normalement plus importante dans le cas des technologies ruptures que

¹⁸⁴ Voir par exemple Lovins (2003).

¹⁸⁵ Le récent changement de politique américaine en matière de piles à combustible pour les applications mobiles est un exemple. Le nouveau Secrétaire d'état à l'énergie, Steven Chu, vient d'enlever les subventions fédérales au développement des piles à combustible à hydrogène pour les applications mobiles. Cette décision menace l'avenir des projets de démonstration et des groupes de recherche aux Etats-Unis comme la cellule hydrogène et piles à combustible du laboratoire national Sandia National Laboratory, à Livermore. Voir : « AC Transit Still Committed To Fuel Cells », *Fuel Cell Today*, 18 mai 2009.

¹⁸⁶ Entretemps les histoires de déficits chroniques (e.g. Ballard), voire des dépôts de bilan (e.g. Millenium fuel cells), sont récurrents dans ce métier. Voir <http://www.fuelcelltoday.com/online/financials> pour plus de détails sur la situation financière des entreprises.

des innovations incrémentales en raison du caractère destructif de compétences associé au changement technique radical (Freeman, 1986). La nécessité de formation des compétences dans ce domaine a été reconnue dans la feuille de route européenne (HyWays, 2008).

L'innovation peut encore être contrainte par une disponibilité limitée en matières premières : ainsi, l'utilisation du platine dans les piles du type PEMFC augmente considérablement les coûts de production et pose question quant au caractère compétitif de la production à large échelle. De nouveaux procédés de fabrication des catalyseurs plus économes en platine, ainsi que le recours à de nouvelles méthodes de recyclage du métal ont permis de réduire les coûts de la pile (NRC, 2008a).

A cela s'ajoute la question de la disponibilité du platine. Les critiques de la solution hydrogène et pile à combustible argumentent que la commercialisation en masse des voitures à hydrogène à pile à combustible serait responsable de l'épuisement des réserves mondiales de platine. Gordon (2006) avance que le platine nécessaire pour la production de 500.000 voitures aurait épuisé en 15 ans les stocks naturels présents dans la lithosphère. Pour sa part, Yang (2009) alerte sur l'impact que l'économie de l'hydrogène aurait sur le marché mondial du platine par rapport à l'évolution récente de l'équilibre (tendu) entre l'offre et la demande, ce qui se traduirait par une augmentation du prix qui rendrait non-faisable la pénétration de l'hydrogène sur le marché. Ses critiques se basent toutefois sur des hypothèses pessimistes quant à l'utilisation du platine dans les piles à combustible, sans rapport avec les dernières estimations officielles.¹⁸⁷

L'innovation peut par ailleurs être contrainte par le comportement incertain des fournisseurs quant à la disponibilité, à la qualité et au coût de la fourniture (Porter, 1980). Dans le cadre des technologies de l'hydrogène et piles à combustible, les décisions des acteurs sont interconnectées : les équipementiers fournissent les piles à combustible aux constructeurs automobiles pour équiper les voitures ; les marques dépendent de l'infrastructure de ravitaillement rendue disponible dans la plupart des cas par les entreprises liées à la distribution de carburant ; les compagnies pétrolières restent dans l'attente des voitures et des consommateurs pour ouvrir leurs stations à hydrogène.

Ces incertitudes peuvent toutefois être réduites par l'intégration verticale (Porter, 1980) : c'est ainsi que les constructeurs automobiles mettent en place des partenariats avec les équipementiers produisant les piles à combustible pour le développement des voitures à hydrogène. Par exemple, le constructeur japonais Nissan (entre-temps racheté par Renault) entretient une longue relation avec le producteur italo-américain de piles à combustible, Nuvera, pour le développement de voitures piles à combustible à hydrogène. Récemment, la division transports du constructeur de piles à combustible Ballard a été reprise par ses partenaires Chrysler, Daimler et Ford.¹⁸⁸

¹⁸⁷ Le platine est un matériau rare dont la production annuelle a atteint 182,3 de tonnes en 2001. Yang (2009) fait remarquer que les recherches ont permis de réduire le contenu de platine dans la pile à 1.2 g/kW en 2006. Frenette et Forthoffer (2009) – département 'véhicules zéro émission' chez Ford – parlent de 0,7 g/kW coïncidant avec les dernières estimations de l'Académie américaine de Sciences (NRC, 2008). Selon cette source, le coût du platine représente 57% du coût final de la pile (du 'stack' soit le cœur de la pile qui contient la membrane dans laquelle l'hydrogène réagit avec l'air).

¹⁸⁸ Voir <http://www.fuelcelltoday.com/online/news/articles/2008-04/Ballard> (accessed in May 19, 2008). Cet exemple est l'image de la réorganisation de l'industrie automobile mondiale. Chrysler et Daimler ont commencé la collaboration avec Ballard en tant qu'une seule entité et se sont dissociés entretemps. En mars 2009, Ford annonce la fermeture de sa division hydrogène et la canalisation des ressources pour les activités liées aux voitures électriques et hybrides en réponse à la crise financière et aux objectifs à plus court terme (« Ford Steps Back from Fuel Cell Vehicles », Fuel Cell Today, 31 mars 2009).

Enfin, les projets de démonstration de l'hydrogène sont contraints par le nombre de voitures mises à la disposition par les constructeurs. A ce stade, le processus de production de ces voitures n'est ni standardisé ni automatisé ce qui rend le coût final très élevé par unité. Des informations rendent compte d'un million d'euros environ par voiture pile à combustible dernièrement démontrée.¹⁸⁹ Le contexte actuel de crise dans le secteur automobile risque d'affecter les programmes de démonstration des marques. Cela affecterait directement les projets de stations-service par une diminution de la demande d'hydrogène.

Le modèle des forces compétitives présente une image plutôt statique du marché. Celui-ci constitue un environnement mouvant où l'aspect dynamique est très important. L'introduction d'innovations modifie le contexte de marché de l'innovateur. Le point suivant analyse les facteurs à considérer pour la définition d'une stratégie technologique, en particulier lorsque les entreprises hésitent à s'engager dans un nouveau marché.

1.4.3. Avantages et inconvénients associés à une stratégie de premier entrant

L'innovation est un moyen de la firme pour se positionner sur le marché. Le changement technologique a un impact important sur sa capacité concurrentielle. L'évolution technologique influe sur la richesse, la croissance, et le potentiel de développement de la firme (Porter, 1986).

Cette dernière met en œuvre une stratégie pour obtenir (ou conserver) un avantage concurrentiel qui lui permet de s'isoler des aléas de l'évolution des forces concurrentielles. Selon Porter (1982), « *la stratégie est l'art de construire des avantages concurrentiels durablement défendables* ». L'auteur identifie trois stratégies génériques ou de base : domination par les coûts ; différenciation ; ou concentration dans un segment de marché par l'avantage prix ou différenciation.

Le choix technologique doit renforcer la stratégie de base de la firme (Porter, 1986). Les décisions technologiques ont une nature différente selon que cette stratégie est la domination par les coûts, la différenciation ou la focalisation sur un marché spécifique (tableau 24).

¹⁸⁹ Renault a estimé à 1 million d'euros le coût de la Scenic version pile à combustible (« Fuel cell powered Renault Scenic », *Fuel Cell Today*, 30 juin 2008). Des rumeurs rendent compte d'un coût de 1 million de \$USD par unité de la FCX, la voiture pile à combustible de Honda (« FCX Clarity goes into production as first customers and dealership network is announced by Honda », *Fuel Cell Today*, 17 juin 2008).

Tableau 24. Innovation de produit et stratégie compétitive de l'entreprise

	Domination par les coûts	Différentiation	Concentration fondée sur les coûts	Concentration fondée sur la différenciation
<i>Progrès technologique relatif aux produits</i>	Développement des produits visant la réduction des coûts.	Amélioration des caractéristiques du produit en termes de qualité perçue, de leur distribution et de renforcement des coûts de changement.	Conception de produits pour la satisfaction des besoins des segments retenus.	Développement de produits visant la satisfaction d'un segment particulier meilleure que les concurrents.

Source : Porter, 1986.

L'investissement dans les technologies de l'hydrogène peut être alors motivé par une recherche de diminution de coûts contre l'augmentation du prix du pétrole, profitant de la plus grande efficacité des piles à combustible. Les entreprises peuvent aussi valoriser les caractéristiques de ces innovations pour améliorer la qualité de leur offre (efficacité, fiabilité, propreté), en général ou sur un marché particulier. Enfin, l'investissement dans l'hydrogène peut viser au début un segment de marché spécifique uniquement (flottes de véhicules, voitures haut de gamme, etc.).

Un aspect important porte sur l'introduction des innovations majeures susceptibles de donner une avance technologique à la firme pionnière. L'innovation ouvre des opportunités pour la firme, et l'expose également à des dangers.

La stratégie de pionnier dans le marché a des avantages pour la firme en termes d'image ; de progression plus rapide sur la courbe d'apprentissage ; de fixation des normes et de standards (Katz et Shapiro, 1986). Ces avantages doivent être toutefois pondérés par les inconvénients d'une telle stratégie, notamment en raison de l'incertitude sur les coûts et sur l'évolution de la demande. D'autant plus dans le cas des innovations majeures où l'incertitude initiale est très forte et elle se dissipe avec l'augmentation de la production. Tout cela dépend des pionniers qui ouvrent le marché. On comprend que ceux-ci n'entrent pas dans le marché sans avoir des perspectives de profits suffisantes pour rembourser le capital et le risque (Bancel et Richard, 1995).

Le comportement des concurrents doit aussi être pris en compte pour la définition du calendrier de l'innovation. En particulier lorsqu'ils s'agit d'un changement technologique radical, les entreprises hésitent entre prendre des décisions irréversibles trop vite concernant les nouvelles technologies, et le coût d'opportunité d'adopter l'innovation trop tard (Katz et Shapiro, 1986). La décision dépendra alors du poids relatif des avantages du premier arrivant notamment en termes d'information sur le potentiel de marché et d'économies d'échelle et d'apprentissage.

Cependant, l'existence d'externalités est susceptible de retarder l'entrée des entreprises sur le marché. De plus, les effets de débordement ou *spillovers* sont d'avantage importants dans le cas des innovations radicales (Griliches, 1992). L'innovateur ne parvient pas à s'approprier toutes les retombées sociales de l'investissement dans la R&D, infrastructures ou commercialisation de la nouvelle technologie, ce qui réduit les incitations à l'innovation (Arrow, 1962a). Les *spillovers* peuvent être de différentes formes : connaissance (la technologie développée par les innovateurs

sera disponible gratuitement pour d'autres entreprises) ; réglementation (les innovateurs supportent le coût de la création des codes et standards pour les nouvelles technologies) ; compétences (les suiveurs peuvent utiliser les compétences formées sans avoir contribué à l'effort de formation) ; ou encore biens complémentaires (pas besoin de reproduire le réseau de services qui a été créé par les entreprises pionnières). Les incertitudes pesant sur les recettes doivent être escomptées dans les analyses financières de l'investissement ce qui retarde la mise en place des projets.

Section 2. La décision d'investissement en environnement incertain : le cas de la station d'hydrogène

A l'heure actuelle, les incertitudes qui pèsent sur l'avenir de l'hydrogène sont nombreuses et profondes. Nous allons maintenant développer une étude de rentabilité d'une station-service produisant l'hydrogène sur site, d'abord à l'aide de l'outil traditionnel de la valeur actualisée nette, et puis à partir de la théorie des options réelles, laquelle permet de mieux cerner les incertitudes propres à la filière hydrogène.

2.1. L'impact de l'incertitude sur les indicateurs économiques

Lorsque les investissements sont marqués par une grande incertitude sur l'avenir, il est difficile d'analyser sa faisabilité financière avec précision (Bancel et Richard, 1995). Dans ce contexte, les entreprises utilisent des méthodes simples pour évaluer les informations disponibles (Angelier, 1997).

2.1.1. La période de récupération

Dans un contexte très incertain, les entreprises préfèrent les projets qui permettent de récupérer rapidement l'investissement initial. En conséquence, les bénéfices à long terme ne sont que très faiblement pris en compte car jugés trop risqués. Lorsque les investisseurs sont confrontés au choix entre plusieurs projets comparables et mutuellement exclusifs, ils prendront celui ayant la plus courte période de récupération. Ce critère favorise peu les investissements dont les avantages se font à long terme, après la période de récupération jugée minimale. Par exemple, pour les investissements en Amérique latine pendant les années 1930 marqués par une grande instabilité, les compagnies pétrolières demandaient la récupération des capitaux investis en une seule année (Angelier, 1997).

2.1.2. L'actualisation des flux de trésorerie et le choix de la prime de risque

Une méthode largement employée dans l'évaluation des investissements est l'actualisation des flux de trésorerie et le calcul de la valeur actualisée nette (VAN) du projet. Cette approche consiste à i) identifier les flux de trésorerie futurs, et à ii) les actualiser à l'aide d'un taux d'actualisation approprié en prenant en compte le coût d'opportunité des flux de trésorerie à différents moments, et l'incertitude (Bancel et Richard, 1995). Cependant, l'actualisation des flux de trésorerie est confrontée à deux problèmes majeurs. Premièrement, les flux futurs sont incertains et leur prévision

peut s'avérer difficile, surtout pour la partie des coûts et bénéfices plus éloignées dans le temps. Deuxièmement, les résultats dépendent souvent du taux d'actualisation retenu et dont le choix est très complexe.

Les investisseurs présentent une aversion au risque et puisque les flux de trésorerie à venir sont considérés comme plus risqués, ils ne leur accordent pas la même valeur. Le choix du taux d'actualisation révèle la préférence pour le court terme, ainsi que la perception du risque associé au projet. Ce taux est essentiellement composé de deux éléments : le taux associé à un investissement non risqué ; et la prime de risque. Le taux sans risque est généralement supposé égal à celui des titres de la dette du gouvernement à long terme (par exemple, le taux des titres du Trésor américain se situe aux alentours de 3%). La prime de risque est la partie restante du taux d'actualisation. Il s'agit d'un surplus de rendement requis pour accepter l'investissement dans l'actif risqué au détriment de l'actif sans risque. Par conséquent, ceci est une mesure du risque du projet. Plus le projet est risqué, plus important est le retour sur investissement demandé et plus le taux d'actualisation est élevé.

L'estimation de la prime de risque est complexe, en particulier dans le cas de nouveaux projets n'ayant pas des données historiques. Le taux d'actualisation utilisé par l'Energy Information Administration (EIA) pour l'évaluation des investissements dans le secteur de l'électricité aux États-Unis est de 10% (3% correspondant au taux sans risque et 7% à la prime de risque) (Roques et al, 2006). Les incertitudes entourant les investissements en hydrogène et piles à combustible sont susceptibles d'augmenter la prime de risque exigée pour investir dans l'infrastructure (Plotkin, 2007).

2.1.3. Le profil des flux de trésorerie de l'investissement dans l'infrastructure pour l'hydrogène

L'investissement dans les infrastructures de l'hydrogène (station de ravitaillement, pipelines, etc) est très intensif en capital et demande une longue période de récupération. De plus, l'infrastructure doit être surdimensionnée dans les premières années afin de garantir le confort d'utilisation des premiers adopteurs (Melaina, 2003, 2007). Cela signifie que les infrastructures seront probablement sous-utilisées pendant la période de transition, en pénalisant la rentabilité. En outre, l'incertitude sur l'évolution de la demande pose des contraintes sérieuses pour la faisabilité du projet. Ainsi, il est probable que les méthodes quantitatives telles que la valeur actualisée nette (VAN) et le ratio de retour sur l'investissement (ROI) présentent des résultats médiocres qui découragent l'investissement.

2.2. La valeur actualisée nette

Étudions tout d'abord la rentabilité de la mise en place d'une station à hydrogène à l'aide de la valeur actualisée nette (VAN) que l'on calcule de la manière suivante :

$$VAN = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0$$

Où : r est le taux d'actualisation ;

CF_t sont les flux de trésorerie attendus du projet pendant l'année t , T étant la dernière année ;

I_0 est l'investissement initial.

Le projet consiste en une station de taille moyenne produisant l'hydrogène en site à partir du reformage de gaz naturel, capable de ravitailler 65 voitures par jour. Les hypothèses retenues pour les coûts et recettes sont réunies dans le tableau 25. Ces valeurs sont empruntées à la base de données du projet HyWays¹⁹⁰ ; elles sont comparables à celles d'autres études (la plupart pour l'Amérique du Nord) telles que Weinert et Lipman (2006) et Simmonet (2005).

Tableau 25. Hypothèses de base pour une station fournissant 20 tonnes d'hydrogène comprimé par an

(en € de 2008)	Unités	Valeurs
<u>Paramètres techniques</u>		
Capacité nette	tonnes/an	120
Taux d'utilisation	%	85
Période de vie utile	Années	20
Efficience	%	75
<u>Paramètres de coûts</u>		
Investissement	€/unité	657 645
Prix du gaz naturel *	€/MBtu	14,78
Taux d'augmentation du prix du gaz naturel **	%/an	2,12
Coefficient d'entretien	%Investissement/an	3,9
Total des dépenses, entretien compris (O&M)	€/unité/an	22 857
<u>Paramètre financier</u>		
Taux d'actualisation réel	%	15
<u>Recettes</u>		
Prix de l'hydrogène ***	€/kg	4

* Il s'agit du tarif "Gaz de France" pour le gaz naturel vendu en France en 2008 à des entreprises de tailles petite et moyenne (coûts variables) : <http://www.gazdefrance.com> (29 avril 2008). Les tarifs commerciaux pour la production en site sont plus élevés que les tarifs industriels pour la production centralisée d'hydrogène.

** Modèle Poles (avril 2008).

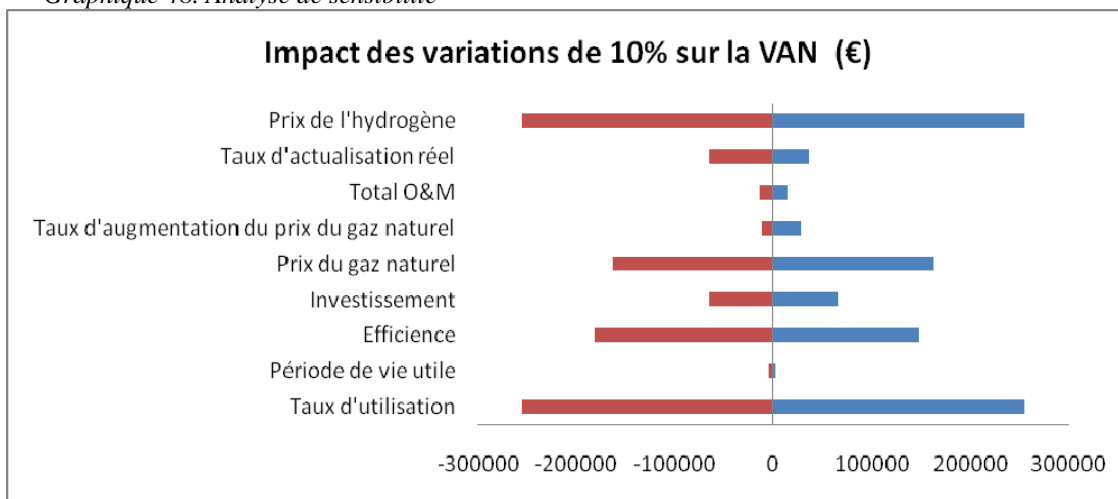
*** Le prix est fixé pour toute la période de vie du projet et est égal à 4 € (hors taxe) de façon à garantir la compétitivité de l'hydrogène par rapport au prix actuel des carburants. Il s'agit aussi de l'objectif européen inscrit dans le "Snapshot 2020" de la plateforme européenne de l'hydrogène et piles à combustible (European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform—HFP).

¹⁹⁰ Disponible en ligne <http://www.hyways.de> (accès du 4 avril 2008).

Pour un taux d'actualisation de 15%, la VAN du projet est positive (117 141 €). Le taux interne de rentabilité (TIR) est de 18,85% (le taux maximal à partir duquel la VAN devient négative). Ce projet semble donc susceptible d'être réalisé, à l'aulne traditionnelle des décisions d'investissement.

Bien que le taux d'actualisation capte la prime de risque du projet, il ne donne aucune information sur la source d'incertitude. Une analyse de sensibilité mesure l'effet du changement isolé de chaque paramètre sur la profitabilité de la station. Le graphique suivant montre l'impact d'une variation de 10% (augmentation et diminution) de chaque paramètre sur la rentabilité, tout le reste constant.

Graphique 48. Analyse de sensibilité



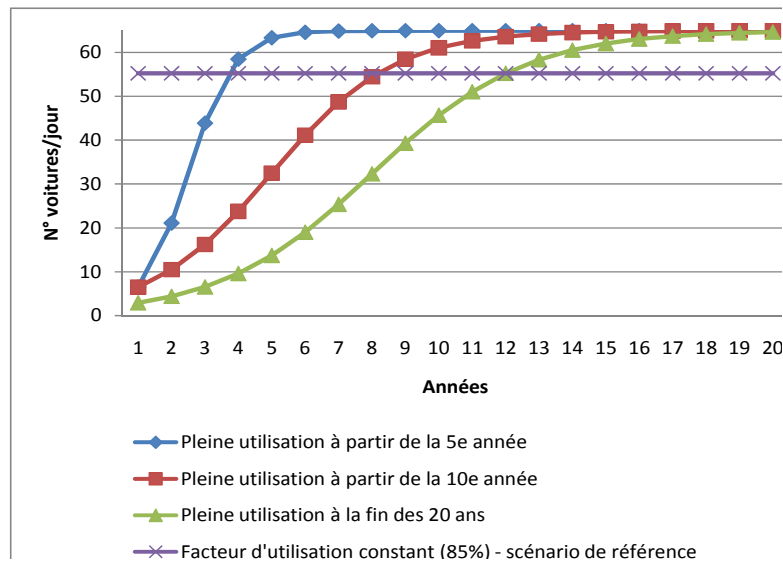
L'économie de la station dépend grandement de l'efficacité du réformateur. D'une manière étonnante, l'investissement initial n'a pas un très grand impact sur la rentabilité globale. Cela peut s'expliquer par le fait que l'analyse se concentre sur la construction d'une simple station, et le problème se pose davantage quand l'investisseur considère la construction d'un réseau de stations. La sensibilité au prix du gaz naturel est importante, car le prix du carburant devrait augmenter dans l'avenir. En outre, la rentabilité dépend fortement du prix de l'hydrogène. Ceci est établi compte tenu du prix des carburants classiques, en particulier si celui-ci prend en compte ou pas les externalités.

Mais une variable déterminante influe sur ce résultat : le taux d'utilisation de la station, supposé ici constant, de 85 % tout au long de la durée de vie du projet. L'hypothèse retenue est très optimiste, surtout pour les premières années de la transition vers l'hydrogène. Un taux d'utilisation élevé peut être atteint en associant par exemple une flotte de véhicules à la station (autobus, poste, etc.) (Leiby et Rubin, 2004 ; Farrell et al., 2003). Les parcs automobiles publics ou des entreprises sont généralement ravitaillées de manière centralisée et ils ont la taille critique pour justifier la construction d'une station dédiée.

En parallèle à cette référence de base, nous examinons donc trois autres scénarios plus nuancés. Ils considèrent une demande modulée au fil du temps : le taux d'utilisation de la station est faible au démarrage, il s'élève ensuite jusqu'à atteindre la pleine capacité (85 %). Selon le temps nécessaire pour atteindre la pleine utilisation, nous formulons le scénario bas (20 ans, soit la fin de la période de vie de la station), moyen (10 ans), et haut (5 ans), ce dernier rythme correspondant à la croissance de la demande au taux généralement attendu dans les projets de construction de stations de

ravitaillement (Simmonet, 2005).¹⁹¹ Les différents sentiers d'évolution de la demande (et taux d'utilisation de la station), selon les scénarios, sont présentés dans le graphique 49.

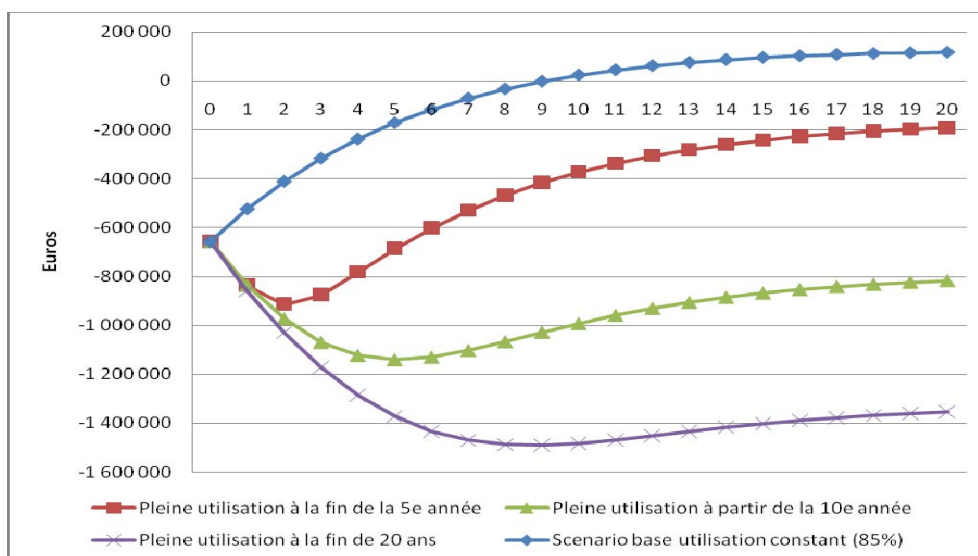
Graphique 49. Les taux d'utilisation de la station en fonction des différents scénarios



On retient un taux d'actualisation de 15 %, et l'on calcule les flux de trésorerie actualisés cumulés du projet, selon les scénarios d'évolution de la demande. Ces flux de trésorerie sont représentés dans le graphique suivant.

¹⁹¹ Les hypothèses concernant le facteur d'utilisation de la station peuvent paraître trop irréelles surtout lorsque comparées à une station d'essence conventionnelle. Cette situation nous a été expliquée par un professionnel de l'industrie pétrolière de la manière suivante : i) Si on ne produit pas l'hydrogène sur le site la capacité de la station pourrait se définir par l'emploi des pompes, comme une station essence classique. Dans ce cas un taux d'utilisation de 100%, c'est à dire une utilisation en continu de toutes les pompes, est irréaliste ; ii) Si l'hydrogène est produit sur site, la capacité est limitée par la dimension de l'équipement de production d'hydrogène. Dans ce cas on peut imaginer une capacité d'utilisation proche de 100%.

Graphique 50. Flux de trésorerie actualisés cumulés selon les différents scénarios d'évolution de la demande



Le scénario de base (taux d'utilisation de la station constant et égal à 85 %) correspond à la limite supérieure vers laquelle tendent les scénarios alternatifs. La période de récupération pour le scénario de référence est de 10 ans. Dans les autres scénarios, l'investissement n'est jamais récupéré en totalité, même pour le scénario le plus optimiste (pleine utilisation au bout de 5 ans) où il se rapproche toutefois du seuil de rentabilité. Ces hypothèses mettent donc en évidence le risque financier que représente un projet d'investissement dans la distribution d'hydrogène. Ce résultat est comparable à ceux de plusieurs études qui généralement concluent que la rentabilité des stations à hydrogène dépend fortement du comportement de la demande (Melaina, 2003 ; Weinert et Lipman, 2006).

En guise de conclusion, l'analyse de rentabilité de la station d'hydrogène a soulevé les points suivants :

- l'investissement peut être rentable. Cependant, à partir du moment que les incertitudes entourant le projet sont prises en compte, celui-ci n'est plus profitable. Les autorités publiques peuvent agir de façon à réduire le risque et rendre l'environnement plus propice aux investissements ;
- la demande est un paramètre critique pour la viabilité de la station, laquelle dépend d'un taux d'utilisation élevé et stable. Une stratégie économique peut être la construction de la station associée à des flottes de voitures à hydrogène ;
- bien que la production d'hydrogène à partir du gaz naturel reste la manière la plus économique, sa rentabilité est défiée par l'augmentation du cours du pétrole (auquel le prix du gaz naturel est lié). Alors, la dépendance aux hydrocarbures n'est pas diminuée. En outre, la maximisation des bénéfices environnementaux demanderait plutôt l'utilisation des ressources renouvelables (e.g. éolien, solaire) dans la production de l'hydrogène ;
- la production décentralisée de l'hydrogène est justifiée pendant les premières années de la transition lorsque la demande est encore peu significative ; toutefois, l'augmentation de la

demande doit rendre plus économique la production centralisée, y compris les coûts de transport de l'hydrogène (Ogden, 1999a). Si cette transition est rapide, les premiers investissements risquent de se retrouver échoués (Plotkin, 2007). Cela doit être pris en compte lors de la discussion sur le financement public des premiers projets.

Au terme de cette première analyse financière, on pourrait conclure que le projet d'investissement dans une station de distribution d'hydrogène doit être rejeté car non rentable. Pourtant, dans la réalité industrielle, le décideur a la possibilité soit de retarder l'exécution du projet, soit de le réaliser par étapes au fur et à mesure qu'il enrichit ses informations, que les incertitudes diminuent avec le passage du temps (Dixit et Pindyck, 1994). Dans le cas d'une réalisation par étapes, les premiers investissements mènent à révéler des informations qualitatives, sur la technologie qui tend à s'imposer ou sur la taille du marché, par exemple, ce qui permet de mieux apprécier le potentiel futur du projet. Cette flexibilité décisionnelle confère une valeur additionnelle aux premiers investissements, ce qu'une analyse en termes de VAN ne prend pas en compte ; il apparaît donc souhaitable de mobiliser des outils financiers plus sophistiqués, prenant mieux en compte cette information croissante.

2.3. La théorie des options réelles et l'évaluation de la rentabilité de la station à hydrogène

La théorie des options réelles part du constat qu'une firme peut engager un projet qui, malgré une valeur actualisée nette négative dans le présent, ouvre la possibilité de réaliser des investissements additionnels rentables, ou contribue à créer de nouveaux marchés à fort potentiel de rentabilité dans l'avenir (Damodaran, 2006).

L'investisseur a en effet la possibilité d'adapter le projet à l'évolution du contexte. La flexibilité de décision constitue une valeur d'option qui doit être prise en compte en plus de la VAN (Gollier, 2001). Cette valeur d'option devient une option réelle une fois les investissements additionnels réalisés (Dixit et Pindyck, 1994).

Néanmoins, tous les investissements n'ont pas une valeur d'option. Pour cela, deux conditions doivent être remplies : (1) l'investissement initial doit constituer une étape nécessaire pour l'investissement final de manière à profiter des gains d'apprentissage et d'information sur le potentiel de marché ; (2) il doit renforcer l'avantage compétitif de l'entreprise, et aussi dégager des surplus à partir d'un certain moment qui puissent compenser les pertes essuyées pendant les premiers temps (Damodaran, 2006 ; Patil et al., 2006).

Avant de présenter la méthodologie de calcul de la valeur d'option, nous étudions d'abord l'effet des différents types d'incertitudes (identifiées dans la section précédente) sur la valeur d'attente de l'investissement.

2.3.1. L'effet des différentes sources d'incertitude sur la valeur d'option

Dans le cadre de décisions irréversibles, l'incertitude contribue à accroître la valeur de l'attente et ainsi à retarder l'investissement. Selon l'approche de la théorie des options, la décision

d'investissement entraîne deux coûts : le coût d'investissement ; et le coût d'opportunité de ne pas laisser pour plus tard la décision d'investissement, lorsque l'ensemble des conditions sont plus favorables. Dixit et Pindyck (1994) montrent comment la décision d'investissement est très sensible à la volatilité de la valeur du projet. Toutefois, les différents types d'incertitudes n'ont pas le même effet sur le coût d'opportunité de l'investissement.

Le tableau 26 présente l'effet des plusieurs sources d'incertitudes sur la valeur d'attente. Dans le côté gauche du tableau, il est présenté les sources d'incertitudes qui réduisent la valeur de l'attente (c'est-à-dire accélèrent les investissements). En présence de ce type d'incertitudes, les premiers investissements profitent à l'entreprise par l'information acquise et par les avantages associées à l'entrée dans le marché avant les autres. Dans le côté droit du tableau sont présentées les sources d'incertitudes qui augmentent la valeur de l'attente. Le coût d'opportunité de l'investissement est alors plus élevé et les entreprises préfèrent attendre pour plus d'information avant de s'engager dans un quelconque investissement.

Tableau 26. L'effet des différents types d'incertitudes sur la valeur d'attente

Incertitudes incitant à accélérer l'investissement (réduction de la valeur d'attente)	Incertitudes contribuant à retarder l'investissement (augmentation de la valeur d'attente)
Technique (y compris apprentissage) Changement du taux d'intérêt	Prix des entrants Changement du taux d'intérêt Demande (ou prix) Concurrence Politique Irréversibilité (coûts échoués)

Parmi les incertitudes susceptibles d'accélérer l'investissement, nous considérons:

- L'incertitude technique (ou de coût) : elles sont particulièrement importantes dans le cas des investissements de longue durée (souvent réalisés en plusieurs étapes). Il existe au moins deux types d'incertitudes de coût qui ont un effet contradictoire sur la valeur de l'attente. La première est d'ordre technique et se rapporte à la difficulté d'achèvement du projet ou d'estimation de son coût total. Dans ce cas, l'information sur les coûts et sur la valeur du projet sera révélée seulement après la réalisation des premiers investissements. Par conséquent, l'incertitude technique rend l'investissement plus attrayant en raison de la valeur des informations supplémentaires (*'shadow value'*) au-delà de sa contribution directe pour la réalisation du projet. Un cas particulier concerne l'effet de l'apprentissage généré par une augmentation de la production cumulée (Arrow, 1962a). La production actuelle peut être considérée comme un investissement pour la réduction des coûts futurs. La deuxième incertitude concerne la volatilité de prix des entrants ayant un effet opposé à celui de l'incertitude technique. Le coût des principaux facteurs productifs (main d'œuvre, terre, capital) peut varier de manière imprévisible en influant sur le coût d'investissement. Il s'agit

d'une source externe d'incertitude puisque les changements sont indépendants de la décision d'investissement de l'entreprise ; alors il n'y a pas d'incitation à accélérer les investissements et elles préfèrent attendre pour plus d'information ;

- les changements de taux d'intérêt peuvent également avoir deux effets opposés. D'une part, ils augmentent la probabilité d'une baisse des taux d'intérêt qui escompte les flux futurs de trésorerie. D'autre part, la volatilité des taux d'intérêt incite l'agent à attendre pour plus d'information plutôt qu'à investir tout de suite.

D'autres incertitudes contribuent à *retarder* des investissements comme celles qui concernent :

- le comportement de la demande. Les fluctuations de la demande peuvent être aussi traduites par des variations de prix. Dans la plupart des marchés, le degré d'incertitude sur les prix augmente avec l'horizon temporel du projet. Cette incertitude affecte la valeur de l'investissement de deux manières. D'une part, la valeur actualisée nette sera plus faible - reflétant par exemple l'utilisation d'un taux d'actualisation plus élevé. D'autre part, le coût d'opportunité de l'investissement augmente puisqu'il existe une possibilité que les prix augmentent dans le futur ;

- la concurrence. Dans le cas d'une évolution favorable, d'autres entreprises entrent sur le marché ce qui augmente la concurrence. Cela limite les marges et compromet la progression des bénéfices. L'attente permet à l'entreprise de revoir sa position et de comprendre mieux si l'opportunité de l'affaire est juste transitoire ;

- les politiques. Les incertitudes sur l'évolution des instruments de soutien (fiscalité, subventions) ou la réglementation peuvent retarder les investissements (Leiby et Rubin, 2004). Par exemple, si un crédit d'impôt à l'investissement ou la possibilité de financement public est considérée pendant trop longtemps, les entreprises préféreront attendre jusqu'à ce que le soutien public soit adopté ;

- l'irréversibilité. Un investissement peut être considéré comme irréversible dans les cas où il est faiblement récupérable ou transférable (coûts irrécupérables ou échoués). L'investissement dans un projet impliquant des coûts irrécupérables entraîne un coût d'opportunité important qui est la possibilité d'investir plus tard. Le coût d'opportunité augmente avec la perception du risque du projet.

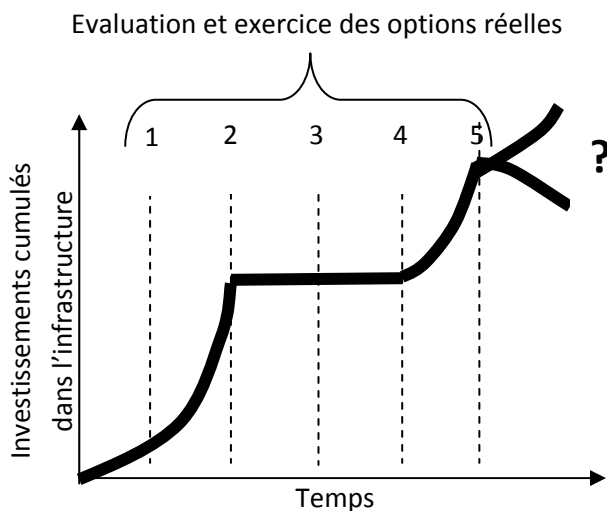
Dans le cas des technologies de l'hydrogène, la complexité de l'innovation élargit le spectre des incertitudes. Réduire l'incertitude peut-être le meilleur moyen de stimuler l'investissement dans l'infrastructure de l'hydrogène, en particulier l'incertitude sur la demande.

2.3.2. L'investissement en options réelles

Lorsqu'un projet est sujet à incertitude, spécialement d'ordre technologique, et lorsqu'il peut être mené à bien par étapes, la totalité de l'information relative aux coûts et au potentiel technologique n'est pas révélée au moment de la première phase d'exécution de l'investissement. La mise en œuvre de cette première phase a donc une valeur d'information qui réduit les coûts de l'ensemble du projet (Dixit et Pindyck, 1994). C'est particulièrement le cas de technologies à fort potentiel

d'économies d'échelle, de gains d'apprentissage, d'effets de club, comme pour l'hydrogène : on sait que l'augmentation de la production cumulée réduira les coûts dans l'avenir.

Graphique 51. Décision séquentielle d'investissement avec les options réelles



Adapté de Patil et al., 2006.

L'investissement dans l'infrastructure de distribution d'hydrogène, en particulier dans les premières stations, peut ainsi être considéré comme une option d'élargissement (Damoradan, 2006). Le projet n'est pas rentable initialement, mais il peut être décomposé en une série d'étapes, chacune constituant une option à élargir (graphique 51). L'investisseur peut arrêter, reprendre ou abandonner l'investissement à tout moment si les performances minimales visées ne sont pas atteintes, ce qui lui permet d'éviter de lourdes pertes (Patil et al., 2006). Le principe étant que la valeur de l'information obtenue à partir des premiers investissements en justifie la réalisation.

La première étape d'investissement correspond alors à une option réelle dont la valeur est équivalente à celle d'une option financière d'achat ('call option'). Le détenteur de l'option réelle investit pour avoir le droit (non l'obligation) de continuer à investir après avoir reçu plus d'information sur la technologie et le marché (Dixit et Pindyck, 1994). On peut ainsi calculer l'option d'élargissement à partir de la formule de Black et Scholes, élaborée pour les options financières d'achat¹⁹² :

$$\text{Valeur de l'option d'achat} = S.N(d_1) - K.e^{-rT}.N(d_2)$$

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{K}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right).T}{\sigma.\sqrt{T}}$$

¹⁹² La formule est normalement utilisée pour l'estimation de la valeur des options financières du type européen, c'est-à-dire, pouvant être exercées seulement à la fin de la vie de l'option. La formule est construite selon l'idée de la réplcation des *cash flows* du projet par un portefeuille constitué par un actif sans risque et le projet en question.

$$d2 = d1 - \sigma \sqrt{T}$$

Où:

S est la valeur actualisée de l'actif sous-jacent ;

N(.) est la fonction de distribution normale cumulative ;

K est le prix d'exercice (strike price) de l'option ;

r est le taux d'intérêt de l'actif sans risque ;

T est la période de vie avant l'expiration de l'option ;

σ^2 est la variance du logarithme de la valeur de l'actif sous-jacent.

2.3.3. Etude de rentabilité d'un réseau de distribution d'hydrogène à l'aide de la théorie des options réelles

Supposons qu'une firme envisage la construction d'un réseau de stations à hydrogène. Elle peut décomposer le projet initial en deux sous projets. Le premier correspond à la construction d'une station permettant de gagner l'option d'élargir le réseau dans l'avenir. On suppose que pour la première station, la demande considérée est celle du scénario moyen où les capacités sont pleinement utilisées à partir de la 10^e année. On calcule ainsi que la première station a un coût attendu de 660 000 € et une valeur actualisée nette négative de 160 000 €, ce qui correspond à une VAN négative de 820 000 €. Le deuxième sous projet correspond à l'élargissement du réseau par la construction de 10 nouvelles stations à hydrogène. Le coût des stations est de 6 600 000 €, soit 10 fois le coût d'une station actuelle (l'hypothèse est prudente puisqu'elle ne prend pas en compte les gains d'apprentissage et d'échelle). La valeur actualisée nette attendue du projet est 4 600 000 €, en supposant que les nouvelles stations sont utilisées à plein à partir de la 5^e année (autrement, la firme préférera de ne pas investir).

Les VAN de chacun des deux sous projets sont négatives. Si la valeur du second reste négative à la fin de la période de vie de l'option, la firme n'investira pas. Cependant, les conditions peuvent changer et l'élargissement du réseau peut devenir rentable.

L'option d'élargissement équivaut à l'option d'achat qui peut être calculée à partir de la formule de Black et Scholes. La valeur espérée du projet est la valeur actualisée de l'actif sous-jacent ($S = 4\,600\,000$ €). La variance et l'écart-type de l'actif sous-jacent ($\sigma^2 = 0,046$ et $\sigma = 22\%$ respectivement) sont calculés à partir de l'analyse de sensibilité.¹⁹³ Le coût attendu de l'élargissement du réseau est le coût d'exercice de l'option ($K = 6\,600\,000$ €). La vie du projet est liée au coût de garder l'option ouverte, et peut donc être plus courte que la période de vie de la première station – on retient l'hypothèse de 5 ans. Le taux d'actualisation de l'actif sans risque est fixé à 5%.

¹⁹³ La variance ainsi calculée est une approximation de la variance du logarithme de la valeur du projet. Cette méthode ne prend pas en compte la répartition complète des résultats possibles ; en particulier des valeurs plus éloignées. La sous-évaluation de la variance doit être considérée comme une hypothèse prudente puisque la valeur de l'option augmente avec la variance (Dixit and Pindyck, 1994).

La valeur de l'option de l'élargissement est calculée de la manière suivante :

$$\text{Valeur d'option de l'élargissement} = 4\,600\,000 \times 0,5319 - 6\,600\,000 \cdot e^{-0,05 \cdot 5} \times 0,3156 = 824\,529,12 \text{ €}$$

La valeur de l'option de l'élargissement est estimée à 824 529,12 €. Cette valeur est additionnée à la VAN du premier projet (- 820 000 €), ce qui donne la valeur globale de l'investissement :

$$\text{VAN avec valeur d'option} = - 820\,000 \text{ €} + 824\,529,12 \text{ €} = 4\,529,12 \text{ €}$$

En appliquant la méthode des options réelles au calcul de rentabilité d'un investissement dans un réseau de distribution d'hydrogène, réalisable par étapes, on obtient une valeur actualisée nette positive (4 529,12 €) lorsque la valeur de l'option est prise en compte. Ce qui signifie que le décideur devrait alors investir dans une première station, malgré la VAN négative, parce que cette première étape comporte une valeur d'option plus élevée que les pertes attendues, car elle réduit les incertitudes relatives au potentiel de la technologie et du marché.

Le modèle de prix des options pour l'évaluation de projets innovants permet ainsi de prendre en compte les externalités positives attachées à l'adoption progressive d'une technologie nouvelle. Il est de ce fait tout à fait adapté à l'analyse de rentabilité de projets d'investissement dans la filière hydrogène.

2.3.4. Les limites de la théorie des options réelles pour l'évaluation du projet

La mise en place graduelle de l'investissement n'est pas forcément une stratégie de minimisation des coûts. Il se peut que cela empêche la réalisation des économies d'échelles avec un investissement plus grand.

Par ailleurs, l'emploi de la formule des options pour l'évaluation de projets innovants n'est pas absente de critiques.¹⁹⁴ Premièrement, le modèle de Black et Scholes repose sur l'hypothèse d'une distribution lognormale de l'actif sous-jacent (les cash-flows du projet). Ensuite, il suppose que le coût des transactions est nul, ce qui n'est probablement pas le cas des options réelles. Troisièmement, la valeur de l'option croît avec la variance de la valeur du projet, ce qui peut être expliqué par l'augmentation de la probabilité de changement du contexte et non pas comme un indicateur de qualité du projet. Finalement, les résultats sont dépendants des valeurs considérées. En dépit des critiques, la théorie des options reste une méthode assez rigoureuse pour le traitement quantifié des incertitudes qui entourent les investissements.

¹⁹⁴ Nous reprenons les grandes lignes des critiques présentées par Angelis (2000).

Conclusion du chapitre 3

L'avènement de l'économie de l'hydrogène est fortement tributaire de la demande. Seule une demande suffisante et stable au long de la période de vie utile du projet garantit la rentabilité de la station. Pour cela, il faut que la voiture pile à combustible à hydrogène soit compétitive avec les voitures conventionnelles équipées d'un moteur à explosion, notamment en termes d'autonomie (au moins 500 km avec un plein), de performance (démarrage, vitesse) et de confort (accéder à un réseau de distribution suffisamment large évitant aux automobilistes de rester captifs). Tout cela à un coût abordable comparativement à la voiture traditionnelle. Les progrès techniques récents vont dans ce sens. Il reste néanmoins à résoudre la question de l'infrastructure de distribution de l'hydrogène dont la mise en place est très exigeante en capitaux.

La construction de l'infrastructure de distribution de l'hydrogène se heurte à plusieurs obstacles : incertitudes technologiques, de demande, de ressources, réglementaires, concurrentielles. Si l'analyse financière traditionnelle tend à considérer que l'investissement en stations d'hydrogène n'est pas rentable, l'outil des options réelles permet de mieux prendre en compte les incertitudes, et montre que la constitution progressive d'un réseau de distribution peut être considérée comme rentable.

Cependant, les obstacles et incertitudes affectant la filière hydrogène ne lui sont pas spécifiques. Les autres alternatives pour les transports telles que les voitures électriques et les biocarburants font face à des défis techniques et économiques similaires. Ceci étant, il est important de laisser ouvert le plus grand nombre d'options technologiques pour l'avenir de façon à mieux faire face aux problèmes posés par la dépendance à l'égard du pétrole et par le changement climatique.

Comme nous le verrons plus en détail dans la deuxième partie de la thèse, il n'est pas sûr que les acteurs privés apportent une réponse optimale aux besoins de développement d'une filière alternative aux carburants pétroliers, en particulier dans les activités de recherche et développement où les bénéfices sont plutôt de nature collective. Sans un soutien effectif des pouvoirs publics à la recherche, développement et démonstration, il est peu probable que les innovations radicales telles que l'hydrogène entre sur le marché et bénéficie du cercle vertueux dans lequel l'expérience fait baisser les coûts, élargit les marchés, ce qui réduit alors les incertitudes et favorise les investissements. Autrement, la société risque d'être prise en otage par le verrouillage sur la technologie actuelle.

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

L'hydrogène et la pile à combustible peuvent approvisionner en énergie un large ensemble d'applications avec un rendement énergétique très élevé et sans émissions polluantes, selon la procédure de production. La méthode de production la plus économique demeure le reformage du gaz naturel. La gazéification du charbon bénéficie de la grande disponibilité de la matière première et des perspectives de réduction des coûts à court et à moyen termes. Mais la capture et le stockage du carbone doivent être possibles de manière à ne pas augmenter les émissions de CO₂. A moyen et long termes, l'hydrogène peut être produit par électrolyse d'énergies renouvelables ce qui réduira drastiquement les émissions de carbone dans les transports.

Les perspectives de l'hydrogène comme énergie sont étroitement liées au développement des technologies, ainsi qu'au déploiement des infrastructures de distribution. Alors que les piles à combustible sont bien parties pour atteindre les objectifs techniques, le problème du stockage de l'hydrogène à bord de la voiture est loin d'être résolu. En ce qui concerne l'infrastructure, celle-ci doit commencer à être mise en place dans les régions à forte densité de population et s'élargir graduellement aux autres régions. Les projets d'interconnexions (« couloirs » ou « autoroutes » d'hydrogène) sont également nécessaires dès le départ.

L'existence d'une infrastructure de production et de distribution est primordiale pour l'avenir de l'hydrogène-énergie. Le caractère capitaliste, les externalités et le risque associé aux investissements demandent l'adoption d'une stratégie de long terme pour la filière, laquelle ne peut se dispenser de la participation de l'Etat. L'analyse de l'évolution historique de l'électricité et du gaz en Europe renforce l'argument selon lequel l'intervention publique est nécessaire pour que le réseau atteigne la taille critique et se diffuse rapidement par l'effet des externalités de demande.

Le déploiement des premières stations-service est très important pour entamer la transition, mais il dépend des pronostics réalisés quant à l'évolution la demande. Seule une demande suffisante et stable tout au long de la période de vie du projet est susceptible de garantir la rentabilité de la station. Pour cela, il faut que la voiture pile à combustible soit compétitive avec la voiture conventionnelle. Il convient donc de passer à l'étude des stratégies pour lever les obstacles technologiques et démarrer la commercialisation de l'hydrogène et des piles à combustible.

DEUXIEME PARTIE

LES BARRIERES A LA DIFFUSION DE L'HYDROGENE ET DES PILES A COMBUSTIBLE SUR LE MARCHE

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE

Le contexte énergétique marqué par l'augmentation de la demande, les tensions pour l'approvisionnement en matière première principale (le pétrole), et plus récemment la prise de conscience du problème environnemental, soulignent le caractère non soutenable de la poursuite des tendances actuelles. Cette situation demande plus que des améliorations marginales ; elle requiert une véritable révolution technologique ouvrant la voie à un système énergétique plus durable.

La transition technologique est un projet de société ambitieux qui doit rassembler tous les moyens possibles, de l'amélioration des technologies existantes à l'introduction des innovations de rupture. Les technologies de l'hydrogène et piles à combustible sont des innovations radicales et nombreux sont ceux qui croient qu'elles sont capables d'apporter une réponse efficace aux défis actuels auxquels est confronté le secteur énergétique. Elles ouvrent des possibilités importantes d'application à moyen et long termes, spécialement dans les transports. Cependant, la transition ne se fait pas naturellement. La technologie doit être préparée et montrer tout son potentiel, notamment par rapport aux autres solutions alternatives.

Par ailleurs, même si l'hydrogène et les piles à combustible réunissent toutes les conditions pour se développer sur le marché, la transition peut être bloquée par la domination des technologies conventionnelles et les défaillances de marché au niveau de la recherche et de l'évaluation des bénéfices sociaux de l'innovation. Cela peut justifier l'intervention publique.

Le **chapitre 4** examine les caractéristiques des ruptures technologiques, et de quelle manière celles-ci peuvent être appliquées à l'hydrogène et aux piles à combustible. Cette analyse est accompagnée de la présentation des facteurs qui sont habituellement à l'origine des changements dans le domaine énergétique. Nous retraçons ensuite le processus d'innovation avec une attention particulière portée à la phase de diffusion. Nous montrons, d'une part, que les externalités associées à la recherche, et la nécessité de planification à long terme rendent plus difficile l'implication des agents privés dans la promotion de la nouvelle filière hydrogène-énergie. Nous montrons d'autre part que l'influence de la technologie dominante bloque la diffusion des innovations environnementales telles que l'hydrogène et les piles à combustible.

Le **chapitre 5** étudie les stratégies possibles pour réussir la transition vers l'économie de l'hydrogène. Premièrement, nous analysons les scénarios possibles pour l'introduction et le développement de

l'hydrogène et des piles à combustible sur le marché. Deuxièmement, nous présentons les instruments qui peuvent être envisagés pour entamer la transition et soutenir la progression de l'hydrogène. Une question importante concerne le fait que les politiques de soutien ne doivent pas isoler l'hydrogène de la concurrence des autres technologies. Néanmoins, en l'absence de ces politiques, le développement de cette innovation radicale ne semble pas réalisable.

Le **chapitre 6** analyse la concurrence technologique pour le marché automobile. Le chapitre commence par une révision thématique de la littérature avant de passer à l'analyse formelle de la diffusion de la voiture à hydrogène sur le marché. Celle-ci fait face à la concurrence d'autres technologies, en particulier celle de la voiture hybride rechargeable. La commercialisation précoce de cette dernière peut avoir des implications importantes sur le résultat final. En outre, la pile à combustible et surtout l'infrastructure jouent un rôle primordial pour le potentiel de progression de l'hydrogène sur le marché.

CHAPITRE 4

L'EMERGENCE DE TECHNOLOGIES DE RUPTURE EN PRESENCE D'UN VERROUILLAGE SUR LE PETROLE

Le secteur énergétique est actuellement confronté à plusieurs défis posés par la raréfaction du pétrole, la sécurité de l'approvisionnement et le changement climatique. Les technologies de l'hydrogène et des piles à combustible sont des innovations majeures susceptibles d'apporter une réponse efficace aux défis énergétiques actuels. Sa modularité permet d'étendre les bénéfices de cette technologie à un vaste nombre d'applications : depuis les gadgets micro-électroniques jusqu'aux systèmes décentralisés de production d'énergie, en passant par les transports. Dans le cas des transports, où une augmentation importante de la demande mondiale est attendue, le verrouillage *de facto* aux énergies fossiles rend très difficiles les efforts de diminution des émissions de carbone. L'apport radical de cette technologie est clair : l'utilisation de l'hydrogène dans une pile à combustible permet de plus que doubler l'efficacité énergétique par rapport à la voiture traditionnelle ; et lorsque l'hydrogène est produit à partir de sources renouvelables, le bilan carbone mesuré du puits à la roue est virtuellement égal à zéro (AIE, 2005).

La pile à combustible fête cette année son cinquantième anniversaire depuis que Francis Bacon annonce la « Bacon cell » à l'Université de Cambridge, en 1959. Entre-temps, la technologie n'a pas cessé de s'améliorer et de connaître plusieurs applications, dont la plus célèbre reste la production d'électricité à bord des vaisseaux spatiaux de la NASA. Malgré tout cela, la pile n'a pas réussi à trouver des applications autres que quelques niches spécialisées où le coût n'est pas le critère principal. Et encore moins dans les applications mobiles, toujours dominées par les carburants fossiles.

Ce chapitre analyse le changement radical dans les industries énergétiques. Il s'agit normalement d'un processus complexe et marqué par les interactions entre les avancées scientifiques et les demandes du marché. Afin d'étudier ce phénomène, nous faisons appel aux théories économiques du changement technique et de la gestion de l'innovation.

La première section examine les caractéristiques des ruptures technologiques et en quoi elles s'appliquent à l'hydrogène et aux piles à combustible. Quelle est la nature des innovations radicales et comment se distinguent-elles des autres innovations ? Comment les grandes ruptures émergent et quels sont les principaux facteurs dans le domaine de l'énergie ? Nous montrons que les grandes innovations créent des ruptures dans le système technologique existant, en ouvrant des potentialités nouvelles. Dans la seconde section, nous traçons le parcours d'une innovation radicale, dès les premières découvertes fondamentales dans le laboratoire, jusqu'à la diffusion en masse en passant par les grands projets de démonstration. Quel est la configuration du processus d'innovation et comment les différentes étapes sont-elles liées ? Quels sont les facteurs qui interviennent lors de chacune des phases ? Quels sont les moments critiques du processus d'innovation ? Quelles sont les barrières au développement et à la diffusion de l'hydrogène et piles à combustible sur le marché ? L'entrée des révolutions technologiques sur le marché se voit confrontée à plus de résistances par rapport aux innovations facilement adaptables dans le paradigme actuel. Dans la troisième section la nature du blocage technique dans les transports est étudiée. Comment ceci conditionne-t-il les choix de l'avenir ? Dans quelle mesure peut-il influencer le comportement des intervenants de la filière hydrogène-énergie ?

Deux idées majeures ressortent du présent chapitre : le problème de l'appropriation privée des résultats freine les activités de recherche et développement, en amont ; et la domination des énergies fossiles rend plus difficile l'entrée des alternatives technologiques sur le marché, en aval. Elles permettent de comprendre les difficultés du marché à gérer, et les difficultés à retenir la bonne technologie. Cela a des répercussions au niveau des politiques publiques, ce qui fait l'objet du chapitre suivant.

Section 1. Les ruptures technologiques : causes et directions

Le développement des économies dans l'histoire est associé à des vagues d'innovations. Ces grappes d'innovations apparaissent normalement autour d'une innovation principale responsable de la rupture avec le paradigme technologique précédent.

Cette section commence par le rappel des grandes vagues technologiques dans l'histoire (1.1). Nous nous penchons ensuite sur l'étude des innovations majeures, ses caractéristiques distinctives et les répercussions au niveau socioéconomique (1.2). L'analyse se poursuit par l'examen des facteurs historiquement à la base de l'émergence des grandes innovations dans le secteur de l'énergie (1.3).

1.1. Les grandes vagues technologiques dans l'histoire

La conception de l'histoire de l'économie en tant que processus d'évolution remonte aux travaux de Schumpeter. Ce caractère évolutionniste du système capitaliste serait le résultat de plusieurs

facteurs comme l'adaptation à un cadre social et naturel en changement constant, ou l'accroissement de la population et du capital. Toutefois, la raison principale évoquée par Schumpeter (1912, 1942) tient à la mutation incessante de la structure économique. Cette mutation se manifeste par un mouvement continu de production de nouveaux objets de consommation, de nouvelles procédures de production et de transport, de nouveaux marchés et de nouveaux types d'organisation industrielle. Cela est dû à l'effort de l'entrepreneur qui est placé au centre de l'analyse. Il est responsable de la mise en place des nouvelles combinaisons de facteurs productifs qui caractérisent les innovations. Il apparaît ainsi comme un innovateur qui, poursuivant le profit, détruit les éléments vieillis pour créer continuellement des éléments nouveaux. L'évolution de l'économie serait ainsi le résultat de ce processus de « destruction créatrice ».

L'innovation est au centre de l'explication schumpetérienne. Alors que l'invention est ici considérée comme un processus graduel et continu, l'innovation est introduite à des moments spécifiques dans l'histoire. Schumpeter (1942) considère comme probable que les innovations soient introduites pendant les périodes de stabilité de l'économie avec un risque d'échec moins important. L'innovation serait l'entreprise des « hommes nouveaux » et des nouvelles firmes. Les entrepreneurs-innovateurs seront alors suivis par une vague d'imitateurs responsables de la diffusion de l'innovation. De cette façon, les innovations seraient apparues en grappes.

Suite à l'introduction des innovations, l'activité économique s'écarte de l'équilibre entraînant, à terme, la diminution du rythme de l'activité innovatrice. Entre-temps, l'économie se caractérise par une structure de production différente, avec une production plus élevée et un niveau de prix plus faible. Les cycles économiques seraient ainsi expliqués par des mouvements d'innovation. Schumpeter (1942) associe les mouvements d'innovation aux trois cycles : de Kondratief (60 ans), de Kitchin (40 ans), et de Juglar (10 ans). Cela lui permet d'identifier trois cycles de Kondratief dans l'histoire : le premier, celui du coton, du fer et de la machine à vapeur (1780-1842) ; le deuxième, celui du chemin de fer (1842-1887) ; et le troisième, celui de l'électricité, de la chimie et de l'automobile (débutant en 1898).

1.2. La typologie du changement technique

Le changement technique n'a pas toujours la même amplitude. A côté des simples changements des techniques de production (par exemple, le changement d'une machine), il existe des situations où le changement est beaucoup plus large avec des implications sur l'état des connaissances ou même sur l'organisation de la société. De ce fait, Freeman (1982) distingue entre le changement « technique » et le changement « technologique ». Le premier représente le changement des méthodes tangibles de production, alors que le changement technologique se réfère à la fois au changement tangible de la connaissance (la technique) et à tout le corpus de connaissances autour de la technique :

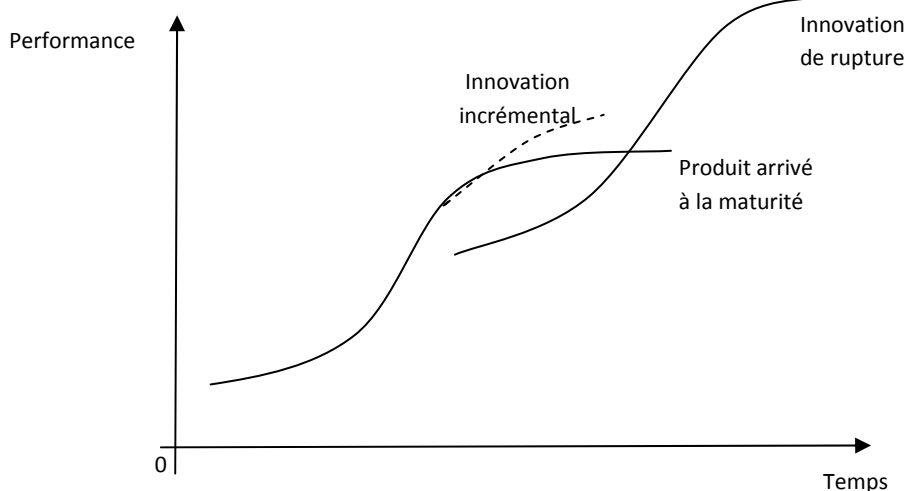
« ...the expression 'technical innovation' or simply 'innovation' is used to describe the introduction and spread of new and improved products and processes in the economy and technological innovation to describe advances in knowledge. » (Freeman, 1982, p.4)

Une importante distinction est établie par Freeman et Perez (1988), lesquels distinguent innovations incrémentales et innovations radicales, d'une part ; changements de système technologique et changements de paradigme techno-économique d'autre part.

Les *innovations incrémentales* sont introduites de manière plus régulière. Ce sont le résultat d'un processus d'amélioration continue des performances, de la qualité et de la réduction des coûts. Ainsi, les innovations incrémentales peuvent être le résultat de l'action menée au niveau de la production ou bien par le fait de l'augmentation de l'usage (les économies d'apprentissage ou « learning by doing » et les économies d'usage ou « learning by using », respectivement).

A l'opposé, les *innovations radicales* sont des événements qui marquent des discontinuités technologiques, étant le plus souvent le résultat d'un processus délibéré de recherche et développement. Ces innovations sont normalement associées à des changements de produit, de procédés et organisationnels. Cependant, les innovations radicales bénéficient des améliorations incrémentales des technologies plus anciennes (par exemple, la filière de l'énergie nucléaire a bénéficié des avancées techniques dans les centrales électriques à charbon et au fioul).

Graphique 52. Innovations incrémentales et de rupture



Source : Le Bas, 1991.

Le graphique 52 compare les innovations incrémentales et les innovations de rupture. Les innovations incrémentales améliorent sensiblement les performances d'un produit (en termes de qualité ou de coûts), ce qui permet d'élargir sensiblement son potentiel de marché. A son tour, l'innovation de rupture est responsable d'une discontinuité technologique. Bien que les innovations radicales de rupture présentent normalement une performance plus limitée au début en comparaison avec les technologies existantes, ce décalage est très vite dépassé en raison d'un potentiel technologique et économique plus important par rapport à la vieille technologie. A titre d'exemple, le passage du moteur à combustion à la batterie électrique, voire même à la pile à combustible, peut améliorer l'efficacité énergétique dans les transports, de 20-25% pour la voiture à combustion actuelle, à 60% d'efficacité théorique pour la pile à combustible, jusqu'à plus de 70% pour la voiture électrique.¹⁹⁵

Par ailleurs, on parle de *changement du système technologique* lorsque les effets du changement ont un impact large sur plusieurs secteurs économiques. Cela est normalement le résultat d'une multitude d'innovations incrémentales et radicales pouvant donner lieu à la création de nouvelles activités économiques. L'émergence de la pétrochimie avec toutes les ramifications industrielles (textile, plastique, etc.) sert ici d'exemple.

¹⁹⁵ Voir chapitre 2.

Enfin, le concept de changement de paradigme techno-économique s'applique aux situations où le changement du système technologique entraîne des conséquences majeures dans tous les domaines de l'économie. Le nouveau paradigme entraîne ainsi des effets de contagion (*'pervasives'*) pour les autres secteurs d'activité :

« [changes in the techno-economic paradigm] *have such widespread consequences for all sectors of the economy that their diffusion is accompanied by major structural crisis of adjustment, in which social and institutional changes are necessary to bring about a better 'match' between the new technology and the systems of social management of the economy—or 'regime of regulation'.* » (Freeman et Perez, 1988, p.38).

La théorie des paradigmes techno-économiques formulée par Freeman et Perez (1988) identifie plusieurs vagues technologiques dans l'histoire,¹⁹⁶ ce qui s'inscrit dans les théories schumpetériennes des cycles longs de l'économie et de la « destruction créatrice ». Ainsi, les nouveaux paradigmes commencent à se développer avant la fin du paradigme précédent. La prise du risque et le coût de l'investissement dans le nouveau paradigme deviennent justifiés à partir du moment où l'augmentation de la productivité de l'ancien paradigme connaît des limites et les anticipations de profit se réduisent. Cependant, une vraie révolution technologique doit satisfaire certains critères : réduction draconienne des coûts ; augmentation rapide et quasi-illimitée de la production ; et effets d'entraînement sur toute l'économie.

L'idée de changement de paradigme technologique trouve ses origines dans les analyses de Kuhn (1962) sur l'évolution de la science et les révolutions scientifiques. Selon Dosi (1988a), un *paradigme technologique* définit globalement les besoins à satisfaire, les principes scientifiques utilisés et les techniques à employer. Le paradigme technologique établit le contexte de l'activité innovatrice par la détermination des problèmes à résoudre et des solutions disponibles. Les innovations suivent une certaine direction ou *trajectoire technologique* tout au long du paradigme dominant (Dosi, 1982, 1988a). Le changement de paradigme n'est fait que par une discontinuité technologique :

« *Continuous changes are often related to progress along a technological trajectory defined by a technological paradigm, while discontinuities are associated with the emergence of a new paradigm.* » (Dosi, 1982, p. 147)

A noter que le concept de paradigme techno-économique proposé par Freeman et Perez est de nature macro-économique, comprenant un ensemble de technologies, alors que le paradigme technologique, auquel Dosi fait référence, caractérise l'évolution d'une seule technologie (approche micro-économique).

Le constat que l'innovation n'est guidée ni par un seul processus aléatoire, ni uniquement par des changements marginaux de la demande ou des coûts, est à la base de la classification suivante. Nelson et Winter (1977, 1982) proposent le concept de *trajectoire technologique* pour décrire la séquence d'innovations qui se développent au sein d'un *régime* technologique donné. Les

¹⁹⁶ Il s'agit des cinq phases de « Kondratieff » associées à l'émergence des grands changements technologiques : la révolution industrielle et le début de la mécanisation (deuxième moitié du 18^e - deuxième moitié du 19^e) ; la machine à vapeur et le train (19^e) ; l'électricité (deuxième moitié du 19^e - deuxième moitié du 20^e) ; le fordisme et la production en masse (1900-1990) ; les technologies de l'information et de la communication (1980-..).

innovations suivent des trajectoires naturelles ouvertes par une avancée scientifique ou technique significative jusqu'aux premiers signes de saturation. Les trajectoires naturelles répondent aussi aux signaux reçus au niveau de l'environnement de sélection des firmes.

Il s'agit alors d'un processus continu, ordonné et cumulatif, visant le plus haut niveau d'efficacité potentielle. L'expérience cumulée dans la production ou dans l'utilisation de la technologie, ainsi que les effets dynamiques d'échelle, contribuent à l'amélioration progressive des caractéristiques techniques et des performances de la technologie au long de trajectoires spécifiques.

Ces trajectoires naturelles s'inscrivent dans un régime (ou paradigme) technologique donné (Nelson, 1977 ; Dosi, 1982). C'est-à-dire que les innovations incrémentales sont conduites par la perception qu'ont les technologues quant à la faisabilité et l'importance des innovations dans un certain domaine. Nelson (1977) donne l'exemple de l'industrie de l'aviation. L'apparition du DC3 dans les années 1930 a défini le régime technologique. Les innovations postérieures ont surtout exploité le potentiel au niveau des moteurs et de la taille de l'avion.

La relation entre l'évolution de la technologie et de l'industrie a été étudiée par Abernathy et Utterback (1978). Les auteurs expliquent l'existence d'un cycle de vie de l'industrie dans lequel les premières firmes entrent dans l'industrie et essayent d'innover mais dans la plupart des cas échouent et quittent le marché. Toutefois, au bout d'un certain temps et suite à quelques efforts cumulés, une nouvelle idée commence à s'installer et à attirer une part significative du marché. Il s'agit alors de l'émergence graduelle d'un design dominant qui va s'imposer à l'ensemble du secteur. A partir du moment où le marché retient un design, les innovateurs et les suiveurs doivent adhérer au nouveau format de façon à pouvoir prendre une partie importante du marché (Utterback, 1994). Dans ce cadre évolutionniste, les premières étapes sont très importantes pour la formation du design dominant et la variété technologique disparaît avec la maturité de l'industrie. Les exemples de design dominant sont la Ford T pour l'industrie automobile et l'ordinateur IBM pour l'industrie informatique.

Un concept proche est proposé par Abernathy et Clark (1985) et prend en compte les implications au niveau de la production et de la consommation. Les auteurs partent du constat que les innovations n'ont pas toutes le même effet : les unes améliorent la technologie existante (innovations régulières), alors que les autres provoquent des ruptures technologiques rendant les compétences anciennes obsolètes. Le concept d'« *innovations architecturales* » s'applique à la nouvelle technologie qui modifie le système de production existant afin de proposer de nouvelles fonctionnalités et de nouvelles utilisations par les usagers. Cela peut être à la base de la reformulation du secteur ou bien de la création d'une nouvelle industrie. L'innovation marque alors la configuration (architecture) de base en termes de techniques et de marketing à employer par le reste de l'industrie.

La formation d'un standard industriel réduit la variété de modèles et donc les incertitudes technologiques pour les firmes et les consommateurs. Désormais, la concurrence n'est plus en termes de nouvelles architectures technologiques complexes, mais se fait en termes de performances, de coûts et de différenciation des produits (Anderson et Tushman, 1990).¹⁹⁷ D'autre

¹⁹⁷ Teece (1987) vient simplifier le cadre d'analyse en deux phases - avant et après l'établissement du nouveau design dominant,- dans lesquelles la concurrence se fait entre les différentes architectures et par le prix.

part, l'émergence d'un standard industriel permet de simplifier le processus d'adoption technologique, autrement les consommateurs devraient essayer plusieurs technologies ce qui peut être difficile ou coûteux pour certains. Les clients attendent jusqu'à ce que l'évolution de la technologie se stabilise. Alors, l'émergence d'une architecture semble une condition nécessaire pour la production de masse.

Christensen (1997) distingue entre technologies de soutien (*sustaining technologies*) qui améliorent la performance, le coût ou la qualité de la technologie existante sans pourtant changer fondamentalement ses caractéristiques, d'une part ; et les technologies dites de rupture (*disruption technologies*) qui viennent imposer un nouveau standard dans l'industrie, d'autre part. Les technologies peuvent être des innovations radicales ou marginales (incrémentales) ; l'important est que l'innovation introduise des caractéristiques nouvelles qui s'imposent sur le marché face à la technologie précédente (prix plus bas, facilité d'utilisation, etc.)

La classification des innovations peut parfois se prêter à une certaine confusion. L'innovation radicale ne conduit pas immédiatement à des gains de performance et de coût. A ce propos, Rosenberg (1976) a écrit :

« ... most inventions are relatively crude and inefficient at the date when they are first recognized as constituting a new innovation. They are, of necessity, badly adapted to many of the ultimate uses to which will eventually be put; therefore, they may offer only very small advantages, or perhaps none at all, over previously existing techniques. Diffusion, under these circumstances will necessarily be slow. » (Rosenberg, 1976, p.195).

De la même manière, les innovations incrémentales peuvent réussir dans la longue période des améliorations considérables de la performance et de la réduction des externalités environnementales (Freeman et Perez, 1988). Par exemple, la voiture traditionnelle à moteur à combustion a bénéficié d'innovations incrémentales au long des années ce qui la rend considérablement plus performante et moins polluante en relevant la barrière aux technologies alternatives pour les transports. Cependant, les innovations radicales telles que les voitures à pile à combustible à hydrogène présentent un potentiel technique et économique suffisamment grand pour révolutionner à terme le secteur, d'où l'intérêt de développer ces nouvelles technologies.

Au lendemain du premier choc pétrolier, Nordhaus (1973a) propose le concept de « backstop technology ». Il suppose l'existence d'une technologie non polluante (« *carbon-free* ») qui n'est pas viable économiquement aux conditions actuelles en raison d'un coût de production élevé. Toutefois, le prix des énergies fossiles peut augmenter significativement par l'effet de l'augmentation de la demande qui n'est pas suivie par l'offre, l'épuisement de la ressource, l'augmentation des taxes, etc., en rendant la « backstop technology » compétitive face à la technologie actuelle.

« The concept that is relevant to this problem is the backstop technology, a set of processes that (1) is capable of meeting the demand requirements and (2) has a virtually infinite resource base ». (Nordhaus, 1973a, p. 547-548)

Ce concept met en évidence l'importance des rentes de rareté dans les choix technologiques. Les exemples typiques de « backstop technologies » sont l'énergie solaire photovoltaïque et les piles à combustible. Ces technologies restent encore plus chères par rapport aux technologies énergétiques

dominantes, mais elles ouvrent la possibilité d'utiliser des ressources renouvelables qui sont abondamment disponibles. La prise en compte du concept de « backstop technology » dans les modèles énergétiques permet de fixer une limite (théorique) à l'augmentation des prix du pétrole. La menace de pénétration de la « backstop technology » dans le marché serait suffisante pour empêcher l'augmentation du prix de l'énergie au-delà d'un certain seuil.¹⁹⁸

Le concept de technologie à caractère général (*'general purpose technologies'*) est employé non seulement pour les technologies, mais aussi pour des idées et disciplines susceptibles d'avoir un large champ d'application, dont les effets atteignent plusieurs domaines à la fois. Ces technologies sont souvent associées à une amélioration générale de la productivité de l'économie.

« The central notion is that, at any point in time, there are a handful of « general purpose technologies » (GPTs) characterized by the potential for pervasive use in a wide range of sectors and by their technological dynamism. As a GTP evolves and advances it spreads throughout the economy, bringing about and fostering generalized productivity gains. This phenomenon involves what we call « innovational complementarities, » that is, the productivity in a downstream sector increases as a consequence of innovation in the GPT technology. » (Bresnahan et Trajtenberg, 1995, p.84, cité par Clarke et al., 2006)

Les exemples les plus connus de GPTs sont l'électricité et le moteur électrique (Rosenberg, 1982). L'électrification des sociétés a provoqué des changements majeurs dans toute la société, en particulier dans les méthodes de production.¹⁹⁹

1.3. Les déterminants des innovations majeures

Ce point commence par la révision des déterminants les plus classiques du changement technique tel que le changement technique induit par la modification des prix relatifs des facteurs. Ensuite, nous rappelons le débat sur les principaux moteurs du changement technologique : la demande pour la technologie ; ou les avancées de la science. L'analyse se poursuit avec l'approche qui s'est développée en réaction à la doctrine plus classique, considérée comme trop simplificatrice du changement technologique. Nous verrons que, plus qu'une négation complète de cette dernière, la perspective évolutionniste de l'innovation cherche à développer une explication plus large des facteurs qui sont à la base du processus d'innovation, lequel est par nature très complexe.

¹⁹⁸ Hotelling (1931) a analysé la question de l'exploitation optimale des ressources épuisables. L'auteur considère que le prix du pétrole intègre une rente en raison de son caractère non renouvelable. Pour une exploitation optimale, la rente doit augmenter au taux d'intérêt : l'augmentation du prix doit compenser une production de plus en plus faible jusqu'à l'épuisement de la ressource. Au contraire, la théorie de la technologie « backstop » de Nordhaus (1973) – laquelle a été reprise par d'autres auteurs tel que Geoffrey Heal – considère que le prix du pétrole augmente en direction du coût de la ressource illimitée. Le remplacement des gisements plus rentables entre-temps arrivés à l'épuisement (à une technologie de production similaire) fait augmenter les coûts, et donc explique la tendance pour la diminution de la rente.

¹⁹⁹ « *The social payoff to electricity would have to include not only lower energy and capital costs but also the benefits flowing from the newfound freedom to redesign factories with a far more flexible power source ...* » (Rosenberg, 1982, p. 77-78).

1.3.1. L'hypothèse néoclassique du changement technique induit

L'approche néoclassique du changement technologique considère que le rythme et la direction des innovations répondent au changement des prix relatifs. Sous l'hypothèse que les agents sont rationnels et maximisent leur profit, les théories de l'innovation induite (*'induced innovation'*) défendent que l'augmentation du prix relatif d'un facteur incite les agents à innover de manière à diminuer l'utilisation du facteur qui est devenu plus cher.

L'explication du changement induit par le changement des prix a été originalement proposée par Hicks :

« a change in the relative prices of the factors of production is itself a spur to invention, and to invention of a particular kind—directed to economizing the use of a factor which has become relatively expensive. » (Hicks, 1932, p.124)

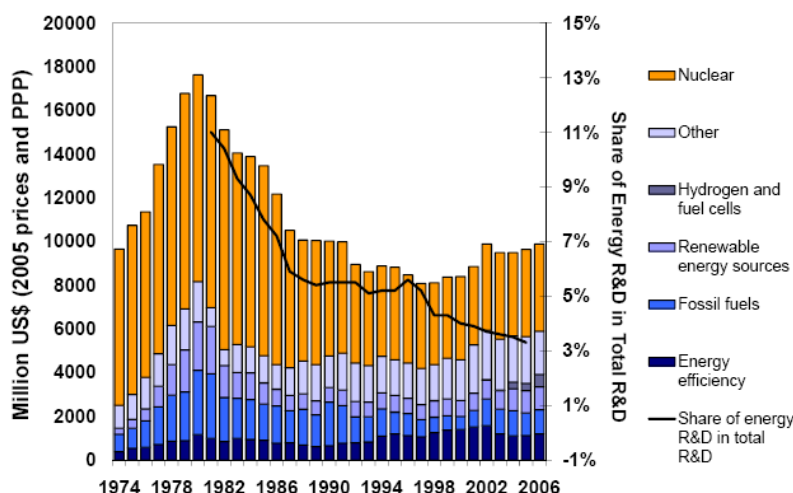
La théorie hicksienne a ouvert la voie à une vague d'études théoriques et empiriques à partir des années soixante.²⁰⁰ Les premières travaux ont eu un caractère plus macroéconomique et se sont focalisé sur l'impact du changement des prix relatifs sur l'utilisation des facteurs de production travail et capital au niveau de l'économie. Les effets sur la R&D et le progrès technique sont aussi étudiés tant au niveau macroéconomique que microéconomique. Ahmad (1966) a élargi les bases microéconomiques de l'hypothèse de l'innovation induite, en montrant que l'investissement en R&D peut être influencé par l'altération des prix relatifs des facteurs, ce qui aura un impact sur la frontière des possibilités de production future de la firme.

Cependant, les premiers travaux sur le changement technologique induit ont été critiqués pour avoir traité le progrès technique comme une variable exogène, ne permettant pas de comprendre les facteurs qui sont à la base du changement tels que la formation des connaissances et la politique d'investissement en R&D (Nordhaus, 1973b). Par la suite, la recherche a donné plus de place à l'analyse du processus d'innovation (voir les points suivants).

Dans le secteur de l'énergie, les investissements en R&D ont montré une certaine corrélation avec les tendances du prix du pétrole au moins depuis les années 1970. A partir de l'analyse de l'évolution des dépenses en R&D (entrant ou *'input'*) des pays développés et des brevets déposés (l'innovation ou *'output'*) de technologies énergétiques, Margolis et Kammen (1999) montrent que l'effort d'innovation dans le secteur des technologies de l'énergie a drastiquement diminué depuis la seconde moitié des années quatre-vingt, coïncidant avec le contre-choc pétrolier pendant lequel le prix du baril est tombé de 40 dollars à 10 dollars entre 1981 et 1986. Aux Etats-Unis, en 1995, les dépenses en R&D représentaient moins de 1% du chiffre d'affaires dans le secteur de l'énergie, à comparer avec 10% en moyenne dans les secteurs des équipements de communication ou de la pharmaceutic. Les données plus récentes montrent que la situation n'a pas beaucoup changé entre-temps (graphique 53).

²⁰⁰ Les premiers développements ont été faits par Kennedy (1964), von Weizsacker (1965) et Samuelson (1965). Pour une révision de la littérature, voir notamment: Thirtle et Ruttan (1987).

Graphique 53. Les dépenses publiques en R&D dans le domaine de l'énergie des pays membres de l'AIE



Source : AIE, 2008c.

En ce qui concerne les pays membres de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE),²⁰¹ la plus grande partie du budget public destiné à la R&D des technologies énergétiques est habituellement dépensée dans le nucléaire, suivie par les dépenses en efficacité énergétique. Le graphique montre encore que le développement des technologies renouvelables n'a pas été une priorité pour les gouvernements pendant la période temporelle analysée. Récemment, l'intérêt des gouvernements pour l'hydrogène et les piles à combustibles s'est traduit par une augmentation du budget de R&D.

Popp (2002) a analysé la relation entre le prix de l'énergie et les brevets déposés pour les innovations énergétiques aux Etats-Unis. L'auteur estime à un tiers l'effet de l'augmentation des prix de l'énergie pour l'innovation induite, pendant une période moyenne de 4 ans. La disparition de l'effet est attribuée aux rendements décroissants dans la R&D.

Newell, Jaffe et Stavins (1999) ont étudié l'hypothèse de l'innovation induite par le changement des prix de l'énergie et de la réglementation dans le cas des équipements d'air conditionné et de chauffage au gaz aux Etats-Unis, entre 1958 et 1993. L'étude conclut que l'augmentation des prix de l'énergie suite au premier choc pétrolier (1973) explique entre le quart et la moitié des innovations de produits énergétiquement efficaces pendant les vingt années suivantes. Cependant, l'analyse conclut aussi que le changement autonome lié à la marche naturelle de la technologie a été responsable pour une partie importante des innovations.

En bref, l'augmentation du prix de l'énergie et de la principale matière première (le pétrole) aurait comme effet l'adoption de technologies plus efficaces, et l'investissement en R&D dans les nouvelles technologies très basse consommation. Dans ce cadre, le marché suffirait pour régler le problème technologique puisque le mécanisme de prix exprime la raréfaction de la ressource et les agents adoptent la technologie idéale au bon moment. Cette position libérale suppose que le système de prix fonctionne à la perfection et ne comporte pas de distorsions. Or il est facile de trouver des exemples où l'existence d'externalités altère les prix relatifs. Ces distorsions peuvent

²⁰¹ Allemagne, Australie, Autriche, Belgique, Canada, Corée du Sud, Danemark, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Italie, Japon, Luxembourg, Norvège (ce pays participe à l'AIE sous une convention spéciale), Nouvelle-Zélande, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Slovaque, République Tchèque, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Turquie.

toutefois être minorées par la mise en place d'instruments de réglementation comme les taxes.²⁰² En outre, les irréversibilités technologiques ne sont pas prises en compte, ce qui ne permet pas de comprendre la raison pour laquelle les technologies les plus efficaces n'arrivent parfois pas à s'imposer sur le marché.

1.3.2. Le « push » de la science versus le « pull » du marché

L'explication du processus de changement technologique et l'identification des sources d'innovation a donné lieu à un long débat dans la science économique. Un courant défend l'idée que les opportunités technologiques (*'technology push'*) sont la cause des innovations dans l'économie Rosenberg (1976). Les auteurs qui postulent cette vision sont favorables à la politique de poussé technologique. C'est-à-dire qu'ils considèrent que l'état peut stimuler l'innovation (et donc la croissance économique) à travers l'ouverture de nouvelles opportunités technologiques par le biais des dépenses publiques en recherche, ou par le soutien de la R&D privée.

Un autre courant postule que les innovations sont déterminées par la demande (*'market pull'*). Pour Schmookler (1966), les changements de la demande sur le marché influencent l'allocation des ressources des firmes dans les activités d'innovation, puisque c'est la demande qui détermine le succès final de l'innovation. Dans le cas des technologies énergétiques, l'état peut donner une impulsion à l'activité innovante par la diffusion d'informations sur les vertus de l'innovation ou par l'imposition des normes technologiques.

Cette vision du processus d'innovation a été développée par une large littérature empirique pendant les années soixante et soixante-dix.²⁰³ Mowery et Rosenberg (1982) ont révisé la littérature de la « demand pull ». Les auteurs argumentent que les méthodes utilisées sont parfois inconsistantes, avec des concepts peu précis, le choix des questionnaires contestable, les interprétations ambiguës et particulièrement biaisés par l'idée de l'importance de la demande dans le processus d'innovation. Le rôle joué par la demande peut être limité par la nouveauté de l'innovation, ou lorsque celle-ci a besoin d'actifs complémentaires. Si l'on prend le cas des innovations majeures, la demande est typiquement moins capable de formuler des jugements sur le potentiel technologique que dans le cas des innovations incrémentales (Freeman, 1982). De plus, une innovation radicale peut avoir besoin d'un entrant complémentaire telle qu'une infrastructure de distribution (Saviotti, 1996). Dans ces cas, son absence retarde la diffusion de l'innovation.

Les deux visions (« pull » du marché et « push » technologique) représentent le processus d'innovation d'une façon linéaire. Cette représentation est peu réaliste et va contre les exemples historiques, par exemple dans l'industrie aéronautique ou électronique, où les opportunités technologiques se sont conjuguées aux besoins spécifiques de la demande pour guider l'innovation (Rosenberg, 1982).

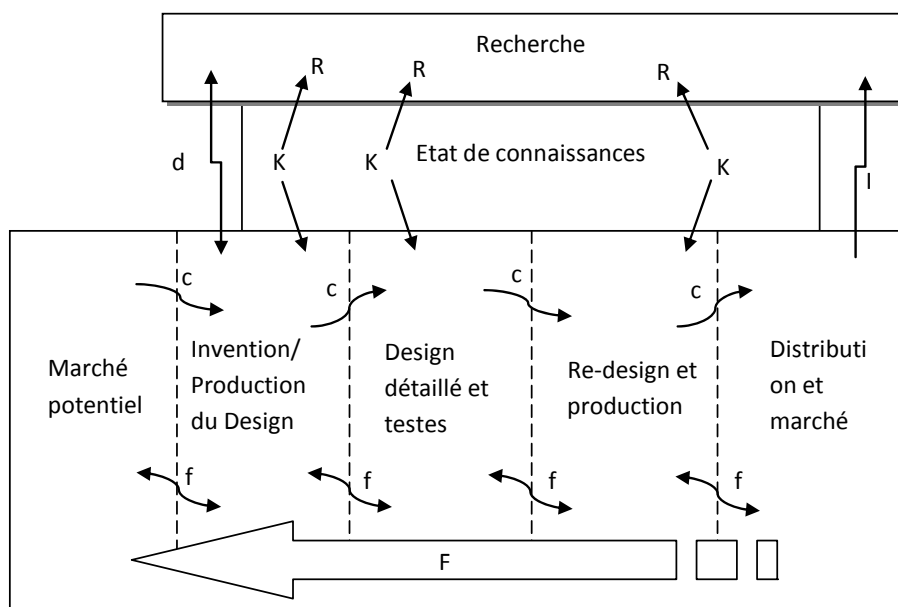
²⁰² Voir chapitre 5.

²⁰³ On peut citer les travaux du projet HINDSIGHT et SAPHO.

Le processus d'innovation est alors le résultat d'un processus interactif entre la demande et la science. Rosenberg (1982) évoque le rôle de l'apprentissage par l'usage (*'learning-by-using'*) pour l'amélioration de l'innovation initiale.²⁰⁴

Le modèle de Kline et Rosenberg (1986) est venu trancher dans le débat entre le « push » technologique et le « pull » du marché (graphique 54). Selon les auteurs, les modèles linéaires d'innovation ont des difficultés pour représenter le processus de changement technique pour deux ordres de raisons. Premièrement, les modèles linéaires ne considèrent des rétroactions (*'feedbacks'*) ni pendant le développement de la technologie ni entre les utilisateurs et la firme. Deuxièmement, les premières versions de l'innovation sont typiquement très imparfaites, et leur performance est loin du potentiel technique maximal. Ainsi, pour que la technologie réussisse, un processus d'amélioration et de reconfiguration continu, prenant en compte les informations (*'feedbacks'*) entre les différents étapes de développement jusqu'à la commercialisation, est essentiel. Et aussi, qui tient compte de l'ensemble des connaissances disponibles.

Graphique 54. Le modèle de « liaison en chaîne » de Kline et Rosenberg (1986)



- c : Chaîne centrale d'innovation
- f: Feedback internes
- F : Feedback externes
- K-R : Liaison entre la chaîne centrale d'innovation, l'état des connaissances disponibles et la recherche
- I : Mise à disposition de technologies pour la recherche, ainsi que des informations sur les marchés à explorer dans l'avenir

Le modèle d'innovation de Kline et Rosenberg est constitué par une chaîne centrale d'innovation, par les interactions internes à la chaîne (*'loops'*) et externes avec le marché et les instances de connaissances et de recherche (la science). A la fin de la construction du premier prototype, l'innovation suit les phases d'amélioration et de test pendant lesquelles elle est réorganisée avant d'être mise en production et finalement commercialisée.

²⁰⁴ « What we are describing here is a feedback loop in the development stage. Optimal design often involves many interactions. » (Rosenberg, 1982, p.123)

Le processus d'innovation démarre avec la conception (design) du produit qui est déterminé par les besoins non satisfaits des consommateurs. Ainsi, le modèle de Kline et Rosenberg peut être associé aux théories du « pull » du marché. Mais, il se peut que le marché potentiel soit ouvert par un nouveau produit, voire même une innovation radicale. Dans ce cas, l'innovation serait plutôt motivée par un « push » technologique.

Dans ce modèle, la science n'est pas à la base du processus d'innovation. En effet, elle accompagne le processus tout au long de la chaîne centrale d'innovation au fur et à mesure que des nouvelles nécessités techniques apparaissent et ne trouvent pas de solution dans l'état actuel des connaissances. A ce moment, un processus de recherche est mis en marche de façon à trouver la solution aux problèmes rencontrés pendant le développement du produit. La science profite aussi des retours du marché pour améliorer les produits et réorienter les recherches dans la direction des marchés potentiels de l'avenir.

Cette représentation intégrée convient particulièrement bien à la représentation de l'innovation dans la filière de l'hydrogène et piles à combustible (PAC). D'une part, le besoin de solutions durables, spécialement dans les transports, demande une transition vers de nouvelles technologies permettant à la fois de résoudre le problème de la rareté des sources fossiles, de l'augmentation attendue de la consommation énergétique, et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. D'autre part, les avancées technologiques de la pile à combustible à membrane d'échange de protons ('*Proton exchange membrane*' ou PEMFC) depuis les années 1960 ont ouvert de nouvelles perspectives pour les technologies mobiles.

La vision interactive du processus de changement technique considère que ce dernier est le résultat à la fois du stimulus de la demande et de l'avancée de la science. Cela a des conséquences au niveau des politiques publiques. Ainsi, le soutien de la recherche fondamentale et appliquée est fondamental pour encourager l'innovation dans l'économie. Mais aussi la création d'un cadre institutionnel qui facilite les interactions entre la science et les acteurs de l'innovation (les entreprises et les consommateurs).²⁰⁵

1.3.3. La perspective évolutionniste du changement technique

Les développements récents des thèses évolutionnistes trouve ses origines dans les critiques de la représentation classique du changement technologique jugée insatisfaisante et irréaliste (Nelson et Winter, 1982 ; Dosi, 1988a). Les théories évolutionnistes s'efforcent d'offrir une vision plus large par l'analyse du processus de création de variété et de sélection technologique.

Le changement économique à long terme est situé au cœur de l'analyse évolutionniste. Il s'agit précisément de l'analyse des mécanismes de sélection qui favorisent les firmes/technologies les mieux adaptées à l'environnement de sélection. Du fait de cette préoccupation, les évolutionnistes ont pris leurs distances avec les thèses néoclassiques - auxquelles ils rapprochent l'irréalisme des hypothèses de la rationalité optimale et de l'information parfaite, le caractère mécaniciste des

²⁰⁵ « *In addition to nourishing the supply side in a broader range of areas, intelligent policies must be directed at the institutional aspects of the innovation process, working to encourage the interaction of users and producers, as well as iterative interactions between more basic and applied research enterprises.* » (Rosenberg, 1982, p.237)

équilibres et la place des analyses statiques – qu'ils considère être en contraste avec un environnement réel très dynamique.²⁰⁶

Pour les auteurs évolutionnistes, le comportement des agents ne résulte pas de l'optimisation des profits ou de l'utilité mais d'un processus imparfait d'adaptation aux modifications de l'environnement de sélection. La firme évolutionniste adopte alors un comportement qui est satisfaisant (Nelson et Winter, 1982 ; Simon, 1976). A la différence de la théorie néoclassique qui considère que les meilleures technologies ('best practice technologies') sont choisies et qu'il n'existe pas d'incertitude sur les caractéristiques de la technologie, la théorie évolutionniste prend en compte l'indivisibilité des facteurs (Dosi, 1982, 1988a). Le choix technologique serait ainsi contraint par les trajectoires technologiques définies par les croyances partagées entre les innovateurs, d'une part ; et par un processus de recherche de technologies caractérisé par le recours à des routines (procédures stables d'action spécifiques à chaque agent), d'autre part. Alors, ce choix a un caractère irréversible dans la mesure où le comportement des firmes est conditionné par les routines employées dans le passé (David, 1985).

Dans les points suivants, nous exploitons les caractéristiques principales de l'analyse évolutionniste de l'innovation : l'hypothèse de la rationalité limitée et de l'incertitude ; la création de la variété et de sélection technologique ; la dépendance de sentier ; et l'influence des facteurs conjoncturels de changement technologique.

A. La rationalité limitée et l'incertitude de l'environnement

Une hypothèse centrale de la théorie évolutionniste est la prise en compte de la rationalité limitée des agents ('bounded rationality'). Les agents disposent d'une capacité de décision qui est limitée, et ils n'ont pas accès à toutes les informations nécessaires à la décision (Simon, 1959, 1991). Cette hypothèse rend les analyses plus réalistes, au prix d'une plus grande complexité opératoire.

« [la rationalité limitée] est une rationalité qui est en cohérence avec notre connaissance du comportement humain réel qui préside aux choix, [elle] suppose que le décideur doit rechercher des solutions alternatives, a une connaissance incomplète et inexacte des conséquences des actions et choisit les actions dont il espère qu'elles seront satisfaisantes. » (Simon, 1997, p. 17, cité par Arena et Lazaric, 2003, p.337).

En raison de la nature limitée de la rationalité, les agents ne sont pas en mesure de prévoir les résultats exacts de leurs actions. Toutefois, la procédure de prise de décision des agents est considérée comme rationnelle puisqu'ils sont en mesure d'expliquer les raisons des décisions, la plupart du temps (Simon, 1991). Cette conception de la rationalité procédurale s'oppose à la rationalité substantive implicite à l'analyse économique néoclassique où l'*homo oeconomicus* est capable d'effectuer des calculs complexes et des choix optimaux (Simon, 1976). La rationalité procédurale considère que la recherche des solutions alternatives n'est pas caractérisée par la poursuite de l'optimum, mais elle s'arrête à la solution considérée satisfaisante.

²⁰⁶ Pour une révision de la littérature évolutionniste du changement technique, voir : Clark et Juma, 1988 ; Arena et Lazaric, 2003.

Les travaux de Simon ont inspiré le programme de recherche des auteurs évolutionnistes. Nelson et Winter (1982) notent que les entreprises n'utilisent pas des outils de décision très élaborés par manque de temps ou de compétences. A l'opposé de l'analyse néoclassique qui considère les agents rationnels et optimisateurs, les firmes évolutionnistes ont un comportement satisfaisant. Néanmoins, Nelson et Winter (1982) remarquent que le résultat de l'ensemble des décisions des entreprises se rapproche de la solution optimale.²⁰⁷

La prise en compte de la rationalité limitée et de l'incertitude - notamment au niveau de l'adoption technologique - introduit une autre grande différence méthodologique entre les deux approches théoriques. Dans les modèles néoclassiques, les firmes choisissent les meilleures technologies ('*best practice technology*') n'ayant pas d'incertitude sur les caractéristiques de la technologie adoptée ; alors que les modèles évolutionnistes prennent en compte l'incertitude portant sur les différentes technologies pour anticiper de manière plus réaliste la progression de chacune sur le marché.

B. La création de diversité technologique

L'innovation est à la base du développement technique et du changement des structures économiques. Elle permet l'assimilation de nouveaux produits, procédés, pratiques, etc., ce qui augmente la variété technologique.

L'importance de la variété technologique comme indicateur du développement économique a été très tôt remarquée par les économistes évolutionnistes. En effet, Schumpeter (1912) a défini le développement économique comme le résultat des nouvelles combinaisons ('*new combinations*') des moyens productifs réalisées par les entrepreneurs. Plus tard, dans son explication des cycles économiques, Schumpeter (1942) développe le concept de « destruction créatrice » pour le processus incessant de transformation des structures économiques à partir de leur intérieur, en créant des nouvelles structures qui remplacent les éléments nouveaux rendus entretemps obsolètes.

Le concept de variété technologique est une mesure qualitative du changement économique. Cette variable est définie par Saviotti (1996) comme le nombre d'acteurs différents, activités et objets requis pour caractériser un système économique. Ainsi, il s'agit d'une condition nécessaire pour la poursuite du développement économique à long terme. D'une manière générale, la variété augmente avec la taille du marché ; et diminue avec la concurrence, lorsque les économies d'échelle sont importantes et les biens sont substituables (Saviotti, 1996).

La variété technologique est limitée par un ensemble de forces qui caractérisent la sélection technologique. Toutes les innovations ne connaissent pas le succès ; ainsi, les vieilles technologies sont normalement remplacées par les nouvelles technologies plus performantes. Alors l'augmentation de variété est souvent suivie par une sélection qui réduit les choix technologiques ; les deux processus sont à la base de l'explication évolutionniste du changement technologique.

²⁰⁷ « *Man's rationality is « bounded » : real-life decision problems are too complex to comprehend and therefore firms cannot maximize over the set of all conceivable alternatives. Relatively simple decision rules and procedures are used to guide action ; (...) however they may be quite satisfactory for the purposes of the firm given the problems the firm faces.* » (Nelson et Winter, 1982, p.35).

C. L'environnement de sélection

Dans la conception évolutionniste, les entreprises et les technologies font l'objet d'un processus économique de sélection identique à la sélection naturelle en biologie.²⁰⁸ Dans les premières formulations du concept faites par Nelson et Winter (1977), la notion d'environnement de sélection est presque équivalente à celle de marché. Le succès sur le marché dictant la capacité de l'entreprise à survivre et à croître (Nelson et Winter, 1982, p.9). Ce concept a entretemps évolué pour inclure aussi les facteurs institutionnels tels que la réglementation, les standards, l'interaction avec les concurrents en présence, et la pression du public (Nelson et Winter, 1977, 1982 ; Dosi, 1982 ; Coombs et al, 2001).

« We propose that a rigorous general model of the selection environment can be built from specification of these three elements: the definition of 'worth' or profit that is operative for the firms in the sector, the manner in which consumer and regulatory preferences and rules influence what is profitable, and the investment and imitation processes that are involved. » (Nelson et Winter, 1977, p. 64)

Le marché reste un baromètre fondamental. Le succès de l'innovation sur le marché augmente les profits de l'innovateur. L'entreprise profitable croît en même temps que diminue la part de marché des autres entreprises, ce qui réduit leur profitabilité (Nelson et Winter, 1977, p.64). Ainsi, les entreprises non-innovantes sont forcées à se contracter. Cette thèse trouve ses origines dans les écrits de Marshall :

« a business firm grows and attains greater strength, and afterwards perhaps stagnates and decays ; and at the turning point there is a balancing or equilibrium of the forces of life and decay ... » (Marshall, 1959, p.12).

De cette manière, les profits des innovateurs et les pertes des autres entreprises stimulent les dernières à innover aussi. Au-delà de l'innovation, Nelson et Winter (1982) envisagent encore d'autres types d'adaptation à l'environnement de sélection par les firmes non-innovantes : la copie ; la disparition pure et simple ; ou l'imitation. Dans la tradition Schumpetérienne, l'imitation est considérée comme le mécanisme dominant par lequel les innovations – surtout les innovations de procédé -se diffusent (Nelson et Winter, 1982, p.272).

Le succès de l'innovation dépend de l'évaluation des consommateurs. Toutefois, l'importance du comportement des consommateurs pour le succès de l'innovation n'est pas la même selon le type d'innovations, de produit ou de procédé (Nelson et Winter, 1977, p.64). Les innovations de procédé qui ne changent pas les caractéristiques du produit final ne doivent pas entraîner un changement du comportement des consommateurs. A l'opposé, la viabilité des innovations de produit est liée à la

²⁰⁸ Les thèses de la biologie évolutive sont très influencées par les théories de la « sélection naturelle » de Darwin (C. Darwin (1859), *De l'origine des espèces par voie de sélection naturelle*). L'auteur explique l'évolution des espèces en termes de constitution génétique (génotype) et comportementale (phénotype), ainsi que d'adaptation au milieu. Les espèces mieux adaptées à l'environnement naturel de sélection « survivent » tandis que celles qui sont peu adaptées « périssent ». Cependant, le déterminisme du processus de sélection naturelle par rapport aux caractéristiques initiales des espèces ne fait pas consensus. Le naturaliste français Jean-Baptiste de Lamarck (J.-B. Lamarck (1809), *Philosophie zoologique*). considère que les agents sont aussi influencés par son contexte, lequel les poussent à développer des caractéristiques organiques de manière à mieux s'adapter à l'environnement de sélection.

Une synthèse de l'influence de la biologie dans la tradition de la pensée évolutionniste peut être consultée dans Mokyr (1991) et Saviotti (1996).

réaction positive des consommateurs. Le succès d'une innovation de produit dépend beaucoup de son acceptation par le marché.

Mais aussi, l'environnement de sélection comprend les acteurs ayant le pouvoir d'influencer l'environnement où se déroule la concurrence technologique ou entre les firmes (Dosi, 1982). L'environnement de sélection peut être modifié par l'intervention du gouvernement à travers le financement de la R&D, la mise en place de standards obligatoires, la réglementation économique, etc. Deuxièmement, l'environnement de sélection est spécifique à chaque secteur et à chaque technologie. Il peut être caractérisé par la disponibilité et la provenance (publique ou privée) des capitaux, la nécessité de biens complémentaires (par exemple, les infrastructures physiques), la liaison entre fournisseur et l'utilisateur (client final ou intermédiaire), les compétences requises, les routines, les préférences de consommateurs et les croyances des innovateurs (Kemp, 1997).

Les développements théoriques plus récents en la matière mettent l'accent sur le contexte socio-économique de la technologie et de la firme, au-delà de la simple notion de marché (Kemp, 1994) :

« *The important point here is that technology needs to be incorporated into a larger technical and socioeconomic system which has evolved in the process of development.* » (Kemp, 1994, p.1031)

Cela explique pourquoi les innovations pouvant intégrer facilement le système social et économique se diffusent plus rapidement que les technologies exigeant le remplacement des biens de capital telles que les infrastructures, comme c'est le cas des voitures électriques ou à hydrogène.

En termes évolutionnistes, les entreprises et les technologies sont sélectionnées sur la base de leur adaptation à l'environnement. Cette conception peut paraître plus proche des thèses Darwiniennes où les meilleures survivent. Néanmoins, les hypothèses évolutionnistes de la rationalité limitée et de l'incertitude de l'environnement (Simon, 1991) changent le caractère de l'analyse. Les entreprises adoptent des stratégies conscientes de planification et d'adaptation à leur contexte. Cela rejoint les conceptions évolutionnistes Lamarckiennes où les organismes génèrent des mutations afin de mieux s'adapter à l'environnement (Saviotti, 1996).

D'un point de vue dynamique, l'évolution de la part de marché de chacune des technologies est déterminée par l'environnement de sélection (Nelson et Winter, 1982). D'une part, il contribue à améliorer la productivité de l'innovation par les économies générées au niveau de la production et de la consommation. D'autre part, l'environnement de sélection influence la priorité des projets de R&D des entreprises en faveur des innovations les plus rentables. Donc il intervient au niveau de la direction des améliorations marginales attendues dans l'avenir, en privilégiant un certain type de technologies au détriment d'autres, *a priori* moins rentables.

Ainsi, le processus de sélection des technologies est à la base de l'émergence de designs dominants, ce qui réduit la variété technologique (Nelson et Winter, 2002 ; Saviotti, 1996; Abernathy et Utterback, 1976). Les innovations les plus adoptées bénéficient davantage des améliorations continues, ce qui leur permet de fermer graduellement le marché aux technologies concurrentes.

D. Dépendance de sentier et verrouillage technologique par des événements historiques

L'explication évolutionniste de la diffusion des technologies part d'un double constat : 1) le marché ne retient pas toujours les meilleures technologies ; et 2) la sélection technologique est le résultat d'un processus dynamique où interviennent plusieurs facteurs. Pour les auteurs évolutionnistes,

l'adoption technologique entraîne des effets dynamiques cumulés au fil du temps en bénéficiant de la technologie la plus adoptée. Dans cette perspective, la sélection technologique est plus le résultat d'un processus interactif de choix technologique et de valorisation de la technologie adoptée, qu'un processus prévisible de rétention de la technologie supérieure.

« Along with both types of learning curves the accumulation of experience—in production and in utilization—that diffusion itself makes possible is seen to govern and sustain a continuing flow of incremental innovation. And such innovations, by lowering the effective « cost » of successive vintages of the embodied technology, reciprocally extend its penetration into new markets and areas of application. » (David, 1988, p. 384).

Cette vision dynamique de l'évolution technologique considère que plusieurs résultats finals sont possibles. Elle est ainsi en contradiction avec les thèses néoclassiques qui défendent l'existence d'un équilibre unique, lequel peut être atteint indépendamment des conditions initiales ou des accidents historiques. Dans la perspective évolutionniste, la complexité des technologies et la rationalité limitée ne permettent pas aux agents de prévoir exactement la part de marché de chaque technologie à long-terme. De plus, le manque d'information et l'incertitude peuvent constituer une barrière à la diffusion des meilleures technologies.

Alors, l'évolution technologique est le résultat d'un processus cumulatif influencé par la succession d'événements historiques et par les choix du passé (Arthur, 1988). Selon David (1985, 1988), la diffusion technologique est marquée par une dépendance de sentier (*'path dependence'*). Dans le jargon des évolutionnistes, le processus est non-ergodique, c'est-à-dire que le résultat final n'est pas prévisible au départ et dépend de la succession de décisions d'adoption (Arthur, 1989).

« The argument of this paper suggests that the interpretation of economic history should be different in different returns regimes. Under constant and diminishing returns, the evolution of the market reflects only a priori endowments, preferences, and transformation possibilities; small events cannot sway the outcome. But while this is comforting, it reduces history to the status of mere carrier—the deliverer of the inevitable. Under increasing returns, by contrast, many outcomes are possible. Insignificant circumstances become magnified by positive feedbacks to "tip" the system into the actual outcome "selected." The small events of history become important. » (Arthur, 1989, p.127)

Ainsi, une technologie devient la plus efficiente parce qu'elle est la plus adoptée. En effet, l'adoption de la technologie rend la technologie plus attractive par une série de raisons. Arthur (1988) identifie cinq sources de « rendements croissants d'adoption » à la base de la création des avantages dynamiques des technologies les plus adoptées : apprentissage par l'usage ; externalités de réseau ; économies d'échelle dans la production ; rendements croissants de l'information ; et interrelation technologique (ex. l'infrastructure). Ces facteurs sont analysés plus en détail dans la prochaine section.

Le clavier QWERTY a pu alors s'imposer face au standard DVORAK, pourtant jugé plus efficient, par un effet d'apprentissage et de réseau (David, 1985). En l'absence de la capacité de prévoir *ex-ante* l'évolution technologique, le marché s'est orienté vers le standard inférieur. La dynamique décentralisée des décisions aurait contribué à renforcer cette direction. D'autres travaux sont toutefois venus contester cette inefficience du marché en argumentant qu'il n'est pas certain que l'alternative technologique aurait pu atteindre de meilleures performances si elle avait été retenue à

la place de l'option dominante (Liebowitz et Margolis, 1994, 2000). Et même si la norme écartée était supérieure, il s'agit essentiellement d'un problème de coordination entre les agents plutôt que d'une véritable externalité. Lorsque le meilleur standard est connu et qu'il est possible de changer de norme sans trop de coûts, ceux qui bénéficient du changement seraient intéressés à négocier les frais de basculement de système technologique (Liebowitz and Margolis, 2000).

E. Les facteurs à la base du changement technique dans l'histoire

Les systèmes technologiques ne sont pas éternels et ils évoluent en réponse aux transformations de l'environnement de sélection. Dosi (1988b) considère que le changement technologique est un processus complexe et déterminé par une série de facteurs comme : les goulets d'étranglement technologique ('*technology bottlenecks*'); la raréfaction des entrants de production ; la croissance et la structure de la demande ; et les facteurs d'ordre politique.

Rosenberg (1976) a analysé le changement technique dans l'industrie textile en Angleterre au XIX^{ème} siècle. Premièrement, les progrès au niveau de la filature n'ont pas été suivis par les maillons suivants de la chaîne de production (tissage et finition), ce qui a été à l'origine d'un dysfonctionnement au niveau de la production. Les firmes ont ainsi été incitées à innover dans les activités à l'aval de la chaîne de façon à lever les goulets d'étranglement existant. Deuxièmement, la rupture de fournitures en coton américain pendant la guerre civile a poussé les industriels à innover dans le sens de réduire la consommation de matières premières dans la production, d'une part ; et de l'utilisation de nouvelles fibres, d'autre part. Enfin, les mouvements syndicaux et les grèves du XIX^e ont incité les entrepreneurs à innover de façon à réduire la dépendance au facteur travail.

Dans le domaine de l'énergie, les anticipations de goulets d'étranglement et de crises des entrants sont également importantes pour expliquer l'évolution des systèmes énergétiques (Martin, 1998). Ainsi, l'intérêt pour les combustibles alternatifs comme l'hydrogène apparaît naturellement dans le contexte actuel marqué par le débat sur la raréfaction du pétrole, le réchauffement climatique et la nécessité de réduction drastique des émissions. La sensibilisation des acteurs aux problèmes environnementaux et énergétiques peut ouvrir la fenêtre pour l'entrée des alternatives technologiques et sortir de l'actuel paradigme techno-économique dominé par le pétrole (Freeman et Perez, 1988 ; Unruh, 2002).

La question qui se pose alors est celle de l'organisation de l'innovation - depuis l'idée jusqu'au marché ; et quelles sont les stratégies pour diffuser l'hydrogène dans le marché. Dans la section suivante, nous passons en revue les différentes étapes du processus d'innovation pour ensuite discuter les stratégies à déployer pour lever les obstacles qui entravent la transition vers une économie de l'hydrogène.

Section 2. La dynamique d'innovation dans les technologies énergétiques

Les innovations énergétiques demandent normalement la mobilisation d'énormes ressources (financières, humaines, etc.), ce qui rend le processus d'innovation plus complexe que dans la plupart des secteurs de l'économie. On peut identifier plusieurs étapes dans le processus d'innovation (2.1).

Tout d'abord, l'invention nécessite de la recherche et développement (2.2). Un moment critique pour l'innovation apparaît au niveau de la transition entre le laboratoire et la commercialisation (2.3). L'apprentissage est un élément-clé pour la compétitivité de la technologie (2.4), ce qui sera décisif pour sa diffusion (2.5).

2.1. Les étapes du changement technologique

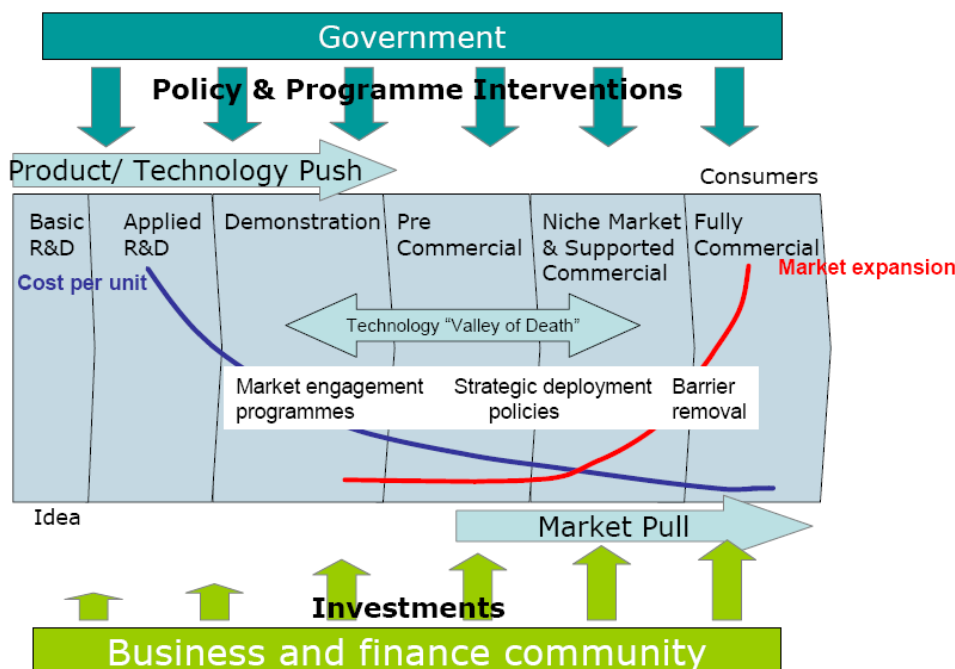
Le changement technologique est habituellement représenté dans la littérature comme un processus linéaire composé de plusieurs phases successives. Les origines de cette vision remontent à Schumpeter (1942) qui a distingué dans le processus complexe d'innovation trois étapes : l'invention, le moment de la création de l'idée ; l'innovation, la période de valorisation économique du nouveau concept ; et la diffusion, par l'adoption des utilisateurs et l'imitation des concurrents. Freeman (1982) synthétise ce traitement analytique du processus d'innovation de la manière suivante :

« We owe to Schumpeter the extremely important distinction between inventions and innovations, which has since been generally incorporated into economic theory. An invention is an idea, a sketch or model for a new or improved device, product, process or system. Such inventions may often (not always) be patented but they do not necessarily lead to technical innovations. In fact the majority do not. An innovation in the economic sense is accomplished only with the first commercial transaction involving the new product, process, system or device, although the word is used to describe the whole process. » (Freeman, 1982, p.7)

Du fait des investissements initiaux élevés et des nécessités en infrastructure, le changement technique dans le secteur de l'énergie est différent par rapport à d'autres technologies.

Dans la section précédente, nous avons pu constater les limites de la vision linéaire du processus de changement technologique. Grubb (2004) propose une représentation de la chaîne d'innovation dans les industries énergétiques qui intègre les interactions entre la demande et l'offre de technologie. Le schéma ci-dessous prend aussi en compte les influences externes telles que le cadre réglementaire et le contexte des investissements. L'auteur identifie six phases dans le processus d'innovation (graphique 55) : 1) la recherche fondamentale ; 2) la recherche appliquée, le développement et la démonstration ; 3) les démonstrations, les tests à échelle réelle et les premières estimations du potentiel économique de technologique ; 4) la commercialisation (l'entrée dans le marché ou 'start-up') ; 5) l'accumulation de marchés ; et 6) la diffusion à grande échelle.

Graphique 55. La chaîne d'innovation dans les industries énergétiques



Source : Grubb, 2004.

Dans les points suivants, nous analysons les phases les plus importantes du processus d'innovation des technologies énergétiques. Les éléments traités sont la recherche et le développement (2.2), la phase de transition entre le laboratoire et le marché (2.3), l'apprentissage technologique (2.4) et la diffusion (2.5).

2.2. La recherche et développement (R&D)

L'innovation et le changement technique s'appuient sur un certain stock de connaissances disponibles dans l'économie. Les théories de la croissance endogène²⁰⁹ considèrent le stock de « capital connaissance » (*'knowledge capital'*) comme un des facteurs de la croissance économique. La recherche et développement (R&D) alimente le stock de connaissances et par ce biais, elle est à la base des innovations et donc indirectement de la croissance économique.

Une première distinction conceptuelle doit se faire entre la recherche fondamentale et la recherche appliquée. La recherche fondamentale concerne les recherches dont les résultats ont un potentiel d'application pratique à terme. La recherche appliquée se réfère aux activités liées à la création et à l'amélioration d'une technologie donnée. Par rapport à la vision linéaire ou schumpetérienne des étapes de la recherche, il est probable que l'invention soit le résultat d'un processus de recherche fondamentale ; alors que la recherche appliquée donne lieu à des innovations (ou à des améliorations technologiques). Pendant la phase de développement, les résultats de la recherche fondamentale et appliquée sont utilisés pour concevoir les premiers prototypes de la technologie, lesquels seront plus tard testés, augmentés et démontrés en situation réelle aux clients potentiels (Gallagher et al., 2006). Et cela, si les promesses technologiques de l'innovation se confirment dans le temps.

²⁰⁹ Voir, par exemple, Aghion et Howitt, 1998.

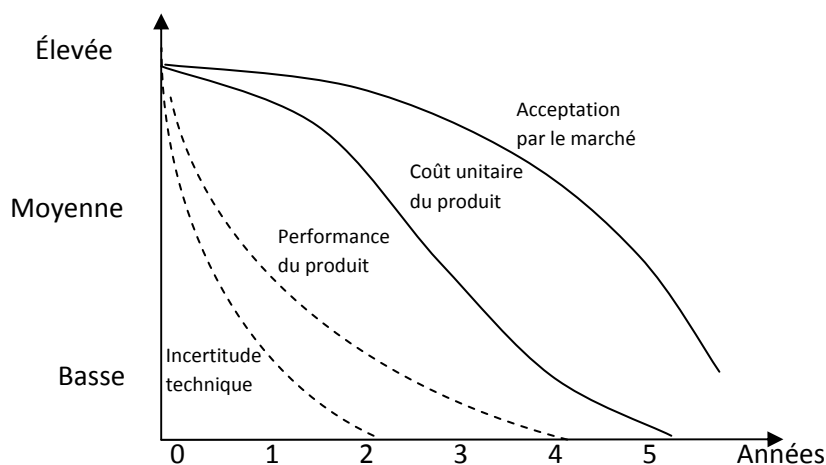
2.2.1. L'incertitude associée à l'innovation

Les firmes investissent en R&D avec l'intention de générer des innovations profitables de produits ou de procédés. L'investissement en R&D a des caractéristiques distinctes par rapport à l'investissement en actifs tangibles. Tout d'abord, le résultat de l'investissement en recherche est plus incertain. Le degré d'incertitude est différent selon le type et la phase de l'innovation. Dans le chapitre 3 nous avons vu que les innovations situées entre la phase de développement et la commercialisation sont marquées par une multitude d'incertitudes qui rendent les investissements très risqués.

Freeman (1982) identifie trois types d'incertitudes : l'incertitude technique ; l'incertitude du marché ; l'incertitude du climat des affaires. Le premier type d'incertitude est d'ordre technique et concerne le degré de confiance quant à la validation des objectifs techniques fixés au début de l'innovation, pendant la phase de développement. L'incertitude de marché est liée à la manière dont l'innovation est acceptée par le marché. Il s'agit d'un type d'incertitude fondamentale puisque la réussite commerciale dicte le succès de l'innovation. Enfin, l'incertitude sur le contexte des affaires est aussi importante puisqu'elle détermine la capacité de l'innovation à générer des retombées financières positives.

D'une manière générale, le degré d'incertitude diminue pendant le développement de l'innovation. Le cas inverse peut amener l'entreprise à cesser ses efforts d'innovation de façon à éviter le risque d'accumulation des pertes. Cela dit, les différentes incertitudes ne se dissipent pas de la même manière (Sherrer, 1999). On s'attend à ce que l'incertitude technique diminue plus vite que l'incertitude sur le climat des affaires et que l'incertitude sur l'acceptation du marché (graphique 56).

Graphique 56. L'évolution des différents types d'incertitudes pendant la phase de développement de l'innovation selon Sherrer (1999)



De plus, le type d'innovation a une influence sur le degré d'incertitude. Le développement d'innovations radicales est associé à une plus grande incertitude (technique, de marché, du contexte des affaires) en comparaison avec les innovations incrémentales (Freeman, 1982). Déjà la recherche fondamentale – nécessaire aux innovations majeures - est considérablement plus incertaine que la recherche appliquée à la simple amélioration technique. De même pour ce qui est de l'incertitude liée à l'innovation de produit et à l'innovation de procédés : la première est plus risquée car elle fait

face à deux types d'incertitudes au moins (technique et de marché), alors que l'innovation de procédé fait surtout face à l'incertitude technique. De surcroît, l'incertitude de marché est souvent moins contrôlable par l'innovateur que l'incertitude technique (Freeman, 1982). Le tableau 27 présente une synthèse des différents degrés d'incertitude par rapport au type d'innovations.

Tableau 27. Le degré d'incertitude associé aux différents types d'innovations

1. Vraie incertitude	Recherche fondamentale
2. Incertitude très élevée	Innovation radicale (produit ou procédé)
3. Incertitude élevée	Innovation majeure de produit Innovation radicale de procédé (dans le propre établissement)
4. Incertitude modérée	Nouvelle génération de produits existants
5. Peu d'incertitude	Imitation d'une innovation de produit Obtention de licence pour développer une innovation Modifications des produits/procédés Adoption précoce d'un procédé
6. Très peu d'incertitude	Nouveau « modèle » Différenciation du produit Adoption tardive d'un procédé Améliorations techniques mineures

Adapté de Freeman, 1982, p.150.

L'incertitude rend plus difficile le financement de la R&D, en particulier pour les firmes de petite taille qui doivent faire appel à des capitaux externes pour financer leurs projets de recherche (Jaffe et al, 2003).

2.2.2. Le problème de l'appropriation

Une autre question se pose par rapport à l'appropriation des résultats de la recherche. La connaissance est un bien à caractère public, c'est-à-dire que, une fois produite, il devient difficile pour l'innovateur d'exclure autres firmes de son utilisation. La firme peut essayer de garder les résultats secrets, ce qui n'est toutefois pas une stratégie totalement sûre. Cependant, lorsqu'il s'agit des innovations de produit, elle doit rendre l'innovation disponible au public de manière à pouvoir rentabiliser sa découverte. Ce faisant, la connaissance associée à l'innovation est rendue (en totalité ou en partie) aussi publique. Cela veut dire que celle-ci devient disponible à tous les concurrents du marché.

Il s'agit du problème de l'appropriation des bénéfices de l'innovation. Les firmes ne réussissent pas à s'approprier tous les bénéfices sociaux de leur innovation. Une partie des retombés de l'innovation ('spillovers') est captée par ses concurrents, les consommateurs et les firmes à l'aval, ce qui réduit les incitations à innover (Griliches, 1992).

La divergence entre les bénéfices sociaux et les bénéfices privés provoque un investissement sous-optimal en R&D par rapport à l'optimum social (Arrow, 1962a). La littérature empirique identifie un bénéfice social marginal de 30 à 50%, pour un bénéfice marginal privé entre 7 et 15% (Pizer et Popp, 2008). L'activité de recherche se voit ainsi limitée en raison d'une défaillance de marché qui ne permet pas à l'innovateur de récupérer tous les bénéfices de l'innovation.

De plus, l'existence des 'spillovers' augmente les risques des premiers entrants sur le marché (Katz et Shapiro, 1986). C'est le cas en particulier des technologies à l'état de pré-commercialisation dont on attend d'importants gains d'apprentissage. Le déploiement de ces technologies est bénéfique pour la société dans la mesure où cela permet de réduire les coûts. Les entreprises hésitent toutefois à

s'engager en craignant que ce soit leurs concurrents qui profiteront le plus de leur investissement (Sherrer, 1999).

2.2.3. Les dépenses privées en R&D en environnement concurrentiel

Dans un cadre concurrentiel, les investissements privés en R&D sont confrontés à une série de défis à relever. Premièrement, le problème de l'incitation des entreprises à investir en R&D quand les résultats peuvent être gratuitement utilisés par leurs concurrents. Deuxièmement, l'incertitude des résultats et le caractère de long terme de certains projets aura un impact sur le choix des projets à développer par les entreprises.

Dans un cadre de décision rationnelle et optimisatrice, les firmes choisissent les projets de recherche dont la différence entre les flux actualisés des bénéfices attendus et les flux actualisés des coûts est le plus grand (Sherrer, 1999 ; Freeman, 1982). Une telle analyse coût-bénéfice favorise les améliorations technologiques qui peuvent apporter des bénéfices à court-terme, en dépit des changements techniques majeurs qui nécessitent un investissement immédiat et un potentiel (incertain) de bénéfices à plus long terme. Une distinction méthodologique doit être ici faite entre risque et incertitude. Dans la littérature, le terme risque est employé lorsque l'incertitude est mesurable et peut être pris en compte dans l'analyse financière ; inversement, lorsque l'incertitude ne peut pas être quantifiable, on se réfère plutôt à la vraie incertitude (Knight, 1921). Donc, le risque de l'investissement en innovations radicales réduit les chances d'acceptabilité du projet par des firmes qui maximisent leurs profits et sont averses au risque.

Ainsi, les dépenses privées en R&D d'innovation radicales sont attendues à un niveau socialement sous-optimal en raison des incertitudes et du caractère de long terme des projets. L'investissement sera d'autant sous-optimal que la recherche est fondamentale et l'innovation radicale (Arrow, 1962a ; Freeman, 1982). A l'inverse, il serait attendu que les firmes surinvestissent en projets de R&D de court terme associés à la différenciation des produits. En cas de marché oligopolistique, les firmes sont incitées à réduire l'incertitude de marché par la différenciation de leur produit à travers l'investissement en marketing ou de légers changements du produit (Porter, 1980). Freeman (1982) donne l'exemple de l'industrie automobile laquelle, selon l'auteur, aurait investi plus en différenciation du produit que dans le développement de meilleurs systèmes de propulsion pour les automobiles.²¹⁰

L'investissement privé en recherche fondamentale est typiquement très faible. Le gros des investissements industriels est destiné au développement des produits et des procédés permettant de renforcer l'avantage compétitif des entreprises.²¹¹ De plus, les investissements privés en R&D sont très concentrés sur très peu de secteurs. Rosenberg (1992) analyse les dépenses industrielles en R&D aux Etats-Unis entre 1960 et 1983. L'auteur conclut que 75% des dépenses ont été issues de cinq secteurs (aviation, équipements électriques, machinerie non-électrique, chimie et automobile). Le

²¹⁰ « ...efforts to design safer cars and a relatively pollution-free car were very obvious social needs, but the R&D effort which went into improving safety or preventing pollution was negligible for a long time. » (Freeman, 1982, p.204).

Les défis énergétiques et environnementaux qui se posent actuellement aux transports ne seraient-ils pas différents si les constructeurs automobiles avaient choisi une autre stratégie pendant si longtemps ?

²¹¹ Par exemple, en 1994 et pour les Etats-Unis, seulement 5,9% des dépenses des entreprises en R&D ont été destinées à des recherches fondamentales (Sherrer, 1999).

financement public de la recherche fondamentale devient ainsi essentiel pour palier le sous-investissement privé dans ces activités fondamentales pour l'innovation.

2.2.4. Le financement public de la recherche fondamentale

Les théories de la croissance endogène ont montré à quel point l'apprentissage et la R&D sont importantes pour la croissance économique.²¹² Toutefois, des problèmes de coordination et de prise en compte des externalités par le processus de décision décentralisé peuvent éloigner les agents du niveau d'investissement optimal. Dans son modèle de base, Romer (1986) a mis en évidence l'intérêt d'une politique de l'Etat visant à stimuler les investissements en recherche (par la voie des subventions ou des taxes), ce qui en retour favorise l'apprentissage. Les investissements sont donc porteurs d'externalités capables d'accélérer la croissance de la production dans le long terme.

Néanmoins, la politique technologique de l'Etat est souvent critiquée car associée au gaspillage des ressources et à la vulnérabilité aux influences des groupes d'intérêts particuliers.²¹³ Il existe cependant des situations où le soutien public est la seule option réaliste, permettant d'assurer le financement.²¹⁴

Les défaillances de marché provoquées par les externalités de la connaissance, les externalités environnementales et la myopie des agents, justifient le soutien public à la R&D (Martin et Scott, 2000). Cette intervention est d'avantage nécessaire pour les activités de recherche fondamentale très incertaines et de difficile appropriation des résultats où la probabilité de sous-investissement par les agents privés est très grande.

Le même support public est nécessaire pour le développement de technologies dont les gains sociaux attendus à long terme sont importants. C'est notamment le cas de la fusion nucléaire, dont les investissements ont un horizon temporel très éloigné avant que la réaction puisse être contrôlée, ce qui permettra l'accès à une source d'énergie propre est pratiquement inépuisable. Cela exige la planification des actions à long terme, dans un horizon de temps qui est souvent trop long pour les investisseurs privés. La vision et l'investissement en R&D de l'état sont alors importants afin de rendre la technologie disponible au moment nécessaire (l'augmentation des prix de l'énergie, changements climatiques brusques, etc.).

²¹² Pour une revue de la théorie de la croissance endogène voir : Aghion et Howitt, 1998.

²¹³ Une littérature a été développée à propos des programmes technologiques très coûteux, présentant une faible viabilité économique, que l'état entreprend par influence de groupes d'intérêts ('lobbyies'). Ces technologies qui ne sont viables que par la subvention publique sont connues sous le terme de « pork barrels ». Voir par exemple Cohen et Noll (1991) pour une révision des arguments.

²¹⁴ Le financement (privé ou public) de la recherche est conditionné par l'encadrement organisationnel des pays. L'approche "variety of capitalisms" de Peter Hall et David Soskice fait la distinction entre : l' "économie de marché coordonnée" (cas-type : Allemagne ou Japon), où existent des institutions de coordination « coordinated bargaining » à différents niveaux (gouvernement, banque, industrie, syndicats nationaux et sectoriels,...) ; et l' "économie de marché libérale" (cas-type : USA ou UK) où la concurrence sur le marché dicte l'allocation des ressources. Alors que " l'économie de marché coordonnée" permet de réduire l'incertitude et de mobiliser d'importantes ressources, l' "économie de marché libérale" se caractérise par une très grande flexibilité. Le rôle important - historiquement déterminé – des marchés financiers stimule les comportements de prise de risque ce qui peut favoriser des innovations dans certains domaines (génétique, biologie, informatique, etc.), où le rôle premier est joué par de petites start-ups. In : Hall P.A., Soskice D. (eds.) (2001), *Varieties of Capitalism : The Institutional Foundations of Comparative Advantage*, Oxford University Press, Oxford.

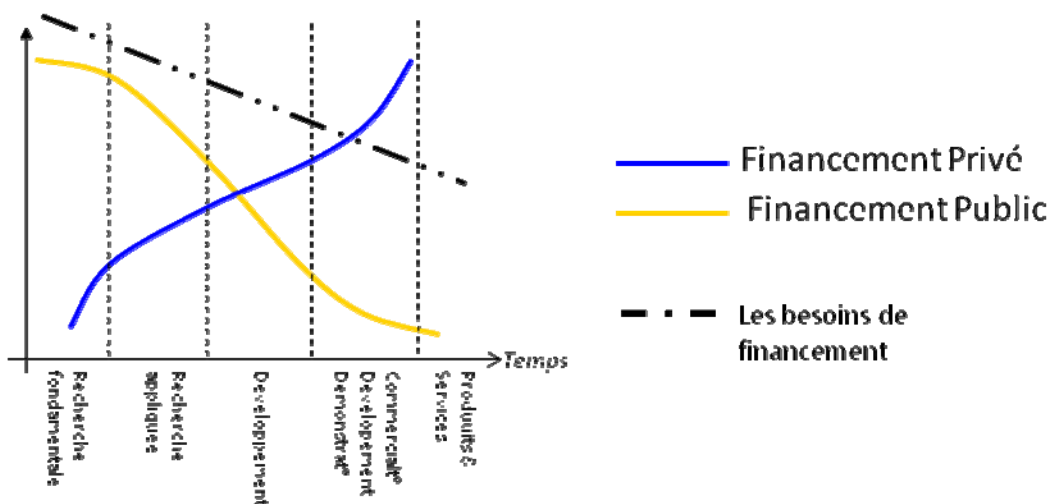
Dans le cas des innovations environnementales, les principaux avantages (p.ex. réduction des gaz à effet de serre, indépendance énergétique) sont souvent des biens publics, ce qui rend plus difficile à l'innovateur de capturer toutes les retombées de l'innovation. L'importance de l'innovation pour la société rend alors le financement public de la R&D particulièrement nécessaire (Jaffe et al, 2003).

2.3. Du laboratoire au marché : dépasser la « vallée de la mort »

La transition du laboratoire à la commercialisation est une phase cruciale pour le succès de l'innovation. Cela exige normalement l'exécution d'activités de recherche appliquée et de démonstration comme la construction de prototypes et des premières versions expérimentales de la technologie à l'échelle réelle permettant une première estimation du potentiel économique de la technologie. Néanmoins, il s'agit d'une étape plus intensive en capital alors que le risque du projet demeure très élevé, ce qui pose des problèmes de financement.

A partir de la phase de la démonstration de l'innovation, les firmes découvrent plus d'opportunités de profit. De cette manière, les sources privées de financement commencent à être en mesure de prendre le relais du financement public de l'innovation (graphique 57). Toutefois, les besoins en capital sont normalement importants et le risque encore très élevé, ce qui rend difficile le financement à partir des investisseurs privés uniquement. Ainsi, le soutien public reste nécessaire pour combler le déficit de financement privé (Gallagher et al., 2006). L'intervention du gouvernement peut se justifier par les externalités de la démonstration de la technologie, le caractère public de la connaissance et la forte incertitude des résultats.

Graphique 57. Le financement public et privé pour l'émergence d'une innovation radicale: le cas de la pile à combustible

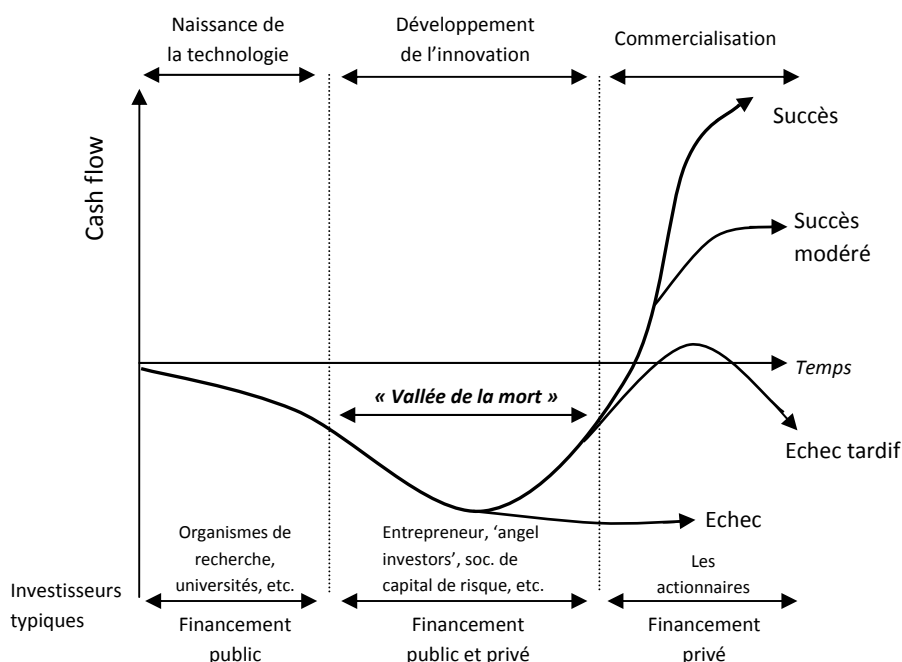


Les besoins en capital sont particulièrement importants dans le cas des innovations énergétiques radicales. En comparaison avec le logiciel informatique, le développement des innovations énergétiques demande un investissement initial bien supérieur (Murphy et Edwards, 2003). Le problème est que les investisseurs spécialisés dans le soutien à des projets risqués (sociétés de

capital de risque, 'angels investors' etc.) demandent plus de contreparties pour leur engagement.²¹⁵ En même temps, la diminution des fonds publics pour le développement de l'innovation rend plus difficile la transition vers le marché.

Ainsi, l'innovateur a plus de difficultés à trouver les ressources financières nécessaires. La sévérité de ce problème peut remettre en cause la poursuite du projet. Ceci est comparable au passage par une « vallée de la mort » ('*death valley*') d'où le projet risque de ne jamais sortir (Murphy et Edwards, 2003).

Graphique 58. La "vallée de la mort" comme fonction du temps de développement, les phases d'innovation et les investisseurs typiques à stage de développement



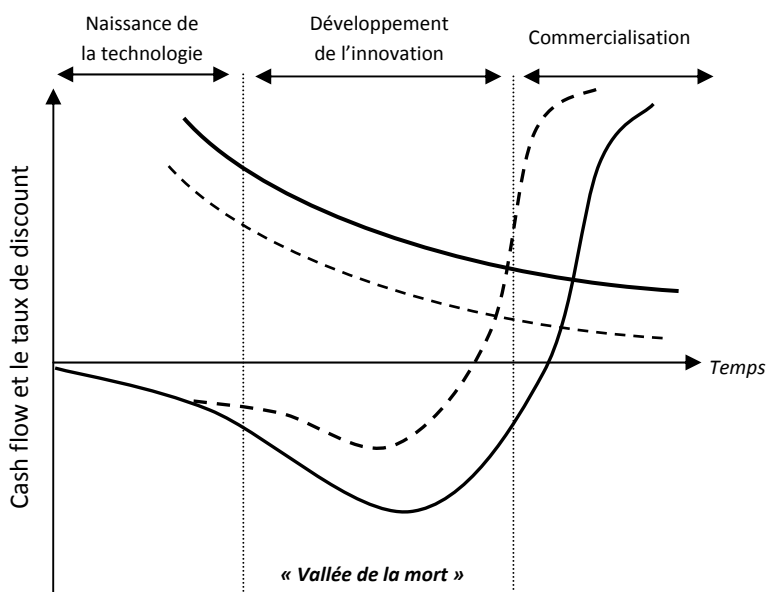
Adapté de Murphy et Edwards, 2003.

Etant donné le niveau d'investissement nécessaire dans le développement de nouvelles technologies énergétiques et dans les infrastructures associées, les partenariats entre le secteur public et les firmes privées peuvent donner une solution efficace aux problèmes posés par la transition de la technologie vers le marché. Ces collaborations peuvent allier l'expertise et les ressources financières nécessaires, à moindre coût, en réduisant simultanément le risque des investissements subséquents. De cette manière, le projet peut devenir plus rapidement attractif pour les investisseurs externes, ce qui raccourcit la « vallée de la mort » (graphique 59). Comme principe général, la politique européenne subventionne à l' hauteur de 50% les projets de la recherche appliquée et de démonstration ayant un horizon plus lointain d'entrée dans le marché ; et à 25% les projets susceptibles de devenir compétitifs à un horizon plus proche.²¹⁶

²¹⁵ Les sociétés de capital de risque acceptent normalement les investissements offrant une rémunération de 10 fois l'investissement initial minimum au bout de 3 à 5 ans (Murphy et Edwards, 2003).

²¹⁶ « Usually, for medium-to-long term research actions, EC funds up to 50% of the total costs, while for medium-to-short research actions EC funds up to 35% of the total costs. » (Commission Européenne, 2006, p.7)

Graphique 59. Le partenariat entre le secteur public et l'innovateur privé peut raccourcir la « vallée de la mort »



Adapté de Murphy et Edwards, 2003.

Il ne s'agit pas de choisir le vainqueur de la course technologique, mais de créer une diversité technologique qui puisse être en mesure de se développer et finalement laisser le marché retenir la meilleure technologie.

Le développement des piles à combustible ces dernières années est un exemple de partenariat technologique entre les acteurs publics et privés (Bourgeois et Mima, 2003). Les pays industrialisés se sont rassemblés autour d'un projet de partenariat international de recherche et développement des applications énergétiques de l'hydrogène, le *International Partnership for the Hydrogen Economy* (IPHE).²¹⁷ Au niveau européen, les gouvernements nationaux et la Commission Européenne ont établi une collaboration avec l'industrie pour le développement de l'hydrogène et des piles à combustible. La plateforme technologique résultante ('*Hydrogen Framework Program*' ou HFP)²¹⁸ est à la base du *Joint Technological Implementation* (JTI), un grand programme de démonstration de l'hydrogène et des piles à combustible à l'échelle européenne, dans les différentes applications (portables, stationnaires et mobiles).

Dans le cas de l'hydrogène et des piles à combustible, Bourgeois et Mima (2003) mettent en évidence l'importance des programmes d'achat public (*public procurement*) pendant les premières années de l'émergence des innovations radicales, de manière à permettre à la technologie d'entrer sur le marché et de bénéficier de gains dynamiques d'apprentissage. Un autre mécanisme d'intervention publique est la fixation des codes et standards. Ce mécanisme renforce la confiance sur l'engagement du gouvernement pour soutenir la technologie, en réduisant ainsi les incertitudes (Murphy et Edwards, 2003). On reviendra sur ces mécanismes dans le chapitre 5.

²¹⁷ <http://www.iphe.net>

²¹⁸ www.HFPEurope.org

2.4. L'apprentissage technologique

Le concept d'apprentissage technologique est né du constat que les coûts unitaires de la technologie diminuent et les performances s'améliorent avec l'augmentation de production. La diminution des coûts des technologies par l'effet de l'apprentissage fut identifiée pour la première fois par Wright (1936). En étudiant le cas de l'industrie aérienne, l'auteur découvre que les coûts de conception des avions diminuaient avec l'apprentissage acquis par l'expérience de production (*'learning by doing'*) et de recherche (*'learning by searching'*) :

« *Learning is the product of experience. Learning can only take place through the attempt to solve a problem and therefore only takes place through activity.* » (Arrow, 1962a, p. 155)

En effet, l'apprentissage augmente la productivité des facteurs en réduisant les coûts unitaires de production. L'expérience de production - à la base de l'apprentissage - est depuis Arrow mesurée par la production cumulée et représentée à travers les courbes d'apprentissage qui montrent le rythme de réduction des coûts unitaires en fonction de l'expérience.

« *I therefore take (...) cumulative gross investment (cumulative production of capital goods) as an index of experience.* » (Arrow, 1962a, p. 157)

Les sources d'apprentissage ne se trouvent pas seulement dans les activités de recherche et de production. Aussi l'utilisation de la technologie (*'learning by using'*) (Arrow, 1962a ; Rosenberg, 1982) peut contribuer à l'amélioration des performances de l'innovation.

L'apprentissage est habituellement représenté dans les modèles de changement technologique de façon alternativement endogène et exogène ou autonome (Grübler et al., 1999). Dans le premier cas, le progrès de la technologie dépend de facteurs endogènes tels que les investissements en RD&D ou la production cumulée. Dans le deuxième cas, le rythme de progrès technologique autonome est fixé de manière exogène, comme si le changement technologique était le résultat de la « main divine » (*'manna from the heaven'*). Grübler et al (1999) montrent que la première méthode de modélisation, celle du progrès technique endogène et des courbes d'apprentissage, donne des résultats plus compatibles avec l'expérience historique.

2.4.1. La courbe d'apprentissage

De nombreuses technologies, notamment énergétiques, sont caractérisées par une réduction des coûts avec la production cumulée. La diminution des coûts peut être due particulièrement à la production à grande échelle ou aux économies d'apprentissage. La première représente les économies dégagées par un accroissement de la quantité (échelle) de production. La seconde est exprimée par les courbes d'expérience (ou apprentissage), et représente une diminution des coûts par l'effet d'apprentissage avec une augmentation de la production cumulée.

Isoard et Soria (2001) notent la difficulté de distinguer la réduction des coûts de la technologie par l'effet d'apprentissage et par l'effet des économies d'échelle. La réalisation d'économies d'échelle peut inciter les entreprises à investir plus tôt. A l'opposé, les économies d'apprentissage (*'learning'*) incitent les firmes à retarder les investissements de façon à bénéficier de coûts de capital plus faibles et de plus d'information (moins d'incertitude technique, de marché, etc.). Dans le cas des technologies émergentes, les ratios de progression sont originalement plus élevés (McDonald et

Schrattenholzer, 2001 ; Grübler et al., 1999), mais ces technologies souffrent de déséconomies d'échelle. Donc, l'aide publique aux technologies émergentes serait justifiée par le potentiel de réalisation d'économies d'échelle, d'une part ; et par les gains dynamiques d'apprentissage, d'autre part.

D'une manière générale, la nouvelle technologie est initialement beaucoup plus chère que les technologies existantes, lesquelles ont déjà bénéficié des gains d'apprentissage lors de leur introduction et diffusion dans le marché. Au fur et à mesure que la nouvelle technologie est produite et commercialisée, les effets des revenus croissants se manifestent par une diminution des coûts de la nouvelle technologie. La diminution des coûts peut se poursuivre jusqu'au point où la nouvelle technologie devient plus performante et moins chère que la technologie existante.

La courbe d'apprentissage est typiquement formalisée par la relation entre les coûts unitaires et la production cumulée (ou capacité installée), de la manière suivante :

$$C(K_t) = \alpha \cdot K_t^{-\beta}$$

où C est le coût unitaire de la technologie, K_t est la capacité installée cumulée (ou la production cumulée) au moment t , α est le coût de la première unité, et β représente l'apprentissage. L'estimation de la courbe d'apprentissage permet de calculer de combien il faut augmenter la production cumulée pour obtenir une certaine diminution du prix de la technologie.

Plus concrètement, le paramètre β permet d'estimer le *ratio de progression* ('progress ration' ou PR) d'une technologie. Cet indicateur mesure la vitesse de réduction du coût en capital de la technologie par l'effet du doublement de la production cumulée. Le PR est calculé à partir de β en utilisant la relation suivante :

$$PR = \frac{P_0 \cdot (2X)^\beta}{P_0 \cdot X^\beta} = 2^\beta$$

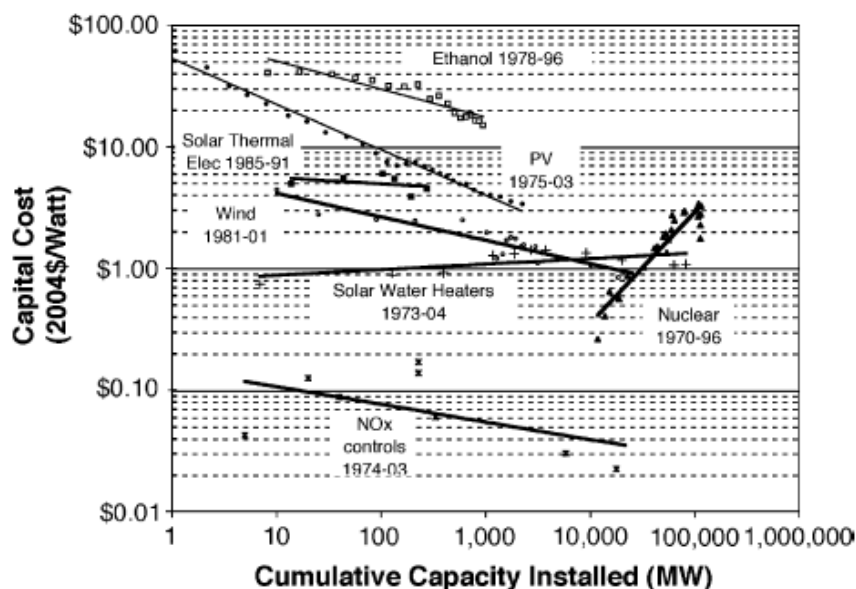
Le ratio d'apprentissage ('*Learning ratio*') donne le pourcentage de réduction du coût unitaire de la technologie après le doublement de la production cumulée (McDonald et Schrattenholzer, 2001). Cet indicateur est estimé à partir du PR : $(100 - PR)$. Les nouvelles technologies bénéficient de gains d'apprentissage plus importants que les vieilles technologies ayant les mêmes PR (ou ratio d'apprentissage). Par exemple, dans le cas des technologies photovoltaïques entre 1976 et 1992 : l'augmentation de 1 MW à 2 MW a permis une diminution des prix de 18%. Cependant, lorsque le volume cumulé dépasse les 100 MW, pour bénéficier du même pourcentage de diminution il faudrait installer 100 MW de capacité nouvelle au lieu de 1 MW comme pendant la période précédente. L'investissement d'apprentissage est alors substantiellement plus important.

Le graphique 60 montre les courbes d'apprentissage historiques pour plusieurs technologies de production électrique. Les coûts ont diminué avec la production cumulée, à l'exception du nucléaire et du solaire thermique.²¹⁹ A l'état initial, les innovations majeures telles que le solaire

²¹⁹ Cependant, Nemet (2009) met en garde pour tous les autres facteurs tels que les changements exogènes, les changements de qualité ou des prix des entrants, ayant un impact sur les coûts de la technologie, mais qui ne sont pas pris en compte par la seule variable de la production cumulée.

photovoltaïques (PV) présentent un potentiel plus important de réductions des coûts par l'effet d'apprentissage.

Graphique 60. Les courbes d'apprentissage pour différentes technologies de production électrique



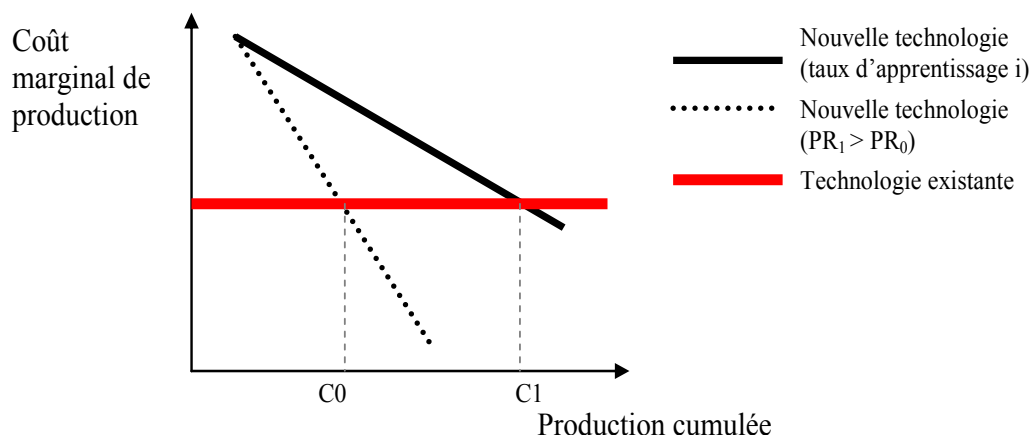
Source : Nemet, 2009.

Nemet (2009) a regroupé un total de 156 études publiées sur les courbes d'apprentissage pour les technologies éolienne et solaire.²²⁰ Cette analyse a confirmé le constat empirique de la baisse dynamique des coûts. Dans 95% des études, les ratios de progression pour les deux technologies sont situés entre 17% et 24%.

La réduction des coûts par l'effet d'apprentissage permet à la technologie de se diffuser plus rapidement. Le graphique 61 présente l'effet de différents taux d'apprentissage pour la concurrence technologique. Les deux technologies nouvelles bénéficient de gains d'apprentissage à chaque doublement de la production cumulée. Toutefois, la technologie qui dispose du ratio d'apprentissage le plus élevée voit les coûts diminuer le plus vite, et devient plus rapidement compétitive par rapport à la technologie existante. L'investissement nécessaire pour rendre la technologie compétitive est alors moins important car moins d'unités ont besoin d'être subventionnées pour atteindre le même objectif-coût (la production cumulée est alors de $C0 < C1$).

²²⁰ En s'appuyant aussi sur des travaux de synthèse comme par exemple ceux de McDonald et Schrattenholzer (2001).

Graphique 61. L'effet de l'augmentation du taux d'apprentissage



Les gains liés à la diminution des coûts de la nouvelle technologie peuvent avoir un caractère de bien public. C'est-à-dire, dès que la technologie est déployée sur le marché et que son coût est ramené à un niveau concurrentiel, tout le monde en bénéficie sans pour autant avoir payé pour sa mise en œuvre, notamment lorsque son coût était encore très élevé. Dans ce cas, les firmes et grands consommateurs préfèrent attendre, ce qui retardera la progression de la technologie. De plus, l'incertitude pesant sur la réduction des coûts augmente les risques de l'investissement en apprentissage.

Des stratégies peuvent être employées de façon à inciter les agents à produire et adopter une technologie plus coûteuse. Les entreprises peuvent alors vendre à perte lorsqu'elles sont sûres de gagner un avantage concurrentiel qui leur permet de récupérer l'investissement dans le futur, ou bien de découvrir des « niches » où les caractéristiques du produit sont valorisées par le marché et les consommateurs sont disposés à payer plus cher le produit (Kemp et al., 1998). Dans le cas inverse, l'Etat peut subventionner les premières unités produites. C'est le cas par exemple des tarifs préférentiels ('*feed-in tariffs*') accordés à la production éolienne en Espagne (Menanteau et al., 2003). Par ailleurs, la réglementation peut aussi accélérer la compétitivité des nouvelles technologies via le changement des prix relatifs (encadré 3).

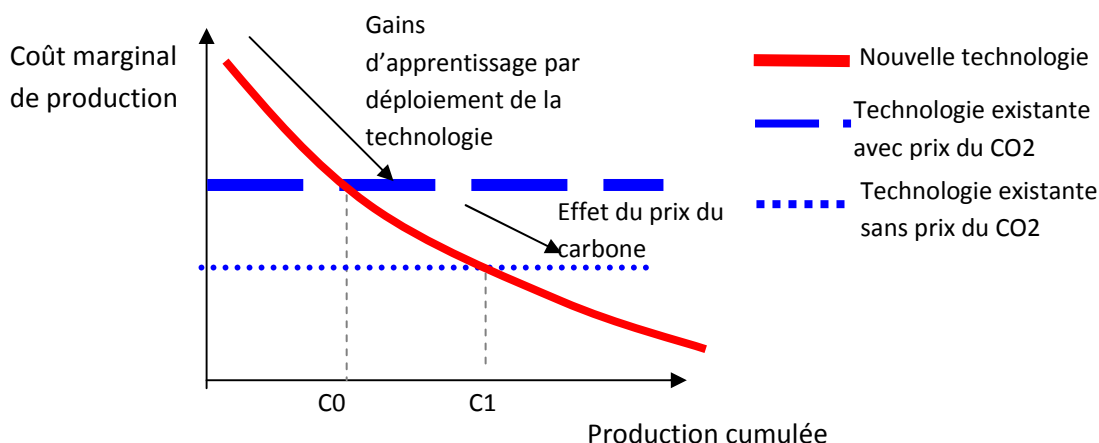
Encadré 3. L'internalisation du coût du carbone accélère la compétitivité des innovations propres

Le développement de nouvelles technologies énergétiques faiblement émettrices de gaz à effet de serre (GES), telles que les technologies renouvelables (éolien, solaire, etc.) ou l'hydrogène et les piles à combustible, demandent des investissements initiaux très importants dans la technologie et en déploiement, de manière à les rendre compétitives. Le problème est que l'avantage environnemental des technologies propres échappe souvent au mécanisme de prix. La pollution est une externalité négative de l'utilisation des vieilles technologies qui n'entre pas dans le calcul économique des agents. Toutefois, le gouvernement peut obliger les agents à incorporer tous les coûts de leurs actions par le biais de 1) la définition de droits à polluer, 2) la mise en place d'une taxe carbone, ou encore 3) la définition de normes technologiques. La mise en place de ces instruments crée un coût d'émission de carbone que les agents doivent intégrer dans leurs décisions d'investissement.

Le prix du carbone a un impact sur le déploiement des nouvelles technologies par le biais de la valorisation économique des performances environnementales de la technologie. Les prix relatifs des

deux technologies sont alors altérés en faveur de la technologie moins émettrice (Neuhoff, 2008).

Graphique 62. L'effort de déploiement de la technologie et le prix du carbone



Ainsi, la nouvelle technologie devient rentable à partir d'un seuil de production cumulée plus faible ($C_0 < C_1$). Cela réduit considérablement l'effort de redéploiement de la nouvelle technologie nécessaire pour ramener les coûts à un niveau concurrentiel - représenté graphiquement par le « delta » ou l'espace entre la courbe de coût marginal de production de la nouvelle technologie et le coût de la technologie existante.

En outre, les gains d'apprentissage traduits par la courbe d'expérience peuvent contribuer à « verrouiller » le marché sur une technologie (Arthur, 1989). En effet, le bas coût de la technologie qui a bénéficié de l'apprentissage rend plus difficile l'entrée de nouvelles technologies. Les effets dynamiques peuvent consolider la domination des technologies existantes et renforcer ainsi la dépendance du sentier (David, 1995).

2.4.2. Les ratios d'apprentissage des piles à combustible en comparaison avec d'autres technologies énergétiques nouvelles

La courbe d'apprentissage n'est pas une loi physique mais un constat empirique, selon lequel le coût de développement des innovations énergétiques diminue au fil du temps. Ce constat est très important au niveau de la planification des investissements. La courbe peut être estimée par extrapolation des données historiques, bien qu'une telle méthode se heurte à plusieurs difficultés. La plus importante est la précision. En dépendant de différents PR retenus, les investissements d'apprentissage peuvent être très différents. McDonald et Schrattenholzer (2001) ont estimé l'impact de la réduction du taux d'apprentissage de 20 à 10% en ayant pour base des données réelles. Selon leurs estimations, les coûts de développement augmenteraient de 2 à 16 milliards de dollars, et la capacité critique ('point mort' de compétitivité) de 9 à 96 GW. A partir des différents ratios de progression étudiés dans la littérature, Nemet (2009) a estimé l'investissement nécessaire pour que la technologie solaire PV devienne compétitive (de 50 à 166 billion d'US dollars), ainsi que la date à partir de laquelle la technologie est compétitive (de 2029 à 2040). L'étude conclut que le degré d'incertitude est très élevé et donc, l'utilisation des ratios de progression doit être faite avec prudence, de façon à éviter les programmes technologiques trop dispendieux au final.

De plus, plusieurs études ont montré que le 'learning by doing' ne représente qu'une partie – parfois minoritaire – de l'explication de la baisse des coûts. Une façon de remédier à ce problème est d'estimer les PR à partir de l'évolution des coûts de chacune des composants de la technologie (Andersen, 2003 ; Blesl et Ohl, 2003 ; Nemet, 2009). Dans le cas du solaire PV, Nemet (2009) a trouvé que l'apprentissage explique 30% de la baisse des coûts, le restant étant dû à la taille de l'usine (43%) et au coût du silicone.

Les technologies des piles à combustible présentent une marge de progression importante sans doute liée à leur état pré-commercial. Blesl et Ohl (2003) ont estimé le PR des piles à combustible pour les applications stationnaires du type carbonates fondus ('Molten Ceramic Fuel Cell' ou MCFC) et oxydes solides ('Solid Oxide Fuel Cell' ou SOFC). L'analyse des données historiques (jusqu'à 2003) a conclu un PR de 70 % pour les piles du type MCFC et 75 % pour les SOFC. L'extrapolation des tendances a permis d'estimer un PR de 75 % (25% de ratio d'apprentissage) pour chacune des deux technologies. Par ailleurs, les auteurs ont décomposé en composantes les piles, et procédé à une estimation des PR pour chacune des parties ce qui a confirmé les premiers résultats. Ceux-ci comparent avec la moyenne des taux d'apprentissage pour les technologies énergétiques estimée entre 16 et 17 % (McDonald et Schrattenholzer, 2001).

Le Project HyWays (2008) a estimé le potentiel de réduction des coûts pour la voiture conventionnelle et pour la voiture pile à combustible à hydrogène. L'étude reprend les informations de la base de données européenne CONCAWE/JRC/EUCAR (2006) sur les coûts des composantes de la voiture. Les résultats ont été validés par les partenaires industriels (Daimler, BMW, GM/Opel).²²¹ Deux ratios de progrès ont été estimés : l'un avec un apprentissage rapide ; et l'autre avec un niveau modeste d'apprentissage, correspondant à un faible apprentissage au bout de 10 ans. Les ratios de progression des voitures à hydrogène (PAC et moteur à combustion) sont présentés dans le tableau 28. Ceux-ci sont comparés avec le ratio de progression 0,85 de la Ford T dans le passé (HyWays, 2008).

Tableau 28. Les ratios de progression (PR) des composantes de la voiture à hydrogène

Composantes	Apprentissage rapide (PR faible)	Apprentissage lent (PR fort)
Réservoir d'hydrogène	0,85	0,85 (0,98) **
Moteur électrique et contrôleur	0,90	
Batterie Li-Ion	0,90	
PAC (système)	0,80 (0,90)**	0,82 (0,92)**
H ₂ -ICE *	1,00	1,00

* Adaptation de la voiture conventionnelle avec moteur à combustion pour l'hydrogène, aussi connue comme « hydrogène thermique ».

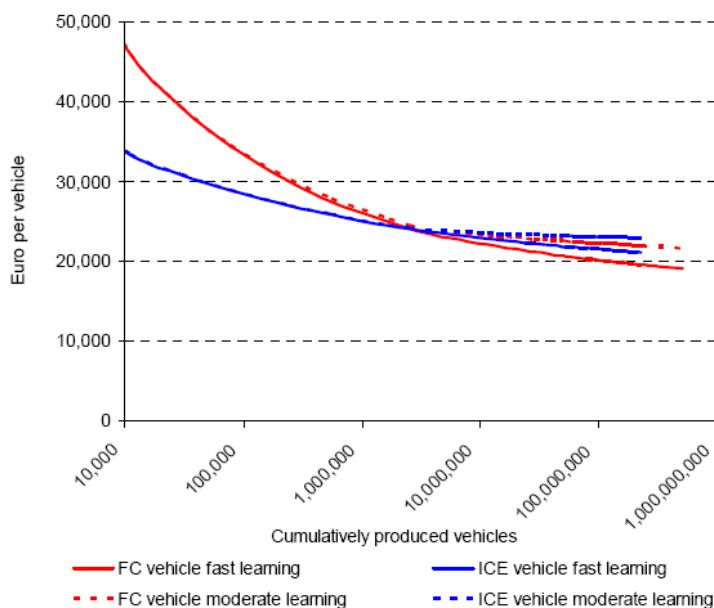
** Au bout de 10 ans de commercialisation.

Source : HyWays, 2008.

²²¹ Les ratios de progression ont été calculés de manière à ce que le coût unitaire après 100.000 voitures à hydrogène produites correspond à l'estimation de CONCAWE/JRC/EUCAR (2006) pour l'année 2010.

L'évolution des coûts est présentée dans le graphique 63. L'étude part d'un niveau de production cumulée de 10.000 voitures à hydrogène.

Graphique 63. Réduction des coûts de la voiture à hydrogène pour les deux ratios de progression



Source : HyWays, 2008.

La connaissance du potentiel technique et de réduction de coûts permet de prévoir les investissements nécessaires pour rendre la technologie compétitive. Ces coûts augmentent normalement avec le déploiement : bien que le coût par unité soit inférieur, un investissement plus important est nécessaire dans le doublement de la production cumulée. Les constructeurs automobiles ont pu financer la démonstration des petites flottes de voitures, toutefois le déploiement à grande échelle entraîne des coûts plus importants. Le partenariat européen pour les piles à combustible à hydrogène (*Joint Technology Implementation* JTI) entre les autorités publiques et les industriels prépare le déploiement de plusieurs milliers de voitures à l'horizon 2015.

2.4.3. Les limites de l'utilisation des courbes d'expérience

La courbe d'expérience permet de simplifier le traitement analytique d'une réalité complexe - les gains dynamiques de l'apprentissage par la production et par la consommation. Il s'agit d'un outil très attractif pour les exercices d'évaluation du comportement des technologies dans le temps et d'évaluer le potentiel d'innovation pour entrer sur le marché. Toutefois, l'usage de cet instrument n'est pas absent de pièges.

En effet, la baisse des coûts (augmentation de la productivité) peut être le résultat de plusieurs facteurs. Il est important alors de distinguer entre les effets d'apprentissage et les facteurs externes de changement technologique. Parmi ces facteurs externes on compte les économies d'échelle et d'envergure, les résultats de la R&D, les *spillovers* et les innovations fondamentales extérieures à l'industrie (Nordhaus, 2009). La non prise en compte de tous ces effets est responsable d'estimations trop optimistes du coefficient d'apprentissage.

Ce problème est particulièrement important dans le cas des modèles énergétiques d'optimisation inter-technologique. L'utilisation des coefficients d'apprentissage surévalués génère des erreurs d'estimation des coûts marginaux des technologies. A l'aide d'un modèle théorique, Nordhaus (2009) montre que les coûts estimés peuvent être facilement sous-évalués de moitié. Dans une telle situation, une technologie peut être considérée à tort comme étant la moins chère, du fait de la mauvaise spécification des gains d'apprentissage. Cela aura notamment des répercussions au niveau de l'estimation du potentiel de diffusion sur le marché.

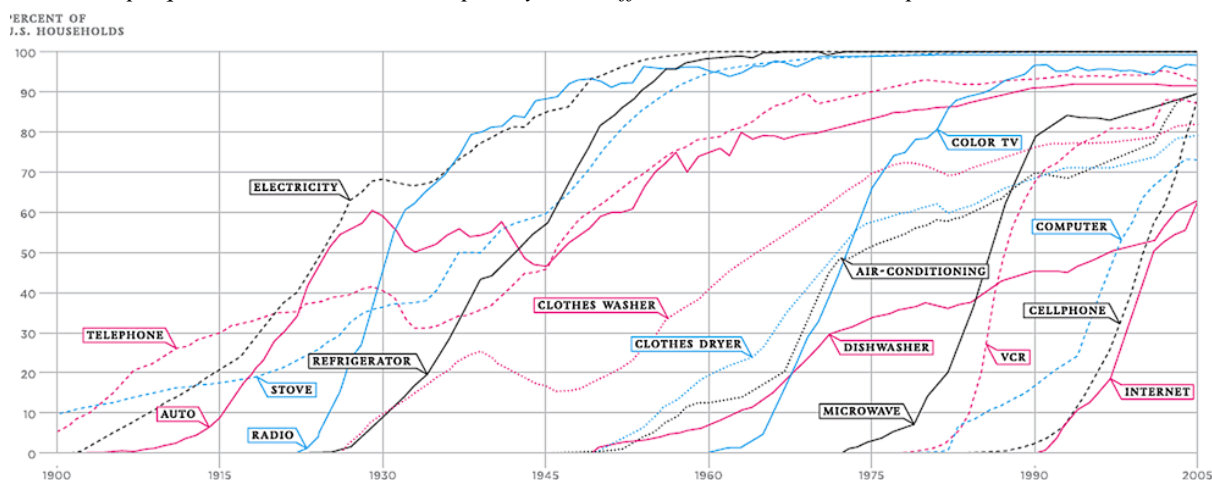
2.5. La diffusion technologique

La diffusion des innovations dans le passé a suivi une certaine régularité, indépendamment de leur nature. L'explication de ce comportement stylisé est au cœur d'une vaste littérature. Cette situation ramène parfois à la domination d'une technologie qui peut être éventuellement inférieure. Ici, nous présentons quelques éléments théoriques du débat, de façon à mettre en perspective le comportement de l'hydrogène et des piles à combustible sur le marché.²²²

2.5.1. La régularité empirique de la diffusion des innovations : la courbe en S

Le graphique 64 présente la diffusion de plusieurs innovations de produits aux Etats-Unis.

Graphique 64. La réduction du temps moyen de diffusion des innovations de produit aux Etats-Unis



Source : New York Times d'après les données du US Department of Commerce.

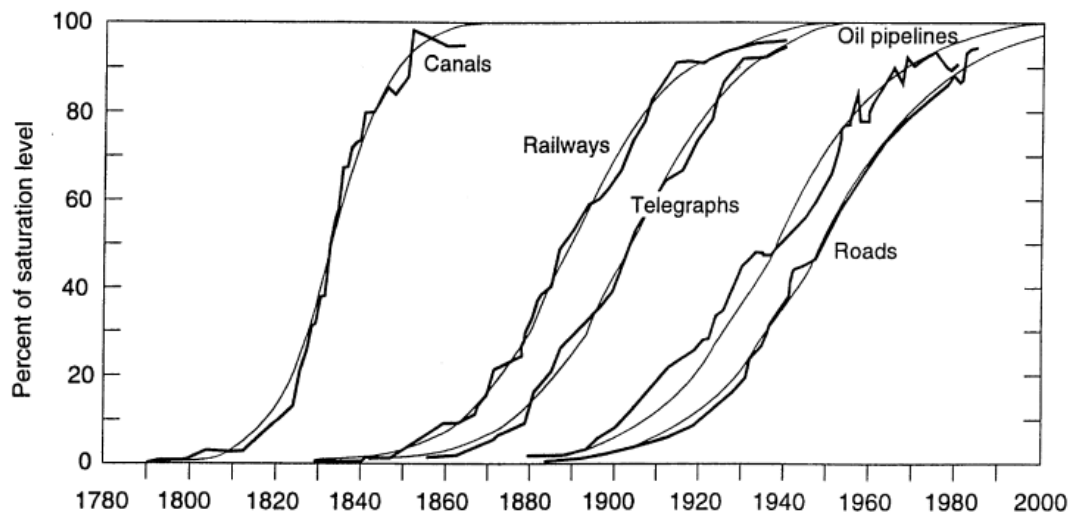
A partir de l'analyse du graphique, nous sommes en mesure de trouver des régularités empiriques sur le processus de diffusion. Tout d'abord, la diffusion technologique est un processus long étalé sur plusieurs décennies. Entre la première utilisation de la technologie et le moment où elle atteint une large partie du marché potentiel (disons 90 %), il peut s'écouler de 5 à 50 ans, voire plus longtemps (Mansfield, 1968). D'une manière générale, la diffusion est devenue plus rapide récemment. La diffusion du four de cuisine a pris plus de 70 ans ; le réfrigérateur 40 ans ; et la climatisation pas plus de 20 ans environ. Toutefois, on peut identifier différents groupes dans l'ensemble d'innovations présentées dans le graphique ci-dessus. Par exemple, les technologies ayant besoin de la mise en

²²² Le chapitre 6 fait le point des théories de diffusion appliquées et les mobilise pour prévoir le comportement de la concurrence technologique entre la voiture électrique et la voiture à hydrogène pour le remplacement du moteur à combustion d'énergies fossiles.

place d'une infrastructure dédiée (électricité, voiture, téléphone, radio) ont pris normalement plus de temps à se diffuser.²²³

La diffusion des infrastructures de transport aux Etats-Unis est présentée dans le graphique 65.

Graphique 65. L'évolution des infrastructures aux Etats-Unis



Source : Grübler et al, 1999.

La diffusion des infrastructures de transport a été plus lente, en particulier celle des routes. Par ailleurs, il est intéressant de noter la coévolution des infrastructures compatibles comme par exemple les chemins de fer et le télégraphe, ou la route et le pétrole. Cette situation met en évidence l'existence d'externalités - effets de réseau – des infrastructures.

La comparaison entre les deux graphiques permet de dégager deux conclusions. Premièrement, la nécessité de la construction des infrastructures peut retarder la diffusion technologique. Deuxièmement, une caractéristique commune à presque toutes les technologies présentées ci-dessus est la forme de la diffusion. Lorsque l'évolution dans le temps de la pénétration de la technologie sur le marché est représentée graphiquement, le résultat est une courbe de diffusion logistique en S. Cette courbe illustre les faibles taux initiaux de diffusion suivis par un rythme de croissance plus soutenu jusqu'au point d'inflexion à partir duquel le rythme de croissance ralentit de nouveau.

Les caractéristiques des technologies ont tendance à changer pendant le processus de diffusion. L'arrivée de la technologie à la maturité est généralement accompagnée par l'amélioration des performances et la réduction des prix. Stoneman (2002) donne l'exemple des ordinateurs et des microprocesseurs, dont les prix sont tombés de plusieurs ordres de grandeur, en même temps que la performance a été considérablement améliorée.

Les utilisateurs de la technologie ont aussi des caractéristiques différentes au long du processus de diffusion. Rogers a analysé les différents groupes de personnes qui composent le marché potentiel d'une innovation. L'auteur identifie plusieurs groupes de consommateurs ayant des attitudes

²²³ L'internet constitue un cas particulier puisque la diffusion de cette technologie s'appuie sur les infrastructures préexistantes des télécommunications.

différentes vis-à-vis l'innovation, dont l'entrée différée dans le marché expliquerait le comportement stylisé de la diffusion.

2.5.2. La diffusion par la transmission de l'information entre groupes sociaux différents

Dans son ouvrage sur la diffusion de l'innovation, Rogers (1995) propose une analyse des facteurs sociaux à la base de l'adoption d'une nouvelle technologie. Cette approche met l'accent sur le processus de diffusion de l'information et sur l'attitude des différents individus vis-à-vis l'innovation.

Le mécanisme de diffusion est basé sur la *contagion* et le traitement de l'information par chaque agent. L'adoption (ou rejet) de l'innovation est le résultat d'un processus de décision constitué de plusieurs étapes : 1) la prise de connaissance de l'innovation ; 2) la formation d'une attitude à l'égard de l'innovation ; 3) la décision d'adoption (ou rejet) ; 4) la mise en place de l'innovation ; et 5) la confirmation de la décision.

Par ailleurs, l'auteur a proposé une catégorisation de la population susceptible d'être intéressée par une certaine innovation. Les agents sont classés selon leur volonté d'adopter l'innovation laquelle dépend de la perception de l'avantage technologique, de sa compatibilité avec les technologies existantes, de sa complexité, de la possibilité d'expérimentation, et de sa visibilité. Ainsi, Rogers distingue cinq groupes de consommateurs potentiels :

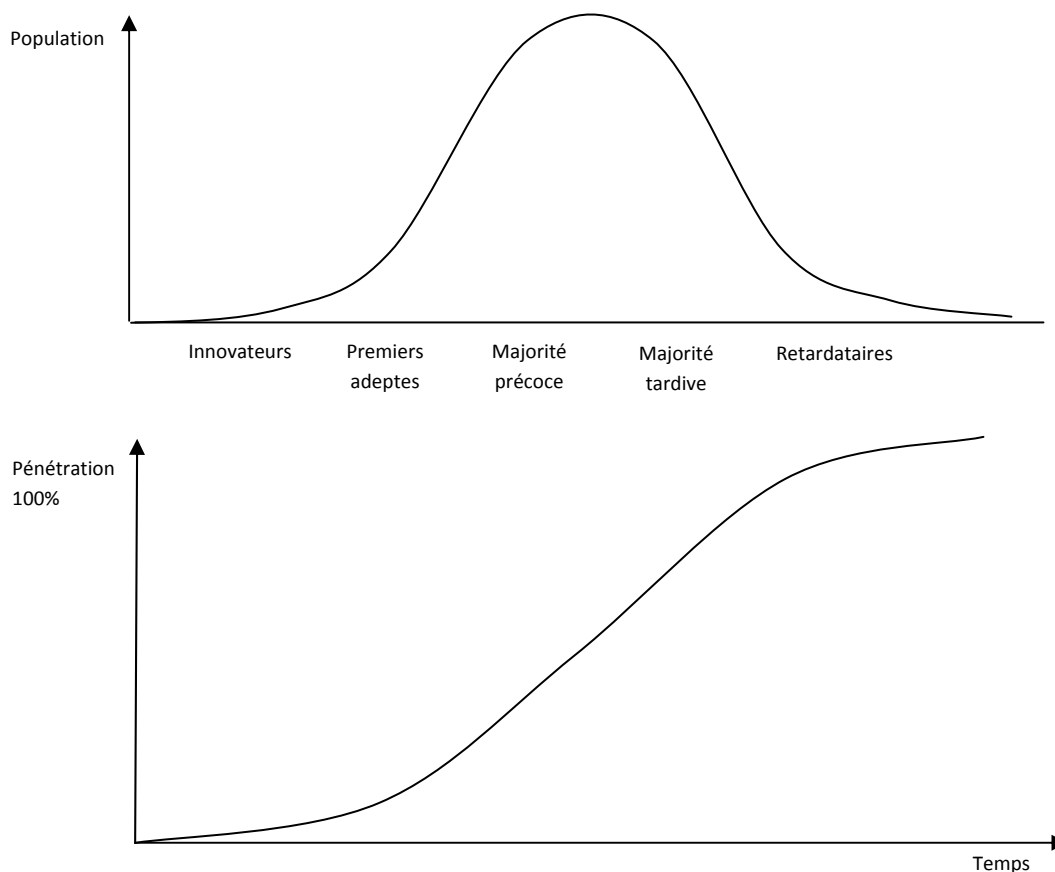
- Les *innovateurs* sont les premiers utilisateurs de l'innovation. Ils sont attirés par les nouveautés technologiques (« *technology enthusiasts* »). Les précurseurs sont typiquement plus riches et disposés à prendre le risque de l'innovation. De par leur adoption, ils influencent le choix des consommateurs suivants ;
- Les *premiers adeptes* suivent de près les décisions des innovateurs. Il s'agit d'un groupe normalement plus jeune et éduqué qui cherche à garder une longueur d'avance sur le reste de la population. Ce type de consommateurs est au début de la vague de diffusion et ils ont normalement un rôle actif pour la persuasion de leurs voisins ;
- La *majorité précoce* forme un groupe de consommateurs plus conservateur mais encore ouvert à des idées nouvelles. Ce groupe est influencé par l'adoption d'un nombre croissant de personnes ;
- La *majorité tardive* est un groupe averse au risque. Il n'achète pas l'innovation avant qu'elle ne soit utilisée par une base élargie de personnes de manière à être rassuré quant à la qualité de la technologie ;
- Les *retardataires* (« *laggards* ») sont les derniers à utiliser l'innovation. Ils ne sont typiquement pas intéressés par les dernières nouveautés.

Cette classification est relative à la technologie, à l'agent et au moment de l'innovation. Un individu peut tomber dans des catégories différentes selon les innovations. Par exemple, un agriculteur peut-être l'un des premiers adeptes des innovations mécaniques, mais faire partie de la majorité tardive en ce qui concerne les innovations chimiques.

A partir des études sociologiques, Rogers (1995) a conclu que la population de consommateurs potentiels d'une innovation est normalement répartie entre les différentes catégories analysées (graphique 66). L'auteur se base sur les écarts-types de la moyenne de la courbe de distribution normale pour répartir la population entre innovateurs (2,5%), premiers adeptes (13,5%), majorité précoce (34%), majorité tardive (34%) et retardataires (16%).

Cette répartition est à l'origine de la courbe de diffusion en S lorsque l'on représente graphiquement l'évolution du pourcentage cumulé d'adhérents (ou de la part de marché) dans le temps. Ainsi, l'innovation commence par se diffuser doucement au début de la période et le rythme s'accélère au fur et à mesure que la majorité précoce et tardive adopte la technologie, jusqu'à ce qu'il ne reste plus que les retardataires à acheter la technologie.

Graphique 66. La courbe de diffusion de l'innovation (Rogers, 1995)



2.5.3. La diffusion comme un processus cumulatif et dynamique

Le changement technique est un processus dynamique. L'adoption croissante de la technologie permet l'amélioration des performances et la réduction des coûts. A l'opposé de l'approche standard où la technologie reste inchangée tout au long du processus de diffusion et la meilleure technologie s'impose sur le marché, l'approche évolutionniste considère que la technologie devient la meilleure parce qu'elle est la plus adoptée fréquemment (Foray, 1989). A l'affirmation classique « on adopte la technologie parce qu'elle est plus performante », l'approche évolutionniste répond « c'est parce que l'on adopte la technologie qu'elle devient plus efficiente ». Alors, pour les auteurs évolutionnistes, l'analyse des facteurs qui déterminent l'évolution de la technologie est essentielle pour comprendre le résultat final.

La diffusion technologique présente des caractéristiques d'irréversibilité, dans le sens où les choix du passé affectent les alternatives présentes (Arthur, 1988, 1985 ; David, 1988, 1985). Par exemple, les adhérents à la norme QWERTY des claviers des ordinateurs ont développé par la suite des capacités

liées à l'utilisation de ce type de clavier, ce qui peut être considéré comme un investissement 'quasi-irréversible' puisque ces connaissances ne peuvent être que très faiblement employées dans un autre type de clavier.

En absence de prévision parfaite de l'avenir, il est impossible d'anticiper le résultat final de la concurrence technologique avec certitude parce que celui-ci dépend du sentier de diffusion (David, 1985). Cette dépendance de sentier limite graduellement les choix disponibles, ce qui mène au final à un verrouillage du marché sur la technologie dominante ('lock in') (Arthur, 1989). A la suite, nous présentons les facteurs qui sont à la base des externalités positives d'adoption.

2.5.4. La concurrence technologique en présence de rendements croissants d'adoption

La représentation évolutionniste considère que la concurrence entre technologies est affectée par des facteurs dynamiques susceptibles de verrouiller le marché par la technologie inférieure (David, 1985). Il existe des équilibres multiples et non pas un seul équilibre vers lequel le système converge. Le résultat final est alors imprévisible dans le sens où on ne peut pas prévoir exactement la part de marché de chaque technologie. Sous certaines conditions d'adoption, le processus de concurrence devient instable et des petits événements historiques peuvent être suffisants pour déterminer le résultat du processus (Arthur, 1988).

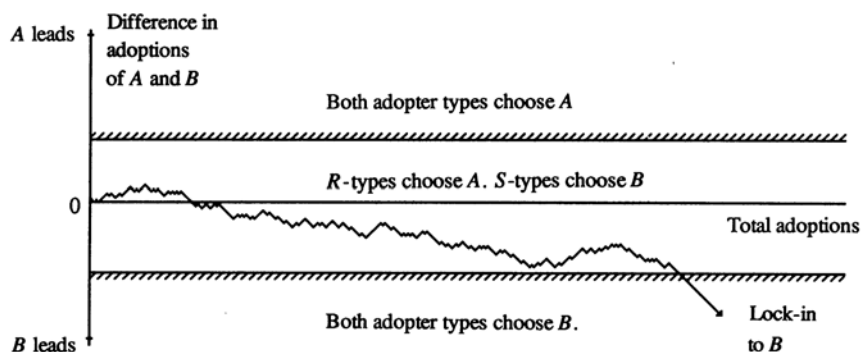
Cela est particulièrement le cas lorsque la diffusion de la technologie contribue à renforcer son attractivité (coût, performance, qualité, etc.). Les *rendements croissants d'adoption* sont des externalités positives dégagées par l'adoption d'une technologie qui font augmenter la probabilité d'adoption à mesure qu'elle se diffuse (Arthur 1988, 1989). Plusieurs facteurs concourent à l'existence de telles rétroactions positives. Arthur (1988) identifie cinq sources de rendements croissants d'adoption :

- **Apprentissage par l'usage** : la technologie devient plus performante avec l'adoption et surtout avec l'usage, ce qui la rend plus attractive pour les non utilisateurs (Rosenberg, 1982) ;
- **Externalités de réseau** (effets de club ou économies d'échelle de la demande) : la technologie devient plus attractive au fur et à mesure que le nombre d'utilisateurs augmente (Katz et Shapiro, 1986). Les exemples typiques sont le téléphone ou l'internet dont l'arrivée des nouveaux adhérents au réseau augmente les possibilités de communication de tous les usagers (hors les effets de congestion qui se manifestent plus tard à partir d'une certaine taille) ;
- **Rendements croissants dans la production** (économies d'échelle et d'envergure) : l'accroissement du volume de production peut permettre une réduction des coûts unitaires (Marshall, 1959), ainsi que l'accumulation d'expérience ce qui réduit d'avantage les coûts (Arrow, 1962a) ;
- **Rendements croissants d'information** : l'adoption croissante d'une nouvelle technologie accroît la connaissance générale sur cette technologie, ce qui réduit les incertitudes qui bloquent la diffusion (Mansfield, 1968) ;
- **Interrelations technologiques** (effets d'envergure) : plus la technologie est adoptée, plus de biens compatibles sont mis à sa disposition des usagers (Economides, 1996). Il s'agit particulièrement de services et supports physiques (infrastructures) auxiliaires à la

consommation. Selon la définition de Grübler et al. (1999), l'infrastructure est un ensemble de technologies ayant comme principal but de fournir des externalités (de réseau) ; par exemple, la diffusion de la voiture individuelle a beaucoup bénéficié du réseau de stations de service en place et des services tels que la cartographie des routes. Ainsi, les technologies compatibles avec l'infrastructure ont plus de conditions pour se développer sur le marché ; simultanément, les technologies incompatibles doivent faire face à plus de barrières.

En présence de rendements croissants d'adoption, les agents ayant comme préférence une certaine technologie A peuvent finir par choisir une autre technologie (B) en raison des choix précédents (graphique 67).

Graphique 67. L'adoption technologique en présence de rendements croissants



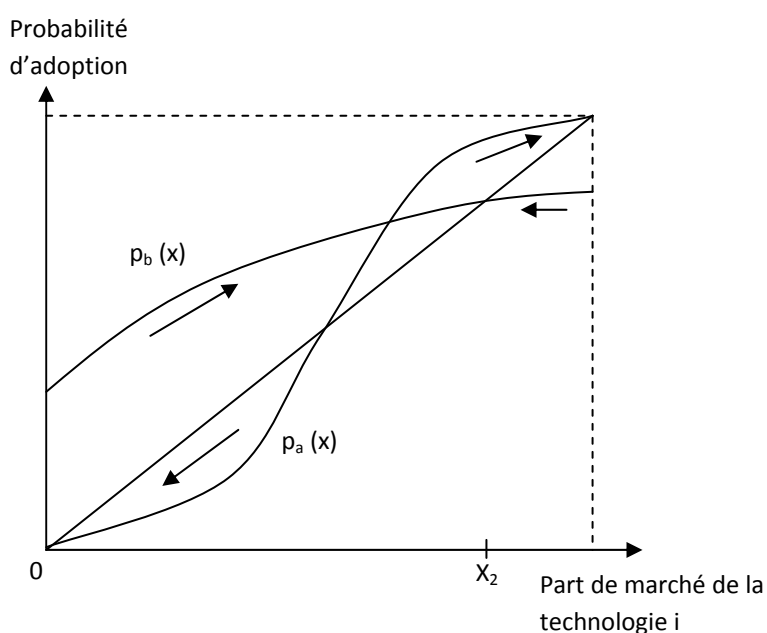
Source : Arthur, 1989, p.120.

Le processus est affecté par la séquence historique d'adoption, notamment par des facteurs mineurs et éventuellement aléatoires qui déterminent le résultat final (dépendance de sentier). C'est-à-dire qu'une séquence différente d'événements historiques mène à l'adoption de l'autre technologie. Le marché peut être ainsi verrouillé graduellement sur une technologie inférieure (Arthur, 1989). Les exemples traditionnellement évoqués concernent le processus qui a conduit à la domination de deux standards inférieurs (David, 1985) : le clavier QWERTY, malgré les études qui montrent que cette technologie est sous-optimale pour la dactylographie ;²²⁴ le magnétoscope VHS en dépit du standard BETA.

La diffusion technologique n'est pas linéaire lorsque la probabilité d'adoption de la technologie augmente avec la part de marché (Arthur, 1988, 1989). Considérons deux processus d'adoption A et B différents, caractérisés par des rendements croissants et décroissants, respectivement (graphique 68). Lorsque la probabilité d'adoption est supérieure à la part de marché, la tendance est à l'augmentation de la part de la technologie dans le marché et *vice-versa*.

²²⁴ Voir aussi la critique de Liebowitz et Margolis (1994, 2000) particulièrement sur les conclusions des études citées par David (1985) pour soutenir la thèse que le standard inférieur a pu s'imposer sur le marché.

Graphique 68. La probabilité d'adoption comme fonction de la part de marché



En présence de rendements d'adoption décroissants (courbe $p_b(x)$), il existe une part de marché d'équilibre (x_2) qui est unique et pour laquelle le système converge. Un point à gauche de x_2 a une probabilité d'adoption supérieure à la part de marché de la technologie et donc cette dernière a tendance à augmenter, et vice-versa. En cas de rendements croissants d'adoption (courbe $p_a(x)$), il existe de multiples équilibres avec au moins un point d'équilibre instable (le point qui croise la diagonale pour lequel le moindre écart éloigne irrévérablement de l'équilibre), ce qui rend le résultat de la concurrence entre technologies dépendant du sentier. Au-delà de ce point, le processus d'adoption devient autoentretenu et la technologie tend à voir sa part de marché augmenter jusqu'à devenir dominante et à verrouiller le marché. En deçà du point d'équilibre instable, la dynamique va dans le sens de la réduction de la part de marché de la technologie. Il s'agit d'une situation de marché à bascule où ceci tend naturellement vers le monopole technologique. Donc, en présence de rendements croissants, le fait de gagner un avantage sur les concurrents n'est pas suffisant pour que la technologie domine le marché, il faut que l'avantage soit autoentretenu (Arthur, 1988).

Ainsi, par le jeu des rendements croissants d'adoption, la diffusion de la meilleure technologie est un résultat possible entre autres. Une technologie inférieure peut gagner une part de marché importante qui est consolidée par le choix décentralisé (David, 1985). Dans une telle situation, le marché est graduellement bloqué sur la technologie sous-optimale. L'intervention publique est alors justifiée pour éviter un résultat défailant (David, 1988).

Enfin, l'émergence des nouvelles technologies devient plus difficile en présence de rendements croissants d'adoption. Les nouvelles technologies peu diffusées n'ont pas encore profité des externalités d'adoption, ce qui limite leur attractivité (performances médiocres, coût élevés, peu connues, etc.). De cette manière, ces technologies sont dans une position défavorable vis-à-vis des technologies matures lesquelles ont déjà bénéficié des effets positifs de la diffusion. Dans le domaine des transports, la diffusion de carburants alternatifs aux énergies fossiles a été bloquée à plusieurs reprises. La section suivante analyse le « lock-in » sur le paradigme du moteur thermique et énergies fossiles dans les transports.

Section 3. Stratégies des acteurs dans le cadre du verrouillage technique et institutionnel sur le pétrole

Les énergies fossiles occupent un rôle déterminant dans le bouquet énergétique actuel des nations. Cette domination est particulièrement évidente dans le secteur des transports où le pétrole est pratiquement la seule source d'énergie. Cette situation s'auto entretient dans le sens où les institutions de l'économie ont tendance à reproduire les choix du passé et ainsi contribuer à une certaine inertie. Les changements doivent faire face à cette rigidité institutionnelle, surtout dans le cas de changements majeurs. Les agents s'adaptent à leur environnement, mais cela ne les empêche pas d'adopter une stratégie permettant de se positionner sur le marché dès lors qu'il s'ouvre.

3.1. Le verrouillage institutionnel sur le 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.

3.1.1. Stabilité institutionnelle et changement graduel

Les institutions peuvent être définies comme toutes les contraintes du comportement individuel qui structurent les interactions humaines (Foxon, 2002). Elles ont un effet sur la performance économique et changement social, et donc sur les trajectoires technologiques.

L'économiste Douglas C. North a analysé les institutions, la façon comme elles évoluent et leur impact sur la performance économique. Selon lui, 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). Au long de l'histoire, l'objectif des institutions a été d'introduire un certain ordre et réduire l'incertitude dans les transactions (North, 1991). Ainsi, les sociétés humaines ont structuré leur environnement de manière à accroître la prévisibilité. Pour cela, elles se sont appuyées sur des modèles mentaux de culture et de croyances partagés collectivement (North, 2005).

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 dans la société, en particulier la structure d'incitations et d'opportunités des acteurs (North, 1991).

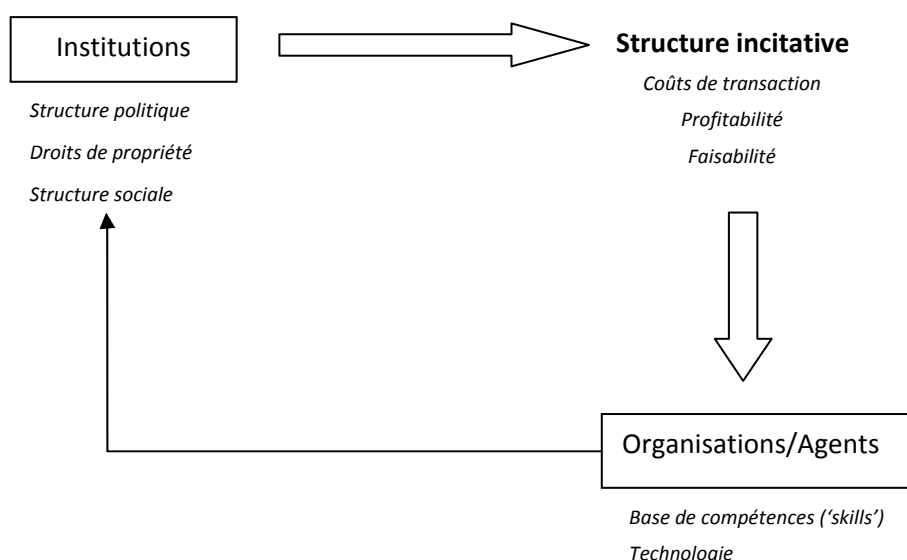
Les institutions modèlent les perceptions que les agents ont de leur environnement et des conséquences de leurs actions. Les décisions des agents sont prises à partir de leurs croyances et orientées par les opportunités ouvertes par l'environnement. Leur compréhension de la réalité est

limitée et ils doivent décider dans un monde « non ergodique » qui change en continu (North, 2005). Dans ce cadre, l'erreur est normale et différents équilibres multiples peuvent en résulter.

Les choix sont affectés par les interactions effectuées entre les agents et les institutions. Les organisations sont obligées d'investir continuellement en nouvelles compétences et connaissances pour rester compétitives.²²⁵ La concurrence indique particulièrement 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.

En effet, les agents répondent aux changements de l'environnement en prenant en compte leur propre stock de connaissances et technologies acquises dans le passé.²²⁶ Cela affecte à son tour les choix qui influencent l'évolution des institutions, lesquelles reflètent les croyances accumulées au fil du temps (graphique 69).

Graphique 69. Le cadre institutionnel de base de l'analyse de North



North considère que les rendements croissants d'adoption des technologies – telles que décrites par Arthur (1989) - peuvent s'appliquer à l'analyse des institutions : « *the interdependent web of an institutional matrix produces massive increasing returns* » (North, 1990). L'évolution des institutions serait alors marquée par des économies d'échelle, économies de gamme, effets de réseau, etc., qui consolident les institutions existantes. 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.

Le changement institutionnel est alors marginal et 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. North élargit aux institutions le concept de dépendance de sentier de David (1985, 1988).

²²⁵ Pour une analyse de la stratégie des organisations pour s'adapter à l'environnement institutionnel et choisir l'encadrement contractuel qui réduit les coûts de transaction, voir Williamson (2005).

²²⁶ North reprend ici les thèses évolutionnistes sur les compétences base de la firme, lesquelles conditionnent ses choix technologiques pour l'avenir. Voir : Nelson et Winter, 1982.

Ainsi, l'évolution des institutions est dépendante des choix du passé parce que le changement sera cohérent avec la matrice institutionnelle existante, et aussi que gouverné par les technologies et compétences acquises par les agents au fil des années.

Aoki (2001, 2007) analyse les mécanismes de changement des institutions. En particulier, l'auteur s'efforce de répondre à la question de savoir si les institutions changent en réponse aux contraintes et facteurs externes, ou bien de manière endogène, suivant une logique propre à leur développement interne. Les institutions sont ici entendues comme une connaissance commune de caractéristiques auto-entretenu des interactions sociales. La cohérence et l'évolution des arrangements institutionnels est alors le résultat de l'interaction entre facteurs sociaux, politiques, économiques et organisationnels.

Ainsi, Aoki (2007) spécifie trois mécanismes endogènes de changement institutionnel : l'innovation au sens schumpétérien ; le chevauchement de normes sociales ; et les complémentarités institutionnelles dynamiques. Ces mécanismes agissent de manière interactive et simultanée pour produire la transformation des structures. Une nouvelle architecture peut venir remplacer l'ancienne par un processus similaire à celui de la destruction créative promue par l'entrepreneur-innovateur schumpétérien. Mais les normes sociales encastrées dans plusieurs domaines peuvent freiner ce mouvement, en introduisant des éléments du passé. Cette contrainte peut être forte lorsque le développement de nouvelles formes institutionnelles n'est possible que par l'intégration dans les structures préexistantes. Les complémentarités dynamiques capturent le rôle des politiques dans le processus de changement institutionnel. Ceci doit se dérouler de manière graduelle et en interaction avec les altérations dans d'autres domaines. En l'absence d'institutions complémentaires et de compétences de support, la transition peut se faire de manière très difficile.

Les mécanismes endogènes ne sont pas isolés du contexte externe. Par exemple, l'environnement peut être favorable à la création de nouvelles innovations qui viennent éroder les rentes des normes sociales précédentes. Le passé et le futur sont liés de manière complexe pour influencer la dynamique institutionnelle, ainsi que les contraintes internes et externes.

March et Olsen (1989) focalisent leur analyse sur les institutions politiques, particulièrement leur rôle pour maintenir une certaine stabilité institutionnelle. L'action des institutions est marquée par des routines. Les routines renferment identités collectives et individuelles, intérêts, système de valeurs, et perspectives du monde, qui agissent sur la définition des priorités, les standards d'appréciation, les perceptions et la répartition des ressources (March et Olsen, 1989, p.24). Les routines ont une existence indépendante des acteurs, lesquels se comportent plus ou moins en conformité avec elles.

L'évolution des routines se fait à partir de l'expérience et du stock existant de routines (March et Olsen, 1989). Face à une nouvelle situation, les organisations essaient de trouver une routine qui s'adapte au problème en question. Ainsi, l'apprentissage et l'histoire sont plus importants que les anticipations sur l'avenir. Ceci dit, les institutions politiques ne sont pas condamnées à rester définitivement inchangées, mais peuvent aussi se transformer.

Les institutions politiques évoluent de façon graduelle, ponctuée de temps en temps par des périodes de révolution (North, 2005 ; March et Olsen, 1989). Le changement le plus normal se déroule toutefois par l'exploitation de processus stables. Dans ce cadre, March et Olsen (1989)

identifient six stratégies pour façonner graduellement les institutions : l'évolution des règles par un processus de variation et de sélection (Nelson et Winter, 1982) ; la résolution de problèmes par le choix entre alternatives possibles orienté par des objectifs établis ; l'apprentissage par l'expérience (essaie-erreur, en gardant les meilleures règles) ; le conflit entre individus et groupes, dont le résultat dépend de leurs préférences et pouvoirs ; la contagion, le contact entre variation de règles et l'imitation des croyances affecte la vitesse de changement (Rogers, 1995) ; et par la rotation d'individus et de compétences.

En outre, les réformes des institutions politiques sont normalement infructueuses, mais elles ouvrent la voie pour la discussion sur les justifications du changement et les mécanismes à emprunter (March et Olsen, 1989). Une manière d'influencer le succès des réformes est d'agir au niveau des aspirations de la société. D'où l'intérêt d'alerter les consciences sur les problèmes sociaux de façon à entamer un changement graduel des institutions.

3.1.2. Les défaillances institutionnelles bloquent l'émergence de nouveaux systèmes technologiques

Une littérature proche des analyses de Porter sur la compétitivité des nations s'est développé au sein du courant évolutionniste.²²⁷ Les auteurs ont cherché à comprendre le fonctionnement des systèmes d'innovation. Selon la définition de Lundvall (1992), un *système d'innovation* est composé par les éléments et interactions établis entre la production, la diffusion et l'utilisation de nouvelles connaissances économiquement utiles. Ce cadre d'analyse a été appliqué à l'étude de la performance innovante des pays afin d'établir des comparaisons et de retirer quelques conclusions. Ceci a donné lieu à la notion de systèmes nationaux d'innovation (Nelson, 1992 ; Lundvall, 1992) qui a été approfondi *a posteriori* dans plusieurs travaux de l'OCDE (1997, 2002). Il n'existe pas une définition commune de système national d'innovation (*'national innovation system'*), toutefois les différentes notions mettent l'accent sur les interactions entre les acteurs et les institutions publiques et privées (entreprises, consommateurs, état, universités, unités de recherche, etc.) et les flux de connaissance et d'influence qui caractérisent un système d'innovation donné.

A partir de la littérature sur les systèmes nationaux d'innovation (Nelson, 1992 ; Lundvall, 1992 ; OCDE, 1997, 2002), et des travaux sur le développement des systèmes technologiques (Hughes, 1983, Edquist, 1997), Jacobsson et Johnson (2000) analysent l'émergence de nouveaux systèmes basés sur les technologies énergétiques renouvelables au sein de différents contextes institutionnels. Particulièrement, l'analyse se focalise sur l'émergence d'innovations radicales dans un contexte de concurrence entre technologies de production énergétique.

Jacobsson et Johnson (2000) partent du concept de « *systèmes technologiques* » tel que défini par Carlsson et Stankiewicz (1991, p.111) : un réseau formé par les interactions des agents dans un certain cadre institutionnel, de manière à gérer, diffuser et utiliser une technologie particulière. Un

²²⁷ Stopford et Strange proposent une application du modèle de Porter pour l'analyse de l'interdépendance entre les Etats et les firmes multinationales. Les auteurs montrent comment les changements structurels mondiaux influencent les gouvernements à rechercher la coopération des dirigeants des grandes entreprises, mais dans les limites des ressources économiques intérieures, des structures sociales et de l'histoire. In : Stopford J.M., Strange S.H. (1991), *Rival States and Rival Firms: Competition for World Market Share*, Cambridge University Press, Cambridge.

système technologique ainsi décrit est constitué par plusieurs composantes : les acteurs et leurs compétences respectives ; les réseaux ; et les 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 (North, 1990, 1991). Elles peuvent influencer le sentier de développement technologique (North, 2005 ; David, 1988).²²⁸

Au-delà des défaillances du mécanisme prix (p.ex. externalités, biens publics), la formation d'un nouveau système technologique peut être encore bloquée par les défaillances institutionnelles (Jacobsson et Johnson, 2000). Dans chacune des trois composantes présentées ci-dessous, il peut exister des éléments faisant résistance au développement de nouvelles technologies. Le tableau suivant présente des exemples de facteurs qui peuvent retarder l'émergence de nouveaux systèmes.

Tableau 29. Les barrières au développement de nouveaux systèmes technologiques

Composantes du système	Facteurs de résistance
Acteurs et marchés	Problèmes d'articulation de la demande Les technologies existantes bénéficient de rendements croissants Le processus de recherche locale Le pouvoir de marché des firmes établies
Réseaux d'acteurs	Faible connectivité Absence de vision de l'avenir
Institutions	Défaillances de la législation Faiblesses du système d'éducation Marché du capital étroit Faible organisation et influence des nouveaux entrants

Source : Jacobsson et Johnson, 2000.

La transformation du marché peut se voir freinée par plusieurs ordres de raisons : les problèmes d'articulation de la demande (les consommateurs potentiels n'arrivent pas à exprimer leurs attentes en termes de qualité, prix et performance du produit) ; le processus de recherche locale des entreprises (Dosi, 1988a) ; l'écart prix/performance face à la technologie existante dont la diffusion a bénéficié de rendements croissants dans le passé ; la résistance des firmes dont les intérêts sont liés à la technologie dominante ; les faiblesses du réseau professionnel de la technologie émergente ; la législation et le système d'éducation peuvent bénéficier de la technologie ancienne ; et l'incertitude et le risque associés à la nouvelle technologie rendent plus difficile le recours au marché des capitaux.

Des stratégies peuvent alors se mettre en place pour aider à l'émergence des innovations. Premièrement, l'incitation des firmes à entrer sur le marché et devenir elles-mêmes pionnières dans la diffusion de la technologie. Les premières firmes ont un rôle important pour éduquer les

²²⁸ Linda Weiss analyse l'impact de la globalisation sur la capacité des institutions nationales à gérer l'économie. L'auteur argumente que la globalisation crée l'occasion pour les demandes de protection des acteurs internes. Mais les institutions domestiques répondent de manière différente aux stimulations externes. In : Weiss L. (2003), *States in the Global Economy: Bringing Domestic Institutions Back In*, Cambridge University Press, Cambridge.

consommateurs à la nouvelle technologie, et influencer aussi le contexte institutionnel. Jacobsson et Johnson (2000) donnent l'exemple du développement de l'éolien en Allemagne où le secteur a acquis un pouvoir d'influence décisif pour la définition des politiques de soutien à la filière. Deuxièmement, les politiques de création de variété technologique comme les subventions à la R&D aident à réduire les barrières techniques au développement de nouveaux systèmes.

Cependant, la libéralisation des marchés de l'énergie en Europe est venue complexifier le financement des activités innovantes. Les analyses faites à propos de l'impact de l'ouverture sur l'innovation dans le secteur électrique rendent compte d'une diminution des dépenses des firmes en R&D, spécialement en matière de recherche fondamentale (Jamasp et Pollitt, 2005a). Ces dépenses sont nécessaires afin de réduire les coûts de production des innovations, et de rendre disponible la technologie propre dans le futur. De plus, ces innovations doivent se développer et entrer sur le marché sous un contexte dominé par les énergies fossiles.

3.1.3. Le « lock in » aux énergies fossiles

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 aux énergies fossiles et ses implications pour le développement des innovations vertes.

Le rôle des hydrocarbures dans le quotidien des pays développés 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 aux énergies fossiles par un processus de coévolution technologique et institutionnelle et de dépendance de sentier à travers les rendements d'échelle croissants. Ce verrouillage aux 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, voir tableau 30), 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).

Tableau 30. Les sources de verrouillage technologique au carbone

<i>Les sources de lock-in</i>	<i>Exemples</i>
Technologique	Design dominant, innovation architecturale, compatibilité
Organisationnelle	Routines, training
Industrielle	Standardisation, interrelations technologiques
Sociétale	Socialisation, réputation, système de valeurs
Institutionnelle	Politiques publiques, normes techniques

Adapté d'Unruh, 2002, p.318.

Ce complexe technico-industriel serait défendu par les intérêts des firmes dominantes. Dans son analyse sur la logique de l'action collective, Olson (1965) montre que les groupes plus petits engagent un coût plus bas pour organiser une action collective et leurs éléments partagent plus de bénéfices individuels en comparaison avec un groupe plus grand. Ainsi, 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). Les bénéfices du blocage du marché par ces entreprises seraient alors plus élevés que les coûts supportés par individu pour combattre le rôle dominant des carburants fossiles et lutter pour une transition énergétique.

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. Le TIC serait alors responsable par le retard de l'entrée dans le marché des innovations propres. L'intervention des pouvoirs publics devient nécessaire de manière à débloquer le marché et lever les barrières à la diffusion technologique.

Trois stratégies d'interventions publiques sont envisagées par Unruh (2002) : 1) la stratégie 'end-of-pipe', c'est-à-dire, le traitement uniquement des émissions de carbone sans changer le reste du système (p.ex. la fixation de standards d'efficacité énergétique) ; 2) la stratégie dite de continuité, l'intervention au niveau des composantes de l'environnement de sélection sans pour autant modifier l'architecture globale (p.ex. la taxe carbone) ; et enfin 3) une position de rupture ou de discontinuité, caractérisée par le remplacement complet de l'actuel système basé sur les énergies fossiles (p.ex. la création de niches de marché pour les innovations ; l'interdiction de la vente de l'ancienne technologie). L'ampleur du problème du réchauffement climatique demande une action plus énergétique que les simples mesures 'end of the pipe'.²²⁹ Par ailleurs, les stratégies de continuité, bien que moins performantes par rapport aux changements de rupture, ont le mérite de réduire les comportements d'inertie au changement et la résistance des agents.

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.²³⁰ Au début du XX^{ème} 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, avec un démarrage facile, et non polluant. Cette technologie présentait toutefois le handicap du temps de recharge et de l'autonomie des voitures. Malgré ces 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 de masse et les nouvelles méthodes de rationalisation de la production mise 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 diesel 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 dans le processus qui a conduit à la domination du moteur à explosion. Les économies d'échelle et d'apprentissage sont venues élargir

²²⁹ Voir par exemple les études du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) : <http://www.ipcc.ch>

²³⁰ Cette présentation très synthétique de la diffusion du moteur à explosion dans les transports est inspirée des présentations de Grübler (1999), Geels (2005) et Melaina (2007).

les rendements croissants d'adoption des voitures à essence, en verrouillant au même temps le marché à cette technologie par un processus de dépendance de sentier. Le « lock-in » actuel rend plus difficile l'émergence et le développement de technologies alternatives comme les voitures à hydrogène.

Cependant, les grands changements ne sont pas normalement entamés par les acteurs dominants, mais par des nouveaux acteurs qui introduisent les innovations radicales. Les agents installés ont intérêt à défendre la technologie existante en mettant les innovations majeures à l'étagère (*'on the shelf'*). 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. 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 des nouvelles technologies radicales. Ce concept a été introduit par Ward (1967) en se référant aux améliorations survenus aux bateaux à voile pendant les années 1860 et 1870, lorsque leur domination a été défiée par les navires à vapeur.

En raison de leur rôle dans le paradigme technologique actuel, les constructeurs automobiles et les compagnies pétrolières peuvent se comporter comme les « gardiens du temple » des moteurs à combustion, en freinant ainsi les changements 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 est en train d'évoluer, d'une part, par l'effet des externalités inhérentes à la combustion d'énergies fossiles (pollution de l'air, changement climatique); et d'autre part, par les limites physiques au perfectionnement du rendement du moteur, de l'aérodynamique, etc.

De leur côté, les compagnies pétrolières ont intérêt à pérenniser leur activité de base et de rentabiliser au maximum les investissements réalisés dans l'infrastructure actuelle. Cependant, la perspective de raréfaction du pétrole oblige ces compagnies à commencer à préparer l'après pétrole.

3.2. La stratégie des acteurs potentiels de l'hydrogène

Les grandes entreprises de l'hydrogène-énergie n'existent pas pour l'instant. Celles qui ont une activité proche de l'hydrogène sont intéressées à suivre le développement de la filière, soit par acquisition de sociétés plus petites (p.ex. *'start-up'*) qui développent la technologie (acquisition et développement), soit par investissement en R&D interne de manière à laisser ouvertes plusieurs alternatives en attendant que les incertitudes technologiques se dissipent. Le premier cas correspond plutôt à une stratégie de suiveur rapide (*'fast follower'*), alors que le dernier correspond à une stratégie de pionnier (*'first mover'*).

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 déployées avant 2015 (HyWays, 2008). La feuille de route prévoit 400 stations localisées dans les premières villes d'ici 2015, complétées par 500 stations-service sur les principales autoroutes européennes pendant la même période, de manière à créer un « couloir » de l'hydrogène.

Une caractéristique des investissements dans la filière hydrogène est l'interdépendance des décisions, ce qui rend nécessaire la coordination des actions. Pour que les constructeurs automobiles puissent vendre ou louer ces voitures, une infrastructure de distribution d'hydrogène est nécessaire. D'autre part, les stations d'hydrogène se feront dans la mesure où les voitures sont disponibles.²³¹ Toutefois, les intérêts à entrer dans le marché ne sont pas partagés par tous les investisseurs potentiels. En effet, les compagnies pétrolières y voient une stratégie souhaitable d'évolution de leur métier de base pour des produits plus élaborés ; alors que les entreprises énergétiques, en particulier les compagnies pétrolières, peuvent voir dans l'hydrogène un substitut à leurs produit de base et ainsi craindre que la transition les empêche de rentabiliser les investissements dans l'infrastructure actuelle (Sperling et Gordon, 2008 ; Van Benthem et al., 2006). Cela a des implications pour la mise en place des arrangements entre les constructeurs automobiles et les compagnies pétrolières pour le développement de l'hydrogène. Une politique de soutien aux premières infrastructures peut créer les incitations nécessaires au démarrage de la filière.

3.2.1. Les constructeurs automobiles

L'industrie automobile mondiale fait face à un contexte complexe. Le nouvel environnement est marqué par les problèmes liés à l'approvisionnement de pétrole, ressource jusqu'alors considérée comme abondante et bon-marché. L'augmentation de la consommation de pétrole et les prévisions de consommation des marchés émergents, en particulier en Chine et en Inde, ainsi que les craintes d'un « peak oil » font converger les prévisions sur un prix durablement élevé du pétrole dans les prochaines années. Les guerres pour le pétrole et l'augmentation des dépenses avec la sécurité de l'approvisionnement renforcent la volonté des pays à réduire leur dépendance face à l'or noir. Dans son analyse sur ces transitions de long terme, Grübler (1999) signale que les changements structurels des systèmes de transports sont régulièrement accompagnés par une augmentation de la volatilité du prix.

A cela s'ajoute la question environnementale du changement climatique et de la dégradation de la qualité de l'air au niveau local. Dans ce contexte, l'industrie automobile doit commencer à préparer les grandes évolutions à moyen et long termes qui vont probablement exiger un changement de paradigme technologique.

Ce défi est posé au moment où la crise atteint fortement l'industrie automobile. Pendant les dernières années, de nombreuses marques ont échappé de justesse à la faillite (Fiat, GM et ses filiales européennes Opel et Saab, pour citer les exemples les plus médiatiques). La difficulté actuelle pour les marques est de concilier les objectifs à court terme de gestion de la crise et les objectifs à long terme avec la préparation des grandes transformations technologiques.

Un certain nombre de tendances peuvent alors être identifiées, qui auront un impact sur l'évolution du paysage automobile à moyen terme.²³² Tout d'abord, au niveau de la demande :

²³¹ Clark et Rifkin (2006) posent la question de la disponibilité de voitures pour les projets de démonstration d'hydrogène dans le monde. Voir chapitre 3.

²³² Cette analyse est inspirée de la synthèse présenté par le Centre d'Analyse Stratégique, La note de veille n°132-Avril 2009.

- le parc mondial de véhicules doit tripler à l'horizon 2050 en raison surtout de l'augmentation de la demande dans les marchés émergents (WBCSD, 2004) ;
- la demande de technologies propres afin de combattre les problèmes de réchauffement climatique et de pollution de l'air dans les villes ;

Des mutations récentes sont aussi susceptibles d'influencer l'avenir à moyen terme de l'industrie automobile. Ainsi, parmi les facteurs internes liés à l'offre, on compte :

- la concurrence des constructeurs des nouveaux pays constructeurs de voitures (comme la Corée du Sud, l'Inde, la Chine) ;
- les incertitudes concernant le rôle des différentes technologies dans le futur (voiture hybride ; voiture à hydrogène ; voiture hybride rechargeable ; biocarburants ; ...)
- le mouvement de concentration dans le secteur et les partenariats entre les acteurs de l'ensemble de la filière afin d'accompagner l'évolution technologique et faire face à une concurrence globalisée sur un produit devenu plus homogène.

La représentation des défis posés à l'industrie automobile dans les 20 à 30 prochaines années permet de mieux comprendre le contexte dans lequel va se dérouler le changement probable de paradigme. Ensuite, nous présenterons une liste non exhaustive de l'activité des constructeurs les plus impliqués dans la filière de l'hydrogène.

Les grands constructeurs automobiles (à quelques exceptions près) ont un programme de développement de voitures à hydrogène. Presque toutes les marques ont déjà présenté au moins un modèle de voiture à hydrogène dans un salon automobile. Dans la plupart des cas, il s'agit de prototypes équipés d'une pile à combustible alimentée à hydrogène stocké à bord de façon comprimée. Une estimation faite à partir de la littérature et des entretiens avec les dirigeants des quatre premiers constructeurs actifs dans le développement des voitures à hydrogène (Daimler, General Motors, Honda, Toyota) rend compte d'une dépense annuelle de plus de 100 millions de US\$ par chacun des constructeurs, depuis 2000 (Sperling et Gordon, 2008). Une autre caractéristique est le report successif de la date de lancement commercial des voitures à hydrogène.

Daimler (Mercedes) est une des marques les plus actives dans le développement de voitures à hydrogène. La marque de l'étoile a tout intérêt à préserver sa réputation de fabricant de grandes voitures de luxe référence dans le monde (cela s'applique aussi à d'autres marques comme BMW). La raréfaction du pétrole et les perspectives de mobilité plus propre rendent obligatoire la création d'alternatives qui combinent la performance à la réduction drastique des émissions. En l'état actuel de la technologie, il est évident que la voiture électrique ne peut pas assurer un confort d'utilisation similaire à la voiture conventionnelle. Ainsi, l'intérêt de la marque allemande dans la solution pile à combustible à hydrogène est naturel.

L'étoile de Stuttgart a surpris le monde de l'automobile quand en 1997 elle a annoncé son ambition de vendre 40.000 voitures piles à combustible en 2004, et 200.000 en 2006.²³³ Depuis, la date du démarrage de la production (100.000 unités par an) a été successivement repoussée à 2010, 2012 et la dernière échéance a été fixée à 2014/2015. L'entreprise a une longue histoire de démonstration de modèles à hydrogène depuis le minibus Nekar 1 en 1994. Elle est aussi à l'origine des 30 bus

²³³ Reuters (1997), « Daimler-Benz fuels alternative energy hopes », 22/10/97.

Mercedes-Benz Citaro qui ont équipé la démonstration européenne de l'hydrogène dans les transports publics (programme CUTE) entre 2006 et 2009, laquelle s'est élargi entretemps à d'autres villes dans le monde. Daimler entretient une des plus grandes flottes de voitures au monde avec plus de 100 voitures pile à combustible actuellement en route (sur base de la Mercedes Classe A). En janvier 2009, la marque a présenté le nouveau BlueZERO F-Cell, une voiture basée sur la Classe B, équipée d'une pile à combustible de 90 kW de l' *Automotive Fuel Cell Cooperation Corp* (AFCC) - l'ancienne division transports de Ballard dans laquelle Daimler détient la majeure partie du capital - à hydrogène comprimé à 700 bars, permettant une autonomie de 385 km et une vitesse maximale de 170 km/h.²³⁴ Une vingtaine de voitures doivent être livrées à la fin de l'année 2009 à Hambourg, ainsi qu'un nombre encore non spécifié aux Etats-Unis, plus concrètement en Californie (Fuel Cell Today, 2009a). Les premières voitures doivent être offertes aux consommateurs finals sur la base d'un forfait type « leasing ». La décision de commercialisation à grande échelle de la voiture pile à combustible en 2014/15 dépendra des améliorations de performances et de la réduction des coûts de la pile.

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. En 2002, le plus grand des constructeurs américains présente l'AUTOmomy, un prototype qui se distingue aussi bien par le design avant-gardiste que par deux grandes innovations au niveau de la construction. La première est le nouveau concept de châssis type « skate board » intégrant toutes les composantes de propulsion (y compris le stockage d'hydrogène) dans un plancher plat. La deuxième innovation est le concept de conduction par fils (*'drive by wire'*), c'est-à-dire que toutes les parties mécaniques sont remplacées par des fils électriques permettant plus de fiabilité, moins de vibration et de poids. En Septembre 2006, GM annonce qu'elle allait construire plus de 100 véhicules Chevrolet Equinox Fuel Cell dans le cadre d'un plan global de déploiement - « Project Driveway » - destiné à acquérir l'information sur l'expérience des clients. 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 Europe, GM démontre la HydroGen4 - une voiture équipée d'une pile à combustible sur la base de l'Opel Zafira - dans le cadre du partenariat berlinois pour les voitures propres. La pile a la particularité d'alimenter une batterie, laquelle fonctionne comme tampon pour le stockage d'électricité et la récupération de l'énergie du freinage. En avril 2008 la compagnie de Detroit a annoncé l'intention de produire 1.000 voitures piles à combustible destinées à rouler sous les routes californiennes à l'horizon 2012. Depuis, la compagnie a été atteinte de plein fouet par la crise qui a bouleversé le secteur automobile en 2009. L'entreprise a dû se mettre sous la protection de la loi sur les faillites pour pouvoir se restructurer. C'est finalement l'Etat américain qui prête les fonds nécessaires à sa restructurations ; en échange GM a dû vendre ou supprimer plusieurs marques dont Hummer (vendue en août à une société à des capitaux russes) ou Pontiac (laquelle doit disparaître en 2010). La crise a aussi eu comme effet quelques suppressions de postes dans la division hydrogène.²³⁵ En outre, les attentions se sont tournées vers la présentation de la voiture électrique rechargeable, Chevy Volt, en août 2009.

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 mettre en location quelques voitures piles

²³⁴ <http://www.daimler.com/>

²³⁵ Fuel Cell Today (2009), « GM Lays off 8 Fuel Cell Staff », 24/07/09.

à combustible en Californie en Décembre 2002 (Solomon et Banerjee, 2006). A la fin de 2008, Honda a démarré la location des premières FCX Clarity à Los Angeles et Tokyo. Il s'agit de la première voiture entièrement conçue pour comporter une pile à combustible de 100 kW, avec les composants standardisés de manière à être prête pour la production à grande échelle. La voiture a la capacité de stocker 4 kg d'hydrogène comprimé à 350 bars, ce qui permet une autonomie de 430 km et une vitesse de pointe de 160 km/h.²³⁶ Le consommateur prend une location de la voiture pour une durée de 36 mois au prix de 600 US\$ par mois. Ce prix comprend l'entretien de la voiture. La compagnie japonaise compte louer 200 voitures en 3 ans. En 2007, Honda ambitionnait de produire à grande échelle la voiture pile à combustible en 2018, à un prix de 65.000 € l'unité (Beuzit, 2007).

De plus, Honda développe un système de production et de ravitaillement en hydrogène à la maison (Fuel Cell Today, 2008d). Le dernier modèle ('Home Energy Station IV' - HES IV) a été développé avec l'équipementier Plug Power ; il s'agit d'une pile à combustible stationnaire de cogénération d'électricité et de chaleur à hydrogène produit à partir du reformage de gaz naturel. Lorsque l'hydrogène n'est pas consommé, il est stocké dans des réservoirs et reste disponible pour approvisionner la voiture. Les automobilistes pourraient ainsi commencer à utiliser la voiture à hydrogène sans avoir besoin de stations-service à proximité. Le projet prévoit encore une version de production d'hydrogène à la maison par électrolyse de l'électricité produite par des panneaux solaires photovoltaïques.

Toyota aussi a été pionnière dans la commercialisation de voitures piles à combustible à hydrogène. Le plus grand constructeur du monde (en ventes annuelles) a lancé en 2008 le 'Highlander Fuel Cell Hybrid Vehicle – Advanced (FCHV-adv)', un véhicule utilitaire sportif (SUV en anglais) basé sur le modèle Highlander. Ce véhicule à hydrogène est parmi les plus performants déjà créés avec une autonomie annoncée de 830 km (650 km ont été confirmés en situation réelle de conduite).²³⁷ En outre, la compagnie nipponne avance parallèlement dans les autres technologies comme les voitures hybrides où son modèle Prius est un succès mondial. Les pertes liées au contexte actuel de crise n'ont pas pour l'instant fait infléchir les plans consistant à lancer la voiture pile à combustible en 2015.²³⁸

BMW promeut son modèle 'Hydrogen 7' depuis deux ans. La marque bavaroise a fabriqué une centaine de ces voitures lesquelles ont été louées à des personnalités de la politique et du spectacle (p.ex. Angelina Jolie, Arnold Schwarzenegger, Juliette Binoche, José Manuel Barroso). Il s'agit d'une voiture construite sur la base de la 'BMW Serie 7', équipée d'un moteur à combustion carburant également essence et hydrogène liquide. La voiture dispose d'une autonomie totale de 700 km : l'autonomie du réservoir d'hydrogène est de 200 km ; le rayon d'action du réservoir d'essence est de 500 km.²³⁹ L'intérêt d'un moteur ('dual-fuel') est de résoudre les problèmes mixte de coût et de durabilité des piles à combustible pour démarrer la transition. Un autre avantage est le fait de pouvoir utiliser l'infrastructure actuelle des carburants fossiles. L'inconvénient majeur de l'utilisation de l'hydrogène dans un moteur à explosion est le bilan énergétique et environnemental nettement dégradé par rapport à la pile à combustible. Le constructeur s'intéresse aussi à la pile à combustible

²³⁶ <http://www.autobloggreen.com/2007/11/18/first-drive-2009-honda-fcx-clarity-worlds-first-series-product/>

²³⁷ Fuel Cell Today (2009), « Toyota unveils advanced fuel cell vehicle », 6/6/2009.

²³⁸ Fuel Cell Today (2009), « Toyota reiterates its commitment to Fuel Cell Vehicles », 19/08/2009.

²³⁹ Le Monde (2008), « BMW croit en l'hydrogène », 30/10/08.

comme groupe auxiliaire embarqué ('APU') pour les modèles haut de gamme. En mars 2008, BMW a rendu public son scénario pour l'avenir. Ainsi, la marque croit à la voiture à hydrogène mais juge que l'infrastructure ne doit pas se mettre en place avant 2025. Entre-temps, le constructeur mise sur la voiture hybride comme stratégie à court et moyen termes.

Une éventuelle conséquence de ce réalignement technologique est le fait de ne pas faire partie du groupe de six constructeurs (Daimler, GM, Honda, Toyota, Ford et Hyundai) qui ont signé le protocole de collaboration concernant le déploiement de voitures pile à combustible et de l'infrastructure d'hydrogène.²⁴⁰ Les marques se sont engagées à démarrer la commercialisation des voitures pile à combustible avant 2015, et à produire des centaines des milliers de voitures par an à partir de cette date.

En 2005, **Ford** a lancé une flotte de 30 voitures 'Focus' à hydrogène équipées de piles à combustible Ballard (avec laquelle le constructeur avait un partenariat commun avec Daimler). Ces voitures seront encore sur la route jusqu'en 2010.²⁴¹ A signaler aussi ses expériences avec les moteurs thermiques alimentés à hydrogène ('Focus Hydrogen C-max' en 2004) et, plus récemment, le développement d'une voiture hybride avec une pile à combustible fournissant l'énergie aux batteries afin de prolonger l'autonomie de la voiture ('Hy Series' en 2007). La crise est venue stopper les projets de conception d'une nouvelle voiture pile à combustible. En mars 2009, le second constructeur américain a pris la décision d'arrêter sa division hydrogène et de déplacer les ressources vers le développement de voitures hybrides et voitures électriques pures.²⁴²

Par opposition, les fabricants asiatiques (autres que Honda et Toyota) se montrent très actifs dans la promotion de la voiture à hydrogène. C'est le cas du fabricant coréen **Hyundai-Kia** qui a annoncé le lancement commercial des voitures piles à combustible en 2012.²⁴³ Kia prétend tester 200 Borrego FCV dès 2010.²⁴⁴ Une trentaine de SUV pile à combustible 'Tucson' et 'Sportage' circulent sur les routes américaines (Californie et Michigan). La marque japonaise **Mazda** a plutôt suivi la voie de l'hydrogène thermique, mais à la différence de BMW, la marque d'Hiroshima utilise un moteur rotatif capable de carburer essence ou hydrogène. Le 'Mazda RX-8 Hydrogen RE' a été mis en démonstration au Japon et le constructeur a signé un contrat de fourniture de 30 voitures au partenariat nordique HyNor. La première voiture a été livrée en Norvège en mai dernier.²⁴⁵ En 2008, le partenaire nippon de Renault, **Nissan**, a dévoilé la nouvelle génération de sa pile à combustible « maison » qui équipe le SUV 'X-Trail'.²⁴⁶ Selon le communiqué de presse, la dernière pile est 40% plus compacte et moins coûteuse. Cette pile à combustible est en usage dans la dernière Renault 'Scenic ZEV H2' présentée en 2008.

Renault a une histoire avec la pile à combustible qui remonte aux années 1990. Le dernier Renault Scenic ZEV H2 est propulsé par une pile à combustible de 90 kW, avec une batterie lithium-ion. La

²⁴⁰ Fuel Cell Today (2009), « Six major automakers sign MOU encouraging the development of hydrogen infrastructure », 10/09/09.

²⁴¹ Fuel Cell Today (2008), « Ford extends fuel cell Focus demo programme », 26/08/08.

²⁴² Fuel Cell Today (2009), « Ford Steps Back from Fuel Cell Vehicles », 31/3/09.

²⁴³ Fuel Cell Today (2009), « Hyundai-Kia announces plans for nearly £2 billion investment in "green growth" », 23/7/09.

²⁴⁴ Fuel Cell Today (2009), « Kia reportedly to bring FCV to market in 2012 », 16/3/09.

²⁴⁵ Fuel Cell Today (2009), « Mazda Hydrogen Car for Norway », 24/4/09.

²⁴⁶ Fuel Cell Today, 2008), « Nissan unveils fuel cell vehicle in London », 16/6/08.

voiture atteint une vitesse de pointe de 160 km/h et une autonomie de 250 km environ.²⁴⁷ Le groupe Renault-Nissan ne cache pas son inclination pour la voiture électrique, qu'il pense commercialiser à très court terme. Entre-temps, Nissan a décalé la décision de commercialisation de la voiture pile à combustible pour la période 2010-2015.

Quant à **PSA Peugeot Citroën**, le moment est venu de décider de s'engager dans une voie (électrique, pile à combustible, etc.). L'entreprise contrôlée par la famille Peugeot est cependant associée à des projets de démonstration importants, comme le concept car HydroGen mis en place en partenariat avec le CEA et Renault en 1997, ou bien le Taxi PAC en 2001. En 2005, Peugeot présente la Genepac (Générateur électrique à pile à combustible) développée avec le concours du CEA. Il s'agit d'une pile de 80 kW du type PEMFC avec un rendement de 45% ce qui est un record en France et figure parmi les meilleures résultats au monde (Beuzit, 2007).²⁴⁸

Le tableau suivant fait le point sur les plans des constructeurs pour la commercialisation de la voiture pile à combustible.

Tableau 31. Plans actuels pour l'essai et la commercialisation de voitures pile à combustible

Constructeur	Année prévu de commercialisation	Nombre de voitures	Remarques
BMW (Allemagne)	2008	100	Démonstration Série 7 ICE dual (LH ²) APU
Daimler (Allemagne)	2012	10.000	Lancement
	2015		Décision sur la production à grande échelle
GM (Etats-Unis)	2009	115 voitures (des 318 au monde) en avril 2009	Démonstrations/partenariats pour mettre en place l'infrastructure (Californie, JHFC,...)
	2012	1.000	Début de production
	2012+	1 million/an	Post 2012 : 1 million voitures/an
Honda (Japon)	2008-11	200	Commercialisation
	2015		Lancement
Hyundai (Corée du Sud)	2009	100	Démonstration
	2012	1000	Lancement
	2018	30.000	Production de masse
Kia (Corée du Sud)	2010	200	Essais
Mazda (Japon)	2008+	30 RX-8	HyNor
Nissan (Japon)	2009		Introduction
	2014		Lancement
Toyota (Japon)	2015		Coût objectif: 50.000 US\$

Les visions des différents constructeurs convergent dans le sens de voir la voiture hybride à plus court terme, suivi par la voiture pile à combustible à moyen et long termes (Buzneck, 2009). La crise

²⁴⁷ Fuel Cell Today (2008), « Fuel cell powered Renault Scenic », 30/6/08.

²⁴⁸ Peugeot a récemment annoncé le choix de développer la voiture hybride-diesel. La marque française prévoit la mise en commercialisation de la première voiture, la 3008 (une SUV), en 2011. La version rechargeable est prévue l'année suivante. Voir : <http://www.carttech.fr/news/peugeot-3008-hybride-39386962.htm> ; <http://www.carttech.fr/news/peugeot-3008-hybride-rechargeable-electrique-39709333.htm> .

économique a poussé les constructeurs à accélérer le déploiement des technologies propres. La contrainte financière a par ailleurs contribué à ce que les marques se concentrent sur les technologies qui peuvent se déployer à plus brève échéance (comme les voitures hybrides et électriques). Cela dit, l'hydrogène continue à être considéré comme une solution à moyen et long termes (Daimler, GM, Honda, Toyota croit à 2015 ; Volkswagen a indiqué 2020 ; BMW pense possible à 2025). L'absence d'infrastructure est signalée comme le principal frein pour les compagnies les plus avancées technologiquement dans le domaine ; les autres compagnies évoquent la performance des piles à combustible et la priorité pour les marchés à court terme. En outre, les grandes démonstrations de voitures à hydrogène ont pu se dérouler avec la collaboration des compagnies pétrolières.

3.2.2. Les investisseurs dans l'infrastructure pour l'hydrogène

Les entreprises énergétiques (compagnies pétrolières, entreprises de gaz industriels, gaziers et électriciens) doivent mettre en place les premières infrastructures nécessaires au lancement des voitures à hydrogène. A la suite, nous présentons une liste non exhaustive des entreprises actives dans ce domaine.

A. Les compagnies pétrolières

Les compagnies pétrolières connaissent l'hydrogène depuis longtemps pour le raffinage du brut. Le nouveau carburant hydrogène apparaît comme un successeur possible du pétrole en assurant ainsi la continuité de l'activité. Cependant, le verrouillage au pétrole se manifeste dans le sens où les compagnies pétrolières sont plus intéressées à amortir les investissements réalisés, plutôt qu'à mettre en place une nouvelle infrastructure pour l'hydrogène. A la différence des constructeurs automobiles, une compagnie pétrolière a moins de raisons pour s'engager avant les autres dans la filière de l'hydrogène (Van Benthem, 2006).

Shell a ouvert sa division hydrogène en 1999. En 2001, elle publie sa vision durable de l'énergie à l'horizon 2050, laquelle accorde une grande place à l'hydrogène (Shell, 2001). Dans les années qui suivent, Shell consacre 1 milliard de dollars à la R&D et commercialisation de l'hydrogène jusqu'en 2006 (Solomon et Banerjee, 2006). La compagnie pétrolière anglo-britannique participe à divers projets de démonstration dans le monde, le plus souvent en ouvrant une station-service, comme à Reykjavik en Islande, une des premières stations au monde. La collaboration avec GM aux Etats-Unis a été à l'origine de l'ouverture de plusieurs stations en Amérique. Shell a actuellement 6 stations d'hydrogène actives dans le monde. En 2008, le pétrolier rend public sa nouvelle vision de l'avenir de l'énergie, où l'optimisme (un peu exagéré, il est vrai) pour l'hydrogène a laissé place à l'enthousiasme pour la voiture électrique.

En mars dernier, Shell a déclaré son intention d'arrêter les investissements en hydrogène, lequel est apparu comme solution de « long terme ».²⁴⁹ Quelques jours plus tard, la compagnie est venue tempérer ses propres propos, en assurant qu'elle souhaite garder les stations existantes, voire

²⁴⁹ Fuel Cell Today (2009), « Shell Pulls Out of Investment in Hydrogen, Wind and Solar », 18/3/09.

augmenter graduellement le nombre de stations dans les prochaines années en accompagnant le développement prévisible du marché des piles à combustibles pour les transports.²⁵⁰

Au début des années 2000, **BP** a voulu montrer son engagement dans l'investissement en énergies alternatives au pétrole avec le slogan 'Beyond Petroleum' (après le pétrole). Déjà en 1998, la compagnie britannique a créé une division hydrogène. En 1999, elle rejoint le partenariat californien pour la promotion des piles à combustible (CaFCP) ensemble avec Shell, ExxonMobil et Chevron, et s'engage à construire un réseau de stations d'hydrogène dans cet Etat. Entretemps elle participe à plusieurs autres démonstrations dans le monde comme le projet 'HyFleet :Cute' de démonstration de l'hydrogène dans les transports collectifs. L'entreprise a ouvert des stations en Europe, Etats-Unis, Australie, Chine et Singapour.²⁵¹ Les investissements en hydrogène ne représentent toutefois qu'une maigre partie des investissements en énergies alternatives. BP a annoncé dans les médias américains que l'entreprise avait investi 28 milliards de dollars en infrastructures énergétiques aux Etats-Unis depuis 2002. En 2008, l'investissement total en énergies alternatives a atteint son maximum avec 1,4 milliard de dollars. Ce budget doit être compris entre 500.000 et 1 milliard de dollars en 2009.²⁵² En 2009, suite à une restructuration interne, BP a pris la décision de fermer sa division d'énergies alternatives.

Par ailleurs, la compagnie parie sur l'avenir de l'hydrogène à partir des énergies fossiles. BP et Rio Tinto ont créé une joint venture nommée « Hydrogen Energy » pour la construction de centrales électriques à énergies fossiles avec capture et séquestration du charbon. Ce partenariat a annoncé la construction d'une centrale au charbon à cycles combinés ('Integrated Gasification Combined Cycle') en Californie avec capture et séquestration du carbone. Le charbon (ou autres hydrocarbures lourds) gazéifié en présence d'eau, donne de l'hydrogène et du CO₂. Ce dernier est capturé et transporté jusqu'à l'endroit du stockage. L'hydrogène alimente les turbines de génération électrique de 250 MW de capacité. La construction de la centrale est attendue pour 2011 et doit démarrer en 2015.²⁵³ Un autre projet est la centrale à gaz à cycles combinés d'une capacité de 420 MW avec capture et stockage du CO₂, à Abu Dhabi. La mise en fonctionnement est attendue pour 2013.²⁵⁴

Total est un des principaux groupes pétroliers mondiaux, et un grand acteur dans le domaine de la chimie. La compagnie française a réalisé un résultat net de 10 milliards d'euros et compte 96.960 salariés dans le monde en 2008.²⁵⁵ Total entretient actuellement 2 stations-service en Allemagne (Berlin, Munich) et 1 station en Belgique (Ruysbroek). La station de Berlin dispose de deux piles à combustible stationnaires, l'électricité produite est vendue au réseau et l'eau chaude est utilisée dans la station. Le groupe français est actif dans plusieurs projets européens de promotion de

²⁵⁰ « *We continue to provide hydrogen filling stations, working with the auto makers as the number of hydrogen fuel cell vehicles gradually starts to rise. We currently have six filling stations and have plans to open more this year. With these stations we are learning more about commercial distribution and dispensing of hydrogen - building our expertise and capability. This, we hope, will see Shell well placed when much larger numbers of fuel cell vehicles come on to the market in the longer term.* » <http://www.reuters.com/article/environmentNews/idUSTRE52G4SU20090317> (6/04/2009).

²⁵¹ <http://www.fuelcells.org> accédé en septembre 2009.

²⁵² National Public Radio (2009), « BP Cuts Back Its Alternative Energy Division », 9/7/09 ; Financial Times (2009), « Back to petroleum », 7/7/2009.

²⁵³ Fuel Cell Today (2009), « \$308 million Awarded To Hydrogen Plant From (IGCC) Clean Coal Power Initiative », 2/6/09.

²⁵⁴ Fuel Cell Today (2009), « BP Says Abu Dhabi Hydrogen-Fueled Plant to Start 2013 », 22/1/09.

²⁵⁵ http://www.total.com/static/en/medias/topic3546/Total_2008_document_reference_va.pdf

l'hydrogène comme le consortium 'HyWays' (feuille de route), 'HyFleet : Cute' (démonstration dans les flottes de bus) et CEP (partenariat berlinois pour la démonstration dans les transports). Il a aussi coopéré avec BMW dans ses projets de démonstration du 'BMW Hydrogen 7'. Total a annoncé récemment qu'elle prépare un déploiement à large échelle entre 2010 et 2015, surtout en Allemagne où la compagnie française vient de signer un accord de principe avec quelques constructeurs automobiles pour la mise en place des stations avant 2015.²⁵⁶ Le groupe est présent aussi dans la chimie industrielle avec Arkema. Cette dernière produit des composantes (polymères fluorés) pour les piles à combustible.

B. Les producteurs de gaz industriels

Les producteurs de gaz industriels comme le Groupe Linde, Air Liquide, Praxair, et Air Products & Chemicals sont aussi très actifs dans la promotion de la filière hydrogène-énergie. Ces entreprises collaborent avec les compagnies pétrolières pour mettre en place les stations dans le monde. La perspective de l'élargissement des usages de l'hydrogène-énergie explique l'intérêt des entreprises à cet égard. En fait, l'économie de l'hydrogène ouvre une nouvelle opportunité pour la valorisation de leurs compétences et l'expansion des marchés de base dans l'avenir.

Le groupe Linde est devenu le plus grand producteur de gaz industriels au monde (en part de marché) après l'acquisition de BOC. En 2008, Linde a réalisé 12,663 milliards d'euro de chiffre d'affaires et dispose de 51.900 salariés dans le monde.²⁵⁷ Sa division gaz offre des produits qui couvrent un vaste éventail d'applications dans l'industrie, la médecine, la protection de l'environnement, la recherche et le développement. La compagnie est notamment spécialisée dans la fourniture d'hydrogène liquide. Une large part des stations à hydrogène liquide construites dans le monde a été réalisée avec le concours de Linde. En 2003, la société gazière allemande a présenté la première station d'hydrogène en utilisant la technologie de compression à 700bar. En 2008, Linde a collaboré avec Shell pour l'ouverture de la première station à hydrogène en Chine. De plus, l'entreprise allemande a entamé des projets aux Etats-Unis (San Diego en Californie) pour la construction de quatre usines de production d'hydrogène à partir de déchets (Fuel Cell Today, 2008d). En outre, Linde est impliquée dans le projet de démonstration et commercialisation de chariots élévateurs à piles à combustible du type PEMFC avec les sociétés Proton Motor Fuel Cell et Still.

Air Liquide est le deuxième plus grand producteur mondial de gaz industriels en part de marché et le premier en termes de chiffre d'affaires (13,10 milliards d'euros en 2008).²⁵⁸ La société française emploie 43.000 salariés dans le monde, organisés autour des activités de production, de transport et de distribution d'hydrogène. Parallèlement, la compagnie développe de nouveaux outils et méthodes dans ses centres de recherche dispersés dans le monde. Une division des techniques avancées (DTA) est située à Sassenage, dans l'Isère. Cette division compte 350 personnes et est dédiée au développement de méthodes de stockage et de distribution d'hydrogène. Le site héberge également

²⁵⁶ « Hydrogen : Clean Energy for Tomorrow », http://www.total.com/static/en/medias/topic1612/Total_Hydrogene_EN_sept2008.pdf, mais les éléments contactés du staff ont fait part de plus de contention.

²⁵⁷ <http://www.linde.com>

²⁵⁸ <http://www.airliquide.com>

la première station d'hydrogène gazeux (à 350 et 700 bars) en France. Depuis, Air Liquide a construit 7 autres stations d'hydrogène dans le monde.

Dans le même établissement à Sassenage fonctionne encore sa filiale Axane dédiée au développement, teste, validation, et commercialisation de piles à combustibles.²⁵⁹ Air Liquide et sa filiale Axane participent à des nombreux programmes de R&D sur les technologies d'hydrogène et de piles à combustible tels que 'HyApproval' (définition des normes pour les stations d'hydrogène), 'Hyvolution' (nouvelles méthodes de production d'hydrogène, notamment à partir des cyanobactéries) et 'HyChain' (démonstration de l'hydrogène et piles à combustible dans les transports spéciaux) dans lequel le groupe Air Liquide est le coordinateur de projet.

C. Les entreprises d'électricité et de gaz

Les *utilities* énergétiques voient dans l'hydrogène et piles à combustible une opportunité d'expansion de leurs activités dans l'avenir. Les infrastructures de gaz naturel peuvent servir au transport/distribution d'hydrogène. De plus, les gaziers voient dans la technologie de la pile à combustible la possibilité de 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 propre et très efficace d'électricité. Leur intérêt est aussi porté par la perspective de l'électron à pouvoir assumer un rôle plus important dans les transports, soit dans la production d'hydrogène par la voie de l'électrolyse, soit directement dans les voitures électriques.

GDF Suez est un des plus importants groupes gazier européens, et le cinquième plus grand producteur et vendeur d'électricité en Europe.²⁶⁰ Le groupe compte 200.000 salariés dans le monde dont plus de la moitié est située en France. En outre, sa division recherche est composée de 1.200 chercheurs dispersés dans 8 centres de recherche dans le monde et un budget total de 203 million d'euros en 2008. GDF Suez possède deux milliers de brevets environ. Le groupe s'intéresse depuis longtemps aux piles à combustible stationnaires pour la cogénération d'électricité et chaleur pour les applications destinées au marché individuel (1 à 5 kW) et collectif (150 à 200 kW), le plus souvent en partenariat avec EDF. GDF Suez est un acteur actif dans le développement et l'expérimentation de différents types de piles à combustible : 'Phosphoric Acid Fuel Cells' (PAFC), GDF Suez et EDF ont installé la première pile à combustible dans un site commercial en 2000 à Chelles; 'Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell' (PEMFC) ont été essayées en conditions réelles d'utilisation dans 4 villes françaises (Dunkerque, Limoges, Nancy, Sophia-Antipolis); 'Solid Oxide Fuel Cells' (SOFC) à l'instar de la pile PEMFC, la division de R&D participe au développement de la technologie en France. L'intérêt pour les piles à haute température s'explique par le fait que celles-ci peuvent utiliser directement du gaz naturel pour produire électricité et chaleur. Le groupe français participe à plusieurs programmes autour de l'hydrogène et des piles à combustible en France (avec l'Agence Nationale de la Recherche et le CEA), et en Europe (la plateforme technologique pour la promotion de l'hydrogène et des piles à combustible (JTI) et le programme de recherche qui étudie la possibilité d'utiliser les infrastructures du gaz naturel pour le transport de l'hydrogène, NaturalHy). En outre, GDF Suez est actif dans le programme national de démonstration de bus fonctionnant à l'Hythane® (mélange de gaz naturel et hydrogène), dans les villes de Dunkerque et Toulouse.

²⁵⁹ Voir point 3.2.3.

²⁶⁰ <http://www.gdfsuez.com>

EDF est de loin le premier groupe européen de production d'électricité avec le quart du marché et un des plus grands au monde. Le groupe mène des activités de recherche importantes, mais l'ouverture du marché est associée à une baisse des investissements en recherche, ainsi qu'à la réorientation des priorités vers une logique de discount des flux et de résultats à court-terme. En 2008, le budget pour la R&D a été de 375 millions d'euros, soit 0,6% du chiffre d'affaires, et comptait 2.000 employés ; cela est à comparer avec la situation de 2003 où les dépenses en R&D étaient de 424 millions d'euros, soit 0,9% du chiffre d'affaires, et 2.400 salariés.²⁶¹ L'électricien français entretient des collaborations importantes notamment avec l'EPRI et l'Université de Karlsruhe avec laquelle EDF dispose d'un laboratoire commun baptisé Eifer. La technologie nucléaire est au centre des compétences du groupe, avec laquelle il produit 85% de l'électricité en France. Ce ne sont donc pas les émissions de CO₂ qui posent un défi au parc de production d'EDF, mais plutôt son renouvellement et la tendance vers la décentralisation de la production. Bien que la pile à combustible ne soit pas la priorité dans son portefeuille technologique, EDF mène des activités dans le développement des piles PEMFC et SOFC stationnaires et au niveau de la démonstration de différentes autres types de piles (ex. PAFC). Le groupe français est par ailleurs engagé dans la recherche des batteries pour le stockage d'électricité à bord de la voiture électrique, ainsi que dans les projets de déploiement des bornes électriques. Cependant, le thème du stockage de l'électricité est inscrit dans les priorités du groupe électrique, il peut ouvrir une voie dans le futur pour les systèmes de stockage d'énergie utilisant hydrogène et piles à combustible.

3.2.3. Les fabricants de technologies d'hydrogène

Plusieurs entreprises poursuivent des activités dans le domaine des technologies de l'hydrogène (piles à combustible, techniques de production d'hydrogène, outils de stockage à bord d'hydrogène). En ce qui concerne les piles à combustible, les principaux producteurs sont à la fois les constructeurs automobiles qui fabriquent leur propre pile « maison » et les équipementiers spécialisés. Ces derniers sont le miroir des problèmes de la transition de l'innovation radicale entre le laboratoire et la commercialisation. La perspective d'un grand marché a justifié le lancement des compagnies privées en bourse. Entretemps, les prospectives initiales tardent à se concrétiser et les entreprises cotées présentent des pertes de manière récurrente. Les marchés niches où les piles sont déjà compétitives sont peu nombreux ('backup', chariots élévateurs, APU pour la navigation de plaisance) et ne suffisent pas pour générer assez des recettes afin de poursuivre le développement des piles à combustible et alors ouvrir plus rapidement le marché. Ainsi, ces entreprises sont dépendantes du financement externe, subventions et marchés publics. Le tableau suivant témoigne de l'intérêt dont ce secteur a fait l'objet de la part des investisseurs privés au cours des dernières années.

²⁶¹ <http://rd.edf.com/fichiers/fckeditor/File/EDF%20RD/EDFRDplaqFR.pdf> et Bourgeois, 2004.

Tableau 32. Capitaux levés par les sociétés privées de technologies d'hydrogène et piles à combustible

Activité principale de la société	Nombre de compagnies	Capital levé 2002-2007 (US\$)
<i>Pile à combustible (tous les types)</i>	38	468.107.388
Etats-Unis	21	327.595.800
Europe	13	91.212.248
Canada	4	9.299.340
<i>Composantes de la pile à combustible (p.ex. membranes)</i>	8	127.490.300
Etats-Unis	2	59.900.000
Europe	6	67.590.300
<i>Production d'hydrogène (p.ex. électrolyseurs, reformeurs)</i>	12	64.688.900
Etats-Unis	6	47.255.000
Europe	2	3.800.000
Canada	4	13.633.900
<i>Stockage d'hydrogène (p.ex. réservoir, hydrides)</i>	3	6.710.309
Etats-Unis	2	808.000
Europe	1	5.902.309
<i>Infrastructure d'hydrogène (p.ex. compresseurs)</i>	1	2.055.000
Canada	1	2.055.000
<i>Autres (intégrateurs, équipementiers spéciaux)</i>	6	135.786.000
Etats-Unis	3	93.020.000
Europe	2	11.000.000
Canada	1	31.766.000
<i>Total</i>	68	804.837.897

SOURCE: NRC, 2008a (à partir de CleanTech Network, Juillet 2007.)

Parmi les fabricants de piles à combustible les plus importants figurent : UTC Power, FuelCell Energy, Ballard, Plug Power, Hydrogenics, Medis Technologies, Ceramic Fuel Cells, IdaTech, MTI Micro, SFC Smart Fuel Cell, MTU Friedrichshafen, et Nuvera. Le tableau suivant présente la valeur boursière de quelques entreprises cotées.

Tableau 33. Capital investi dans les sociétés fabricantes de piles à combustible cotées en bourse

Sociétés cotées au NASDAQ	Capital investi (million de dollars)			
	(31/12/05)	(31/12/06)	(31/12/07)	(31/03/09)
Ballard Power Systems (BLDP)	1.161	1.170	1.174	832
Fuel Cell Energy (FCEL)	530	531	631	-
Hydrogenics (HYGS)—includes Stuart Energy	319	321	322	306
Medis Technologies (MDTL)	209	287	290 ^b	-
Plug Power (PLUG)	532	752	-	-
Ceramic Fuel Cells, Ltd (CFU) ^a	-	154		

^a Coté à AIM marché de Londres (juillet 2007).

^b A la fin du mois de juillet 2007.

Ballard est le plus grand fabricant de piles à combustible au monde. Il est spécialisé dans les piles du type PEMFC depuis 1983.²⁶² En 2003, l'entreprise canadienne entre dans une collaboration de 10 ans avec Daimler et Ford pour la production de voitures pile à combustible (Solomon et Banerjee, 2006).

²⁶² <http://www.ballard.com>

Des pertes récurrentes ont obligé à une restructuration et la compagnie a dû vendre sa division transports à Daimler en 2007, en se focalisant désormais dans les piles à combustible pour les applications stationnaires et pour les chariots élévateurs. En mai dernier, Ballard a rompu sa collaboration avec la société japonaise Ebara pour la vente de systèmes de cogénération au Japon.²⁶³ Ce partenariat entrainait dans le cadre du programme gouvernemental pour la commercialisation de piles à combustible stationnaires dans le secteur résidentiel japonais. Dans le passé, Ballard avait aussi poursuivi des accords avec la société Millenium Cell, laquelle a fait faillite récemment.

Dans le domaine des piles stationnaires – surtout depuis le nouvel abandon de Siemens Westinghouse - il existe deux grands fabricants : UTC Power et FuelCells Energy. **UTC Power** est une filiale du groupe UTC Technologies Corporation spécialisée dans la R&D et la fabrication de piles à combustible pour les applications mobiles et surtout stationnaires. Sur ce dernier marché, la société du Connecticut vend de gros générateurs d'électricité de haute qualité et fiabilité pour les centres de données ('data centers'), hôpitaux, hôtels, universités, etc. Elle commercialise notamment les piles du type PAFC, PureCell®Model 400 et PureCell®Model 200, de 400 et 200 kW de puissance respectivement, destinées à la cogénération d'électricité, chaleur et eau chaude. En septembre 2009, l'entreprise avait déjà déployé 260 systèmes dans le monde, lesquels ont jusqu'alors cumulé 9 million d'heures de fonctionnement.²⁶⁴ En outre, UTC Power développe le système PureCell®Model 120 pour les bus, et mène parallèlement des collaborations avec des constructeurs automobiles comme Hyundai et Nissan.

FuelCell Energy est un autre grand développeur et fabricant de piles à combustible stationnaires qui équipent les centrales électriques. La société américaine commercialise le modèle Direct FuelCell® (DFC) – une pile à haute température du type MCFC - en trois versions : 300 kW, 1,2 MW et 2,4 MW électrique et la même puissance en chaleur.²⁶⁵ FuelCell Energy développe des collaborations avec des fabricants d'autres régions du monde, notamment avec MTU CFC lequel commercialise le HotModule® en Europe, un produit similaire à la Direct FuelCell® et qui a été mis en démonstration à Paris et plus récemment à Hambourg.

La France compte plusieurs entreprises dans le domaine des piles à combustible. Dans la plupart des cas, il s'agit de filiales des entreprises liées aux technologies de l'énergie (p.ex. Areva) ou *start-up's* sorties des laboratoires publics de recherche (p.ex. CEA). Parmi les sociétés françaises les plus importantes, on compte les suivantes :

- **Axane** est une filiale de la société Air Liquide créée en mai 2001 et emploie 35 personnes.²⁶⁶ Elle développe des piles à combustible de différentes tailles et destinées à différents marchés : pour les applications portables (500-10 kW) ; pour les applications stationnaires tels que des applications domestiques (> 10kW) ; et pour les applications mobiles tels que les voitures hybrides (5-20 kW) ;
- **Héliion** (de Areva) fabrique des piles à combustibles du type PEMFC d'une puissance comprise entre 2 et 80 kW destinées à la génération électrique d'appoint ('*backup*') et la production permanente en site isolé. En novembre 2006, l'entreprise a installé une pile à hydrogène de

²⁶³ Fuel Cell Today (2009), « Ballard to dissolve EBARA Ballard Corporation », 26/5/09.

²⁶⁴ <http://www.utcpower.com>

²⁶⁵ <http://www.fuelcellenergy.com>

²⁶⁶ www.axane.fr

30 kW de puissance au siège du CEA, à Saclay. Elle commercialise aussi des bancs didactiques sur la pile à combustible ;

- **Paxitech** est une *start up* du CEA dédiée à la commercialisation des cœurs de piles à combustible (*'stacks'*) sur commande. La société grenobloise fabrique également des sources d'énergie de quelques Watts pour les applications portables (baladeur MP3, ordinateur portable, etc.).

3.2.4. Le besoin de coopération entre les acteurs privés et publics

La présentation précédente a montré que les agents se focalisent chacun sur les activités proches de leur métier de base, mais que la transition n'est possible que si les décisions sont coordonnées au niveau de la R&D, lancement sur le marché et mise en place de l'infrastructure.

Lorsque la transaction demande la mise en place d'investissements durables, donc très spécifiques, le nombre de fournisseurs est réduit et donc une des parties peut se trouver dans la dépendance contractuelle de la contrepartie (p.ex. l'ouverture des stations dépend de la disponibilité de voitures). Cette dépendance des contractants augmente le risque d'opportunisme. L'augmentation des coûts de transaction rend la gouvernance par le marché plus difficile (Williamson, 1985). Un engagement coopératif doit alors se mettre en place de façon à gérer les problèmes avec l'opportunisme et l'incertitude. Cette coopération entre les parties (configuration hybride de gouvernance) est généralement encadrée par un contrat afin de rendre possible la transaction.

Les arrangements hybrides existent parce que les marchés sont perçus comme incapables de réunir les ressources et capacités adéquates (Teece et Pisano, 1994). Cela concerne en particulier la mise en commun de ressources (*'pooling resources'*) pour la réalisation d'un investissement nécessaire à la transaction. Cette relation doit logiquement perdurer, ce qui demande coopération et coordination entre les entités partenaires.

Les organisations hybrides peuvent prendre plusieurs formes, selon la dépendance et le degré d'autonomie des entités. Ménard (2004) distingue les configurations suivantes : confiance (*'trust'*) ; réseau relationnel (*'network relation'*) ; leadership ; et gouvernance formelle (*'formal government'*). Les organisations basées sur la confiance peuvent gérer l'opportunisme et l'incertitude par la fréquence des relations et la similitude des agents. Les problèmes de partage de rentes, d'une part, et d'observabilité de la participation, d'autre part, peuvent limiter le recours à des organisations fondées sur la confiance. A l'autre extrême, les agents peuvent se mettre d'accord sur la mise en place d'une structure de gouvernance autonome avec un système de règlement rigide. Le choix entre l'une ou l'autre dépend en particulier du degré mutuel de dépendance et de l'environnement institutionnel (North, 1990). Entre ces deux extrêmes, les réseaux relationnels sont gérés comme des clubs. Ils peuvent avoir des conventions formelles ; le contrôle peut se faire par la relation historique et la récurrence des transactions, ainsi que par la complémentarité des compétences. Enfin, le leadership est une forme d'organisation hybride où le leader prend l'autorité sur les autres partenaires soit parce qu'il détient une compétence ou un actif central, soit parce qu'il occupe une position centrale dans le déroulement des transactions.

Dans le cas de l'hydrogène, l'environnement incertain et la dépendance des décisions rendent nécessaire la coordination des agents. Ces organisations hybrides ont commencé par la confiance

(p.ex. collaborations entre constructeurs et laboratoires publics pour la réalisation d'activités de R&D ; déclaration d'intention des constructeurs et des compagnies pétrolières pour la mise en place de l'infrastructure), mais elles évoluent dans le sens de la formalisation des relations au fur et à mesure que l'on se rapproche du déploiement des investissements physiques et la dépendance des décisions augmente (p.ex. mise en place de la plateforme technologique JTI en Europe).

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 actuellement 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'hydrogène²⁶⁷ et piles à combustible.²⁶⁸ Par ailleurs, un programme focalisé sur les transports a été créé à partir de la coopération des constructeurs automobiles pour la R&D (FreedomCar) et l'initiative présidentielle pour la promotion de l'hydrogène qui a été lancé par George Bush en 2003, avec 1,2 milliard de dollars en cinq ans à partir de 2004. Ce programme visait une accélération de la R&DD dans les technologies de l'hydrogène de manière à les rendre disponibles à l'horizon 2015.

Encore sur le continent américain, à signaler les diverses initiatives rassemblant les acteurs publics et privés de l'Etat de Californie pour la promotion de l'hydrogène et des piles à combustible. Le partenariat californien autour des piles à combustible (« California Fuel Cell Partnership » ou CaFCP) qui a été créé en janvier 1999 avec l'objectif de promouvoir la commercialisation des technologies d'hydrogène, particulièrement dans les transports.²⁶⁹ La collaboration dans le domaine des applications stationnaires des piles à combustible (« California Stationary fuel cell collaboration », CaSFC) qui a été créée en 2001 par un groupe d'organisations publiques et privées.²⁷⁰ Enfin, l'initiative lancée en 2004 par le gouverneur Schwarzenegger visant à mettre en place un réseau de stations d'hydrogène le long des principales autoroutes californiennes (« California Hydrogen Highway Network », CHHN).²⁷¹ L'infrastructure serait le résultat des efforts coordonnés des organismes publics et des entreprises privées (surtout compagnies pétrolières et constructeurs automobiles) pour le développement d'un réseau initial capable d'entamer la commercialisation de l'hydrogène.

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'Economie du Commerce et de l'industrie (METI), en partenariat avec les principales marques d'automobile japonaise et étrangères (p.ex. Toyota, Honda, Nissan, Daimler, GM) et quelques entreprises d'énergie (comme Tokyo Gas, Shell). Cela a permis l'ouverture de 12 stations d'hydrogène pour assister la démonstration de 60 voitures à hydrogène.²⁷²

²⁶⁷ Le programme hydrogène du DOE : <http://www.hydrogen.energy.gov>

²⁶⁸ Le programme américain sur les piles à combustible :

<http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/>

²⁶⁹ <http://www.cafcp.org>

²⁷⁰ <http://stationaryfuelcells.org>

²⁷¹ <http://www.hydrogenhighway.ca.gov>

²⁷² <http://www.jhfc.jp/e/>

En Europe, les organismes publics et compagnies privées sont réunis autour du programme technologique de promotion des piles à combustible et de l'hydrogène (*'Joint Technology Initiative' JTI*), pour le déploiement en masse de la technologie sur le marché avant 2020. Ce programme a démarré en 2008 pour une période de 4 ans, avec un budget de 1 milliard d'euros apporté en parties égales par les organismes publics et privés. En outre, les entreprises, les laboratoires nationaux, les universités et les organismes européens se sont réunis dans le projet HyWays (2005-2008) duquel à résulté une feuille de route pour la commercialisation de l'hydrogène.

En France, le premier « Plan national d'action hydrogène et piles à combustibles » (PAN'H) apparaît en 2005. Il succède au réseau PACo (Piles à combustible et énergies nouvelles) initié en 1999 par le Comité interministériel de la recherche, lequel a servi de plateforme de collaboration et d'échange de connaissances entre les entreprises privées et les organismes publics (Bourgeois, 2004). Le plan PAN'H a financé 73 projets entre 2005 et 2008 pour un montant total de 84 millions d'euros. Ces projets ont abordé plusieurs thèmes, de la production propre d'hydrogène à la fabrication et au déploiement des piles à combustible. Le nouveau programme H'PAC fait suite à l'ancien programme pour la période 2009-2012. Il vise prioritairement les applications stationnaires (cogénération, groupes de secours, production décentralisée, groupes auxiliaires de puissance, etc.). Un autre objectif est l'articulation avec les actions menées dans le cadre du partenariat européen pour l'hydrogène et piles à combustible (JTI). En outre, l'agence française pour le soutien à l'innovation industrielle (OSEO) et les entreprises françaises autour de l'hydrogène et des piles à combustible viennent de démarrer le programme « Horizon hydrogène énergie » (H2E). Ce programme qui aura une durée de sept ans vise à rendre l'utilisation de l'hydrogène-énergie compétitive à court terme, notamment par la mise en place des infrastructures et la réduction du coût des piles à combustible. Le financement sera apporté par Air Liquide (125 M€), le coordonnateur du projet, et par OSEO (67,6 M€). Il regroupe encore des partenaires industriels (comme Axane, Hélium, Alfa Laval Vicarb, Imphy Alloys), des PME (Raigi, Alphaplast) et des laboratoires publics (comme l'Institut national de soudure et le CEA).²⁷³

²⁷³ Pour plus d'informations sur les programmes autour de l'hydrogène en France, voir : « Le Programme Hydrogène en France », <http://www.afh2.org> (accédé en août 2009).

Conclusion du chapitre 4

Le secteur énergétique est actuellement confronté à une série de défis posés par la raréfaction du pétrole, la sécurité de l'approvisionnement et le changement climatique. Les technologies de l'hydrogène et des piles à combustible sont des innovations majeures capables d'apporter une réponse radicale aux défis posés. Cette révolution énergétique est susceptible de s'élargir à une multitude de secteurs grâce à la modularité des piles à combustible. Mais c'est dans les transports que les bénéfices sont le plus attendus en raison de la domination du pétrole qui rend très difficiles les efforts de diminution des émissions de carbone dans ce secteur. L'utilisation de l'hydrogène dans une voiture équipée d'une pile à combustible permet de plus que doubler l'efficacité énergétique par rapport à la voiture traditionnelle ; lorsque l'hydrogène est produit à partir de sources renouvelables, le bilan carbone mesuré du puits à la roue est virtuellement zéro.

La technologie des piles à combustible est actuellement en phase pré-commerciale. Son développement est bien représenté par le modèle interactif du processus d'innovation caractérisé par les échanges entre les demandes du marché et les avancées de la recherche. Le déploiement de la technologie dans le marché est important dans la mesure où il permet de baisser les coûts par l'accumulation d'expériences de production. Les piles à combustible sont arrivées à un moment critique de leur évolution marqué par l'incertitude (technologique et de marché), les nécessités financières pour organiser les premiers projets de démonstration, et les dépenses en recherche (notamment fondamentale) afin de surmonter les derniers verrous technologiques.

La diffusion de l'hydrogène et les piles à combustible dans le marché est actuellement rendue difficile par le *lock in* des énergies fossiles. Ce verrouillage empêche la technologie d'entrer sur le marché et de profiter du cycle positif de l'augmentation de la production, baisse des coûts et ouverture de nouveaux marchés. Une coordination des actions est nécessaire de manière à démarrer la transition, mais les acteurs n'ont pas tous le même intérêt à ce changement (principalement les compagnies pétrolières). Des stratégies adaptées doivent être mises en place pour surmonter cette barrière. Ceci fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 5

Stratégies de soutien à la transition technologique vers l'économie de l'hydrogène

La lutte contre le changement climatique passe par la réduction des émissions anthropogéniques de GES, notamment dans le secteur énergétique (production électrique, transports). Le pétrole, en particulier, est responsable pour une partie croissante des émissions des GES, ainsi que de la dégradation de la qualité de l'air dans les villes (Ce-Delft, 2008). Par ailleurs, le secteur des transports est très dépendant du pétrole et donc très vulnérable aux aléas de la sécurité d'approvisionnement de la matière première. L'utilisation de l'hydrogène produit à partir de sources non émettrices de carbone dans les PAC peut apporter une réponse à la dépendance des transports aux combustibles fossiles, en les rendant au même temps plus propres (« zéro émissions »).

Néanmoins, la mise en place de cette innovation radicale est actuellement bloquée par une série de facteurs. Au-delà des incertitudes techniques caractéristiques des technologies émergentes, la diffusion de la voiture à hydrogène fait encore face à la concurrence de la technologie dominante qui bénéficie d'un siècle d'améliorations technologiques et de toute une infrastructure dédiée (comme le réseau de stations de ravitaillement, les garages). En plus, l'hydrogène n'est pas la seule alternative pour les transports ; la voiture électrique est un autre candidat sérieux.

Cette section analyse la manière dont peut être accomplie la transition technologique d'une économie du carbone vers une économie propre basée sur l'hydrogène. Nous commençons par aborder la manière dont s'opèrent les grandes transitions technologiques, en particulier le cas des innovations environnementales. Nous étudions ensuite les stratégies qui peuvent être mobilisées pour mettre en place les technologies d'hydrogène, et le rôle que les niches de marché peuvent avoir afin d'entamer la transition. Le chapitre se termine par l'étude des instruments dont disposent les pouvoirs publics pour soutenir la diffusion de l'hydrogène et des piles à combustible. Nous argumentons que l'internalisation des externalités est une mesure nécessaire mais pas suffisante pour démarrer les investissements.

Section 1. Le processus de transition technologique : théorie et application au cas de l'automobile

L'énergie et la technologie ont toujours joué un rôle primordial dans l'histoire de l'Humanité. Le cours de l'histoire peut être étudié au travers du prisme des principaux instruments et sources énergétiques utilisés à chaque moment. Les grands changements seraient alors accompagnés de modifications au niveau des techniques et des sources énergétiques employées. Smil (1994, 2009) analyse les grandes transformations énergétiques dans l'histoire. L'auteur propose le concept de « prime movers » : instruments faisant la conversion des sources primaires d'énergie en force mécanique, électricité ou chaleur. Le sens du progrès serait ainsi la recherche de « prime movers » permettant une utilisation plus intensive, efficiente et confortable des énergies primaires.²⁷⁴

Selon cette approche, l'histoire peut être subdivisée en périodes définies par la prévalence de différents « prime movers ». Le premier moment (le plus long) a été lorsque la principale force employée était les muscles humains. Cette époque fut remplacée par l'utilisation graduelle de la force animale (en particulier des chevaux). La force mécanique, troisième étape, est venue bouleverser le cours de l'histoire ; elle est la principale source du progrès économique des sociétés modernes. Cette révolution mécanique commence dans les années 1780 avec les travaux de James Watt pour l'amélioration des performances de la machine à vapeur, et se poursuit par son application à l'industrie et aux transports ; l'invention de la turbine dans les années 1830 a permis l'exploitation de l'énergie dégagée par le mouvement de l'eau (la huile blanche) ; l'invention du moteur à combustion interne dans les années 1880 a révolutionné les transports ; et la turbine à gaz pendant la première moitié du XXe siècle, avec des applications pour la production électrique et l'aviation à partir de la fin de la deuxième guerre mondiale.

Le temps compris entre un régime et l'autre est de plusieurs décennies, voire des siècles. En effet, la durée de la transition technologique est autant plus grande que l'échelle d'application du « prime mover » est grande. Geels (2007) souligne que les changements de systèmes techniques sont normalement associés à une innovation radicale ayant des répercussions larges dans la société.²⁷⁵

Le processus de transition technologique est composé de plusieurs niveaux. L'innovation radicale est formée au niveau des niches de marché ; elle peut profiter du changement de l'environnement de sélection pour se diffuser et, à la limite, changer le régime technologique existant. Cette section s'intéresse particulièrement aux grands changements technologiques qui ont affecté la mobilité personnelle. Nous analysons la théorie de la transition technologique d'abord, pour ensuite l'appliquer à l'étude de la diffusion de l'automobile.

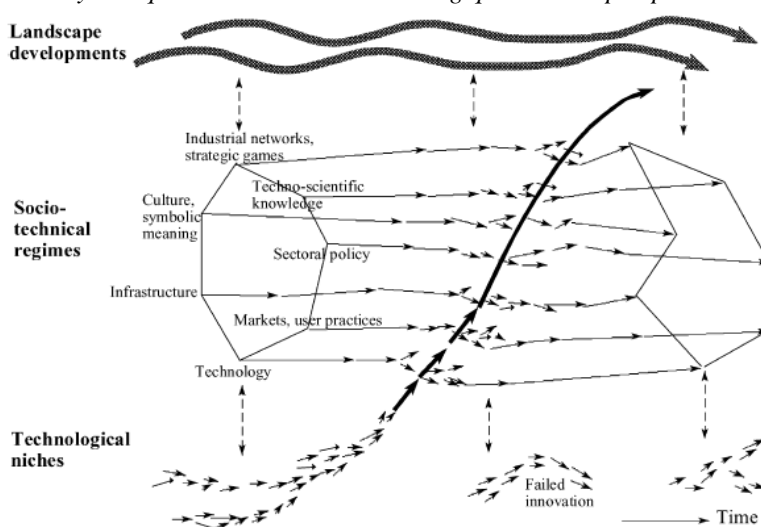
²⁷⁴ « *The fundamental difference between traditional and modern uses of energy consists not in access to new or better energy resources, but in the invention and mass deployment of efficient, affordable, reliable, and convenient "prime movers," devices that convert primary energies into mechanical power, electricity, or heat. History could be profitably subdivided into eras defined by the prevailing prime movers.* » (Smil, 2009)

²⁷⁵ « (...) *Radical innovations have been studied much in business studies and management, because they affect firms and industries. But system changes are more encompassing, affecting also user practices, policies, cultural meaning, etc. (...)* » (Geels, 2007, p.402)

1.1. L'approche multi-niveaux de la transition technologique

La transition technologique est depuis longtemps au centre de nombreux travaux de recherche. Récemment, une approche théorique nouvelle a été proposée qui systématise la littérature précédente. Geels (2002, 2005) a élaboré un modèle de transition technologique multi-niveaux à travers l'identification des marques principales de changement et de la manière dont les transitions se sont succédées dans l'histoire. Son modèle s'inscrit dans le courant évolutionniste de l'innovation. Particulièrement, il se situe dans la perspective ouverte par les travaux de Nelson et Winter (1977, 1982) sur les régimes technologiques et l'évolution des processus de variation et de sélection, d'une part ; et de Schumpeter (1912) sur l'évolution technologique comme un processus de reconfiguration permanente (« création destruction ») duquel résultent de nouvelles trajectoires technologiques, d'autre part.

Graphique 70. La dynamique de la transition technologique selon la perspective multi-niveau



Source : Geels, 2002, p.1263.

Dans la perspective multi-niveaux, la transition technologique est composée de changements à plusieurs échelles (ou niveaux) : paysage sociotechnique ; régimes ; et niches (graphique 70). Le *paysage sociotechnique* est défini comme le contexte où s'inscrivent les interactions des acteurs. Il s'agit de la tendance structurelle, et son évolution est donc plus lente que la progression des trajectoires ou les régimes techniques. Le concept de *régimes sociotechniques* renvoie à l'ensemble des règles et procédures partagées par les différents groupes sociaux qui orientent et encadrent leur action. Les mécanismes de sélection et de rétention technologique sont situés à ce niveau. Les régimes ont un caractère plus normatif : ils confèrent une stabilité au système par le développement en priorité des technologies existantes. Ainsi, les innovations incrémentales sont habituellement gérées au niveau des régimes ; alors que les innovations radicales sont développées au niveau des *niches* de marché.

Les différents niveaux forment une échelle hiérarchique. Ce sont les changements qui prennent place simultanément à chaque niveau, ainsi que les interactions dynamiques entre les différents éléments de l'échelle, qui permettent à la technologie de progresser et de se diffuser sur le marché (Geels, 2005, 2007).

Ainsi, les innovations progressent au niveau des niches à travers l'apprentissage, l'amélioration des performances et la réduction des coûts. En même temps, la nouvelle technologie gagne le support de groupes d'intérêt, lesquels peuvent agir pour créer les conditions nécessaires à sa diffusion (p.ex. demande de subventions, mise en place des codes et standards). Par ailleurs, les changements occasionnés au niveau du paysage sociotechnique exercent une pression au niveau du régime technologique en vigueur. La déstabilisation de ce dernier ouvre une fenêtre d'opportunité pour la diffusion des innovations qui se trouvent encore au niveau des niches.

Selon cette approche, les innovations radicales qui se succèdent commencent à se former au niveau des niches de marché, puis elles progressent par le biais de l'accumulation de nouvelles niches. Cette progression est accompagnée par les améliorations techniques et l'hybridation de la technologie (Raven, 2007). C'est-à-dire que dans un premier temps, la technologie nouvelle est incorporée dans la technologie existante, ce qui lui permet de profiter des synergies possibles et à faire baisser les barrières à la diffusion. Par exemple, à propos de la concurrence technologique entre les navires à voile et les navires à vapeur au XIXe siècle, les premiers bateaux à vapeur océaniques ont été à voile tout en disposant parallèlement d'une propulsion à vapeur (Geels, 2002).

Par la suite, l'innovation radicale peut trouver une « fenêtre d'opportunité » pour sortir des niches et se diffuser sur le marché, à condition que le contexte soit favorable au niveau des régimes technologiques et du paysage sociotechnique. Cela est plus probable lorsque le marché cible est en croissance.

Le sentier de la transition technologique est différent selon la combinaison du timing et de la nature des processus en marche au niveau des différents échelons. En particulier, l'interaction entre les pressions au niveau du paysage sociotechnique et l'état de développement des technologies au niveau des niches aura une répercussion sur la manière dont l'innovation se propage. Geels (2007) définit quatre sentiers possibles de transition de régimes technologiques ; chacun présentant une ampleur, un timing d'interactions entre niveaux, et des acteurs qui leur sont spécifiques :

- *la transformation technologique* : le contexte au niveau du paysage sociotechnique change modérément, mais l'innovation au niveau des niches n'est pas suffisamment prête. Dans ce cas, les acteurs dominants et les nouveaux entrants agissent de manière à changer la direction de l'innovation. Alors, des innovations plus adaptées au nouvel environnement de sélection émergent ;
- *le désalignement et le réalignement* : les changements au niveau du paysage sociotechnique sont très larges et profonds et déstabilisent le régime technologique dominant. En même temps, une multitude d'innovations sont en concurrence au niveau des niches de marché. A terme, il est possible que l'une devienne dominante et réorganise le régime technologique autour de cette technologie. Les nouveaux acteurs liés à cette innovation sont alors les vecteurs du changement. La diffusion de la voiture à essence dans le passé est un exemple de ce type de transition ;
- *la substitution technologique* : un changement sociotechnique de rupture au moment où les innovations se sont suffisamment développées dans les niches de marché permet à celles-ci de remplacer le régime technologique existant. Un exemple est le changement technologique des navires à voile vers les navires à vapeur au XIXe siècle ;

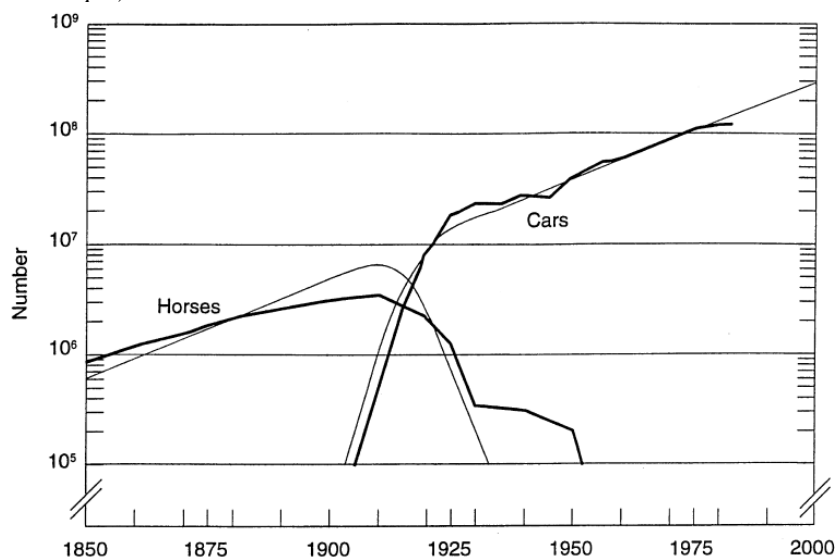
- *la reconfiguration technologique* : les innovations développées dans les niches sont assimilées par le régime technologique en rendant celui-ci plus adapté à l'environnement de sélection changeant. Toutes les améliorations incrémentales dont la voiture à essence a pu bénéficier au long du XXe siècle en constituent des exemples.

Les sentiers présentés ci-dessus peuvent être considérés comme des modèles purs de transition technologique. La réalité est plus complexe et on peut avoir une combinaison simultanée de plusieurs modèles de transition. A l'heure actuelle, le changement climatique exerce une pression pour le changement de plusieurs régimes technologiques tel que celui des transports. Cela peut se faire de manière séquentielle (Geels, 2007) : en commençant par une transformation technologique mère, menant à une reconfiguration du régime, ce qui éventuellement peut donner lieu à un réaligement ou bien à une substitution du régime technologique.

1.2. La diffusion de l'automobile à essence dans le passé

L'utilisation du cheval dans les transports a amélioré considérablement le confort et le rayon de déplacement humain. Au XIXe siècle, le cheval assurait le transport collectif dans les grandes villes européennes et nord américaines (graphique 71). A la fin du siècle, Londres comptait 300.000 chevaux (Smil, 1994). Cependant, le nombre croissant de bêtes n'allait pas sans poser de problèmes pour les villes. La stabulation de tous ces chevaux et le stockage de foin nécessaires pour les nourrir soulevaient des demandes énormes en espace urbain. De plus, les services de nettoyage étaient nécessaires afin de garantir l'hygiène dans les rues. Un nouveau système de transports était alors recherché ; cette recherche a coïncidé avec le moment de l'invention de la bicyclette.

Graphique 71. Nombre de chevaux utilisés pour le transport et nombre de voitures aux Etats-Unis (échelle semi-logarithmique)



Source : Grübler, 1999.

C'est dans ce contexte que les premières automobiles font leur apparition au cours du dernier quart du XIXe siècle. Les premiers modèles ont adapté un moteur à l'architecture de base de la voiture à cheval. En 1881, Gustave Trouvé présente une voiture électrique à trois roues dans le cadre de l'exposition internationale de Paris. Celle-ci avait plusieurs avantages par rapport au cheval (Geels,

2005) : elle n'émet pas de bruit ; elle est plus propre, inodore, fiable et facile à démarrer et à conduire. Cette voiture connaît un grand succès dans la dernière décennie du XIXe siècle tant en Europe - comme en France - qu'aux Etats-Unis. Elle est particulièrement l'option dominante pour les services de mobilité urbaine comme les taxis. Un autre concurrent est la voiture à vapeur qui fait son apparition dans la première moitié du XIXe siècle. A l'instar de la voiture électrique, le moteur à vapeur a aussi l'avantage des faibles émissions polluantes. Le temps de démarrage est encore acceptable, toutefois il est plus long que pour la voiture électrique (Shell, 2001). De plus, les moteurs à vapeur étaient très encombrants et lourds, peu adaptés aux petites voitures urbaines.²⁷⁶

Cependant, les moments clé de l'histoire de l'automobile ont été l'invention du moteur Otto à combustion interne à essence, en plusieurs étapes : Nikolaus Otto (l'invention du moteur à essence pour les usages stationnaires en 1862) ; Karl Benz (le moteur Otto à deux et à quatre temps pour les usages mobiles en 1879) ; Gottlieb Daimler (le carburateur d'essence en 1885) ; et Wilhelm Maybach (première voiture Daimler-Mayback en 1889). En 1897 Rudolf Diesel présente une version plus efficiente du moteur à explosion.²⁷⁷ Un autre moment important a été l'invention du démarreur électrique par Charles Kettering en 1911. Cette technologie s'est inspirée des moteurs électriques : elle utilise un courant à haut voltage pour démarrer la voiture, lequel est stocké dans une batterie. Ce système est venu remplacer le démarrage manuel à la manivelle considéré comme peu pratique. Ceci a été important pour la diffusion à large échelle de la voiture à essence.

A l'entrée du XXe siècle, le marché automobile naissant était partagé entre les trois modes de propulsion suivants : moteur électrique ; moteur à vapeur, moteur à essence (tableau 34).

Tableau 34. *Ventes annuelles de voitures aux Etats-Unis*

	1900	1905
Electrique	1575 (37,5%)	1425 (6,5%)
Vapeur	1681 (40,1%)	1568 (7,2%)
Essence	936 (22,3%)	18699 (86,2%)
Total	4192 (100%)	21692 (100%)

Source : Geels, 2007.

La voiture électrique et la voiture à vapeur présentaient toutes les deux un avantage sur le moteur à combustion pendant les premières années 1900. Néanmoins, une répartition des voitures par usages va s'opérer à partir de cette date. Ce mouvement est à l'origine d'un bouleversement profond dans le marché automobile. Les problèmes techniques et l'état des routes ont cantonné la diffusion de la voiture à vapeur à quelques enthousiastes (Geels, 2007). Malgré le succès des premières années, la voiture électrique connaît des problèmes. La fiabilité des voitures a été mise en question par la vulnérabilité des batteries et leurs pannes fréquentes. De plus, elles avaient une autonomie très limitée et le temps d'immobilisation nécessaire pour le rechargement était un grand handicap. En outre l'infrastructure était limitée aux villes et les bornes électriques avaient parfois des standards différents, ce qui limitait d'avantage le rayon d'action (les ballades à la campagne en voiture étaient impossibles). Ainsi, la voiture électrique a gardé quelques niches dans le transport urbain comme le

²⁷⁶ En 1900, le poids du moteur à vapeur était le double de celui du moteur à combustion (Smil, 1994).

²⁷⁷ Les dates considérées sont celles du dépôt du brevet. Pour une histoire de l'automobile, se rapporter aux ouvrages de Smil (1994), Grübler (1999) et Geels (2005).

segment de luxe ou celui des conducteurs demandant une conduite plus simple (personnes âgées, etc.) (Geels, 2005).

La progression de la voiture à essence sur le marché a été initialement freinée par les problèmes de bruit, de pollution, et de démarrage difficile des premiers modèles. Toutefois, les avantages du moteur à combustion interne en termes de prix et d'autonomie ont graduellement pris le pas sur les inconvénients. L'utilisation de carburants liquides à forte densité énergétique, faciles à transporter et à stocker, a été un atout majeur en faveur du moteur à combustion (Smil, 1994). Au-delà de l'aspect technique, un facteur important de réussite a été la disponibilité de l'essence (Grübler, 1999).

La diffusion de la voiture à essence a bénéficié de l'existence d'un réseau de distribution d'essence pour les applications domestiques (comme l'éclairage ou les moteurs stationnaires à essence) assurant un niveau de confort intéressant aux premiers acheteurs de la voiture équipée d'un moteur à combustion (Melaina, 2007). Celle-ci a pu aussi bénéficier du réseau de réparation et d'entretien existant grâce à la dispersion de compétences mécaniques (p.ex. agriculteurs, mécaniciens).

Mais c'est la décision de Henry Ford de produire en masse son Modèle T qui a fait baisser considérablement les coûts de la voiture à essence et a permis de la rendre accessible à un plus grand public. En effet, le prix n'a pas cessé de baisser de \$850 en 1908 à \$360 en 1916 (Geels, 2005, 2007), ce qui a stimulé son adoption. En outre, la production en masse du Modèle T a permis de stabiliser le design dominant des voitures à la fin de la première décennie du XXe siècle. Cela a rendu possible d'accommoder les demandes de différentes niches de marché et de tracer la voie des progrès techniques postérieurs. Les améliorations techniques successives (comme le démarreur électrique, le système d'éclairage, le moteur plus puissant, la fermeture de la structure de la voiture) ont rendu la voiture plus confortable. En outre, la saturation du transport ferroviaire après les années 1920 aux Etats-Unis a finalement ouvert la « fenêtre d'opportunité » des longs trajets à la voiture à combustion (Grübler, 1999). Cette évolution a été suivie dans le reste du monde (tableau 35).

Tableau 35. Production annuelle de voitures dans le monde : 1900-1924

(en milliers)	1900	1907	1913	1924
Etats-Unis	4	45	485	3.504
France	4,8	25	45	145
Royaume-Uni	0,175	12	34	147
Allemagne	0,8	4	23	49
Canada	-	-	18	135
Italie	-	2,5	8	50

Source : Geels, 2005 (d'après Ville, 1990 :180).

Ce processus a été renforcé par l'action parallèle d'un vaste groupe d'intérêt formé par : les compagnies pétrolières qui trouvaient dans les transports un nouveau débouché pour l'essence ; les nouveaux acteurs liés à la construction des voitures (notamment les anciens constructeurs de vélos convertis dans la fabrication des automobiles) ; et les nouvelles institutions telles que les restaurants et les shopping centers (Melaina, 2007 ; Geels, 2005).

La voiture à essence a aussi bénéficié de l'invention de la bicyclette quelques années auparavant. Celle-ci a été responsable de la diffusion de certaines valeurs comme le goût pour le sport ou les promenades dans le monde rural ('*touring*') (Geels, 2005). Ainsi, les consommateurs ont valorisé les caractéristiques de la voiture à essence comme la vitesse, la souplesse d'utilisation dans les pires endroits et l'autonomie. Ces caractéristiques ont contribué à donner un avantage décisif à la voiture à essence en comparaison avec les autres voitures (Bouwkamp, 2004). Elle a pu s'affirmer comme une 'machine d'aventure' et rallier à elle les valeurs de liberté, d'autonomie et de divertissement (Geels, 2005).

Cet exemple de diffusion des moteurs à combustion interne – d'abord aux Etats-Unis, puis dans le reste du monde - montre bien l'importance de l'existence d'une infrastructure de distribution initiale et des externalités de demande. Les économies d'échelle et d'apprentissage dans la production ont rendu la voiture accessible au plus grand nombre et stimulé les rendements croissants d'adoption, ce qui a verrouillé graduellement le marché des transports sur le moteur à explosion par un processus de dépendance de sentier (David, 1985). Ce « lock-in » technologique rend actuellement très difficile la diffusion de technologies alternatives comme les voitures à hydrogène.

1.3. Les défis pour les alternatives technologiques au moteur à explosion

Le développement de solutions techniques alternatives pour les transports personnels telles que les biocarburants et la voiture électrique doit se faire dans un marché complètement dominé par les carburants fossiles. De plus, ceux-ci disposent d'une vaste infrastructure de distribution qui garantit un confort élevé à l'automobiliste. Un niveau de confort similaire est très difficile à atteindre pour les carburants alternatifs, surtout pendant les premières années de la transition.

Par ailleurs, les acteurs impliqués dans l'actuel paradigme de la voiture à carburants fossiles (tels les constructeurs d'automobiles et les compagnies pétrolières) peuvent se montrer résistants à la diffusion des nouvelles alternatives technologiques, comme dans le cas de l'échec du projet français de la voiture électrique VEL dans les années 1970 (encadré 4).

Encadré 4. Le projet « Voiture Electrique » en France

Le projet de voiture électrique (VEL) a été présenté par les ingénieurs d'EDF au début des années 1970.²⁷⁸ Celui-ci a été inspiré par la révolution culturelle de mai 1968 et renforcé par le premier choc pétrolier de 1973. La voiture à combustion traditionnelle était associée à l'ancienne société industrielle et à la pollution sonore et environnementale dans les villes. La nouvelle voiture devrait être silencieuse et non polluante. Elle devrait aussi correspondre à un grand changement des valeurs et des mentalités permettant l'adoption de comportements socialement plus responsables, la voiture n'étant plus considérée comme un indicateur de distinction sociale. Enfin une nouvelle planification des transports dans la ville était prévue qui accordait une place plus grande au système électrique de transports en commun.

L'objectif était ainsi d'amener la société française à l'ère postindustrielle. Pour aller dans ce sens, les consommateurs devaient abandonner les voitures conventionnelles au bénéfice des voitures

²⁷⁸ Cet encadré s'inspire de la présentation de Callon (1993).

électriques. Le projet impliquait encore la participation d'autres acteurs : les pouvoirs publics pour la mise en place d'une réglementation contre la pollution et le bruit ; le constructeur automobile (Renault) pour la construction du véhicule ; et l'électricien pour la mise au point d'une batterie (la technologie des accumulateurs au plomb et plus tard la batterie zinc-air) plus efficace.

Le projet VEL envisageait aussi le développement de la voiture à hydrogène permettant de dépasser la vitesse de 90 km/h, à condition que des catalyseurs moins chers que ceux en platine soient développés. Cela était considéré comme possible avec la technologie des années 1980. Or cet objectif technique s'est avéré insurmontable à l'époque car les nouveaux catalyseurs devenaient très vite contaminés ; de même, le progrès des batteries pour les voitures électriques, ne s'est pas confirmé.

De plus, le projet s'est heurté à la résistance de plusieurs acteurs, surtout ceux dont l'importance se réduisait – les constructeurs automobiles, les compagnies pétrolières – en faveur de la compagnie électrique (EDF).

Les alternatives technologiques qui se profilent (électrique, biocarburant, hydrogène) ont des natures très spécifiques. La voiture électrique a déjà perdu une fois la bataille pour le marché contre la voiture à essence, et réapparaît souvent lorsque l'actuel paradigme du moteur à combustion des carburants fossiles entre en crise. L'intérêt pour la voiture électrique ne s'essouffle pas immédiatement après la diffusion de masse de la voiture à essence. En fait la voiture électrique a connu dans l'histoire deux grands pics d'intérêt. Le premier coïncide avec la Première guerre mondiale. La pénurie d'essence durant les temps de guerre et les réquisitions de véhicules équipés de moteurs à combustion ont créé un contexte favorable à l'adoption des voitures alternatives. De plus, les projets de centrales au charbon et d'aménagement des rivières pour la production hydraulique a créé un surplus de production électrique (Høyer, 2008).²⁷⁹ Le deuxième pic est constaté lors de la Seconde guerre mondiale caractérisée par un contexte similaire à celui de la Première guerre. L'Allemagne comptait à cette époque 30.000 voitures électriques pour le service de poste, et le Royaume-Uni 30.000 pour le transport du lait (Høyer, 2008). La stabilisation à la fin de la guerre était normalement accompagnée par un regain d'intérêt pour la voiture à combustion en dépit de la voiture électrique.

Les chocs pétroliers des années 1970 ont réveillé l'intérêt pour les technologies alternatives aux carburants fossiles. De nombreux programmes de R&D et de démonstration de voitures électriques ont alors été mis au point dans le monde.²⁸⁰ Cependant, ces voitures sont confrontées aux mêmes problèmes que ceux qui ont limité sa progression sur le marché un demi-siècle auparavant : l'autonomie ; la vitesse ; et les coûts (Høyer, 2008). Les autres alternatives technologiques (biocarburants, hydrogène) présentent eux aussi des verrous techniques à surmonter.

Plusieurs programmes visant le déploiement des biocarburants dans le monde ont été financés depuis les années 1980 par les pouvoirs publics pour des raisons environnementales et

²⁷⁹ Les Etats-Unis comptent environ 50.000 voitures électriques à la fin de la Première guerre mondiale (Høyer, 2008).

²⁸⁰ Par exemple, le « Electric and Hybrid Vehicle Act of 1976 » ambitionnait de transformer les Etats-Unis en une économie de voitures électriques.

d'indépendance énergétique (Sperling, 1990). En dépit de ce soutien, et hormis le cas brésilien²⁸¹, ceux-ci n'ont pas encore pu prendre une partie importante du marché. En outre, les bénéfices environnementaux des différentes filières de production font encore l'objet de discussions. Par ailleurs, la voiture à hydrogène apparaît dans la discussion soit comme un prolongement de la voiture électrique, soit comme une alternative à l'utilisation des batteries dans les transports. L'une et l'autre auront besoin d'une infrastructure dédiée dont la mise en place sera très coûteuse et s'étalera sur plusieurs décennies.

La domination des carburants fossiles est une barrière importante à la diffusion d'alternatives dans les transports telles que les biocarburants de seconde génération ou l'hydrogène. Le développement de nouvelles technologies entraîne un risque technologique important, ainsi que des coûts initiaux plus élevés (Åhman et Nilsson, 2008). Néanmoins, ces coûts doivent baisser avec la production de masse. Pour cela, le soutien public à la R&D et à l'infrastructure est nécessaire de manière à donner l'opportunité à ces technologies de progresser et de montrer tout leur potentiel, de manière à ce que le marché retienne la meilleure technologie et débloque ainsi l'addiction au pétrole.

Section 2. Les mécanismes de transformation du marché

La transition technologique est un processus normalement long en raison de son caractère de rupture dans le secteur industriel, dans l'économie, ou même dans la société. Souvent, la diffusion du nouveau paradigme technologique demande des changements importants au niveau technique, organisationnel et institutionnel, qui ne peuvent être réalisés qu'au bout d'un certain temps et avec une certaine coordination entre les acteurs. Dans le domaine des technologies énergétiques, les transitions technologiques (p.ex. de la biomasse vers le charbon et plus tard du charbon vers le pétrole) ont pris des décennies, voire des siècles (Grübler et Nakicenovic, 1996 ; Grübler et al., 1999). Une caractéristique des transitions est la tendance à la décarbonisation du contenu énergétique, c'est-à-dire l'utilisation de ressources énergétiques à moindre intensité de carbone (bois, charbon, pétrole, gaz naturel, ... hydrogène ?). A chaque fois, le changement a été ralenti par l'absence d'infrastructures, la résistance des intérêts en place liés à la technologie établie, etc. Ces facteurs peuvent aller jusqu'à bloquer la progression de la nouvelle technologie.

Des stratégies de transformation graduelle du marché sont mises en place de manière à contourner ce problème et permettre la progression de solutions technologiques de long terme. Dans cette section, nous analysons l'émergence et le développement des innovations de rupture et la façon dont elles menacent la technologie dominante. Néanmoins, le blocage du marché peut être tel qu'il devient peu probable que les alternatives technologiques puissent se développer. Dans ce cas, l'intervention publique est nécessaire, comme la création de niches protégées de marché pour le développement des innovations. La section finit avec l'étude des stratégies permettant d'améliorer le positionnement concurrentiel de l'hydrogène et des piles à combustible.

²⁸¹ Il y en a qui parlent de l'« illusion brésilienne » afin de souligner les conditions très spécifiques (notamment climatiques et agricoles) qui ont permis le succès du programme public de soutien aux biocarburants dans ce pays sud-américain.

2.1. La dynamique des innovations de rupture

Dans son ouvrage de 1997, Christensen cherche à comprendre la raison pour laquelle les plus grandes entreprises de l'électronique, de l'informatique, de l'acier, de la construction mécanique, etc., disposant de plus de ressources et employant les meilleures pratiques de gestion, ont été vaincues par des concurrents initialement plus petits. Selon son analyse, la raison du déclin de ces grandes entreprises est à trouver dans la dynamique d'innovation. Pour expliquer ce paradoxe, l'auteur fait la distinction entre technologies de rupture et technologies de soutien.

Selon cette approche, la firme leader sur le marché a tendance à produire des technologies de soutien. Ainsi, elle cherche à améliorer la performance des produits de manière à satisfaire au mieux ses clients, d'abord, et le marché principal, ensuite. Les technologies de soutien peuvent être de nature incrémentale ou même radicale selon la typologie de Freeman et Perez (1988), l'important étant que l'innovation améliore les performances des attributs historiquement valorisés par le marché (p. ex. la capacité d'un disque rigide à stocker l'information).

A la différence des technologies précédentes, les innovations de rupture répondent aux nouvelles demandes du marché. Au départ, les performances des technologies de rupture sont généralement moins bonnes que celles de la technologie dominante, mais elles disposent d'attributs valorisés par une frange souvent nouvelle et croissante de clients. L'avantage de l'innovation de rupture peut être en termes de prix, de portabilité, de simplicité, ou de confort d'utilisation. De cette façon, les technologies de rupture ouvrent un nouveau marché à grand potentiel de profits pour les entreprises pionnières.

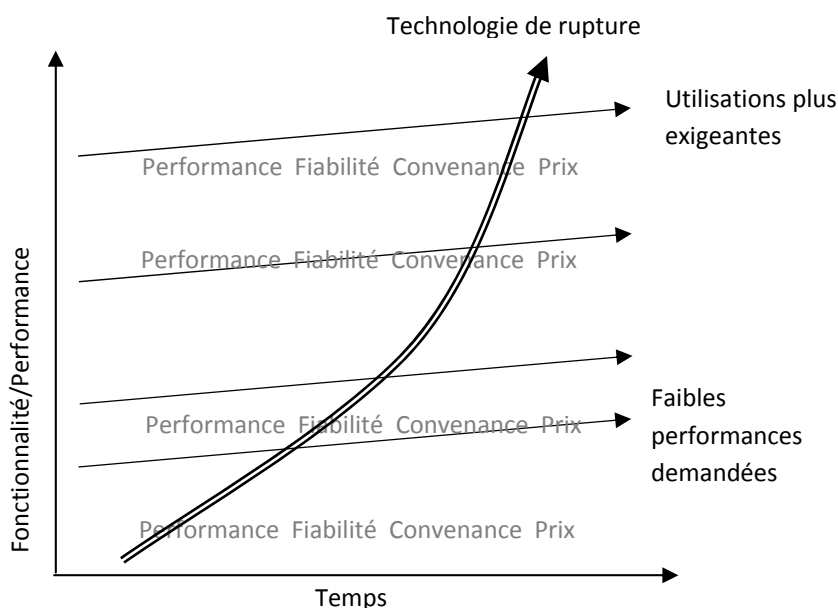
Dans la théorie originale des innovations « ruptures » (Christensen, 1997), le marché est capable de gérer les innovations sans recourir à une protection spéciale pendant la phase de transition. Par ailleurs, le critère de rupture n'est pas le même que pour les innovations radicales. En effet, une innovation peut être radicale sans constituer une rupture. De même, une technologie connue peut devenir une innovation de rupture (solution '*off-the-shelf*'). Par exemple, la voiture électrique est une technologie connue depuis presque un siècle et si les efforts de promotion de cette technologie sont récompensés, un jour elle peut prendre la place de la voiture conventionnelle à moteur thermique.

Bien que la technologie de rupture offre initialement des performances plus modestes que la technologie dominante, elle peut devenir à terme compétitive sur les principaux marchés. Christensen (1997, 2006) considère que le progrès technique dans les produits établis est souvent supérieur aux améliorations attendues par le marché.²⁸² L'auteur illustre cette situation avec plusieurs exemples tirés de l'industrie informatique, de la microélectronique, ou de la grande distribution, où la technologie avait progressé plus vite que les exigences de la demande. Ainsi, les technologies dominantes laissent ouvertes des niches de marché qui peuvent être exploitées par les technologies de rupture. Ces dernières trouvent alors des débouchés valorisant leurs principaux attributs (coût, prix, confort, etc.), à partir desquels elles s'améliorent et s'étendent pour conquérir les segments de marché suivants.

²⁸² C'est le cas opposé à l'effet de 'bateau à voile' ('sailing ship') décrit dans le chapitre précédent, où la technologie établie ne s'améliore que lorsque sa domination du marché est défiée par l'arrivée d'une nouvelle technologie (Geels, 2005).

Le marché initial des technologies de rupture peut s'élargir par deux voies. Premièrement, par un changement de critères de concurrence. Lorsque la technologie atteint le niveau minimum de performance pour un certain marché, les consommateurs de ce marché adopteront d'autres critères de décision que celui de la simple performance. De cette manière, la base de concurrence entre les technologies se déplace vers des terrains nouveaux tels que la fiabilité, la convenance, ou le prix. Deuxièmement, par une amélioration dynamique des performances de la technologie de rupture. L'accumulation d'investissement et d'expérience améliore les performances de la technologie de rupture. A terme, cette technologie peut monter en importance et concurrencer la vieille technologie sur les principaux marchés - plus exigeants en termes de performance,- offrant en plus de nouveaux attributs (graphique 72).

Graphique 72. La dynamique des innovations de rupture dans le marché



L'avenir des grandes entreprises liées aux technologies dominantes serait alors menacé par la percée dans le marché des technologies de rupture. De plus, il est peu probable que les grandes entreprises soient intéressées à promouvoir ces innovations en dépit de leur dotation en ressources humaines, matérielles et financières. Cela pour des raisons de deux ordres. D'une part, les grandes entreprises cherchent à consolider leur position dominante sur le marché. Ainsi, elles investissent dans les améliorations de la technologie existante, en espérant satisfaire les attentes et les nécessités révélées des clients. D'autre part, la maximisation des profits pousse à la recherche de marchés à plus forte valeur ajoutée. Ce faisant, les grandes entreprises se focalisent sur les plus grands marchés et délaissent les niches (un marché de 1 million d'euros est plus attractif pour une petite entreprise « *start up* », alors qu'il peut être totalement négligeable pour une très grosse entreprise comme Microsoft). De cette manière, la théorie des innovations de rupture considère que les grandes firmes auraient tout intérêt de promouvoir l'innovation de rupture pour garantir sa propre pérennité dans le marché, mais ce sont les firmes dynamiques de taille modeste qui sont plus en mesure d'introduire les technologies de rupture sur le marché.

La technologie des piles à combustible à hydrogène peut être considérée comme de rupture. Il s'agit d'une technologie très modulaire permettant plusieurs utilisations (mobiles, stationnaires, portables). Sur chacun des marchés, la technologie présente des caractéristiques différentes de celles qui ont été historiquement valorisées par les consommateurs. Par exemple, l'utilisation de l'hydrogène et piles à combustible sur le marché des transports permet d'atteindre des performances environnementales très élevées (zéro émissions) ; elle rend la conduite plus silencieuse et agréable ; et elle élargit la variété de services disponibles pour l'utilisateur (p.ex. la production d'électricité à bord pour le chargement des appareils portables ou pour le raccordement à des applications fixes, stockage d'électricité). Cependant, il est probable que les piles à combustible présentent un prix trop élevé au début de la diffusion ou une taille jugée trop encombrante par les usagers (p.ex. pour les usages portables). Le succès des piles à combustible dépend alors de l'amélioration continue permettant la réduction des coûts et, simultanément, l'amélioration des autres caractéristiques jugées nécessaires par le marché (p.ex. durabilité, performance).

L'application du cadre analytique des innovations de rupture à la diffusion des piles à combustible connaît toutefois des limites. Premièrement, il s'agit d'une grande percée technologique et non pas d'une technologie maîtrisée (*'on the shelf'*) tel que le moteur électrique largement connu par le marché. Cela change la capacité des petites firmes à remettre en cause la domination des grandes entreprises installées, celles-ci disposant de plus de moyens pour investir dans la nouvelle technologie. Deuxièmement, l'implication actuelle des grands constructeurs d'automobiles dans le développement de cette innovation ne suit pas les prévisions originales du modèle de Christensen quant à l'effet des ruptures sur l'entreprise dominante (p.ex. constructeurs automobiles). Ainsi, il est peu probable que les grandes compagnies soient dépassées par la diffusion de cette innovation radicale.

Une autre question importante est la capacité des nouvelles technologies à pénétrer le marché.

2.2. La gestion stratégique des niches de marché

Les problèmes liés au réchauffement climatique et à la sécurité énergétique rendent nécessaire la mise en place de solutions technologiques nouvelles. Toutefois, il n'est pas sûr que le marché soit capable de générer ces alternatives. D'où l'importance de créer des niches pour développer les technologies qui vont permettre la transition vers des régimes technologiques plus soutenables (Kemp, 1994 ; Kemp et al., 1998).

2.2.1. La difficulté pour le marché à générer des innovations de rupture

Les innovations environnementales rencontrent aujourd'hui deux grands types de barrières pour leur développement sur le marché. Premièrement, l'entrée est freinée par le verrouillage (« *lock-in* ») par les énergies fossiles (Unruh, 2002). Les technologies établies bénéficient de toutes les améliorations techniques réalisées durant un siècle, ainsi que de l'infrastructure existante qui n'est pas facile à transformer du jour au lendemain. Deuxièmement, les performances initialement limitées des nouvelles technologies. Pour bon nombre d'innovations radicales telles que les piles à combustible (PAC), malgré tout le potentiel technologique à long terme, il est probable que les coûts soient élevés et les performances médiocres pendant les premières années de diffusion. Au moment de l'entrée

sur le marché, ces innovations ont encore un long chemin à parcourir pour s'améliorer et s'adapter aux besoins des utilisateurs (Kemp, 1994).

La technologie n'est pas statique mais elle co-évolue normalement avec l'environnement de sélection. Les premiers marchés permettent de dégager les moyens financiers nécessaires pour les améliorations ultérieures. Ils contribuent encore à augmenter le soutien des acteurs à la nouvelle technologie en rendant le contexte institutionnel plus favorable à sa diffusion.

Cependant, la théorie des marchés niches met en cause la capacité du marché à gérer seul les innovations radicales. Le comportement maximisateur des agents et leur horizon temporel plus restreint peut expliquer une certaine myopie du marché, laquelle favorise les technologies les plus rentables à court terme. Il revient désormais à l'agent public de veiller à ce que les technologies à plus grand potentiel en termes de bénéfices environnementaux ne soient pas retardées ou simplement évincées du marché (Kemp et al, 1998). Une façon d'éviter cette situation passe par la création de niches de marché pour les innovations radicales (Kemp, 1994 ; Kemp et al, 1998).

2.2.2. La progression des innovations dans les niches de marché

La gestion stratégique des niches de marché permet l'introduction et le développement de l'innovation sur un marché protégé où les avantages de la technologie sont valorisés et les inconvénients (en termes de coûts et de confort) sont moins importants:

« Strategic niche management is the creation, development and controlled phase-out of protected spaces for the development and use of promising technologies by means of experimentation, with the aim of (1) learning about the desirability of the new technology and (2) enhancing the further development and the rate of application of the new technology. » (Kemp et al, 1998, p.186)

Selon cette perspective, cette protection ne doit être accordée qu'aux innovations ouvrant le plus d'opportunités technologiques, ainsi que des gains dynamiques en termes de rendements croissants et d'apprentissage (*learning by doing-using-failure-interacting*). A terme, la décision de maintien de la protection doit dépendre de la capacité de la technologie à confirmer son potentiel. La protection ne doit pas être trop élevée de façon à créer les incitations nécessaires à l'amélioration de la technologie en évitant, simultanément, les grandes dépenses en cas d'échec. Elle ne doit pas non plus être trop lâche au risque d'empêcher le développement des innovations radicales. Le décideur doit alors faire le bilan (*'trade-off'*) entre incitation et protection, de manière à choisir le degré de soutien adéquat à l'innovation émergente (Kemp et al, 1998).

Pour une diffusion technologique plus rapide, cette politique peut être coordonnée par des instruments de réglementation (p.ex. taxe carbone, permis d'émission) capables d'intégrer la valeur des externalités, en changeant ainsi les coûts relatifs des technologies (Kemp, 1994). Cela contribue aussi à réduire les incertitudes pesant sur l'innovation radicale en renforçant la viabilité du projet. Toutefois, les instruments de marché peuvent ne pas suffire à créer un espace de marché pour les technologies encore très coûteuses. Quatre types d'instruments peuvent alors être mobilisés par les pouvoirs publics afin de créer des niches de marché pour les nouvelles technologies (Sandén et Azar, 2005) :

- **labels énergétiques** : les labels permettent de diffuser l'information de manière à aider le consommateur dans sa prise de décision. Ils contribuent à une meilleure distinction des produits en termes d'impacts environnementaux. La différenciation est une stratégie qui permet d'isoler le produit de la pression concurrentielle par la valorisation d'un attribut différent (Porter, 1982) ;
- **obligations de marché** : l'Etat peut aussi réserver une partie du marché pour la nouvelle technologie ou un groupe de technologies. C'est le cas du programme de véhicules « Zéro Emissions » en Californie qui oblige les constructeurs à consacrer un pourcentage de leurs ventes annuelles dans l'Etat à ce type de voitures (p. ex. électriques, piles à combustible). Comme dans le cas californien, afin de garantir que les objectifs soient respectés au moindre coût, les obligations de marché peuvent être organisées dans le cadre d'un programme d'échange de quotas ('*cap-and-trade*').
- **incitations financières** : l'intervention peut se faire au niveau des coûts d'investissement de la technologie. A l'inverse de la taxe carbone dont bénéficie un ensemble plus vaste de technologies, le support spécifique à une technologie permet de mieux cibler l'aide. Ceci comprend les subventions à l'achat, les avantages fiscaux ou les taux d'intérêt plus avantageux.
- **marchés publics** : l'Etat peut organiser directement les premières commandes pour la technologie. Il peut obliger les agences publiques à l'achat de la technologie. Nelson (1982) donne l'exemple de l'importance des commandes militaires aux Etats-Unis pour les développements de l'informatique, des turbines à gaz ou du nucléaire.²⁸³

En outre, la politique publique a un rôle très important à jouer pendant la phase de transition. Elle doit établir clairement les objectifs à atteindre et favoriser la création d'un réseau d'acteurs qui puissent soutenir l'émergence de la nouvelle trajectoire technologique (Kemp, 1994 ; Kemp et al, 1998). En particulier, elle doit fixer un objectif à long terme (p.ex. réduire de moitié les émissions polluantes des transports d'ici 2025), à partir duquel des objectifs intermédiaires sont définis par la technique du '*backcasting*' (Rotmans et al. (2001). Par ailleurs, l'innovation aurait à gagner à s'insérer dans les dynamiques technologiques actuelles plutôt qu'à forcer des mutations radicales qui peuvent induire plus de résistances au changement.

2.2.3. Création de niches de marché pour l'hydrogène et les piles à combustibles

Les piles à combustible sont une innovation de rupture avec un large éventail d'applications possibles, et proposant de nouveaux attributs tels que l'efficacité, la propreté énergétique, de moindres coûts opérationnels, et une meilleure qualité de courant. La technologie PAC restant très coûteuse, de nombreuses améliorations sont encore nécessaires notamment au niveau de la durabilité et de la performance de la pile. Le coût des prototypes a beaucoup diminué depuis quelques années et il a été récemment évalué à plus de 500 US\$, ou entre 100 à 200 US\$ en cas de production en masse (Roads2HyCom, 2009a ; NRC, 2008ab). L'objectif est de ramener le coût de la PAC à moins de 1000 US\$ par kW de manière à la rendre compétitive dans les marchés stationnaires, et à moins de 50 US\$ pour les applications mobiles (AIE, 2005).

²⁸³ La section 3 traite plus en profondeur ces questions de réglementation.

Il est probable que les coûts et les performances de la PAC s'améliorent significativement avec le déploiement sur le marché. L'Etat peut stimuler l'apprentissage technologique en créant les conditions pour que l'innovation pénètre les niches de marché où leurs attributs (performance, autonomie, propreté) sont valorisés (Kemp, 1994 ; Kemp et al., 1998) (tableau 36).

Tableau 36. Les facteurs de création de niches et les premiers marchés pour les piles à combustible

Usages (types de PAC)	Drivers	Exemples de premiers marchés
Stationnaire (PEMFC, DMFC, AFC, SOFC, MCFC)	<ul style="list-style-type: none"> - Décentralisation de la production - Externalités environnementales - Efficacité énergétique - Qualité de chaleur - Flexibilité - Diversification des sources d'énergie - Compatibilité au réseau de gaz naturel - Durabilité 	<ul style="list-style-type: none"> - Unités de production électrique (UPS) - Unités d'appoint ('backup') - Unité de production combinée d'électricité et chaleur ('combined heat and power' ou CHP) industrielle et résidentielle
Portable (< 1KW) (PEMFC, DMFC, AFC)	<ul style="list-style-type: none"> - Miniaturisation - Fiabilité - Démarrage rapide - Recharge rapide (DMFC) 	<ul style="list-style-type: none"> - PC portable - Téléphone - Petits générateurs
Transport (PEMFC, DMFC)	<ul style="list-style-type: none"> - Efficacité énergétique - « zéro émissions » - Production d'électricité à bord 	<ul style="list-style-type: none"> - Bus - Flottes publiques ou privées - Petits véhicules et élévateurs - Unité auxiliaire de production ('APU')

Les types de piles à combustible sont présentés sous les acronymes de leur désignation en anglais : *Proton exchange membrane fuel cell* (PEMFC) ; *Direct methanol fuel cell* (DMFC) ; *Alkaline fuel cell* (AFC) ; *Solid oxide fuel cell* (SOFC) ; *Molten carbonate fuel cell* (MCFC).

Source : Agnolucci, 2007a,b ; Fuel Cell Today, 2009ab ; HFC, 2007 ; Mima et Criqui, 2003.

Le fait que les PAC ne soient pas encore compétitives sur les principaux marchés n'empêche pas l'émergence de niches. Dans la plupart des cas, il s'agit de marchés haut de gamme où le critère d'achat est autre que le prix. En ce qui concerne les applications portables et stationnaires (fixes), les premiers marchés pour les PAC seront probablement (Agnolucci, 2007a ; HFP, 2007 ; Fuel Cell Today, 2009b) :

- les micro PACs permettant une plus grande autonomie (entre deux recharges) des applications électroniques par rapport aux batteries conventionnelles (p.ex. les téléphones portables, les ordinateurs portables) ;
- les usages militaires en raison de la légèreté, fiabilité, silence pendant l'utilisation ;
- la production d'électricité pour les utilisations isolées. Par exemple, les unités de production d'électricité pour les antennes relais du réseau de téléphonie portable ;
- la production électrique pour des applications électroniques hautement sensibles nécessitant des unités de production électrique d'appoint en cas de manque d'électricité (p.ex. institutions financières, hôpitaux), ou des générateurs d'énergie pour les situations

d'urgence (p.ex. pompiers, ambulances). Dans le premier cas, il s'agit clairement des applications privilégiées (*premium*) au sens où les coûts ne sont pas le critère principal d'achat puisque les conséquences d'une qualité irrégulière du courant ou d'une panne électrique sont économiquement catastrophiques.

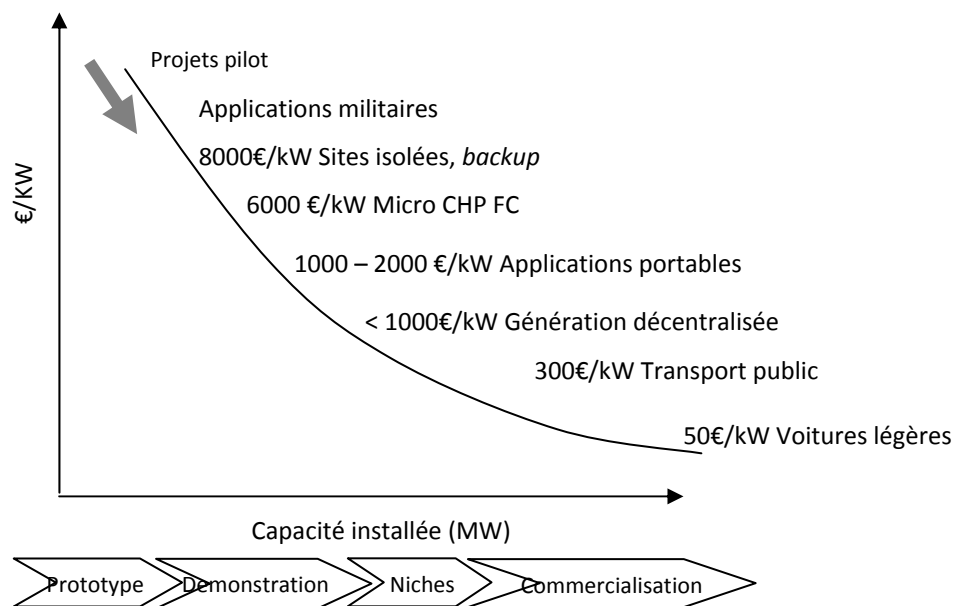
Pour ce qui est des applications mobiles, la commercialisation des voitures à hydrogène semble ne pas être possible avant 2012, voire même 2015. Entretemps, les PAC commencent à conquérir des positions intéressantes dans des niches de marché telles que celle des élévateurs où l'aspect propreté est particulièrement valorisé (Fuel Cell Today, 2007). Per et al. (2007) identifient quatre groupes d'utilisateurs potentiellement intéressés à devenir les premiers marchés pour l'hydrogène et les PAC en Europe :

- les pouvoirs publics : le secteur public possède un grand parc de voitures. Il peut obliger les entités publiques à réserver un pourcentage du remplacement à des projets de démonstration de technologies à fort potentiel à terme ;
- les compagnies de transport en commun : l'utilisation des piles à combustible dans les bus sera probablement compétitive avant le marché de la voiture individuelle ;
- la poste : en raison de sa grande flotte de voitures et des conditions favorables à l'introduction des carburants alternatifs (p.ex. gestion et ravitaillement centralisé) ;
- les compagnies énergétiques : pour des raisons d'image et afin de rester ouvertes à de nouvelles opportunités de marché.

Ainsi, les technologies de l'hydrogène peuvent devenir des innovations de rupture en se diffusant sur le marché par l'accumulation de niches. Les attributs des PACs sont différents de ceux qui ont contribué à la diffusion du moteur à combustion dans le passé (p. ex. l'autonomie, l'existence d'un réseau de distribution d'essence pour les usages domestiques).²⁸⁴ Malgré les défis techniques, les PAC ont connu des progrès importants au cours des dernières années ce qui permet de rester confiant quant au potentiel de diminution des coûts. Au fur et à mesure que les ventes dans les niches augmentent, il est probable que les performances des piles s'améliorent et les coûts diminuent jusqu'à ce que la technologie devienne progressivement compétitive sur les marchés principaux. Ainsi, la technologie PAC doit commencer d'abord par les segments de marché les moins exigeants en termes de coûts ; et ensuite passer aux autres catégories de marché en se substituant définitivement à la vieille technologie. A chaque segment de marché et à des coûts identiques, les clients préfèrent la technologie nouvelle qui apporte plus de fiabilité et de confort par rapport à la technologie précédente (p.ex. le confort de conduite offert par la voiture à hydrogène en comparaison avec celui de la voiture conventionnelle) (graphique 73).

²⁸⁴ cf. Melaina, 2007.

Graphique 73. Le processus de diffusion des PAC par l'accumulation des niches de marché



Sources : Mima et Criqui, 2003 ; HFP, Implementation Plan, 2007.

Le déploiement sur le marché permet à la technologie de progresser dans la courbe d'apprentissage, ce qui la rend moins coûteuse et donc plus compétitive dans les différentes utilisations. Eventuellement, des sauts technologiques interviendront de manière à accélérer la vitesse de diffusion. Ainsi, il est probable que les PAC entrent d'abord sur le marché des usages stationnaires et des équipements portables où la concurrence technologique est moins acharnée et le seuil de compétitivité moins exigeant, avant d'atteindre le marché principal des transports.

2.3. Les stratégies concurrentielles pour les innovations vertes

Comme pour les autres transitions énergétiques du passé, la transition vers l'économie de l'hydrogène ne se fait pas par décret. Elle commence à partir du moment où les agents se mobilisent pour mettre en place des projets ayant pour but la réalisation d'un profit. Le rôle du gouvernement pour accélérer la transition par le biais d'une concurrence juste et équilibrée fait l'objet du point suivant.

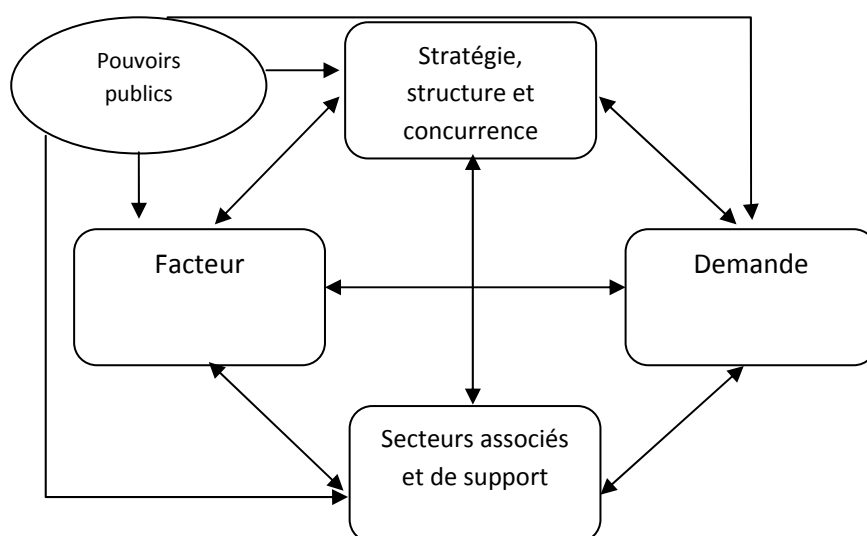
Le résultat final dépend des interactions entre l'innovation et la technologie ancienne, d'une part ; et entre les entreprises innovantes et le marché, d'autre part. Ces interactions donnent lieu à des stratégies compétitives destinées à améliorer la position initiale de chaque intervenant (Porter, 1986). Dans un contexte d'économie ouverte, la compétitivité entre les nations est un autre aspect important. Chacun des Etats cherche à se positionner dans la nouvelle vague technologique. Les possibilités de réussite dépendent, entre autres, des conditions internes de demande, de la capacité d'exportation et de la structure concurrentielle du marché intérieur (Porter, 1990).

En outre, la décision de la commercialisation de l'hydrogène et des piles à combustible doit être prise par les entreprises privées. Il convient alors d'étudier les stratégies qui ont été déployées lorsqu'elles ont dû faire face à un contexte similaire à celui qui caractérise actuellement l'hydrogène et les PAC.

2.3.1. Compétitivité internationale des nations dans les nouvelles filières technologiques

Le diamant de Porter (graphique 74) systématise graphiquement les facteurs qui conditionnent la position d'une nation (ou d'une région) dans la concurrence globale. L'auteur identifie quatre déterminants de l'avantage compétitif. Le premier élément tient à la dotation de *facteurs* tels que les facteurs de production (p.ex. main d'œuvre formée, capital) et l'existence des infrastructures. Deuxièmement, la disponibilité d'une *demande* suffisamment large pour absorber la production intérieure. Troisièmement, les *secteurs associés de support* comme par exemple l'industrie ou les services et leur capacité à fournir des entrants compétitifs au niveau international. Enfin, l'environnement des affaires en termes de *stratégie, de structure et de concurrence* qui influencent la façon dont les entreprises sont créées, organisées et gérées.

Graphique 74. Le diamant de Porter : les déterminants de l'avantage compétitif des nations



Source : Porter, 1990.

Selon cette analyse, les nations gagnent des avantages compétitifs dans les industries bénéficiant d'une demande interne suffisamment large pour que les entreprises nationales puissent comprendre mieux et plus rapidement les besoins des consommateurs par rapport à un concurrent étranger. Cela est un pilier important pour construire des firmes compétitives à l'international. Le diamant de Porter postule encore qu'il est plus probable que les industries compétitives se forment dans les nations qui disposent de ressources humaines hautement préparées, de secteurs de supports et d'une concurrence interne rigoureuse.

L'Etat a la possibilité d'agir sur chacun des déterminants qui conditionnent l'avantage compétitif de la nation, de manière à améliorer la compétitivité des industries. Il peut ainsi concentrer son action sur la disponibilité des facteurs au travers de l'investissement dans l'éducation ou dans les infrastructures ; promouvoir les premiers marchés pour les innovations majeures ; stimuler la concurrence de manière à inciter à l'innovation et à des gains de productivité ; développer les secteurs de support par une stratégie de création de clusters industriels. Porter (1990) applique ce schéma à l'analyse de nombreux pays développés comme les Etats-Unis, ce qui lui permet de souligner les effets des investissements dans la science et l'éducation après la deuxième guerre mondiale, ainsi que la formation d'une demande interne notamment par le biais des commandes

militaires ; ou le Japon où l'Etat a joué un rôle très important dans la modernisation des industries et dans l'investissement en R&D qui ont permis l'émergence des grands leaders mondiaux de l'industrie électronique et automobile. Plus récemment, la formation de l'industrie éolienne au Danemark est l'exemple qui illustre bien cette combinaison des ressources internes avec la politique technologique (encadré 5).

Encadré 5. La construction du leadership danois dans l'industrie éolienne

Au lendemain des chocs pétroliers, le Danemark a fait le choix de renforcer son indépendance énergétique.²⁸⁵ Entre autres voies, les politiques publiques ont cherché à exploiter le potentiel des ressources renouvelables disponibles dans le pays. Les deux plans énergétiques « Danish Energy Plans » des années 1990 montrent la volonté de promouvoir le développement de technologies telles que les biocarburants et l'éolien. En fait, ces deux plans ne sont que le prolongement de l'orientation adoptée lors des décennies précédentes.

Le développement de la filière éolienne danoise pendant les années 1970 et 1980 a bénéficié de l'intervention publique pour la création d'un cluster industriel et des mécanismes de soutien mis en place. Le soutien public à la R&D a été très important. De même, les collaborations entre l'Etat et les sociétés privées ont permis le développement de la technologie éolienne notamment par l'élaboration d'un plan pour le secteur et des objectifs précis en matière énergétique. De plus, le cadre réglementaire était très favorable, la rémunération de la production éolienne bénéficiait d'un prix bonifié du type « feed-in tarif » (garantissant aux propriétaires des fermes éoliennes une prime en plus du prix de marché) ce qui a eu un rôle important pour lever les incertitudes relatives à l'investissement. Ainsi, les incitations publiques sont restées stables au Danemark, alors qu'elles suivaient l'évolution des cours du pétrole aux Etats-Unis pendant la même période.

Le cas danois montre encore l'importance de la relation entre les différents intervenants dans une filière technologique émergente (Jacobsson et Johnsson, 2000). En effet, l'organisation de la demande par groupes a rendu plus facile la transmission d'information aux constructeurs de machines éoliennes quant aux besoins réels du marché en termes de taille, sécurité et fiabilité. Les collaborations avec les clients et avec les fournisseurs ont permis aux constructeurs d'acquérir les compétences et de cumuler l'expérience nécessaire pour faire évoluer la technologie (Andersen, 2003). L'intervention de l'Etat a renforcé cette dynamique.

Cette situation exceptionnelle a permis un fort investissement par le biais d'une demande interne capable de remplir le carnet de commandes de l'industrie. Cela est à la base de la naissance d'entreprises leader comme le fabricant de turbines, Vestas, lesquelles sont le symbole de l'avance danoise dans le secteur. A ce jour, le Danemark produit 20% de son électricité à partir de l'éolien. Les changements de la politique énergétique survenus à partir des années 2000 et la révision du régime de tarification ont provoqué une chute des investissements en capacité installée par an - de 600MW en 2000 ils sont tombés à 30MW en 2004. Ceci montre encore une fois l'importance des politiques nationales actives pour le développement de la filière éolienne.

L'analyse de la position d'un pays (ou région) par rapport au diamant de Porter permet d'évaluer les possibilités de développement d'une industrie de piles à combustible compétitive au niveau mondial, ainsi que les conditions pour devenir une des premières économies de l'hydrogène. Pour cela, des

²⁸⁵ Cette présentation de l'industrie éolienne danoise est inspirée de Jacobsson et Johnsson, 2000.

conditions de base doivent être créées au niveau national. L'existence d'un marché large et capable d'acheter une technologie initialement plus chère est une condition nécessaire. Les ressources scientifiques et la main d'œuvre disponible doivent aussi être en mesure de développer une technologie de pointe. Enfin, l'entrée dans le marché des nouvelles technologies de l'hydrogène nécessite une infrastructure minimale dédiée.

2.3.2. Les projets entrepreneuriaux existant pour développer les alternatives au pétrole

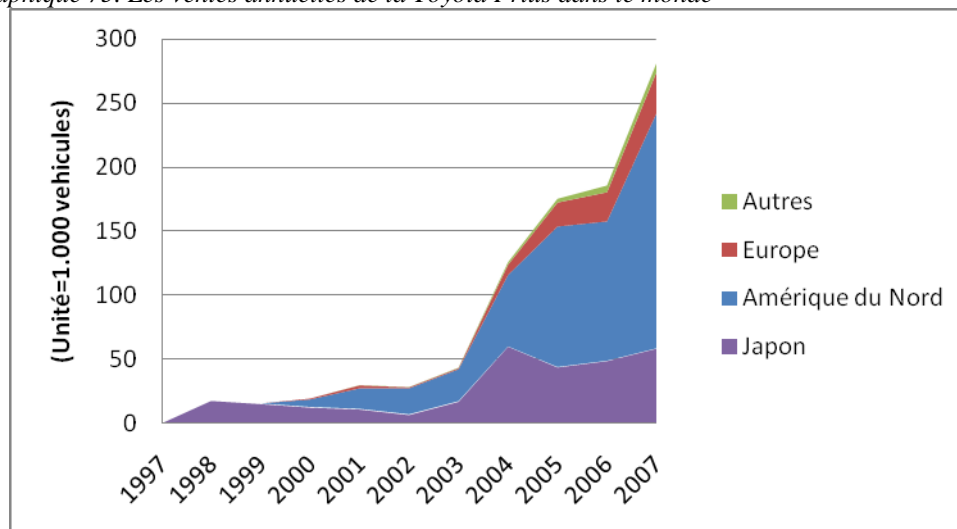
Les entreprises voulant se lancer dans la promotion des innovations à l'état pré-concurrentiel adoptent les stratégies qui leur permettent de rendre la technologie compétitive et de gagner un avantage concurrentiel (Porter, 1982, 1986). Lorsque les gains d'apprentissage attendus sont importants, le sponsoring technologique peut se justifier- le succès commercial de la voiture Prius en est un exemple. Dans la situation où les barrières sont plus importantes et les perspectives de profits moins sûres, soit parce que la technologie n'est pas encore compétitive, soit parce qu'elle nécessite d'une infrastructure nouvelle, les stratégies commerciales sont plus complexes.

A. De l'investissement à perte au succès commercial : le cas de la Toyota Prius

La commercialisation de la Prius a démarré en 1997 ; dix ans plus tard, en mars 2007, elle franchit le seuil du million de voitures vendues dans le monde (graphique 75). Le succès commercial de la Prius est un cas pur de *sponsoring* technologique. Cette voiture hybride combine à la fois un moteur électrique et un moteur à combustion, ce qui lui permet d'améliorer les performances énergétiques par rapport à la voiture conventionnelle.²⁸⁶ Afin de rester compétitive, Toyota a vendu sa Prius à un prix inférieur au coût de production pendant les années 1990. Cela a permis de trouver des débouchés et d'augmenter la production. La marque japonaise attendait les gains dynamiques d'apprentissage pour diminuer les coûts de la technologie. En effet, les coûts ont diminué avec l'augmentation de la production jusqu'à rendre la Prius rentable. L'arrivée de nouveaux concurrents sur le marché des voitures hybrides comme la Civic de Honda n'a pas empêché Toyota de profiter de son avantage initial.

²⁸⁶ La Prius est 60% plus efficiente que la voiture conventionnelle à combustion (Romm et Frank, 2006).

Graphique 75. Les ventes annuelles de la Toyota Prius dans le monde



Source : Toyota, 2008.

Le succès de la voiture hybride Prius ouvre la voie à une nouvelle technologie : la voiture hybride rechargeable. Cette dernière dispose d'une batterie plus grande et d'un câble permettant de brancher la voiture au secteur et de la recharger pendant la nuit, lorsqu'elle est garée et que l'électricité est moins chère (Romm et Frank, 2006).

B. Le business plan de la voiture à hydrogène « Clarity » de Honda

Honda a été le premier constructeur à concevoir une voiture pile à combustible à hydrogène destinée à la production en série. Le modèle « FCX Clarity » est équipé d'une pile à combustible de 100 KW de puissance maximale. Le réservoir a la capacité de stocker 4 kg d'hydrogène à la pression de 350 bars permettant une autonomie de 430 km ce qui est remarquable pour une voiture familiale électrique avec pile à combustible. La consommation moyenne annoncée est de 3,6 litres par 100 km.²⁸⁷

La stratégie commerciale de Honda est similaire à celle utilisée par Toyota pour promouvoir sa Prius lorsque celle-ci était encore très coûteuse. Honda cherche à augmenter la production de manière à faire baisser les coûts par les gains d'apprentissage. Simultanément, la marque japonaise se positionne tôt sur le marché des voitures à hydrogène de façon à gagner un avantage concurrentiel au moment du démarrage du marché.

La FCX Clarity est proposée en location à 600 dollars par mois (entretien et assurance anticollision compris), pendant 3 ans. L'intérêt suscité par cette offre peut être évalué par les 50.000 demandes de préinscription pour participer au projet à Los Angeles.²⁸⁸ A la fin 2008, les 5 premières voitures circulaient déjà à Los Angeles, en bénéficiant des stations d'hydrogène mises en place par le gouvernement de cet état américain. Plus de voitures sont attendues encore à Los Angeles, mais aussi à Tokyo (Japon) et à Londres (Royaume-Uni). Honda a affiché l'intention de produire et de mettre en location 200 voitures d'ici 2011.

²⁸⁷ Cf. <http://www.automobiles.honda.com/fcx-clarity>, vue le 5 mai 2008.

²⁸⁸ Fuel Cell Today (2008), « Honda Announces FCX Clarity Business Plan and Commencement of Customer Selection Process », 21 mai 2008.

C. Les concepts émergents de commercialisation de la voiture électrique

La voiture électrique est plus proche de la commercialisation, en comparaison avec les autres technologies émission zéro comme la pile à combustible à hydrogène. Cependant, cette technologie demeure plus chère que la voiture conventionnelle et ses spécificités techniques concernant l'autonomie, la durée de vie de la batterie et le temps de recharge, constituent une autre barrière à sa commercialisation. A cela s'ajoute la nécessité d'une infrastructure nouvelle de ravitaillement afin de rendre possible l'utilisation de la voiture électrique à grande échelle. Ces difficultés techniques sont à la base de l'émergence de nouveaux modèles économiques.

Le projet « Better Place » est une *start up* située dans la Silicon Valley créée par Shai Agassi (ancien numéro deux de l'éditeur de logiciels SAP) qui prétend mettre en place un système de location de voitures électriques et le réseau de ravitaillement dédié. Le projet s'inspire du modèle de la téléphonie mobile : l'automobiliste est propriétaire de la voiture, mais il loue la batterie. En achetant la voiture, il souscrit simultanément un abonnement donnant accès au réseau de recharge. Le prix actuel des prototypes de voitures électriques est estimé entre 60.000 et 80.000 euros, dont 40% correspond au coût de la batterie.²⁸⁹ De plus, le développement des batteries s'insère dans des cycles courts d'innovation marqués par des évolutions technologiques successives. Une manière de réduire l'incertitude quant à l'évolution de la technologie et de dissocier la propriété des batteries de celle de la voiture. Le fait de ne pas payer la batterie réduit de 40% le prix de la voiture ce qui la rapproche du coût de la voiture conventionnelle. Le coût de l'électricité est annoncé à 60 euros par mois, ce qui est très optimiste quant aux gains potentiels en termes de production de masse et d'apprentissage vu les coûts des prototypes actuels.²⁹⁰ Le projet a réuni 200 millions de dollars (140 millions d'euros) pour le financement des premières démonstrations, ce qui le place parmi les cinq plus importants de l'histoire de la Silicon Valley en termes de dotation financière.²⁹¹

L'organisation de la recharge de la voiture est le point principal du modèle économique sous-jacent à « Better Place ». Le système de ravitaillement est constitué par un réseau de bornes et de stations d'échange de batteries. Les bornes se destinent au rechargement - éventuellement partiel - de la voiture lorsque celle-ci est garée en ville. Pour les trajets plus longs (de l'ordre de 100 km) à la fin desquelles la recharge complète de la batterie demande normalement une longue période d'immobilisation de la voiture, un réseau est prévu pour l'échange des batteries dans des conditions similaires à celles dans lesquelles l'automobiliste fait aujourd'hui le plein d'essence.

La première grande démonstration est attendue pour l'an prochain en Israël. Ce pays dispose de conditions favorables à l'utilisation des voitures électriques avec 1 million de véhicules, où 90% de la population fait moins de 70 kilomètres par jour.²⁹² L'expérience est réalisée en partenariat avec le constructeur automobile Renault qui fournit les voitures en s'appuyant sur la *joint venture* formée entre Nissan et NEC pour la fourniture des batteries lithium-ion.²⁹³ Le constructeur d'automobiles a déjà investi 1,5 milliard de dollars (1 milliard d'euros environ) dans le développement des voitures

²⁸⁹ In : Centre d'Analyse Stratégique, La note de veille n°132-Avril 2009.

²⁹⁰ <http://www.betterplace.com>

²⁹¹ cf. Les Echos (2009), « Shai Agassi, l'homme qui veut réinventer la voiture », 4 mars.

²⁹² Cf. Le Monde (2008), « Renault se lance dans la voiture électrique en Israël », 22 janvier, p.13.

²⁹³ La voiture du projet est une Mégane Berline tricorps (avec un coffre indépendant) ayant une autonomie annoncée de 160 km pour des cycles de conduite normaux, 100 km en conditions plus difficiles comme pentes et chaleur demandant l'utilisation de la climatisation. In : Centre d'Analyse Stratégique, Avril 2009, *idem*.

électriques. Les annonces tiennent compte d'une infrastructure constituée de 500.000 points de recharge. Le gouvernement israélien est aussi partenaire du projet. Il a notamment fait passer une loi abaissant de 30% la fiscalité sur les voitures propres. Outre Israël, d'autres pays prévoient des démonstrations comme l'Australie, le Danemark, les Etats-Unis (Californie), et le Portugal.²⁹⁴ Enfin, les compagnies d'électricité sont aussi impliquées dans l'expérience. Elles travaillent particulièrement dans le développement du système de gestion et de tarification de l'électricité par l'interaction entre le réseau et l'ordinateur de bord de la voiture.

La voiture électrique a l'avantage de ne pas avoir d'émission pour ce qui est de l'utilisation. Ainsi, elle peut combattre efficacement les problèmes liés à la pollution de l'air des villes, en l'occurrence des villes israéliennes. Cependant, l'électricité israélienne est produite actuellement à 75% à partir du charbon. En l'état actuel du projet et en l'absence d'investissements en moyens propres de production électrique, il s'agit simplement de déplacer les émissions vers l'amont. Sans un effort simultané pour réduire l'intensité carbone du mix électrique, la voiture électrique risque d'augmenter les émissions globales de gaz à effet de serre.²⁹⁵

La voiture électrique peut bénéficier de programmes de démonstration pour diminuer les coûts et évoluer techniquement en termes d'autonomie, performance et durabilité, de manière à garantir un niveau de confort comparable à celui de la voiture actuelle. Tout cela va dépendre, dans une large mesure, de la capacité à développer une nouvelle vague de batteries plus économiques et efficaces. Des incertitudes persistent quant à la concrétisation de ses objectifs techniques, d'où l'intérêt de ne pas fermer la possibilité de progression aux autres technologies. La voiture à pile à combustible à hydrogène promet un potentiel technique plus important que la voiture électrique. Sa commercialisation semble toutefois s'étaler sur un horizon plus lointain. Donc, on comprend que les entreprises voient moins d'opportunités pour réaliser des bénéfices à court terme, malgré le fait que le développement des piles à combustible élargit les possibilités technologiques pour faire baisser les émissions dans les transports ce qui présente une valeur sociale importante. Des politiques de stimulation qui augmentent les bénéfices des innovateurs sont alors nécessaires afin de les inciter à investir dans les nouvelles technologies.

Section 3. Les instruments de promotion de la soutenabilité

L'investissement dans les innovations environnementales contribue à la préservation de *biens publics* comme la stabilité du climat ou la qualité de l'air local (Samuelson, 1954). Toutefois, le caractère de non-exclusion (l'impossibilité d'exclusion par le prix) et de non-rivalité (la non appropriation du bien par un seul consommateur) des biens publics n'incite pas les agents privés à investir dans les technologies environnementales plus chères.

²⁹⁴ Le Portugal a récemment signé un accord avec le constructeur Renault-Nissan pour le déploiement de voitures électriques dans ce pays à l'horizon 2011. Le gouvernement prend notamment en charge la construction de 320 points de recharge en 2010 et 1300 jusqu'à la fin 2011. En outre, le gouvernement s'engage à des baisses de la fiscalité et à des crédits d'impôts pour l'achat des voitures propres. Cf. Publico (2008), « Governo e Renault-Nissan assinam acordo para abastecimento de veículos eléctricos », 22 novembre.

²⁹⁵ Dans la littérature anglo-saxonne cette situation est nommée '*emissions elsewhere vehicles*'.

Le support aux innovations environnementales peut être alors justifié par l'internalisation des externalités environnementales, d'une part ; et les incitations aux progrès techniques, d'autre part. Etant donné que l'ensemble des bénéfices et des coûts ne sont pas pris en compte par les agents, l'équilibre de marché ne correspond pas à l'optimum collectif (Coase, 1960). Entretemps, la surexploitation de ressources communes comme l'eau et l'air provoque ce que Hardin (1968) qualifie de *'tragedy of the commons'*

L'objet de cette section est l'analyse des politiques de support aux innovations environnementales, en particulier l'hydrogène et les piles à combustible. Les instruments à la disposition des pouvoirs publics pour soutenir la transition technologique peuvent être divisés en deux groupes, par rapport au champ d'action : les instruments génériques capables d'influencer l'environnement de sélection de manière à promouvoir la soutenabilité et la concurrence technologique plus équilibrée (instruments économiques et standards), d'une part ; les instruments de soutien spécifique à une technologie (p.ex. le financement de la R&D ; la subvention) de manière à combattre le 'lock in' technologique, d'autre part. Nous argumentons que les deux types d'instruments sont nécessaires à la fois pour promouvoir l'émergence de nouvelles innovations et la concurrence technologique.

3.1. L'internalisation des externalités environnementales

Le système énergétique actuel n'est pas soutenable. La transformation du marché avec l'émergence d'innovations propres nécessite que les externalités liées à l'utilisation des technologies conventionnelles soient prises en compte. Dans la théorie économique, l'internalisation des effets externes dans les décisions décentralisées des agents peut être obtenue à travers des instruments économiques tels que le système de permis d'émission négociables et l'« éco-taxe », d'une part ; et la voie réglementaire, d'autre part.

3.1.1. Les instruments économiques : intervenir par les prix ou par les quantités ?

Pour internaliser une externalité, le régulateur peut intervenir soit par les prix, soit par les quantités. D'un point de vue théorique, les deux instruments produisent un résultat similaire, mais dans la pratique l'efficacité de chacun des instruments est influencée par des facteurs comme l'information imparfaite ou la faisabilité de la mise en place.

A. Taxes ou permis ?

Les théories de l'économie du bien-être montrent que – sous certaines conditions dites classiques - le marché aboutit normalement à une solution optimale dans le sens de Pareto (Guerrien, 2002). Néanmoins, en présence d'effets externes le marché peut s'avérer défaillant dans l'allocation efficiente des ressources. Le concept d'externalité a été proposé par Marshall (1884)²⁹⁶ et repris plus

²⁹⁶ A la fin du XIXe siècle, Marshall propose une « écotaxe » pour résoudre le problème de la surpopulation de la ville de Londres et notamment les conditions de vie misérables des classes pauvres. L'idée-base est que les habitants les plus démunis doivent quitter la ville et s'installer ailleurs où ils trouveront de meilleures conditions de vie. Pour cela, l'auteur propose la mise en place d'un standard minimum d'hygiène accompagné d'une écotaxe à appliquer aux propriétaires des maisons qui abritent les familles vivant en deçà de

tard par Pigou (1920). Il s'agit des effets négatifs (bénéfiques) de l'activité d'un agent sur un autre agent, subis de manière involontaire par ce dernier, et sans donner lieu à une compensation (paiement) monétaire (Baumol et Oates, 1988 ; Buchanan et Stubblebine, 1967). L'exemple classique est l'industrie qui pollue l'eau d'une rivière en engendrant une série de coûts pour les activités situées en aval (comme la pêche, la baignade, l'utilisation industrielle ou domestique de l'eau potable). L'agent à l'origine de l'externalité négative n'intègre pas tous les coûts de son action et a donc tendance à en produire trop ; dans le cas inverse, il ne perçoit pas tous les bénéfices de son activité ce qui l'incite à produire une quantité sous-optimale du bien. Alors le système de prix ne donne pas un signal fiable de la valeur des biens et services. Il existe une divergence entre les coûts (bénéfiques) privés et sociaux (les coûts pour l'ensemble des agents économiques), ce qui a des conséquences au niveau de l'efficacité économique (Turvey, 1963).²⁹⁷ L'internalisation des externalités permet le retour à l'équilibre optimal.

La **taxe environnementale** trouve son origine dans les travaux de Pigou (1920) sur les externalités et la nécessité de les internaliser. La puissance publique impose au pollueur un paiement égal à la valeur de l'externalité négative occasionnée (ou l'obtention d'une subvention dans la mesure de l'effet positif généré). L'instauration d'une taxe oblige le producteur à prendre en compte les effets négatifs de sa production.²⁹⁸ De cette manière, le coût marginal de production (coût marginal privé plus la taxe) égalise le coût marginal social de production. Sous l'hypothèse de convexité des fonctions de production et d'utilité, le prélèvement fiscal ramène les quantités produites à un niveau optimal (Cropper et Oates, 1992). Chaque producteur réduit la pollution jusqu'à ce que le coût de dépollution soit égal au montant de la taxe, ce qui permet de répartir l'effort de dépollution entre les installations au moindre coût (Lévêque, 2004 ; Baumol et Oates, 1988).

La taxe permet de dégager des recettes fiscales capables de réduire les distorsions provoquées par la fiscalisation sur le capital ou sur le travail (Metcalf, 2007).²⁹⁹ De même, le produit fiscal peut servir à financer les investissements en technologies plus propres afin de diminuer le coût de réduction de la pollution (Stavins, 2004). Alternativement, il peut être versé aux victimes de l'effet externe de

ce minimum. La proposition est incroyablement complexe pour l'époque car Marshall suggère aussi des stratégies pour mettre en place la taxe.

« Anyhow, those who cannot manage their houses properly, and exercise a due control over the sanitary habits of their tenants, should be fined toll they sell them to others who can. But all changes must be gradual; it is a mistake to propound regulations that cannot be enforced. The house-room insisted on for each person, and the free space insisted on between the houses, should start from a workable level, and increase steadily and surely till a high standard is attained. » (Marshall, 1884, p.229).

²⁹⁷ L'existence d'externalités justifie l'intervention publique dans le sens de l'internalisation. Le champ de cette intervention a toutefois fait l'objet d'un important débat théorique. De nouvelles classifications d'externalités sont apparues de manière à restreindre le champ d'action de la défaillance de marché. Une classification consiste à distinguer les externalités pécuniaires des externalités non pécuniaires. Les premiers ne seraient pas de vraies externalités car elles s'inscrivent dans le système de prix. Buchanan et Stubblebine (1967) proposent alors une autre distinction pour les externalités entre les « Pareto relevant » lorsque son internalisation améliore le bien-être social au sens de Pareto et les « Pareto irrelevant » dans le cas où le bien-être social n'est pas amélioré par l'internalisation. Pour une revue des différentes définitions du concept d'externalité, voir Baumol et Oates (1988).

²⁹⁸ En Norvège, la mise en place d'une taxe sur les émissions de CO₂ (35 €/tCO₂) sur l'industrie pétrolière a incité les compagnies pétrolières à développer des projets de capture et séquestration comme celui de Sleipner où Statoil séquestre 1000 Mte CO₂ par an dans la formation Utsira, dans une zone profonde de la mer du Nord.

²⁹⁹ Selon les calculs de l'auteur pour les Etats-Unis, une taxe de \$15 par tonne de CO₂ permettrait de dégager des recettes fiscales suffisantes pour exonérer les revenus de chaque travailleur jusqu'à \$3.660 du paiement d'impôt.

manière compensatoire, dans le respect de la neutralité de la taxe en termes de répartition du rendement.

De nombreux auteurs ont montré que l'internalisation des effets externes à travers une taxe environnementale est une mesure qui rend la concurrence entre technologies plus équilibrée.³⁰⁰

Une autre approche pour l'internalisation de l'externalité consiste à privilégier la négociation bilatérale comme dans un **marché de quotas de pollution** entre les agents de façon à réduire les distorsions provoquées par les effets externes. En l'absence de coûts de transaction, les parties négocient le montant que chacun accepte de recevoir/payer pour maintenir l'activité (pollueur) ou subir ses effets négatifs (victime). Cela repose sur un présupposé essentiel : *l'allocation initiale des droits de propriété*. C'est-à-dire, la définition de l'entité qui doit dédommager l'autre partie : la victime doit payer pour que le producteur réduise sa production ; ou bien le pollueur doit dédommager la victime des effets externes. Dans un monde où les droits de propriété sont bien définis, les parties trouveront l'intérêt à entrer en négociation, en vue d'un résultat qui constitue un optimum. Cette proposition est connue comme le *théorème de Coase* (1960) : dans un monde de coûts de transaction nuls, les agents corrigent d'eux-mêmes les externalités de manière optimale indépendamment de l'allocation initiale des droits de propriété.³⁰¹

L'externalité tire alors son origine de la faillite de la définition des droits de propriété. Les biens environnementaux comme l'air et l'eau ont été longtemps considérés comme des biens libres et non appropriables, donc source d'externalités. Dans ce sens, l'utilisation massive des biens environnementaux a exacerbé la rareté de ces biens. La définition des droits de propriété est devenue une question de premier ordre. Cela est aussi une étape fondamentale pour la création d'un marché de biens environnementaux.

Dales (1968) a été le premier auteur à proposer un marché de droits de pollution. Il considère que les biens environnementaux sont susceptibles de faire l'objet d'un échange marchand comme un bien ou service privé quelconque. Pour cela, les droits de propriété sur les biens environnementaux doivent être exclusifs et transférables. La confrontation entre la demande et l'offre de « droits à polluer » sur un marché aux caractéristiques concurrentielles donne lieu à la fixation d'un prix d'équilibre optimal. Ce prix est ensuite pris en compte par les agents qui intègrent ainsi les externalités dans leur calcul économique. Dales montre que le prix d'équilibre est égal au coût marginal de réduction de la pollution pour un niveau exigé de dépollution.

L'objectif est fixé par le régulateur compétant (au niveau régional, de l'état, ou supranational comme l'Union Européenne). Le régulateur fixe la quantité de pollution admissible en prenant en considération la technologie disponible à court et moyen termes, et les objectifs de réduction à long terme (Neuhoff, 2008). Ensuite, il met à la disposition des agents le nombre de droits de pollution correspondant à cette quantité. La méthode de répartition des droits suit normalement l'évolution historique de la production des installations et de leurs parts dans la production globale. En outre, les

³⁰⁰ Pour une revue des arguments en faveur de la taxation du carbone, voir Kemp (1997), Stern (2006), Neuhoff (2008) et Stoft (2008). Une liste des économistes en faveur de la mise en place d'une taxe carbone peut être consultée sur <http://gregmankiw.blogspot.com/2006/09/rogoff-joins-pigou-club.html> (accédé le 15 mars 2009).

³⁰¹ Alors la non internalisation des externalités peut aussi correspondre à une situation optimale dans la mesure où les coûts de transaction dépasseraient les gains sociaux de l'internalisation.

droits peuvent être assignés gratuitement ou mis aux enchères, ce qui a des effets distributifs différents.

L'échange des permis de pollution permet d'accomplir un certain objectif de réduction des externalités au moindre coût pour la société (Dales, 1968). Les firmes négocient de manière à ce que la dépollution soit réalisée en priorité par les firmes présentant les coûts de dépollution les plus faibles. Chaque entreprise réduit la pollution jusqu'au moment où le coût marginal de réduction est égal au prix d'équilibre des droits. Les firmes les plus efficaces dépassent leur objectif et vendent le surplus de permis au prix de marché. Pour les autres, il est moins cher d'acheter sur le marché les droits de pollution manquant. A l'équilibre, le prix des droits de pollution est égal au coût marginal de dépollution de chacune des firmes. Ceci reflète encore le coût de la dernière action à entreprendre pour atteindre l'objectif environnemental.

Le principal argument des instruments quantitatifs comme les permis est l'efficacité environnementale. Cependant, dans un monde où le régulateur ne dispose pas d'une connaissance parfaite des coûts de réduction de la pollution, le choix d'un objectif environnemental trop ambitieux risque de provoquer des coûts insupportables pour les entreprises.

La prise en compte de l'incertitude

Le choix entre les instruments dépend aussi du degré d'incertitude sur la forme des courbes de coût de réduction de la pollution et des bénéfices environnementaux de la dépollution. Dans un monde avec information parfaite et en absence de coûts de transaction, le système d'échange de quotas permet le même résultat que la taxe environnementale (Cropper et Oates, 1992). En présence d'incertitude, le théorème de Weitzman (1974) montre que le choix entre ces deux instruments dépend de la pente de la courbe des bénéfices marginaux par rapport à celle des coûts marginaux. Lorsque le coût marginal de réduction de la pollution augmente très vite par rapport aux bénéfices de la dépollution, la meilleure solution est la taxe. La taxe permet de mieux contrôler le coût de la dépollution ce qui est un atout important lorsque les coûts de l'action évoluent plus vite que les coûts des dommages environnementaux.

En ce qui concerne le phénomène du changement climatique, les coûts environnementaux ne sont pas en rapport direct avec le flux des émissions mais avec la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Pizer, 1999).³⁰² Dans ce cas de « pollution-stock », le coût de la dernière unité de production est faible et surtout inférieur au coût de la réduction des émissions, ce qui serait un autre argument en faveur des taxes.

Efficiences dynamique

Une autre question importante est l'efficacité dynamique des instruments en présence d'information imparfaite. La notion d'efficacité suppose que la réduction de la pollution est faite au moindre coût (Jaffe et al., 2005). C'est-à-dire que les technologies sont employées de manière optimale en accord avec le potentiel et les coûts respectifs (Menanteau et al., 2003). Cette définition donne lieu à une double interprétation. La première interprétation conduit à l'approche coût-efficacité : la minimisation des coûts pour la concrétisation d'un objectif environnemental donné. Il s'agit de l'efficacité statique de la réduction des externalités environnementales. La deuxième interprétation concerne la capacité de générer des technologies plus efficaces à moyen et long

³⁰² Ceci est cohérent avec la vision du GIEC qui défend que le dépassement de certains seuils de concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère peut déclencher des ruptures climatiques.

termes (Menanteau et al., 2003 ; Jaffe, Newell et Stavins, 2003). Dans cette conception dynamique de l'efficacité, les instruments économiques créent des incitations à un progrès technique susceptible de rendre les innovations environnementales compétitives à terme.

En présence d'information parfaite, taxes ou permis ont des effets dynamiques similaires de réduction du coût marginal de dépollution (Bohm et Russel, 1985 ; Cropper et Oates, 1992). Cependant, le régulateur peut être contraint à une certaine « myopie » au sens où il ne connaît pas l'évolution des coûts de dépollution. Si les objectifs de réduction ne sont pas révisés en prenant en compte le progrès technique, ils deviennent alors trop modestes avec le temps ce qui n'incite pas les agents à l'innovation. Ce problème ne se passe pas dans le cas de la taxe puisque les firmes sont toujours incitées à l'innovation et à l'adoption de technologies peu polluantes.

En somme, la comparaison de l'efficacité des instruments économiques (prix ou quantités) ne donne pas une réponse claire quant à la supériorité de l'un sur l'autre. Le critère de décision de l'instrument doit prendre en compte les coûts et les avantages liés à leur mise en place au cas par cas. En ce qui concerne la politique de changement climatique, le choix de l'instrument dépend de l'évaluation relative des deux effets (Criqui et Bureau, 2009) : le risque du dépassement des seuils climatiques qui menacent la stabilité de l'écosystème ; et les coûts associés à la réduction de la pollution qui pèsent sur l'économie.

Ensuite nous analysons l'application dans la pratique des deux instruments, en ce qui concerne la taxation pigouvienne des carburants et le marché européen de quotas d'émission de CO₂.

B. La taxation des carburants

Un exemple de l'application des taxes environnementales est la taxation des carburants. Ces écotaxes permettent d'internaliser les externalités associées à l'utilisation de la voiture. Dans ce sens, la consommation de carburant tend à être plus faible dans les pays où les niveaux de taxes sont plus élevés (p.ex. en Union Européenne par rapport aux Etats-Unis). En outre, l'expérience montre que l'efficacité des automobiles est corrélée positivement avec le prix des carburants (Eskeland et Mideksa, 2008).

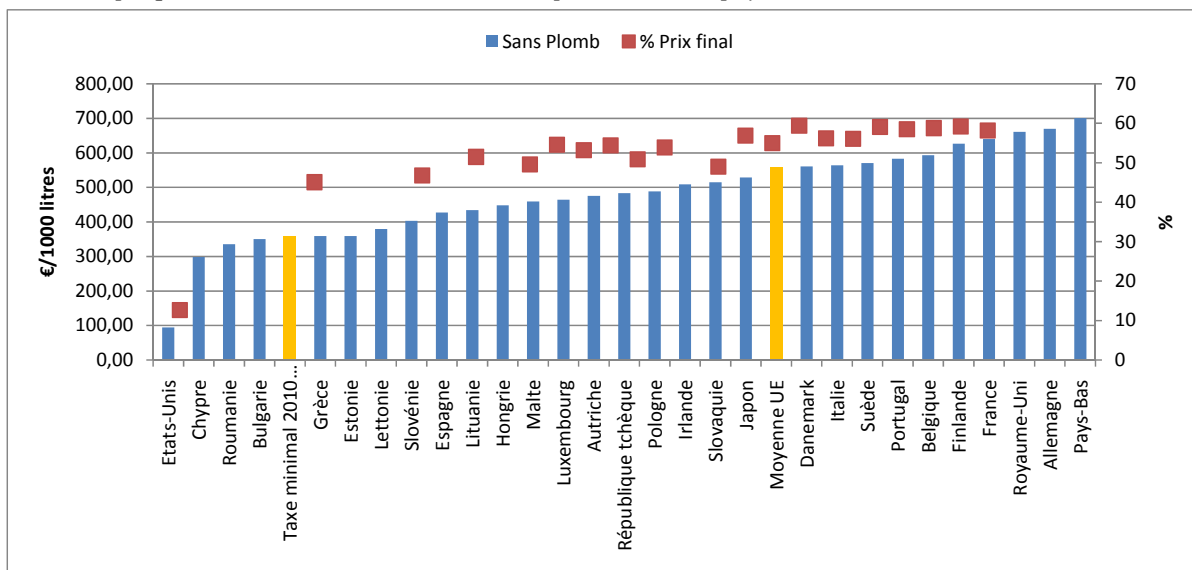
La combustion des énergies fossiles dans les transports est à l'origine de nombreuses externalités négatives, dont les émissions polluantes responsables de la dégradation de la qualité de l'air et du renforcement du phénomène du changement climatique. La pollution de l'air provoquée par le rejet des gaz comme le monoxyde de carbone (CO), l'oxyde d'azote (NO_x) et les particules organiques volatiles (VOC), est associée aux problèmes des pluies acides, des émissions de particules et de l'ozone, responsables de la dégradation de l'air dans les villes. Le nombre de morts a été estimé à 4 millions par an dans les pays de l'UE-27, provoqués par les niveaux élevés de pollution de l'air (AEE, 2008). De plus, un tiers environ des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) - associées au phénomène de réchauffement climatique – est dû à l'utilisation de carburants fossiles pour les véhicules à moteur, l'aviation et les trains au gazoil (AEE, 2005).

En présence d'externalités négatives, le prix ne prend pas en compte tous les coûts sociaux de la voiture. Les consommateurs payent alors un prix inférieur à celui qui serait dû si tous les effets externes étaient internalisés, et donc la consommation est trop élevée par rapport à la situation

optimale (Fauchaux et Noël, 1995). L'imposition d'une taxe de la même valeur que la différence entre le coût marginal social et privé permet un retour à l'optimum de premier rang (Cropper et Oates, 1992). De plus, son application rend l'environnement concurrentiel plus juste pour la pénétration d'innovations propres.

De nombreuses études ont montré que l'élasticité-prix de la demande de carburants à long terme est assez importante et donc la meilleure façon de réduire la consommation de carburant est de la taxer (Dahl et Sterner, 1991 ; Graham and Glaister, 2004).³⁰³ Le graphique suivant dresse un panorama des taxes sur les carburants dans les pays de l'Union Européenne, Etats-Unis et Japon.

Graphique 76. La taxation de l'essence sans plomb dans les pays de l'OCDE



Compilation de données : AIE, 2008d ; Commission Européenne, 2009.

Les informations concernant la charge d'impôt par 1000 litres disent respect à 31 octobre 2008 (CE, 2008). Le poids d'impôt est calculé par rapport aux prix finals en vigueur en 30 septembre 2008 (AIE, 2008d).

Les charges sur les carburants pour les Etats-Unis comprennent déjà l'impôt sur la valeur ajoutée (TVA).

Bien que les écarts de taxation entre les pays européens aient diminué récemment (Sterner, 2007), ils persistent encore. Par exemple, l'Espagne applique des charges fiscales sur les carburants (taxes et TVA) significativement moins élevées en comparaison avec les pays voisins, la France et le Portugal. Un autre exemple est le Luxembourg qui pratique une fiscalité des carburants plus douce que les

³⁰³ Dahl et Sterner (1991) utilisent un modèle économétrique pour expliquer la demande de carburant G_i , pour le pays i , au moment t , comme fonction du rendement Y , du prix P , et de la valeur prise dans la période précédente traduisant les effets de mémoire dans le modèle :

$$G_t = \alpha P_t^{-\beta} Y_t^\gamma G_{t-1}^\delta$$

Les élasticités de court terme par rapport au revenu et au prix peuvent être directement identifiées dans l'expression ci-dessus : α et β , respectivement. Les élasticités à long terme sont données par l'expression $\alpha/(1-\delta)$ pour le revenu et $\beta/(1-\delta)$ pour l'élasticité-prix de la demande.

Les auteurs ont trouvé une élasticité-prix moyenne de la demande de carburant à court terme de -0,26 et à long terme entre -0,6 et -1. Ce modèle a été amplement appliqué pour la demande de carburant de nombreux pays. Graham et Glaister (2004) font une révision de centaines d'études publiées. Les élasticités se situent souvent dans une fourchette assez étroite. Ainsi, les élasticités des prix à court terme se situent entre -0,2 et -0,3 ; celles à long terme entre -0,6 et -0,8.

pays du voisinage. Des critères autres que les arguments environnementaux sont à la base de cette décision (p.ex. volonté d'augmenter la vente de carburants pour les voitures étrangères).

La taxation des carburants est en moyenne plus importante en Europe que par exemple aux Etats-Unis (près de 45% du prix final en Europe contre 12% aux Etats-Unis), ce qui se répercute dans un prix final plus élevé (entre 100 et 120 %) et une consommation per capita qui est le quart de celle aux Etats-Unis (Hammar et al., 2004 ; Sterner, 2007).³⁰⁴ Les théories de l'économie politique peuvent apporter quelques explications à de tels écarts de taxation entre les pays.

Ainsi, les différences de taxation seraient fonction de la résistance à l'impôt, du poids des groupes de pression, et des comportements électoralistes. Premièrement, les niveaux plus élevés de consommation diminuent l'acceptabilité de la taxation des combustibles de la part des consommateurs, de l'industrie du pétrole et de l'automobile (Hammar et al., 2004 ; Parry, Walls et Harrington, 2006 ; Sterner, 2007). Deuxièmement, les hommes politiques peuvent être vulnérables à l'action des groupes d'intérêts de la manière décrite par les théories de la capture du régulateur (Stigler, 1971 ; Peltzman, 1976). Enfin, les bénéfices environnementaux de l'augmentation des taxes sur les carburants se voient surtout à plus long terme, alors que les politiciens sont concernés par la réélection à court terme et les coûts politiques de la réaction à cette augmentation peuvent être élevés (Buchanan et Tullock, 1965 ; Stavins, 2004).

Par ailleurs, la taxation des carburants ne résout pas toutes les externalités des transports. La littérature distingue normalement deux types d'externalités selon que celles-ci sont liées à la consommation de carburant ou bien au nombre de kilomètres parcourus (Parry, Walls et Harrington, 2007 ; Eskeland et Mideksa, 2008). La taxe sur les carburants permet d'internaliser les externalités associées à la sécurité énergétique et aux émissions de gaz à effet de serre, lesquelles dépendent directement de la combustion de carburants fossiles. Cependant, elle n'est pas en mesure d'internaliser les autres externalités liées à l'utilisation de l'automobile comme le bruit, la congestion, la pollution de l'air ou les accidents.³⁰⁵

Malgré toutes les limitations, la taxation des carburants reste un instrument économique puissant pour l'internalisation des effets externes des transports. D'après la directive 2003/06/CE, la taxation minimale des carburants en Europe en 2007 était de 162 €/tCO₂ pour l'essence et de 145 €/tCO₂ pour le gazole (en 2010 les valeurs seront de 153 €/tCO₂ et de 116 €/tCO₂ respectivement).³⁰⁶ Cela est à mettre en perspective avec un prix des permis d'émission sur le marché européen de 20 €/tCO₂ en moyenne pour la première période du système entre 2005-2008. Cependant, la taxe sur les carburants n'a souvent pas comme seul objectif d'internaliser les dommages environnementaux. Dans la pratique, elle sert fréquemment comme une importante source de recettes fiscales dont une partie est généralement affectée au financement des infrastructures routières (surtout lorsque les routes ne sont pas couvertes par un système de péages).

³⁰⁴ Sterner (2007) montre que si l'Europe avait suivi la politique fiscale américaine dans le passé, la consommation de carburant serait aujourd'hui le double des niveaux actuels.

³⁰⁵ Une manière efficace d'internaliser les externalités liées au nombre de kilomètres parcourus est la mise en place d'un système de charges différencié par kilomètre (péages d'autoroute, d'entrée dans la ville, parking, etc.). Voir : CE-Delft (2008) ; Parry, Walls et Harrington (2006).

³⁰⁶ Depuis 2007 la Norvège prend en compte les émissions de CO₂ par kilomètre dans la formule de taxation des voitures nouvelles.

C. Le système européen d'échange de quotas d'émission

L'expérience relativement bien réussie du marché de permis de SO₂ dans le cadre du programme américain de lutte contre les pluies acides a encouragé l'élargissement de cet instrument à d'autres gaz responsables du réchauffement climatique comme le CO₂ (Ellerman, 1999).³⁰⁷ Le système européen d'échange de quotas ('*European Trading System*' ou ETS) est en place depuis 2005. Il s'agit d'un effort pionnier pour donner une valeur économique au carbone, mais le bilan de la première phase (2005-07) est loin d'être satisfaisant.

L'Union Européenne a mis en place un marché intérieur d'échange de quotas d'émission de CO₂ afin de respecter les engagements signés dans le cadre du protocole de Kyoto en matière de lutte contre le changement climatique, de la manière la plus économique possible pour les pays membres. Il s'agit d'un modèle de « *cap and trade* » : les quantités annuelles d'émission sont établies au niveau politique et allouées aux entreprises ; l'objectif initial est réparti entre les différentes installations sous forme de quotas d'émission ; les installations couvertes par le mécanisme doivent détenir un volume de quotas équivalent au niveau d'émission qu'elles effectuent ; les entreprises dépassant leurs plafonds d'émissions peuvent acheter des quotas auprès d'entreprises plus performantes de manière à minimiser les coûts économiques de la dépollution.

La directive « ETS » 2003/87/CE établit les principes d'organisation du système. Deux périodes ont été spécifiées, la première court de 2005 à 2008 et permet la préparation au passage pour la première période d'engagement du protocole de Kyoto entre 2008 et 2012. Parmi les secteurs concernés par le système ETS figurent les centrales de production d'énergie de plus de 20 MW, l'industrie sidérurgique, l'industrie du verre, du ciment, de la poterie et de la brique. Ensemble, ces secteurs représentent près de 45% des émissions totales de CO₂ de l'Union.

L'objectif est de créer des incitations à l'investissement dans un système énergétique plus soutenable. Les impacts sont toutefois limités par l'étendue du champ d'action. Le secteur des transports n'est pas couvert par le système, le secteur du bâtiment non plus. En outre, le système ETS n'a pas réussi à donner un prix du carbone stable pendant la première phase.³⁰⁸ La sur-allocation de quotas d'émission pendant la phase initiale a fait chuter les prix des permis d'émission à la fin de la première période (graphique 77).³⁰⁹

³⁰⁷ Banks (2008) relativise l'argument du succès de la déréglementation avec l'exemple des problèmes de fonctionnement du marché nordique d'électricité NordPool. De plus, l'auteur défend que la taxe est préférable au système d'échange de permis en raison d'une plus grande maîtrise des coûts ; de la neutralité de rendement et de la moindre capacité des firmes à influencer la définition de la contrainte.

³⁰⁸ La Commission a indiqué un prix du crédit d'émission situé dans une fourchette de 8 à 30 €/tCO₂. De cette manière, elle a fixé l'amende à 40 €/tCO₂ pour la période 2005-2007 et de 100 €/tCO₂ pour la période 2008-2012 en direction des entreprises dépassant leur objectif individuel. Voir par exemple <http://www.euroactiv.com>

En France, le CO₂ entre dans les calculs économiques des nouvelles infrastructures publiques depuis 2001. La valeur du carbone utilisée a été définie à partir du « rapport Boiteux », elle est de 32 €/tCO₂ (prix de 2008). Un rapport du Centre d'Analyse Stratégique (2008) a entretemps mis à jour cette valeur en prenant en compte les engagements de la France en termes de lutte contre le changement climatique, les nouvelles données scientifiques sur le phénomène, et l'approche coût-efficacité. Le rapport considère que le prix du carbone doit atteindre 56 €/tCO₂ en 2020, 100 en 2030 et 200 en 2050.

³⁰⁹ Ce problème a été amplifié par les crédits alloués dans le cadre des mécanismes de flexibilité du protocole destinés à prendre en compte les actions menées en-dehors de l'UE. C'est le cas des crédits pour la mise en œuvre conjointe (MOC) ou à travers le mécanisme de développement propre (MDP). L'idée est de permettre le transfert de technologie et la réduction des émissions dans les pays en développement où la croissance économique et de population prévue pour les prochaines décennies fait anticiper une augmentation

Graphique 77. Le prix du permis d'émission dans l'UE entre août 2005 et mars 2009 en €/tCO₂



Source : European Energy Exchange, 2009.

La volatilité des prix du permis est susceptible de bloquer l'investissement dans les technologies à faible émission de CO₂. Ceci est un argument en faveur de la taxe carbone qui a l'avantage de fournir un prix plus stable du CO₂ (Nordhaus, 2006). Le gouvernement fixe la taxe qui reste stable jusqu'à un changement majeur du contexte politique ou d'une révision des résultats à moyen terme. Dans le cas du marché d'émissions, la valeur du CO₂ est donnée par l'allocation politique des objectifs et à chaque instant par la confrontation entre la demande et l'offre de permis. Ceci pose un problème additionnel de nature dynamique pour les changements technologiques structurels. Il est raisonnable de supposer que les premières actions de réduction d'émissions seront les plus faciles et les moins chères à entreprendre. Plus tard, l'arrivée sur le marché des permis liés à ces actions ramène à la baisse le prix du CO₂ au moment où une incitation plus forte serait nécessaire afin d'assurer la viabilité des projets plus chers et présentant un grand potentiel de réduction des émissions (Wittneben, 2009).

Une autre critique adressée au système européen d'échange de quotas d'émission tient aux rentes ('windfall profits') qui ont été générées. Par exemple, les compagnies électriques ont augmenté le prix final de l'électricité afin de prendre en compte le coût du CO₂, alors que les permis avaient été accordés à titre gratuit. Ainsi, les premières années du marché d'émission européen auraient dégagé 70 milliards d'euros de « windfall profits » au bénéfice des électriciens.³¹⁰

Dans l'avenir, le prix du CO₂ va dépendre des engagements européens en matière de réduction des émissions. A la fin du Conseil de Ministres de mars 2007, les pays membres se sont mis d'accord pour réduire les émissions de gaz à effet de serre de 20% en 2020 par rapport aux niveaux de 1990, ou de

importante des émissions des gaz à effet de serre. Ces mécanismes permettent aux pollueurs européens de compenser une partie de leurs obligations environnementales par le financement de projets de réduction d'émissions moins coûteux. Ils ont l'inconvénient de réduire la demande pour les quotas sur le marché.

Entretemps, la Commission a reconnu officiellement en mai 2006 l'attribution excessive de permis d'émission. Elle a donné l'exemple de l'Allemagne qui a disposé de 44,1 millions de permis de CO₂ supplémentaires pour l'année 2005. <http://www.euroactiv.com> (accédé le 15 mai 2009).

³¹⁰ http://regserver.unfccc.int/seors/attachments/file_storage/3p5hkuxvz9i4ety.pdf

30% en cas d'un engagement international.³¹¹ Le nouveau régime a été approuvé par le Parlement le 17 décembre de 2008 et concerne la période post-2013, avec quelques changements importants comme : i) l'élargissement du champ d'action à de nouveaux secteurs (notamment la chimie, la pétrochimie, l'aluminium) ; ii) deux nouveaux gaz (oxyde d'azote et perfluorocarbène), totalisant ainsi près de 50 % de l'ensemble des émissions de l'Union ; et iii) la vente aux enchères remplaçant l'attribution gratuite de permis (près de 60 % des crédits seront vendus aux enchères en 2013, ce pourcentage augmente graduellement jusqu'à atteindre 100% en 2027).³¹²

La production d'hydrogène pour les transports peut être concernée par le système à partir de 2013. Selon le texte de la révision de l'ETS, le système va s'appliquer à toutes industries émettrices, dont l'industrie chimique de production d'hydrogène. Cela peut rendre d'avantage difficile la pénétration de l'hydrogène dans le marché. Des solutions telles que la dérogation ou l'attribution gratuite des crédits peuvent être mises en place pour que la compétitivité de l'hydrogène ne soit pas affectée par la nouvelle configuration du système (Bleischwitz et Bader, 2008).

D. Les limites des instruments économiques pour stimuler le changement technologique

Dans le cas de nouvelles technologies énergétiques plus efficaces et propres, il est important que les ressources épargnées et les émissions évitées aient une valeur économique de manière à combler l'écart prix/performance par rapport aux technologies existantes. Toutefois, la prise en compte de la valeur du carbone est une condition nécessaire mais pas suffisante pour promouvoir le changement technique.

Le tableau suivant montre l'impact d'une taxe carbone (ou permis d'émission) de 15€ et 30€, respectivement,³¹³ sur les prix de trois sources fossiles primaires (gaz naturel, pétrole, charbon), du kWh électrique français et européen, et des carburants pour les transports particuliers (essence, gasoil).

³¹¹ La communauté internationale déterminera en décembre 2009, à la conférence de Copenhague, les engagements mondiaux de réduction des gaz à effet de serre à l'horizon 2020. Entretemps, la nouvelle administration américaine a annoncé son intention de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 14 % par rapport à 2005, avant 2020, et de 83 % en dessous de 2005 avant 2050. Ces objectifs ont encore besoin de l'approbation par le Congrès américain, dont la majorité est démocrate.

³¹² La directive 'ETS' prévoyait que les Etats membres allouent au moins 95% des quotas à titre gratuit pendant la première période 2005-2007, 90% pour la deuxième période 2008-2012.

³¹³ Une taxe de 15€ est en rapport avec la valeur moyenne du CO₂ sur le marché européen d'échange de quotas depuis le début en 2005, et la taxe de 30€ suit la valeur tutélaire du carbone en France (CAS, 2008).

Tableau 37. L'impact de la taxe carbone sur les prix de l'énergie à court terme

	Unité	Prix par unité (€2008)	Taxe 15€ par tonne CO ₂		Taxe 30€ par tonne CO ₂	
			Taxe par unité d'énergie	Impact sur le prix (%)	Taxe par unité d'énergie	Impact sur le prix (%)
Gaz naturel	€/10 ⁶ BTU	8,9	1,16	17	2,33	26,18
Pétrole	€/Baril	75	4,69	6,25	9,38	12,5
Charbon	€/Tonne	60	42	70	84	140
Mix électricité						
-France	€-ct/kWh	11,56	0,135	1,16	0,27	2,34
-Moyenne UE	€-ct/kWh	14,28	0,666	4,66	1,332	9,26
Essence	€-ct/Litre	1,1	3,42	3,1	6,83	6,21
Gazole	€-ct/Litre	1	3,94	3,94	7,88	7,88

Source : Calculs de l'auteur. Les facteurs d'émission de CO₂ de l'essence et gazole sont tirés de CE-Delft (2008) ; ceux des sources primaires fossiles du CAS (2008b) ; enfin, ceux du mix électrique à partir du rapport « Le contenu en CO₂ du kWh électrique: Avantages comparés du contenu marginal et du contenu par usages sur la base de l'historique. », RTE, ADEME, novembre 2007. Les prix des carburants sont les prix moyens en vigueur dans l'Union Européenne en octobre 2008 (Commission, Européenne, 2009). Le prix des énergies primaires fossiles et de l'électricité ont été retirés de la base de données Enerdata (« Global Energy & CO₂ Data », Avril, 2008). Le prix du pétrole correspond à la moyenne annuelle de la cotation spot du Brent en 2008. Le prix du gaz naturel est celui utilisé pour la production électrique. Le prix du charbon correspond au charbon vapeur vendu à l'industrie en Europe (prix 'cif' en avril 2009, le coût de transport inclus). A l'exception du cours du Brent, tous les autres prix sont des prix finals (taxes incluses).

L'impact de la taxe sur le pétrole et le gaz naturel est très limité. L'application d'une taxe de 15€ aurait ajouté presque 5 euros au prix moyen du baril de pétrole, en assumant que la taxe est passée intégralement dans le prix final à court terme. Ceci correspond à une augmentation de 6,25%. Le prix du gaz naturel aurait augmenté de 1,16 euros par milliard de BTU, soit 17%. L'augmentation la plus significative est celle du prix du charbon qui augmente de 42 euros par tonne, soit plus de 70%. Une taxe carbone de 30€ augmente le prix du charbon de presque 140% ! La contrainte carbone peut compromettre sérieusement la compétitivité de la filière charbon, à moins que la technologie de capture et séquestration de carbone soit appliquée, laquelle facilite en même temps la production non polluante d'hydrogène. L'imposition d'une valeur pour le carbone est une condition nécessaire pour la viabilité financière de tels projets.

Le prix final de l'électricité dans l'Union Européenne aurait augmenté de presque 5% avec une taxe carbone de 15€, ce qui est moins important que l'augmentation de 14% en réponse à une taxe carbone de \$15 aux Etats-Unis (Metcalf, 2008). Cela s'explique par l'importance du charbon dans le mix électrique américain. En France, une taxe carbone aurait un impact très faible sur les prix finals de l'électricité grâce au rôle de la production nucléaire qui répond à plus de trois quarts des besoins électriques du pays.

La taxe risque aussi d'avoir des résultats limités dans le secteur des transports particuliers. La mise en place d'une taxe carbone de 15€ sur les carburants (essence et gasoil) augmente leur prix moyen de 3,5 centimes. Dans le cas d'une taxe à 30€, l'augmentation est de 7 centimes ce qui correspond à une augmentation de 7% par rapport au niveau de prix enregistré en octobre 2008, alors que les prix des carburants étaient substantiellement inférieurs à ceux des mois précédents. En outre, les effets de la taxe carbone seraient limités par une élasticité de la demande faible à court terme (Hughes et al., 2008).

En bref, la taxe carbone bénéficie en premier lieu aux technologies renouvelables les plus proches de la commercialisation comme l'éolien. A part l'incitation immédiate à la mise en place de la

technologie de capture et séquestration du carbone dans le cas de la filière charbon, la taxe n'est pas en mesure de provoquer un changement technologique majeur. Cela est d'avantage clair dans le cas des transports. Ainsi, la politique technologique ne doit pas se résumer à la mise en place d'une taxe ou d'un marché de permis d'émission. Afin de stimuler les technologies de long terme, ces politiques doivent être accompagnées de mécanismes plus spécifiques comme les normes et les politiques de soutien technologique.³¹⁴

3.1.2. L'instrument réglementaire : les normes technologiques

La réglementation concerne les régimes spéciaux d'interdiction ou d'autorisation, de surveillance et de contrôle, publiés par l'autorité publique ayant comme objet la défense de l'environnement.³¹⁵ La réglementation force les agents à adopter un certain comportement indépendamment de leurs coûts de mise en conformité, d'où la désignation de mécanismes '*command-and-control*' (Faucheu et Noël, 1995). Dans la plupart des cas, il s'agit de réglementation de performance ou d'obligation d'utilisation d'une certaine technologie. Les normes de performance fixent un objectif pour les firmes en termes de caractéristiques des produits (la quantité de pollution par unité produite, par exemple). Elles donnent au pollueur la flexibilité de décision pour satisfaire une certaine exigence environnementale, il s'agit d'une obligation de résultat plutôt que de moyens (Jaffe et al., 2003). Cependant, son efficacité dépend de la capacité du régulateur à contrôler la conformité des agents à la norme. Lorsque l'information est facilement disponible, les normes sont des instruments simples et efficaces de dépollution. A l'inverse, dans un environnement incertain, cette mesure réglementaire peut donner des résultats moins bons.

A leur tour, les standards technologiques fixent les technologies à mettre en place (p.ex. obligation d'équiper les voitures diesel de filtres à particules). Les politiques réglementaires de ce genre sont utilisées pour forcer la diffusion d'une certaine technologie en dissipant les incertitudes concernant les caractéristiques du produit, en particulier la compatibilité entre les composantes (Katz et Shapiro, 1985). Cela se fait normalement par la substitution de technologies existantes, plus économiques mais aussi moins propres (Jaffe et al., 2005). De cette manière, la fixation des standards technologiques contribue à la diffusion d'informations relatives à la nouvelle technologie retenue.

Par rapport aux normes de performance, les standards technologiques ont généralement des coûts de contrôle moins importants (Bohm et Russell, 1985). Ils sont particulièrement adaptés lorsque la meilleure technologie (praticable ou disponible) est facilement identifiable. Cependant, des doutes peuvent exister quant aux bénéfices des technologies, spécialement lorsqu'elles sont encore à l'état de développement. Notons encore que dans la réalité, les agents ne sont pas homogènes et ils peuvent avoir des solutions technologiques différentes pour obtenir le même objectif environnemental. Cette rigidité est souvent considérée comme source de problèmes d'incitation.

Les analyses théoriques comparatives des avantages des différents instruments concluent généralement à la supériorité des instruments économiques (taxes ou permis) par rapport aux

³¹⁴ Voir point 3.2.

³¹⁵ « a directive to *individual* decision-makers requiring them to set one or more output or input quantities at some specified levels or prohibiting them from exceeding (or falling short of) some specified levels. » (Baumol and Oates, 1988).

normes et standards.³¹⁶ Magat (1979) a comparé les taxes, subventions, permis et normes, pour la réduction de la pollution. L'auteur conclut que tous les instruments créent des incitations à l'innovation à l'exception des normes, à moins que ces dernières obligent à la même réduction de pollution que la taxe ce qui leur permettrait d'atteindre des performances similaires. En outre, l'agent essaye de satisfaire la norme sans chercher à la dépasser (Jaffe et al., 2005). Cela est particulièrement le cas lors des révisions fréquentes des normes les rendant à chaque fois plus strictes, les agents craignant dans ce cas un effet de cliquet (Faucheux et Noël, 1995).

La prise en compte de l'incertitude sur les dommages environnementaux peut toutefois changer l'efficacité relative des instruments économiques (Cropper et Oates, 1992). L'absence d'information sur les bénéfices et les coûts de dépollution affectent l'efficacité des instruments (Bohm et Russell, 1985 ; Baumol et Oates, 1988). Plus concrètement, les bénéfices relatifs des instruments économiques et des politiques '*command-and-control*' changent selon la disposition de la courbe de réduction marginale des externalités environnementales et la courbe de dépollution (Weitzman, 1974). Ainsi, en terme dynamique, lorsque le coût marginal des dommages environnementaux augmente très fortement au voisinage du point initial, les standards peuvent être préférables pour un résultat environnemental satisfaisant à un coût contrôlé.

Malgré les avantages théoriques des instruments économiques (taxe, permis) en termes de réduction de la pollution au moindre coût et d'incitation à l'innovation, les instruments réglementaires sont le plus souvent utilisés dans le quotidien (Keohane et al. 1998 ; Stavins, 2003). Cela pose la question des raisons sous-tendant la préférence des politiciens pour les normes et standards.

Le choix des politiques doit prendre en compte non seulement l'efficacité théorique des instruments, mais aussi leur faisabilité politique. Dans un article séminal, Buchanan et Tullock (1975) expliquent pourquoi les instruments de contrôle direct (quotas, normes) sont privilégiés en dépit des vertus théoriques des taxes. Les auteurs estiment que les entreprises préfèrent les instruments réglementaires parce qu'elles peuvent mieux influencer le niveau de contrainte. De même, les réglementations sont plus faciles à changer que les taxes et donc plus fragiles aux influences des groupes d'intérêt (Keohane et al., 1998). Ce type de réglementation peut aussi augmenter les obstacles à l'entrée sur le marché (comme les standards environnementaux) ce qui génère des rentes pour les firmes installées, alors que les taxes réduisent directement leurs profits.

Par ailleurs, Schneider et Volkert (1999) présentent quelques raisons pour lesquelles l'administration peut privilégier les politiques réglementaires. Tout d'abord, les coûts pour les consommateurs sont moins visibles que dans le cas des taxes. Deuxièmement, les instruments réglementaires permettent aux politiciens de montrer des résultats immédiats avec des coûts moins visibles pour les électeurs. Enfin, les politiques réglementaires offrent plus de pouvoir aux bureaucrates ce qui leur permet de maximiser leur influence et leur budget.

A la suite, nous analysons deux normes de performance (les obligations d'énergies renouvelables et les standards d'émission des voitures) dont la popularité a significativement augmenté au cours des dernières années.

³¹⁶ Pour une révision de la littérature des instruments environnementaux, voir par exemple Kemp (1997) et Jaffe et al. (2003).

A. Les obligations d'incorporation d'énergies renouvelables

Les obligations de marché sont un moyen de promouvoir l'utilisation de sources renouvelables d'énergie. En obligeant les entreprises à acquérir un pourcentage d'énergie verte, l'Etat prétend inciter les agents à investir dans les technologies renouvelables plus proches de la commercialisation. En effet, le fait d'obliger les firmes à un pourcentage d'énergies renouvelables contribue à combler l'écart de coût entre les technologies vertes par rapport aux technologies conventionnelles (du moins en prenant en compte le montant de l'amende). Cela permet aussi de réduire les incertitudes d'investissement en raison d'une volonté politique affichée de développer la filière renouvelable. Cette mesure a notamment bénéficié au développement de la filière éolienne aux Etats-Unis (Norberg-Bohm, 2000) et en Europe (Jacobsson et al., 2009 ; Butler et Neuhoff, 2008).

La directive 'Res-e' (2001/77/EC) fixe à 21% la part d'électricité d'origine renouvelable devant être produite dans l'Union Européenne en 2010. Cet objectif a été revu à la hausse à l'issue du Sommet de l'Union en mai 2007 passant à 20% de l'énergie consommée en Europe en 2020.³¹⁷

L'imposition d'un objectif concernant les renouvelables peut être accompagnée de mécanismes de flexibilité permettant aux agents de respecter les engagements au moindre coût. Ceci est notamment le cas des certificats verts. Le principe de fonctionnement est le suivant : les agents pour lesquels le respect de l'objectif est très onéreux peuvent acheter les quotas aux producteurs d'énergie renouvelable les plus efficaces. Le système est doublement incitatif dans la mesure où le producteur vend l'électricité d'origine renouvelable au prix de marché et en plus reçoit le prix du certificat (Menanteau et al., 2003).

La Commission Européenne pondère actuellement la mise en place d'un marché de certificats verts à l'échelle européenne. Les critiques de cette mesure signalent toutefois que son application en Suède, dans les Flandres et au Royaume-Uni, n'a pas eu de bons résultats (Jacobsson et al., 2009). Dans les trois cas, les certificats verts ont permis l'obtention de profits significatifs au bénéfice des grandes compagnies électriques. Etant donné que le prix du certificat est déterminé par la dernière technologie transactionnée dont le coût marginal est le plus élevé, les exploitants des autres technologies obtiennent des rentes importantes. De plus, ce système a favorisé la diffusion de technologies matures en dépit des innovations énergétiques encore à l'état de développement. Cela a été le cas des systèmes de cogénération d'électricité et de chaleur à partir de la biomasse en Suède ; de l'éolien au Royaume-Uni ; ou de l'éolien et de l'exploitation des déchets municipaux dans les Flandres (Jacobsson et al., 2009). Ainsi, la mise en place d'un marché de certificats verts au niveau européen empêcherait la formation de niches de marché permettant aux nouvelles technologies d'augmenter leur capacité installée et de progresser par des gains d'apprentissage.

³¹⁷ La nouvelle politique de l'UE en matière d'énergie et d'environnement commence à se définir à partir du premier paquet de mesures (le « paquet énergie ») présenté par la Commission Européenne en janvier 2007. Dans ce document, la Commission propose un programme de mesures destinées à atteindre les objectifs de fond en termes de développement durable, de compétitivité et de sécurité de l'approvisionnement. Pour cela, la Commission propose que l'UE s'engage à mener l'initiative « 20-20-20 », qui consiste à réduire de 20% (30% en cas d'accord international) les émissions de gaz à effet de serre, à ramener à 20% (et non pas 8,5% prévu dans la législation précédente) la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique et améliorer de 20% l'efficacité énergétique, le tout avant 2020. Cette initiative a été approuvée par le Conseil Européen de mars 2007.

Une question importante est de savoir si les obligations d'énergies renouvelables servent aussi pour assister le développement de l'hydrogène dans le marché. Nous avons vu que le mécanisme a participé au déploiement des énergies renouvelables, en particulier la filière éolienne. Cependant, la situation de l'hydrogène est plus complexe par rapport à la problématique du support aux techniques de production d'électricité d'origine renouvelable (Bleischwitz et Bader, 2008). D'une part, ce ne sont pas seulement les barrières au niveau de la production qu'il faut lever, mais aussi au niveau de l'infrastructure et de l'utilisation finale (p.ex. la voiture pile à combustible à hydrogène). D'autre part, une différence doit être faite entre le soutien à l'hydrogène en général et celui plus spécifique à l'hydrogène produit à partir de sources renouvelables dont l'utilisation reste plus coûteuse mais ayant plus de bénéfices à long terme (Clark et Rifkin, 2006). Ainsi, les obligations peuvent être un moyen de promouvoir la production d'hydrogène à partir de sources renouvelables et ainsi d'accélérer la réalisation des objectifs de long terme. Toutefois, il est probable que plusieurs Etats-membres ne réussissent pas à respecter les objectifs ambitieux fixés pour 2010 et 2020 et il risque donc de ne pas y avoir assez d'énergie renouvelable disponible pour la production d'hydrogène à grande échelle (Bleischwitz et Bader, 2008).

B. Standards ou taxes pour augmenter l'efficacité dans les transports ?

La part croissante des transports dans la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre rendent nécessaire l'adoption de mesures permettant d'améliorer l'efficacité énergétique. Cela peut être atteint par l'accroissement des taxes sur les carburants ou bien par l'imposition de normes ou standards d'efficacité. Concernant ce dernier point, les autorités publiques fixent l'objectif d'amélioration de l'efficacité énergétique des voitures en prenant en compte les ambitions environnementales et la technologie disponible et émergente.³¹⁸ Les exigences en termes d'économie de carburant ouvrent une opportunité pour les nouvelles technologies comme l'hydrogène. Cependant, cela conduit aussi à des améliorations des moteurs conventionnels et augmente de cette façon les défis pour les alternatives technologiques.

Le choix de l'instrument pour réduire la consommation de carburant – et par conséquent les émissions de gaz à effet de serre – ne fait pas de consensus dans la littérature. L'amélioration de l'efficacité des véhicules induite par la mise en place du standard peut entraîner un effet de rebond de la consommation (Goulder et Parry, 2008 ; Small and Van Dender, 2007). Cela s'entend au sens où les consommateurs sont incités à rouler plus en raison de la diminution du coût par kilomètre en générant ainsi plus d'externalités négatives liées à une plus grande utilisation de la voiture (congestion, trafic, bruit, accidents). En revanche, la taxation des carburants induit une efficacité énergétique, tout en incitant à la modération dans l'utilisation de la voiture (Parry, Walls et Harrington, 2006).

Mais, les taxes sur les carburants connaissent aussi des limites dans l'amélioration de l'efficacité dans les transports. Premièrement, les consommateurs adoptent un comportement myope

³¹⁸ La fixation de l'objectif peut suivre essentiellement l'une des deux approches suivantes. Les objectifs sont fixés en prenant en compte les coûts de développement de la nouvelle technologie (approche dite coût-efficacité), ainsi que les paramètres financiers tels que le facteur d'actualisation et la période de récupération. Cette méthode est par exemple suivie en Europe et aux Etats-Unis. Une autre approche fait coïncider la norme avec la performance de la meilleure technologie disponible ou - encore plus contraignant - connue. Le programme japonais « top-runner » utilise cette approche alternative. Voir (AIE, 2008b).

concernant les décisions d'achat de voitures comme d'autres biens durables (Greene et al., 2005). Ils ne sont pas disposés à attendre longtemps pour que les économies de carburant compensent le prix plus élevé des voitures efficaces. Dans ce sens, la mise en place des standards produirait des effets plus rapides par rapport à une augmentation des taxes.³¹⁹ Deuxièmement, l'augmentation des taxes risque d'être confrontée à une grande résistance de la part des consommateurs (Goulder et Parry, 2008). Les conducteurs européens réagiraient alors à une nouvelle augmentation des taxes dont le niveau est déjà élevé. Aux Etats-Unis, l'évidence que la demande est devenue plus rigide vis-à-vis des changements de prix du carburant (Hughes et al., 2008) rend nécessaire des augmentations de taxes plus importantes pour produire les mêmes effets qu'auparavant. Ces augmentations risqueraient de se heurter à d'avantage de réactions adverses de la part des consommateurs et de l'industrie automobile (Hammar et al., 2004 ; Sterner, 2007).

Cependant, Eskeland et Mideksa (2008) montrent que la résistance politique à l'augmentation du prix du carburant diminue avec l'amélioration de l'efficacité de la voiture. Ainsi, l'adoption conjointe de taxes et de standards permettrait le dépassement de limites inhérentes à chacun des instruments en rendant en même temps le contexte plus favorable au relèvement des taxes dans l'avenir.

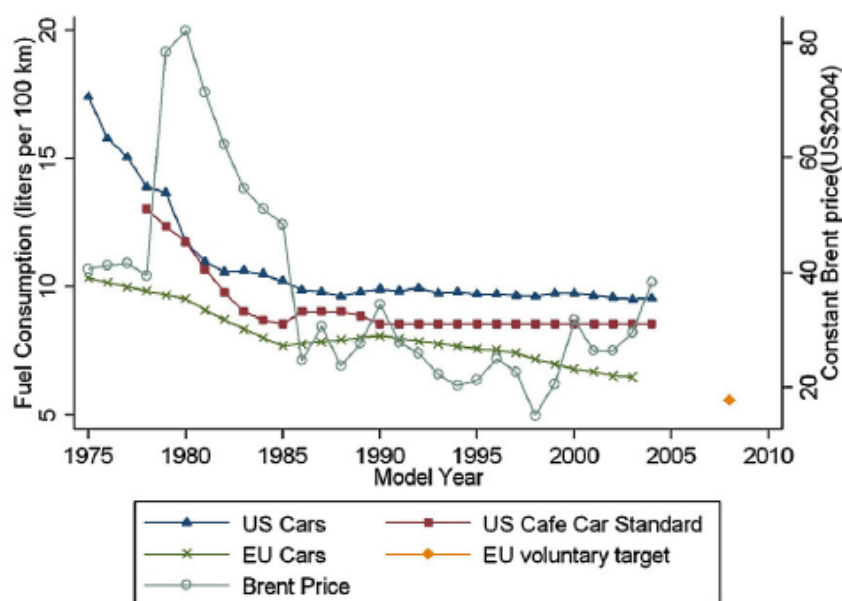
Un autre argument en faveur des standards concerne la crédibilité de l'instrument. Les anticipations de l'augmentation de la taxe ne se traduisent pas directement par une augmentation de l'investissement en technologie propre puisque les agents ne sont pas sûrs qu'elle aura une valeur permettant de rentabiliser l'investissement. A l'opposé, la norme peut être annoncée en avance de manière crédible et changer le comportement des agents avant même sa mise en place. Enfin, il est plus probable que les pays se mettent d'accord quant à l'application de standards internationaux de consommation pour les voitures que la mise en place commun d'une taxe sur les carburants.

Les standards de consommation automobile ont été amplement utilisés – d'une manière obligatoire ou volontaire - dans les pays développés depuis les années 1970.³²⁰ Dans une étude empirique pour la période 1975-2004, Clerides et Zachariadis (2008) ont trouvé des changements majeurs dans la tendance de consommation moyenne de carburants suite à la mise en place de standards au Japon, Etats-Unis et Europe (graphique 78). Les auteurs ont aussi montré que l'impact des normes a été plus prononcé que celui de l'augmentation des prix.

³¹⁹ Greene et al. (2005) s'appuient sur plusieurs études à propos du comportement des consommateurs américains pour estimer à 3 ans le temps moyen qu'ils sont disposés à attendre pour que les économies de carburant compensent le plus grand investissement initial (pour une durée de vie de la voiture de 14 ans).

³²⁰ Deux approches peuvent être suivies. Soit les constructeurs s'engagent volontairement à augmenter l'efficacité des voitures comme l'accord entre les marques et la Commission Européenne en 1995 ; soit ils sont contraints à le faire par une disposition réglementaire, à l'instar des standards légaux CAFE aux Etats-Unis. L'AIE (2008b) analyse les exemples d'application de standards volontaires et mandataires dans le monde. Le bilan d'application est mitigé. Dans un nombre important de cas, les standards fixés volontairement par les industriels n'ont pas atteint leurs objectifs (ex. Union Européenne, Japon, Australie). Dans d'autres cas, la mise en place de normes « mandataires » a généré des effets pervers en raison de défauts de conception du mécanisme (ex. Etats-Unis).

Graphique 78. Evolution de la consommation de carburant des voitures nouvelles aux États-Unis et dans les pays de l'Union européenne



Source : Clerides et Zachariadis, 2008.

Le secteur des transports figure parmi les plus grands émetteurs de gaz à effet de serre en Europe. Les émissions des voitures légères représentent près de 12% du total des émissions de CO₂. Dans le cadre d'un accord volontaire de 1998 conclu entre les constructeurs et la Commission, les premiers se sont engagés à réduire les émissions moyennes de CO₂ des voitures à 140 grammes de CO₂ par kilomètre à l'horizon 2008. Cependant, la moyenne des émissions est juste passée de 186 g/km à 163 g/km entre 1995 et 2004 ce qui a obligé la Commission à changer de stratégie.

En décembre 2008, le Conseil et le Parlement Européen ont adopté une version allégée de la proposition de règlement de la Commission visant à augmenter l'efficacité énergétique dans les transports et diminuer les émissions moyennes de CO₂ des nouvelles voitures vendues dans l'UE.³²¹ Le plan original de la Commission prévoyait d'instaurer une limitation obligatoire à 120 g/km en 2012. Après de longues discussions, les Etats membres ont fini par accepter une limitation progressive à 120 g/km des émissions de CO₂ de 65% des nouvelles voitures en 2012, 75% en 2013, 80% en 2014 et 100% en 2015.³²² Pour les autres voitures, un objectif de 130 g/km doit être atteint grâce à l'amélioration des moteurs. Les 10 g/km restant (pour l'objectif des 120 g/km) doivent être réalisés par des mesures complémentaires telles que l'utilisation de carburants alternatifs, meilleurs

³²¹ « Proposition de Règlement du Parlement Européen et du Conseil établissant des normes de performance en matière d'émissions pour les voitures particulières neuves dans le cadre de l'approche intégrée de la Communauté visant à réduire les émissions de CO₂ des véhicules légers » [COM(2007) 856], du 19 décembre 2007. Cette proposition fait suite à la Communication de la Commission au Conseil et au Parlement Européen, du 7 février 2007, intitulée « Résultats du réexamen de la stratégie communautaire de réduction des émissions de CO₂ des voitures et véhicules commerciaux légers » [COM(2007) 19], où la Commission exprime la volonté de rendre obligatoire l'objectif de 120 g/km pour les nouvelles voitures.

³²² Le calcul des émissions prend en compte plusieurs paramètres dont le poids des voitures. Les voitures plus lourdes ont une limite supérieure à 120 g/km, toutefois, le seuil a été calculé de manière à ce que les efforts pour réduire les émissions dans cette catégorie soient plus grands que ceux demandés aux voitures plus légères.

Voir http://ec.europa.eu/environment/air/transport/co2/co2_home.htm (accédé le 26 janvier 2009).

pneus et climatisation.³²³ L'accord prévoit encore un crédit additionnel de 7 g/km pour les constructeurs qui introduisent des innovations technologiques censées réduire les émissions de CO₂, faisant l'objet de vérification par un organisme indépendant.³²⁴

Une mesure proche des standards de consommation de carburant est la mise en place de labels énergétiques. Les gouvernements peuvent demander aux constructeurs de mettre en place des « écolabels », ou bien rendre leur application obligatoire. Cela permet d'informer les consommateurs sur les caractéristiques des voitures, ainsi que de mieux comparer les différents modèles. Cela permettrait en particulier de souligner les avantages environnementaux des technologies émergentes comme la voiture à hydrogène. Quelques exemples de mise en place volontaire des labels existent déjà avec des résultats toutefois modestes (AIE, 2008e).

3.2. Les instruments de soutien spécifique à l'hydrogène

L'internalisation des externalités environnementales à travers la fixation d'un prix pour le carbone n'est pas à elle seule suffisante pour promouvoir les nouvelles technologies basse émission (Fischer et Newell, 2004). Ces technologies sont à des niveaux différents de développement et font face à de multiples barrières à la diffusion pour être traitées par le même instrument économique. Dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, la combinaison de la contrainte carbone avec les politiques technologiques comme la subvention à la R&D est moins coûteuse que l'imposition d'une taxe ou permis isolé (Goulder et Parry, 2008 ; Gerlagh et van der Zwaan, 2006 ; Clarke, 2002). D'un point de vue dynamique, l'innovation augmente la variété technologique par la création de nouvelles options technologiques qui répondent aux problèmes environnementaux et réduisent l'incertitude sur les coûts de l'action contre le réchauffement climatique (Foxon, 2002, 2005).

Cependant, les innovations environnementales partent d'une position défavorable par rapport aux technologies fossiles (Arthur, 1989). Lorsque celles-ci entrent dans le marché, elles n'ont pas encore atteint leurs performances économiques et techniques ultimes (Jaffe et al., 2005). Les coûts ont tendance à se réduire sous l'effet des rendements croissants dynamiques comme l'apprentissage avec la production.

Les différentes options technologiques doivent avoir la possibilité de montrer leur potentiel et de lutter pour le marché si les conditions leur sont favorables. En particulier, le soutien aux technologies de l'hydrogène est justifié par les externalités positives au niveau de l'environnement ; de

³²³ Pour une comparaison des mesures complémentaires : http://ec.europa.eu/reducing_co2_emissions_from_cars/index_en.htm (accédé le 26 janvier 2009).

³²⁴ La version adoptée par le Parlement et le Conseil comprend encore des sanctions pour les constructeurs qui n'atteindront pas l'objectif. Les marques spécialisées en voitures de luxe sont les plus concernées par cette mesure, ce qui est le cas des trois marques allemandes (Volkswagen, BMW et Daimler).

A partir de 2012 les industriels doivent payer pour chaque gramme de CO₂ par kilomètre émis en moyenne par leurs flottes de voitures nouvelles au-delà de la limite fixée de 120 g/km. Entre 2012 et 2018 les amendes seront appliquées comme suit : 5 € pour le premier gramme de CO₂, 15 pour le deuxième, 25 pour le troisième et 95 € à partir du quatrième gramme. Dès 2019, les constructeurs devront payer 95 € pour chaque gramme dépassant l'objectif.

La proposition originale de la Commission était de démarrer les amendes à 20€ par gramme excédentaire en 2012, puis de les augmenter à 35€ en 2013, 60 en 2014, et 95 en 2015 (cf. COM(2007) 856). Le but étant de ramener les émissions moyennes à 95 g/km pour les nouvelles voitures à l'horizon 2020. Les modalités pour y arriver, ainsi que les dispositions punitives devront être arrêtées avant 2013.

l'apprentissage technologique ; et aussi pour l'économie. En présence d'une grande incertitude, les pouvoirs publics ne doivent pas chercher à choisir le vainqueur technologique car la probabilité est élevée de faire un mauvais choix, ce qui peut se révéler très onéreux (Leiby et Rubin, 2004). Cependant, une politique minimaliste affichant des objectifs vagues à moyen terme risque de ne pas débloquent le verrouillage des trajectoires technologiques actuelles. Une politique plus volontariste permettant de surmonter ce verrouillage semble alors se justifier (McDowall et Eames, 2006). Dans cette section, nous allons étudier les politiques technologiques de soutien à la R&D et les politiques stimulant le déploiement et la diffusion de l'innovation.

3.2.1. Le financement de la R&D et les démonstrations

Le financement public de la R&D se justifie lorsque les bénéfices sociaux de l'innovation sont importants et l'appropriation par les innovateurs faible, ce qui est particulièrement le cas des innovations qui sont encore loin de la commercialisation.

A. La nécessité d'une politique technologique

La connaissance est un bien public non rival et dont les retombés sont difficilement appropriables par l'investisseur. Les effets de débordement (*'spillovers'*) et les problèmes d'appropriation des résultats sont à l'origine du sous-investissement dans la recherche (Griliches, 1992, 1979). Cela est plus important en matière de recherche fondamentale avec rendements privés limités mais retombées sociales importantes. Une autre question concerne les dépenses d'apprentissage. L'augmentation de la production réduit le coût des nouvelles technologies par un phénomène d'apprentissage (*'learning-by-doing'*), ce qui entraîne des bénéfices pour toutes les entreprises (Arrow, 1962a). Le support public de la recherche se justifie alors en raison du risque et des externalités technologiques de cet investissement.

Les technologies à grand potentiel à moyen et long termes ont normalement besoin d'une période plus longue de recherche (appliquée et fondamentale) et de démonstration avant de devenir disponibles pour la commercialisation. Les technologies de l'hydrogène et de piles à combustible ne font pas exception, surtout lorsqu'elles sont comparées à la voiture hybride. Les investissements nécessaires à la mise au point de la technologie doivent encore être réalisés pendant quelques années (encadré 6). Un tel horizon temporel peut être inconcevable pour la plupart des firmes. Ainsi, l'Etat doit soutenir les efforts de recherche dans les technologies de rupture lorsque les bénéfices à terme (environnement, sécurité d'approvisionnement, technologies, économie) compensent l'investissement public (Margolis et Kammen, 1999).

Encadré 6. Les étapes de la commercialisation d'une innovation automobile radicale

Phase	Descriptif	Evolution des véhicules (p.ex. voiture hybride)	Innovation Radicale (p.ex. HPAC)
R&D	Recherche au laboratoire ; haut niveau d'expérimentation	4 ans et +	10 ans et + (2000s)
Développement du produit	Choix du véhicule et le la motorisation ; stabilisation du design technologique ; derniers essais ; planification ; marketing	4-6 ans	5-7 ans (2008-2015) Y compris la phase de démonstrations avancée de prototypes (de quelques centaines à milliers de voitures par an)
Entrée dans les premiers marchés	Booster les ventes (flottes captives ou directement au client) ; réévaluer les projections ; subventions	4-6 ans	3-4 ans (2015-2018) Quelques dizaines de milliers de voitures par an
Expansion des marchés	Elargissement des lignes de production ; objectifs commerciaux tenus ou dépassés ; développement de la seconde génération	4+ ans	7-10 ans (2018-2028) Quelques centaines de milliers de voitures par an)
Total		16-20 ans	30 ans et +

Adapté de Cunningham et al., 2008.

Le temps nécessaire pour la conception, le développement et la commercialisation d'un système de propulsion révolutionnaire comme la voiture pile à combustible à hydrogène est de 30 à 40 ans environ, pratiquement le double du temps qui a été nécessaire pour la mise au point d'une motorisation évoluée comme la voiture hybride (16-20 ans). Pendant ce temps, les besoins en ressources pour le développement de l'innovation radicale sont plus importants et le risque plus élevé, en particulier au moment de l'entrée des premières unités dans le marché. En outre, les bénéfices environnementaux et économiques pour l'avenir justifient le soutien à la nouvelle technologie.

L'Etat peut stimuler l'innovation de plusieurs manières. Premièrement, par le financement direct de la recherche à l'instar des grands programmes technologiques (nucléaire, éolien, etc.) du passé. Deuxièmement, il peut prendre en charge une partie des risques associés au projet notamment par la gestion de la demande et les marchés publics. Enfin, le gouvernement peut augmenter les bénéfices nets de la R&D pour les firmes par la réalisation des recherches dans les instituts publics (Jaffe et al., 2005).

Néanmoins, la politique de soutien technologique connaît aussi des limites. La légitimité de l'intervention publique suppose notamment que (1) l'Etat est un planificateur bienveillant qui tente de ramener les dépenses en R&D à un niveau socialement optimum ; (2) il dispose de toute l'information sur le potentiel technologique et connaît tous les bénéfices pour la société (Jaffe et al., 2003). Or, il semble difficile que ces deux conditions soient réunies dans la réalité. En particulier, le décideur public n'est pas insensible aux pressions des groupes d'intérêt (Cohen et Noll, 1991). Ainsi, il peut être amené à soutenir des projets qui ne sont pas suivis par l'industrie, à l'instar du

programme éolien américain des années 1970. Le choix du gouvernement américain pour le développement des turbines de grande taille (de 3 à 5 MW chacune) s'est révélé un échec puisque les éoliennes de cette taille n'ont pas trouvé preneur (Norberg-Bohm, 2003). Un autre exemple est l'échec du projet français Superphénix, un réacteur nucléaire à neutrons rapides utilisant du sodium liquide comme fluide caloporteur du circuit primaire.³²⁵

Les expériences du passé permettent de retirer quelques leçons quant à la modalité pertinente de l'intervention publique. La mise en place d'un financement incitatif avec des objectifs clairement spécifiés et des procédures de révision sont deux mécanismes possibles pour réduire la probabilité d'échecs coûteux (Norberg-Bohm, 2003). De même, la création de partenariats publics-privés dans lesquels les entreprises prennent aussi des engagements permet de rétablir la pression concurrentielle et de limiter les comportements opportunistes.

Malgré les inconvénients, le soutien public reste un instrument important pour la création d'une variété d'options technologiques qui peuvent être exploitées dans l'avenir (Fri, 2003). De plus, les incertitudes quant aux effets du changement climatique rendent l'investissement en technologies alternatives d'autant plus nécessaire (Baker et al., 2006). Le développement de technologies de long terme comme la pile à combustible et la filière de l'hydrogène ne peut pas se faire sans les investissements publics et privés en R&D.

B. Les efforts nationaux en R&D de technologies d'hydrogène et de piles à combustible

Les dépenses annuelles en R&D de technologies d'hydrogène et piles à combustible dans le monde s'élèvent à plus de 1 milliard de dollars US et sont concentrées à 80% dans trois zones géographiques : Union Européenne, Japon, et Etats-Unis (Roads2Hycom, 2007b). Le tableau 38 présente les dépenses moyennes des pays en R&D de piles à combustible, entre 2003 et 2005. Le Japon est de loin le pays qui a investi le plus (200 million d'euros) suivi par les Etats-Unis. En outre, plus de trois cinquièmes du budget est dirigé vers les applications mobiles. Les dépenses en R&D ont augmenté le plus en Europe pendant les quinze dernières années (tableau 39).

³²⁵ Une centrale expérimentale a été construite à Creys-Malville, en Isère. La construction de plusieurs autres répliques était prévue en particulier une par pays présent dans le consortium, mais aucune mise en chantier n'a eu lieu. Pendant la phase de construction et d'opération, le projet a connu de nombreux problèmes techniques et économiques. Enfin, la stabilisation des cours de l'uranium n'a pas favorisé la viabilité économique de cette technologie. En 2001 la France décide de fermer définitivement le réacteur construit à Creys-Malville. Voir le rapport « Nucléaire : la grande illusion », *Les Cahiers de Global Chance*, n°25, septembre 2008, disponible sur <http://www.global-chance.org/IMG/pdf/GC25.pdf>.

Tableau 38. Dépenses nationales en R&D dans les piles à combustible par usage (moyenne 2003-2005)

En million euros 2005	Mobile	Stationnaire	Total
Japon	139	61	200
Etats-Unis	84	37	121
Corée du Sud	30	30	60
Allemagne	32	20	52
Italie	6,5	6,5	13
Royaume-Uni	7	7	14
Canada	8	8	16
France	7	7	14
Total (8 pays)	313,5	176,5	490
Total monde (%8pays)	356 (88,1%)	218 (81%)	574 (85,4%)

Source : Roads2Hycom, 2007b (collection de plusieurs sources), p.61-62.

Tableau 39. Evolution des budgets de R&D dans les HPAC, 1996-2008 (prix courants)

(Millions \$)	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Croissance [% an]
Japon ^b	69,9	65,1	58	43,8	95,9	135	258,2	228	237	250				13,59
Etats-Unis ^c	114	101	98	115	115	145	159	157,4	155,8	224,7	232,5	274,2	309	8
UE ^a	11,6	11,6	29	29	29	29	60	60	60	60	60	94	94	17,46

Source : Roads2Hycom, 2007b.

^a Les dépenses européennes en R&D HPAC inscrites dans les programmes-cadre pluriannuels (moyenne par an).

^b Entre 1996-2005.

^c Données 2006-2008 : GAO, 2008.

Les firmes nord américaines (Etats-Unis et Canada) sont probablement les leaders dans les technologies des piles à combustible.³²⁶ Plusieurs raisons expliquent la longueur d'avance prise par ces pays par rapport à la concurrence (AIE, 2004 ; Bourgeois et Mima, 2003) : des compétences scientifiques et techniques très importantes ; des investissements gouvernementaux en R&D ; des grands programmes de démonstration de la technologie (p.ex. Californie, Oregon, Vancouver). Aux Etats-Unis, les deux grands piliers de l'action gouvernementale pour le développement des technologies de l'hydrogène et des piles à combustible sont le programme « *Hydrogen fuel initiative* » dans lequel ont été investis 1,2 milliard de dollars entre 2004 et 2008, et le partenariat « *FreedomCar* » avec les constructeurs automobiles.³²⁷

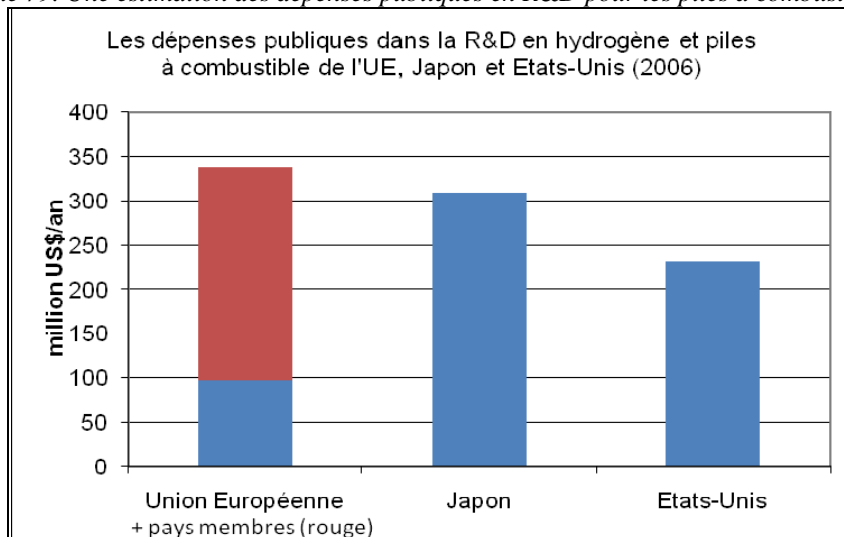
Le Japon est l'autre pays à la pointe de la technologie. Une industrie basée sur l'hydrogène et les piles à combustible se constitue à partir des années 1990 sous l'auspice des programmes de R&D et de démonstration coordonnés par le METI (Ministère de l'Economie, Commerce et Industrie) en

³²⁶ Dans le domaine des piles à combustible, cette région abrite une grande partie des plus grands constructeurs au monde. La canadienne Ballard est éventuellement l'entreprise leader par sa production, son expérience et son savoir-faire. Les Etats-Unis disposent d'un grand nombre de compagnies de niveau international parmi lesquelles on retrouve : Quantum, DuPont Fuel Cells, Fuel Cell Energy, UTC Power, Nuvera.

³²⁷ Après quelques années de grands investissements, la nouvelle administration Obama semble vouloir diminuer le soutien au développement des technologies de l'hydrogène et piles à combustible. Le gouvernement fédéral a récemment annoncé l'intention de couper drastiquement les dépenses dans le programme de l'hydrogène et piles à combustible pour les transports. Au moins, pour l'année fiscale 2009. Voir : The Hydrogen Fuel Cell Letter, Bulletin May 9, 2009.

coopération avec les industriels japonais parmi lesquels on retrouve les constructeurs automobiles Honda et Toyota. Le budget 2006 du NEDO (*'New Energy and Industrial Development Organization'*) pour l'hydrogène et les piles à combustible a été de 34 milliards de yens (presque 310 millions d'euros).

Graphique 79. Une estimation des dépenses publiques en R&D pour les piles à combustible en 2005



Source : AIE, 2004 ; Alleau, 2007 ; GAO, 2008 ; Roads2Hycom, 2007b.

La situation en Europe est marquée par une plus grande diversité. Les efforts de développement de l'hydrogène et des piles à combustible sont surtout concentrés sur les pays les mieux dotés en ressources financières, scientifiques et techniques, ayant une industrie automobile et énergétique importante. Ceci est le cas de l'Allemagne, de l'Italie, de l'Angleterre et de la France, par ordre croissant d'investissement en R&D dans le domaine de l'hydrogène et piles à combustible (Roads2HyCom, 2007b). Le Danemark et l'Espagne sont aussi actifs au niveau européen. Les dépenses européennes en R&D sont comparables à celles du Japon et des Etats-Unis (graphique 79). Néanmoins, elles sont moins importantes si elles sont comptabilisées par tête. En outre, les dépenses en recherche financées au niveau européen ne représentent qu'une partie de la R&D totale des pays dans les technologies de l'hydrogène. Celles-ci ont été longtemps réalisées dans le cadre des programmes nationaux, pas forcément coordonnés au niveau communautaire.

De cette manière, les efforts de la Commission vont dans le sens d'une plus grande coordination au niveau européen de manière à optimiser les ressources disponibles.³²⁸ Des programmes européens ont été mis au point pour la recherche (StorHy, pour l'étude du stockage de l'hydrogène à bord des voitures ; NaturalHy pour les analyses de la transition en utilisant l'infrastructure actuelle du gaz naturel ; HyWays pour l'établissement d'une feuille de route vers l'économie de l'hydrogène) ; ainsi que pour la démonstration de la technologie (HyFleet : CUTE de démonstration de l'hydrogène dans les transports urbains ; HyChain de démonstration des voitures spéciales pour les premières niches de marché). Récemment, une plateforme technologique a été créée entre la Commission et l'industrie pour démarrer la commercialisation de l'hydrogène et des piles à combustible avant 2020 (Commission Européenne, 2006). En octobre 2008, la Commission s'est officiellement engagée à

³²⁸ Le 7^{ème} programme-cadre (2007-2013) vise aussi à améliorer la coordination des activités de recherche en Europe, en particulier dans le domaine de l'hydrogène et piles à combustible (Commission Européenne, 2006).

dépenser jusqu'à 470 millions d'euros avant la fin 2013 pour soutenir la R&D et le déploiement de l'hydrogène et des piles à combustible dans le marché, à la condition que l'industrie investisse autant.

En France, l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) distribue l'essentiel des fonds publics alloués à la recherche dans la pile à combustible et l'hydrogène, dans le cadre du programme PAN-H (Plan National sur l'Hydrogène et les Piles à Combustible). Ce programme est géré par le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA). Les subventions ont atteint presque 30 millions d'euros en 2006, mais depuis les valeurs n'ont cessé de baisser pour atteindre la douzaine de millions d'euros en 2008. Le nouveau programme qui succède au PAN-H pour les années 2009, 2010 et 2011 prévoit de maintenir le même niveau d'investissements annuels. A cela s'ajoute les fonds des organismes publics qui travaillent dans le domaine (comme le CNRS, l'ADEME), les fonds communautaires et les investissements privés. Les investissements des grandes entreprises (comme Air Liquide, Total, EDF, GDF) et des petites et très petites entreprises (comme N-GHY, Paxitech) en hydrogène et piles à combustible ont été estimés à environ 60 milliards d'euros en 2006 (Alleau, 2007), soit tout de même la moitié des dépenses publiques américaines en R&D dans les piles à combustible en 2005 (tableau 38).

3.2.2. La création des premiers marchés pour l'hydrogène

Le passage du laboratoire au marché peut s'avérer une étape critique pour l'émergence de la nouvelle technologie. Les premiers marchés sont très importants pour augmenter la production et permettre les réductions de coûts indispensables pour qu'elle devienne compétitive (Kemp, 1994). L'Etat peut alors intervenir de façon à accélérer cette phase de manière à éviter que l'innovation tombe dans la « vallée de la mort » (Murphy et Edwards, 2003). Il s'agit en particulier de la création de niches de marché pour la technologie, lorsque les débouchés initiaux tardent à se développer ou ne sont toujours pas suffisants pour entamer la commercialisation. Alors, les premières niches de marché pour l'hydrogène dans les transports peuvent être ouvertes par la voie réglementaire : les obligations d'achat par les flottes captives ou les obligations de commercialisation de voitures à hydrogène.

La conversion de *flottes* de voitures à hydrogène peut être une stratégie efficace pour démarrer la transition technologique dans les transports (HLG, 2003 ; Farrell et al., 2003 ; Sperling, 1990). Les parcs de voitures fournissent une demande qui atteint la masse critique initiale pour l'hydrogène, ainsi qu'un minimum d'infrastructure nécessaire puisqu'elles empruntent normalement les mêmes itinéraires et sont ravitaillées au même endroit (Nesbitt et Sperling, 1998 ; Sperling, 1990). Ces flottes sont idéales pour démarrer les projets de carburants alternatifs dans les transports. Le déploiement sur le marché permet les améliorations incrémentales nécessaires pour rendre la technologie compétitive, ainsi que pour la mise en place graduelle de l'infrastructure (Kemp et al., 1998). Le gouvernement peut alors obliger les parcs automobiles des services publics à acquérir un pourcentage minimal d'achat de voitures émission zéro lors du renouvellement de la flotte, en mettant simultanément en place des incitations à la conversion des flottes privées (transporteurs, poste, électriciens, etc.).

Les *obligations de vente* de voitures à hydrogène sont un autre instrument susceptible de stimuler le déploiement de ces voitures dans le marché. A la différence des mécanismes généralistes comme les

obligations d'énergies renouvelables qui n'imposent pas le choix de la technologie, le pourcentage minimum de vente est une solution efficace pour soutenir une technologie spécifique. L'exemple le plus important est l'obligation des constructeurs automobiles de vendre des voitures zéro-émission dans l'Etat de Californie (encadré 7).

Encadré 7. L'obligation "Zero emissions vehicle requirement" (ZEV) en Californie

En 1990, l'agence californienne pour le contrôle de la qualité de l'air et des émissions polluantes (California Air Resources Board CARB), a adopté une réglementation visant la diminution des émissions de gaz polluants des voitures légères. Dans ce cadre, l'agence a publié un règlement obligeant les constructeurs automobiles à un pourcentage minimum de vente de voitures zéro émission (« Zero Emissions Vehicle requirement » ou ZEV). L'objectif du programme était de promouvoir le développement et la commercialisation de voitures non polluantes et de combustibles alternatifs. La mise en place de cette mesure se heurte normalement à la résistance des marques automobiles (en particulier américaines) et de l'agence environnementale fédérale (EPA), laquelle est responsable de l'application des standards d'efficacité pour les voitures (CAFE) au niveau national.

Dans sa version initiale, le programme ZEV demandait à ce que 2% des ventes des constructeurs automobiles soient des voitures zéro émissions en 1998. Il était prévu que ce seuil augmenterait annuellement jusqu'à atteindre 10% en 2003. Les objectifs ont été revus entre 1998 et 2003 et un facteur de souplesse a été introduit dans le programme. De nouvelles catégories ont été créées. Désormais, les constructeurs peuvent accomplir 60% de leurs obligations (6% des ventes finales) avec la vente de voitures certifiées presque zéro émission (« partial zero emission vehicle » PZEV) et de PZEV technologiquement avancés ("advanced technology partial zero emission vehicles", AT PZEV). Pour être qualifié de PZEV, la voiture doit accomplir 85% des conditions des ZEVs (tableau 40).

Tableau 40. Les catégories de voitures ZEV

% requise	Type véhicule	Catégorie	Description technique
2,5 %	Véhicule zero emission (ZEV)	"Or"	Zéro émission au « pot d'échappement ». Batterie et HPAC.
2,5 %	Véhicule Techn. Avancé (AT PZEV)	« Argent »	PZEV + nouvelle technologie appliquée aux ZEV (hybrides ; gaz naturel comprimé).
6 %	Presque zéro émission (PZEV)	« Bronze »	Voiture conventionnel avec 90% moins d'émissions que la moyenne des émissions des modèles de l'année considéré + 15 ans ou 150,000 miles de garantie + pas d'évaporations d'eau
%Total requis sur les ventes de l'année 2009 = 11%			

Plus tard, le CARB a encore une fois révisé les obligations de ventes jusqu'en 2018. La dernière version part de 11% initialement prévus pour la période 2005-2009, pour monter à 12% en 2012, 14% en 2015, 15% en 2016 et finalement à 16% en 2018.

Un mécanisme de flexibilité a été introduit. Les constructeurs automobiles ont désormais le choix d'un régime alternatif. L'obligation de vente de voitures appartenant à la catégorie la plus contraignante (ZEV) peut être remplacée par la vente de voitures de la catégorie immédiatement

inférieure, les AT PZEV, pourvu que le constructeur mette sur le marché un nombre minimal de voitures pile à combustible, significativement moins important que les voitures électriques nécessaires pour remplir les critères réglementaires de base. Le régime alternatif vise clairement à promouvoir le déploiement de la voiture à pile à combustible.

Cependant, la difficulté rencontrée afin de construire l'infrastructure pour l'hydrogène et surtout afin d'avoir un nombre de voitures suffisant a amené à revoir les objectifs pour les voitures pile à combustible. Après la dernière révision, les constructeurs doivent déployer 7.500 voitures à hydrogène (précédemment 25.000) entre 2012 et 2014 (CARB, 2008). Les marques sont maintenant autorisées à présenter plus de voitures électriques que de véhicules pile à combustible.

Des questions peuvent être soulevées quant au coût de cette mesure pour les marques, mais le programme ZEV a eu le mérite de permettre le déploiement de larges flottes de voitures pile à combustible ce qui a bénéficié à l'avancement de la technologie. Toujours en Californie, l'administration Schwarzenegger a récemment fait passer un ordre³²⁹ obligeant les raffineurs à des normes de qualité environnementale du carburant plus sévères (*'Low carbon fuel standard'* ou LCFS).³³⁰ Plusieurs stratégies sont à la disposition des raffineries pour réduire l'intensité carbone des carburants. Elles peuvent fabriquer de meilleurs carburants ; les mélanger à des biocarburants comme l'éthanol ; ou vendre des carburants alternatifs comme le gaz naturel, l'électricité et l'hydrogène.

3.2.3. Les mesures d'incitation financière

Dans le cas des innovations environnementales, bien souvent, le consommateur ne peut se rendre compte de tous les bénéfices de son choix pour le progrès de l'innovation et pour l'environnement, ce qui retarde l'évolution de la technologie sur le marché. Les instruments financiers visent alors à rapprocher les bénéfices privés des gains sociaux de l'adoption. La mise en place des instruments de soutien à la diffusion technologique est d'autant plus pertinente que l'écart entre les incitations sociales et privées à l'adoption de la technologie est grand (Jaffe et al., 2005).

A la suite, nous allons étudier les principales mesures de soutien à la diffusion telles que les subventions à l'achat et les incitations fiscales comme les systèmes « bonus/malus ».

A. Subventions à l'achat

Les subventions fonctionnent à l'inverse des taxes : au lieu d'imposer une charge, le gouvernement met en place une subvention reçue par l'entreprise. La subvention peut être utilisée pour limiter une externalité négative comme par exemple dans la lutte contre le changement climatique ; ou bien pour encourager les externalités positives comme celles de l'introduction d'une innovation environnementale. Dans le premier cas, on peut envisager la situation où l'entreprise reçoit une subvention par unité d'émission polluante de moins par rapport à son activité normale (Baumol et

³²⁹ L'ordre fait suite au *Global Warming Solutions Act (AB32)* voté à la fin 2006 qui fixe l'objectif de réduction de 25% des émissions de gaz à effet de serre (y compris dans les transports) en 2020 par rapport à 1990.

³³⁰ Les standards ont été présentés dans deux rapports : Farrell A., Sperling D. (ed.), « A Low-Carbon Fuel Standard – Part I : Technical Analysis & Part II : Policy Analysis », University of California, 2007.

Oates, 1988). Dans le second cas, il s'agit d'une subvention versée soit au vendeur, soit à l'acheteur, pour chaque unité adoptée de l'innovation. En théorie, la subvention possède les mêmes caractéristiques que la taxe : il s'agit d'un moyen efficace pour internaliser les effets externes et pour retourner à un équilibre Pareto-optimal (Faucheux et Noël, 1995).

Par rapport à la taxe, la subvention permet de mieux cibler la technologie ou le système énergétique que le décideur politique cherche à promouvoir (p.ex. subventions accordées à condition que l'hydrogène soit produit à partir de ressources renouvelables). Ainsi, elle peut contribuer à diminuer les incertitudes qui entourent ces innovations. Toutefois, cet instrument augmente les dépenses publiques puisqu'il doit être financé par d'avantage d'impôts, ce qui aggrave ainsi les distorsions de l'économie.

Les subventions doivent être limitées aux innovations ayant des bénéfices sociaux importants et pour lesquelles le marché n'existe pas (Kemp, 1994). Cela s'explique par l'absence d'incitations privées à développer la technologie dans le cas des technologies nécessitant une longue période d'investissement (p.ex. panneaux solaires photovoltaïques, piles à combustible), ou des innovations dont les principales caractéristiques (environnement, sécurité d'approvisionnement) ne sont pas valorisées par le marché. Dans le cas des innovations radicales, les premières décisions d'achats sont très importantes pour l'augmentation de la production et la progression de la technologie. Néanmoins, les acheteurs pionniers ne peuvent récolter toutes les retombées positives ce qui les incite peu à entrer sur le marché. Alors, le but de la subvention est de rapprocher les avantages privés des gains sociaux de l'innovation, particulièrement par l'augmentation du ratio des bénéfices par rapport aux risques caractéristiques des premiers projets (Foxon et al., 2005).

Une question importante est alors celle de savoir quelles sont les subventions dont l'hydrogène et les piles à combustible ont le plus besoin pour percer sur le marché ? La difficulté de la filière hydrogène par rapport aux technologies de production électrique renouvelable est que les barrières doivent être levées au niveau de la production de l'hydrogène mais aussi au niveau de l'infrastructure et de l'usage final (mobile, stationnaires ou portable). Les usages stationnaires de l'hydrogène et piles à combustible sont actuellement les plus proches du seuil compétitif. Selon le plan de mise en œuvre (HFP, 2007), l'attribution d'une subvention de 500-1000 € par kWh est suffisante pour ouvrir les premiers marchés de production décentralisée d'électricité pour les piles à combustible à hydrogène.

Considérons maintenant le cas des usages mobiles. Le coût de l'utilisation de l'hydrogène dépend du coût du carburant et du coût de la voiture. Alors que le prix de l'hydrogène à la pompe atteint un niveau compétitif avec l'essence (en prenant en compte la plus grande efficacité des piles à combustible), le coût de la voiture pile à combustible demeure bien au-dessus de celui de la voiture conventionnelle.³³¹ Ainsi, la subvention à l'achat de la voiture - plutôt qu'au carburant hydrogène - doit être prioritaire de façon à ce que la technologie entre sur le marché et réduise les coûts (Jeeninga et al., 2008).

B. Les mesures fiscales de promotion technologique

Une partie significative du prix final des voitures est actuellement composée par la fiscalité. La dérogation fiscale est alors un levier important pour diminuer le différentiel de prix entre la voiture

³³¹ Voir chapitre 1.

conventionnelle et les technologies alternatives comme la voiture pile à combustible à hydrogène. Une autre manière d'inciter à l'adoption des innovations est l'attribution de crédits d'impôts : les dépenses induites par l'achat de la voiture à hydrogène ou d'un groupe pile à combustible stationnaire de cogénération réduisent l'impôt de l'acheteur à la fin de l'année fiscale.

En outre, les mesures du type « prime à la casse » contribuent à l'accélération du renouvellement du parc automobile, et par ce biais, à l'efficacité énergétique dans les transports. Il est encore trop tôt pour évaluer l'efficacité de cet instrument qui a été mis en place en France il y a relativement peu de temps. Néanmoins, il est déjà soupçonné d'être à l'origine d'effets d'aubaine et de report d'achats jugés contre-productifs (Syrota, 2008). De plus, ce système ne fait pas la distinction entre les différents modèles nouveaux de voitures, à l'inverse du système de bonus/malus.

Le système bonus-malus (*'feebates'*) est caractérisé par la mise en place combinée d'une taxe sur les émissions et d'une subvention (une taxe négative) à la consommation dont le bilan est négatif (malus ou *'fee'*) ou positif (bonus ou *'rebate'*), selon la performance relative des voitures. La fixation du point de référence ou *'point pivot'* est fondamentale dans le mécanisme (Johnson, 2006). Celui-ci doit être fixé en accord avec les objectifs du régulateur à l'instar des normes et à un niveau neutre de recette fiscale. C'est-à-dire que le niveau de référence doit être ni trop bas, de manière à ce que la mesure ne cause pas d'importantes dépenses publiques, ni trop élevé ce qui risquerait d'augmenter la résistance des consommateurs. Dans ce dernier cas, la mesure serait équivalente à l'imposition d'une taxe sur le prix des voitures (y compris des voitures économes). Par ailleurs, le régulateur a la possibilité d'ajuster le « point pivot » régulièrement au fur et à mesure que les informations disponibles sur le progrès technologique et les impacts externes se précisent. En outre, l'incitation à long-terme dépend des révisions périodiques des objectifs. Le régulateur peut fixer par avance le facteur annuel d'amélioration de l'efficacité accompagnant le rythme d'inflation et de progrès technique anticipé.

Le bonus-malus est un mécanisme plus incitatif que les normes de performance. Alors que les entreprises n'ont pas d'incitation à continuer à investir dans la R&D une fois le standard atteint, elles trouveront, avec le mécanisme de bonus-malus, toujours l'intérêt d'améliorer leur technologie de façon à recevoir plus de bonus net de pénalités (Greene et al., 2005). Dans le cas des applications mobiles, ce système incite les constructeurs à vendre les véhicules très faiblement émetteurs de carbone telles que les véhicules électriques ou à hydrogène. Un exemple de la mise en place au niveau des consommateurs est le système de bonus-malus français (encadré 8).

Encadré 8. La version française du système bonus/malus

Le principe du bonus/malus français est d'orienter les choix des consommateurs vers les voitures plus efficaces (moins de consommation et de rejet de CO₂). Cette mesure vise aussi à inciter au renouvellement du parc automobile. En France, la moyenne d'émission du parc automobile actuel est de 175 gCO₂/km, alors que le marché neuf est de l'ordre de 150 gCO₂/km (Syrota, 2008).

L'application du dispositif est simple : les nouvelles voitures peu efficaces et rejetant plus de CO₂ sont appelées à payer une taxe (malus) ; les véhicules plus efficaces reçoivent une prime (bonus). Dans sa version de 2008, le point pivot était établi pour les voitures neuves émettant entre 131 et 160 gCO₂/Km. Les voitures émettant entre 121 et 130 gCO₂/Km ont reçu 200€ par unité, 700€ si les émissions se situent entre 101 et 120 gCO₂/Km. Les voitures les plus émettrices payent jusqu'à 2500€ si les émissions dépassent 250 gCO₂/Km. Les ventes de voitures ouvrant droit à un bonus ont augmenté de dix points de marché (de 30% en 2007 à 40% en 2008). Une évolution inverse s'observe pour les voitures pénalisées (de 24 à 14%) (Syrota, 2008). Des aménagements au dispositif sont actuellement en discussion, tels que l'élargissement de la mesure au marché d'occasion et la prévision d'un malus annuel (un sort d' « éco-vignette »).

Par ailleurs, un bonus écologique de 5000€ pour les véhicules émettant moins de 60 gCO₂/km a été créé en décembre 2007. Cette mesure est destinée aux véhicules très faiblement émetteurs tels que les véhicules électriques ou à hydrogène.

En bref, le support technologique se justifie en présence d'un verrouillage technologique, le but étant que la technologie la plus efficace s'impose sur le marché à la fin du processus (Unruh, 2002). Le soutien public aux technologies de l'hydrogène vise à lever les obstacles à l'entrée dans le marché et à permettre que celles-ci montrent tout leur potentiel technologique et économique. Toutefois, cette politique de promotion de la variété technologique ne doit pas se substituer à la pression concurrentielle. D'autres technologies comme les voitures électriques à batterie ou électriques rechargeables peuvent être plus économiques à court et moyen termes par rapport à la voiture à hydrogène. Un compromis doit être trouvé entre la protection des technologies émergentes et la sélection par le marché (Kemp, 1997). Cela demande une révision périodique des politiques de soutien technologique (Norberg-Bohm, 2003).

3.3. Quels instruments employer en fonction de la maturité technologique ?

Les nécessités de l'innovation changent tout au long du processus d'innovation. Par conséquent, la pertinence des politiques de promotion des technologies de l'hydrogène doit être aussi évaluée d'un point de vue dynamique. Clarke (2002) suggère une approche générale par étapes pour la politique technologique : dans un premier temps, les politiques de promotion de l'innovation (e.g. subvention de la R&D) ; et dans un second temps, la stimulation de l'adoption technologique (e.g. normes, subventions).

3.3.1. Combinaison des instruments de soutien technologique selon les défaillances de marché

La mise en place de mécanismes de soutien aux innovations est justifiée dans la mesure où il existe des barrières qui empêchent leur diffusion sur le marché. Une intervention publique devient alors nécessaire de manière à lever ces obstacles. Le tableau suivant synthétise les facteurs susceptibles de bloquer la progression des technologies énergétiques propres sur le marché, même quand celles-ci sont plus performantes et moins chères que la technologie conventionnelle.

Tableau 41. Types de barrières et mesures correctives

Barrières	Caractéristiques	Mesures de correction typiques
Distorsions des prix	Les technologies dominantes ne payent pas tous les coûts associés	Internalisation des externalités Enlever les subventions
L'accès à l'information et coûts de transaction	Le produit n'est pas disponible et sa nature n'est pas comprise par les consommateurs	Codes et normes Dissémination de l'information
La perception du risque	L'incertitude technologique et économique La difficulté de prévoir l'évolution de la technologie	Démonstration
Préférence pour le présent	Le taux d'actualisation élevé	Analyses sur les coûts du cycle de vie du produit
Financement	Les coûts initiaux élevés et les bénéfices à moyen-long terme L'accès aux fonds Les coûts échoués	Ouverture des fonds spéciaux Subventions à l'achat Politiques fiscales
Les barrières institutionnelles	Le marché reste bloqué sur la technologie et/ou sur les firmes dominantes	Gestion stratégique des niches
Problèmes de réglementation	Les normes de l'industrie peuvent empêcher la diffusion de la technologie	Définition de nouveaux codes et normes
L'apprentissage par l'usage et par la production	Forts gains potentiels d'économies d'échelle et d'apprentissage	Investissement en apprentissage (développement et démonstration)
La nécessité de biens complémentaires (infrastructure)	Le besoin d'une structure de support à la consommation	Démonstration

L'exemple typique de défaillance de marché imposant des barrières à la diffusion technologique est l'existence de coûts et bénéfices qui ne donnent pas lieu à un paiement ou une compensation au-delà du prix payé lors de la transaction. Les externalités provoquent des distorsions du mécanisme de prix qui l'amènent à ne plus donner la mesure exacte des bénéfices et des coûts de la transaction. Ainsi, la non prise en compte de tous les coûts des technologies anciennes (ou de la ressource épargnée par la technologie) empêche la diffusion de l'innovation. Par exemple, un prix bas du

carburant automobile n'incite pas à l'achat de voitures efficaces ; la baisse du prix de l'électricité réduit les bénéfices de l'investissement dans les technologies de basse consommation.

La gestion des externalités demande une intervention visant à internaliser ces effets externes. Cette intervention mène le plus souvent les pouvoirs publics à imposer des taxes/subventions. En outre, ils peuvent soutenir les efforts de création de marchés pour les technologies propres, ce qui aurait un effet similaire à l'internalisation de l'externalité (AIE, 2003).

L'intérêt des consommateurs pour les innovations propres dépend tout d'abord de la disponibilité de l'information sur le produit. Par conséquent, la dissémination de l'information serait une externalité positive dans la mesure où elle génère des bénéfices pour tous les acteurs.

La méconnaissance des caractéristiques de l'innovation et l'impossibilité de prévoir ses performances futures constitue des barrières importantes à sa diffusion sur le marché. En effet, les agents sont sensibles aux coûts élevés et aux performances insuffisantes de la technologie dans le présent. De plus, les améliorations continues poussent les agents à adopter un comportement attentiste vis-à-vis des modèles plus performants, plutôt que d'investir dans un objet qui va vite devenir obsolète. Cette inertie de la demande risque de freiner les progrès dans la production.

Par ailleurs, la préférence des consommateurs pour le présent peut être un obstacle à la diffusion de biens durables. Dans le cas de la voiture pile à combustible à hydrogène, les coûts initiaux sont plus importants, mais les coûts opérationnels sont moins élevés que pour la voiture conventionnelle. Le choix technologique dépend alors de la manière dont l'agent considère les bénéfices dégagés par les coûts opérationnels plus faibles durant la période de vie du produit. La décision dépend du taux d'actualisation utilisé pour actualiser les bénéfices futurs. De plus, la décision des agents ne prend pas souvent en compte tous les flux de coûts et de bénéfices tout au long du cycle de vie de la technologie. Cette décision se focalise sur ces flux lors des premières années (Jaffe et al. 2003).

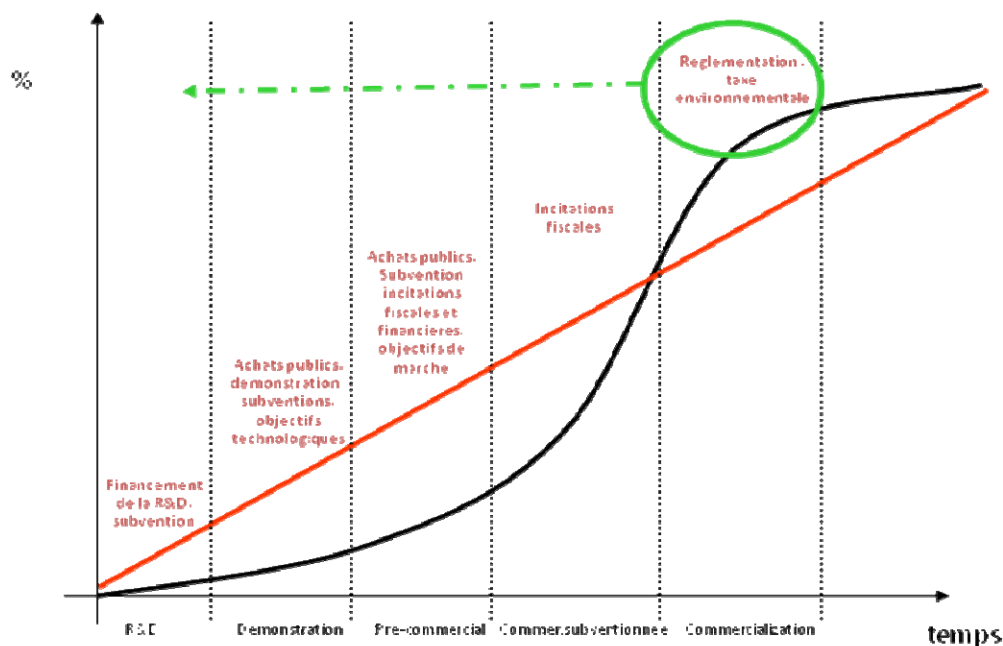
L'investissement en innovation a des coûts initiaux élevés et des bénéfices à moyen et long termes. Cela pose le problème de son financement. En effet, la décision d'adoption de la technologie impose des coûts fixes irrécupérables au consommateur dans l'immédiat. Ce qui peut freiner l'adoption, et rendre plus difficile son financement externe. La mise en place de mesures qui facilitent le financement (comme les prêts à taux réduits) permettent de rendre plus accessibles aux agents l'obtention des moyens nécessaires à l'achat de l'innovation. En outre, les politiques fiscales de subvention à l'achat peuvent aussi aider au développement de la demande d'innovations.

L'apparition d'alternatives technologiques propres peut être bloquée par la domination de la technologie existante. Dans ce cas, l'Etat peut soutenir la progression des nouvelles technologies par la promotion des niches de marché qui valorisent les caractéristiques de l'innovation, où les innovations peuvent progresser avant de pouvoir montrer tout leur potentiel. Cette intervention doit toutefois être suivie au fil du temps, en introduisant des pressions concurrentielles dès que possible de manière à éviter les échecs technologiques coûteux ou le soutien à une technologie inférieure.

Ainsi, les nécessités des innovations ne sont pas les mêmes tout au long du processus de développement et de diffusion. L'efficacité des instruments de soutien technologique change selon les phases de diffusion (Foxon et al., 2005). Le graphique 80 montre la relation entre la diffusion de

l'innovation et les instruments de soutien. L'objectif de l'analyse est de trouver le mix adéquat de politiques à chaque moment du processus d'innovation.

Graphique 80. La dynamique de diffusion et les instruments de soutien aux innovations environnementales



Adapté de Foxon et al., 2005.

Les subventions à la recherche et développement de la nouvelle technologie doivent se concentrer dans les phases initiales où les externalités des activités sont plus grandes et les bénéfices pour les innovateurs moindres. Les mesures de soutien financier sont aussi importantes au moment de la démonstration et de l'entrée dans le marché (phase pré-commerciale), lorsque le risque du projet reste élevé et qu'il est difficile de lever des fonds. L'introduction de la technologie sur le marché doit être accompagnée d'incitations (p.ex. subvention à l'achat, bénéfices fiscaux) aux premiers consommateurs de manière à augmenter les bénéfices de l'adoption, en leur offrant une compensation en même temps pour les externalités de l'achat d'un produit de première génération, souvent moins performant et plus cher. Enfin, au fur et à mesure que l'innovation s'approche de la commercialisation à grande échelle, la capacité des agents privés à réaliser des profits est plus grande. Alors, les mécanismes de soutien peuvent être graduellement levés, en laissant la réglementation environnementale garantir une concurrence juste entre les différentes technologies.

Les revenus dégagés par la réglementation environnementale (taxe, permis ou certificat) peuvent être recyclés dans le développement des innovations environnementales. Cela permettrait d'avancer plus rapidement vers le développement de technologies propres, et d'accroître l'acceptabilité de la politique environnementale (Foxon, 2002).³³²

³³² Le rapport Beffa sur une nouvelle politique industrielle préconise les programmes technologiques industriels de long terme organisés autour de partenariats public-privés dans lesquels les industriels s'engagent à assurer la moitié du financement nécessaire. En comparaison avec les programmes-cadre européens, ces partenariats couvrent toutes les phases précompétitives de la technologie, de la recherche au développement. Les aides seraient accordées en accord avec les besoins à chaque étape : les subventions aux activités en amont ; les

3.3.2. Comparaison des incitations mises en place aux Etats-Unis et en Europe

Le tableau suivant compare les mécanismes de soutien à l'utilisation de l'hydrogène dans les transports actuellement en vigueur aux Etats-Unis et en Europe.

Tableau 42. Comparaison des instruments de soutien à la recherche et au déploiement des technologies de l'hydrogène aux Etats-Unis et en Europe

	Etats-Unis	Union Européenne
R&D	-financement 50%	-financement 50%
Déploiement	-subvention démos 50% -subvention à l'investissement (30% du coût de la station, jusqu'à \$30.000) -Incitations fiscales (dépréciation accélérée ; subvention à l'achat , etc) -Achats publics	-subvention démos 50%
Commercialisation	-Obligations d'achat (ZEV en Californie)	

Les incitations sont similaires en Europe et aux Etats-Unis au niveau de la R&D et du déploiement. La mise en place de l'initiative technologique commune (« Joint Technology Implementation » ou JTI) en octobre 2008 a augmenté de 35% à 50% le financement public dans les projets européens de démonstration. D'autres initiatives ont été lancées aux Etats-Unis. C'est le cas des subventions à l'investissement dans les stations d'hydrogène à l' hauteur de 30% du coût de la station. En Californie, le financement public peut aller jusqu'à 70% de l'investissement, ou 2,7 millions de USD si la station est 100% renouvelable (1,4 millions en moyenne dans les autres cas). De plus, des incitations fiscales ont été mises en place telles que la dépréciation accélérée et la subvention à l'achat. Enfin, les Etats peuvent obliger les flottes publiques à l'achat de voitures ayant des motorisations alternatives jusqu'à hauteur de 75%. Au niveau de la commercialisation, l'Etat de Californie se distingue par la mise en place d'une obligation d'achat de voitures « zéro émission » (ZEV).

Le tableau suivant compare les politiques d'incitation de l'offre et de la demande au niveau de la commercialisation, ainsi que les réglementations mises en place d'un côté et de l'autre de l'Atlantique.

avances remboursables lorsque la technologie est proche de la commercialisation. Rapport Beffa (2005), « Une Nouvelle Politique Industrielle », Rapport au Premier Ministre.

Tableau 43. Les Instruments de promotion de la demande et de l'offre d'hydrogène dans les transports

Type de mesure	Instruments	États-Unis	Union Européenne
Promotion de la demande	Détaxation du carburant	✓	✓
	Subvention à l'achat	✓	
	Crédit d'impôt aux constructeurs	✓	
	Achats publics	✓	✓
Promotion de l'offre	Subvention à la station	✓	✓
	Standards des carburants	✓	✓
Réglementation	Obligations légales	✓	

Selon Jeeninga, Ros et Godfroij (2008), il existe deux philosophies différentes de soutien aux technologies d'hydrogène qui sous-tendent l'approche européenne et américaine. En Europe, l'accent est mis sur la protection des marchés naissants jusqu'à ce que la technologie soit prête à affronter la concurrence dans les marchés stationnaires et les transports. Aux Etats-Unis, il s'agit d'avantage d'une politique explicite de soutien technologique. Si l'Europe est plutôt bien placée en termes de projets de démonstration d'hydrogène, les Etats-Unis ont pris de l'avance en termes de firmes actives dans le secteur des piles à combustible. Le partenariat public-privé européen pour la promotion de l'hydrogène et des piles à combustible (JTI) qui vient juste de démarrer vise à combler le retard dans ce domaine.

Conclusion du chapitre 5

La diffusion de nouvelles technologies propres comme l'hydrogène et les piles à combustible est actuellement freinée par le verrouillage sur les énergies fossiles. Ce verrouillage empêche l'innovation d'entrer sur le marché et de profiter du cycle positif caractérisé par l'augmentation de la production, la baisse des coûts et l'ouverture de nouveaux marchés. Des stratégies adaptées doivent être mises en place pour surmonter cette barrière. L'introduction des piles à combustible dans les premières niches protégées de marché peut être une manière de permettre à la technologie de progresser et de révéler son potentiel, ce qui lui ouvrirait graduellement de nouveaux marchés.

Les défaillances du marché au niveau de l'appropriation des résultats de la R&D (spillovers), le verrouillage technologique à la diffusion (lock in), les externalités environnementales et le besoin de coordination des investissements, justifient l'intervention publique. Un ensemble d'instruments ayant pour objet de surmonter les effets de ces défaillances a été analysé. L'internalisation des externalités environnementales par des taxes ou marchés de carbone est une condition fondamentale pour l'émergence de technologies propres. Cependant, elle ne suffit pas pour remplacer les politiques technologiques telles que les dépenses en R&D et les subventions à l'achat. En outre, la mise en place des premières infrastructures est décisive pour catalyser les investissements et permettre à la technologie de montrer tout son potentiel. Sa diffusion à grande échelle dépendra des avantages relatifs dont la voiture à hydrogène saura faire preuve, notamment par rapport aux voitures électriques.

CHAPITRE 6

Dynamique de diffusion de l'hydrogène et concurrence technologique sur le marché de l'automobile

Dans les chapitres précédents nous avons mis en évidence l'importance des externalités positives dans la diffusion technologique, en particulier de l'infrastructure qui par définition est génératrice des externalités. Nous avons encore argumenté sur l'existence d'un verrou technologique qui empêche l'arrivée des nouvelles technologies vertes telles que l'hydrogène. Des stratégies pour contourner ce « lock in » technologique ont été exposées, de même que les instruments susceptibles d'être déployés pour y parvenir. Dans le chapitre final nous voulons apporter des éléments plus concrets de réponse aux questions suivantes :

Quelle est l'évolution attendue de l'hydrogène sur le marché ? Dans quelle mesure les effets de réseau affectent-ils la diffusion de l'hydrogène ? Comment peut évoluer la rivalité entre la voiture à hydrogène et la voiture électrique ?

Dans la première section, une présentation non exhaustive des modèles de diffusion technologique est réalisée. Une place importante est attribuée aux modèles de concurrence technologique et aux caractéristiques de la concurrence en présence d'effets de réseau. Dans la seconde section, nous appliquons un modèle de concurrence multitechnologique à l'étude de la concurrence entre la voiture pile à combustible à hydrogène et la voiture hybride rechargeable sur le marché de l'automobile. L'effet du coût de la pile à combustible et de l'infrastructure sur le résultat final faisant l'objet d'une analyse particulière.

Section 1. Traitement théorique de la diffusion technologique

La diffusion technologique est un processus long et progressif. Les principaux modèles classiques de diffusion se focalisent sur deux aspects : l'information disponible sur les caractéristiques de la technologie et l'hétérogénéité des agents en termes d'objectifs et de capacités. Les modèles épidémiques accordent plus de place au premier aspect, alors que l'hétérogénéité des agents est au centre des modèles probit (ou de rang).

1.1. Les modèles de diffusion technologique

Les premiers modèles de diffusion technologique ont utilisé la métaphore de la diffusion des épidémies pour représenter le processus de diffusion.³³³ L'évolution de la technologie sur le marché est assimilée à la dissémination d'une maladie dans la population.

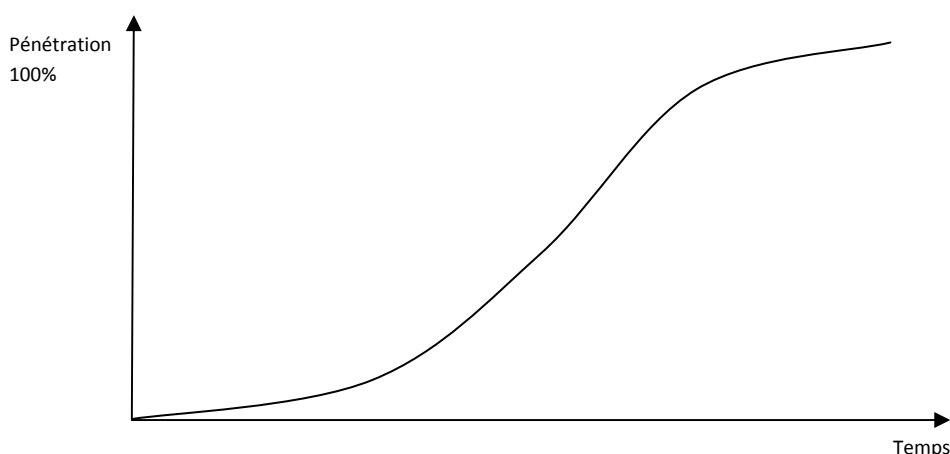
1.1.1. Les modèles épidémiques de diffusion

Les modèles épidémiques émettent normalement l'hypothèse de l'existence d'une population potentielle d'utilisateurs pour une certaine technologie. Cette population potentielle est considérée comme constante dans le temps. De même, la technologie reste inchangée pendant le processus de diffusion. Le mécanisme essentiel de diffusion est la transmission de l'information.

La diffusion commence avec un nombre restreint d'utilisateurs de la technologie. Les utilisateurs sont en contact socialement avec les non-utilisateurs. Le contact avec un utilisateur de la technologie est une condition nécessaire pour convaincre un non utilisateur de devenir consommateur. L'augmentation du nombre d'adhérents dans le temps rend plus probable la transmission de l'information et par ce biais l'adhésion d'un nombre plus grand de personnes. Cependant, au fur et à mesure que la diffusion progresse, le nombre de clients potentiels diminue. Le taux de croissance du nombre d'utilisateurs dépend alors de l'effet relatif de l'augmentation de la probabilité de contact par rapport à la diminution de la population de clients potentiels. Le premier effet est plus fort initialement et le second devient plus important avec le temps. La représentation graphique de la proportion d'utilisateurs face au nombre maximum d'utilisateurs (le potentiel de diffusion) dans le temps donne lieu généralement à une courbe de diffusion en S (graphique 81).

³³³ Les travaux suivants ont joué un rôle important dans la définition des modèles épidémiques: Griliches, 1957 ; Bain, 1964 ; Bass, 1969. Pour une révision des modèles de diffusion voir Geroski (2000) et Stoneman (2002).

Graphique 81. Courbe de diffusion en S



En termes formels, le modèle empirique peut être exprimé de la façon suivante. On représente le nombre maximum d'adhérents par N et le nombre de consommateurs au moment t par $M(t)$. La probabilité qu'un non adhérent d'entrer en contact avec un consommateur est considérée comme proportionnelle au poids des consommateurs face au nombre maximum d'adhérents, c'est-à-dire $M(t)/N$. La variable γ représente la probabilité du non adhérent de devenir consommateur suite au contact. L'arrivée de nouveaux consommateurs au moment t est donnée par l'expression

$$\frac{dM(t)}{dt} = \phi \cdot \frac{M(t)}{N} \cdot [N - M(t)]$$

où ϕ est la probabilité effective de contact : $\phi = \delta \cdot \gamma$.

La résolution de l'équation différentielle de premier ordre présentée ci-dessus est l'expression

$$M(t) = \frac{N}{[1 + \exp(-\eta - \phi t)]}$$

ce qui correspond à l'équation de la courbe logistique. Le η définit le moment de démarrage de la diffusion, N le niveau maximum d'utilisation de la technologie (le niveau d'équilibre à la fin du processus de diffusion), ϕ la vitesse de diffusion. Dans la formulation originale du modèle épidémique, la courbe de diffusion est symétrique et le point d'inflexion (le moment à partir duquel le rythme de croissance ralentit) est atteint à la moitié du niveau d'utilisation maximale (N).³³⁴

La caractéristique fondamentale des modèles épidémiques de diffusion est le processus endogène d'apprentissage et de formation des goûts à travers le contact personnel et l'observation. Le processus de diffusion est conçu de façon auto-entretenu. L'adoption de la technologie par un agent élargit le nombre de consommateurs de la technologie, ce qui permet plus d'adhésions. Le processus s'arrête au moment où le marché potentiel a adopté entièrement la technologie. Cela correspond au niveau d'équilibre du modèle, ce qui explique la raison pour laquelle ces modèles sont

³³⁴ Plus tard, Dixon (1980) a revu le modèle épidémique original de Griliches (1957) en utilisant des données plus récentes et arrive à une courbe logistique différente dont le point d'inflexion est au niveau du tiers de N (courbe de Gompertz).

aussi appelés des modèles de déséquilibre - à l'opposé des modèles *probit*, lesquels sont par définition en équilibre à chaque instant.

La simplicité des modèles épidémiques en fait la force, explique aussi sa grande utilisation (Stoneman, 2002). Néanmoins, ces modèles de diffusion technologique ne sont pas exempts de limites, lesquelles sont le plus souvent liées aux hypothèses de départ. Ainsi, les critiques normalement formulées à l'égard du modèle sont les suivantes :

- le processus de diffusion dans les modèles épidémiques réside dans la transmission de l'information. La seule source d'information considérée est le contact entre consommateurs et non adhérents. Le modèle ignore ainsi les autres sources d'information comme la publicité ;
- l'adhésion de l'agent ne dépend pas d'un choix économique rationnel mais de l'exposition à l'information ;
- le nombre de clients potentiels (N) reste constant tout au long du processus de diffusion et il est trouvé de façon exogène au modèle. D'une part, le nombre de clients potentiels peut changer pendant le processus pour une raison démographique (p.ex. l'augmentation de la natalité), ou un autre facteur quelconque responsable de l'accroissement du nombre de personnes potentiellement intéressées par la technologie. D'autre part, il n'y a pas d'explications quant aux facteurs qui conditionnent cette variable et la façon de la trouver ;
- le modèle considère que les utilisateurs sont homogènes et ne prend pas en compte l'existence de différences dans la population d'adhérents potentiels. Par exemple, le fait que les premiers consommateurs peuvent être intéressés à acheter la technologie plus vite que les derniers n'est pas pris en compte par le modèle. La probabilité effective de contact (θ) demeure inchangée tout au long du processus de diffusion ;
- la technologie ne change pas pendant la diffusion. Le modèle ne prévoit pas la possibilité d'amélioration des performances et de diminution des coûts, ce qui n'est pas réaliste (pas d'effets d'apprentissage) ;
- enfin, le modèle est focalisé sur la dissémination du flux d'information à la base de la diffusion. L'adhésion de la technologie est conditionnée par la réception de l'information et aucune place n'est accordée au traitement de l'information par les agents. Les agents peuvent hésiter à acquérir une technologie en raison d'une méconnaissance de toutes ses caractéristiques.

En réaction à cette dernière critique, Mansfield (1968) a proposé une extension des modèles épidémiques originaux par la prise en compte de l'incertitude pendant le processus de diffusion. Selon cette approche, le niveau d'incertitude inhérente à l'adoption de l'innovation est le principal déterminant du processus de diffusion, et non pas la simple réception de l'information. L'incertitude est mesurée par la part de marché de l'innovation : plus celle-ci est importante, plus grand sera l'apprentissage par l'usage et par la pratique, et moins d'incertitude il y aura sur les performances de la technologie. Par ailleurs, la vitesse de diffusion de l'innovation (θ) est déterminée par les caractéristiques des innovations en termes de rentabilité (r_i) et d'investissement initial (I_i) lesquels restent constants tout au long du processus. La vitesse de diffusion est donnée par la relation suivante :

$$Q_t = \beta_1 + \beta_2 \eta + \beta_3 I_t + \varepsilon_t$$

avec $\beta_1 < 0$ et $\beta_2 > 0$.

Geroski (2000) rapporte encore l'existence d'autres extensions du modèle épidémique original qui ont été introduites dans la littérature. La prise en compte de sous-ensembles différents dans la population d'utilisateurs potentiels, notamment à travers l'emploi de taux de comptage décroissants, ainsi que de l'augmentation du marché potentiel (N), ont généralement conduit à des courbes de diffusion asymétriques.³³⁵

Encadré 9. Diffusion par fonctions épidémiques

Les fonctions épidémiques de nature logistique sont utilisées pour estimer les courbes de diffusion étant données les parts de marché de l'ancienne technologie $F_o(t)$ et de la nouvelle $F_n(t)$ au moment t .

Fonction logistique :

$$\ln\left(\frac{n_t}{N - n_t}\right) = \alpha + \beta(t - t_0)$$

Part de marché :

$$F(t) = \frac{1}{1 + e^{-(t-t_0)/\beta}}$$

N = nombre de clients potentiels ; n_t = nombre d'adhérents ; t = temps

t_0 = date à laquelle la technologie atteint 50% de part de marché

β = paramètre déterminant du taux de changement (plus lent à mesure que le β augmente)

ε_t = l'erreur.

Santini (2004) a testé les fonctions logistiques avec les données relatives à la diffusion d'innovations automobiles dans le passé. Le tableau suivant présente les résultats.

Tableau 44. Résultats de l'analyse empirique de Santini (2004)

³³⁵ Voir par exemple : Dixon (1980) ; Davies (1979).

Switch Type	Details	δ	β	5-95% yrs.	n, R ²
New Powertrain	Car Multi for Single Point FI	1984.6	1.36	9	14, 1.00
New Powertrain	Truck Multi for Single Point FI	1986.2	0.57	4	9, 1.00
New Vehicle	Car Front Wheel Drive	1984	3.22	19*	19
New Powertrain/Fuel	France diesel cars	1995	5.76	35	21, 0.98
Fleet Fuel	RR Wood-to-Coal	1869	5.24	31	5, 0.93
Fleet Powertrain/Fuel	Transit Gasoline to Diesel Fuel	1959	5.51	33	8, 0.93
Fleet Powertrain/Fuel	Automobiles Leaded-Unleaded	1981	5.25	31	12, 0.89
Fleet Vehicle/Fuel	Street RR Horse to Electric	1895	2.5	15	9, 0.92
Fleet Vehicle/Fuel	RR Coal Steam to Diesel Locomotive	1955	2.6	16	30, 0.99
Fleet Veh/Fuel/Mode	Coal to Oil in Ground Transportation, 1921-38	1931	9.19	54	18, 0.99
Fleet Veh/Fuel/Mode	Coal to Oil in Ground Transportation, 1921-63	1931	5.80	35	43, 0.81 [†]
Fleet Veh/Fuel/Mode	Coal to Oil in Ground Transportation, 1945-63	1931	3.10	18	43, 0.81 [†]

* Though the fitted model implies that 95% share was reached, this is incorrect. Share peaked at 85%.

§ Curve fitted through non-linear regression; the log-likelihood function value is 41.3 for new vehicles and 56.8 for fleet.

† Estimated as a part of a segmented curve from 1921-1963

La diffusion d'une technologie de propulsion exigeant un nouveau carburant (p.ex. diffusion du gasoil) est plus lente que si l'innovation n'a pas besoin de changement du carburant (p.ex. traction à l'avant). En outre, la diffusion prend d'avantage de temps lorsque la transition exige un changement de mode de transport (p.ex. charbon vers pétrole). Dans le cas de l'hydrogène, la transition demande un changement technologique, de carburant et de source énergétique. Les défis à relever sont alors plus importants.

Le modèle exposé ci-dessus est très pertinent pour expliquer le comportement de la technologie sur le marché (coefficient de détermination R² très élevé). Cela montre bien la force et la faiblesse de l'application de modèles épidémiques dans la pratique : les résultats sont très robustes ; mais les explications quant aux facteurs économiques à la base de la diffusion sont absentes.

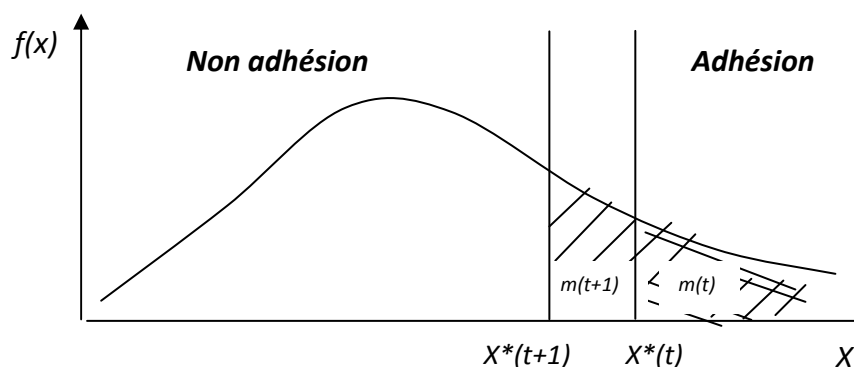
Le modèle de diffusion suivant peut être opposé au modèle épidémique dans la mesure où il essaye de répondre aux faiblesses de celui-ci.

1.1.2. Les modèles probit de l'hétérogénéité des agents

Une autre forme de représentation de la diffusion technologique est proposée par les modèles probit (ou de classe). Ces modèles considèrent que la décision d'adopter la technologie est le résultat d'un choix économique des agents. De plus, le modèle prend en compte le fait que les agents sont différents entre eux, chaque individu (ou firme) ayant des spécificités qui déterminent le rythme de son adoption. La population est constituée par N clients potentiels ayant des caractéristiques différentes qui affectent la rentabilité procurée par l'adoption de la technologie. Cette hétérogénéité

des agents est normalement représentée par une fréquence de distribution du type présenté dans le graphique 82.

Graphique 82. La distribution de la population avec un seuil séparant les adhérents des non-adhérents



Sous l'hypothèse de rationalité des individus et en l'absence d'imperfections de marché, les agents adoptent une technologie dès lors que les bénéfices sont supérieurs aux coûts : $B(t) \geq c(t)$. A chaque moment, il existe un seuil de rentabilité minimal au-delà duquel les agents trouvent économique d'adopter la technologie. Dans la figure 29, il s'agit de la population à droite du point X^* . La proportion d'adhérents $m(t)$ est donnée par l'aire en dessous de la fréquence de distribution. Le nombre cumulé d'adhérents au moment t est donné par l'équation $M(t) = m(t) \cdot N$.

Le modèle arrive ainsi à calculer la proportion d'adhérents de la technologie au moment t . Pour trouver l'évolution de l'utilisation de la technologie dans le temps, il faut comprendre les facteurs qui sont à la base des changements de $M(t)$. Etant donné que la population est considérée comme constante tout au long du processus, les changements survenus dans l'environnement d'adoption ont comme effet le déplacement du seuil (X) minimum d'adoption. Cela veut dire que des facteurs économiques sont responsables d'un changement de la proportion d'adhérents $m(t)$. Les changements peuvent être de deux ordres : 1) la diminution des coûts d'acquisition avec la diffusion, par exemple, par l'effet d'apprentissage dans la production ; et 2) l'augmentation des bénéfices attendus de l'adoption avec l'amélioration de la performance technologique, par exemple.

En termes graphiques, l'augmentation des bénéfices et/ou la réduction des coûts entraîne un déplacement du seuil d'adoption X vers la gauche. La technologie est devenue plus attractive pour un nombre plus large d'agents, c'est-à-dire que la proportion d'adhérents augmente en passant de $m(t)$ à $m(t+1)$. En outre, les distributions les plus utilisées dans la littérature sont la distribution normale ou log-normal, ce qui amène X^* à augmenter initialement à des rythmes croissants et plus tard à un taux décroissant. Donc, l'augmentation du nombre d'utilisateurs au fil du temps est représentée par la courbe en S.

Les agents peuvent être distribués selon plusieurs types de caractéristiques. Davies (1979) distribue les firmes par rapport aux profits attendus de l'adoption. David (1975) trouve que la caractéristique pertinente est la taille de la firme. L'auteur argumente que les firmes plus grandes sont les premières à adopter les innovations (par exemple, les innovations de processus épargnant le facteur travail). D'autres caractéristiques sont encore utilisées comme, par exemple (Geroski, 2000) : les coûts de

recherche de la technologie et d'apprentissage ; les coûts du changement de technologie ('*switching cost*') ; les coûts d'opportunité en termes d'investissements échoués.

Une autre catégorie de modèles considère que les bénéfices de l'adoption changent tout au long du processus de diffusion. Les modèles à effets de *stock* sont construits sous l'hypothèse que les premiers adopteurs obtiennent des bénéfices plus élevés de la technologie (Reinganum, 1989). Cela tient au fait que la technologie réduit les coûts moyens de production ce qui en concurrence se traduit par une baisse du prix final. Ainsi, les premières adhésions sont plus profitables et les bénéfices se réduisent avec le nombre d'adhérents. Une autre catégorie est encore représentée par les modèles à effets d'*ordre* (Ireland et Stoneman, 1986). Ces modèles considèrent que les agents ont des dotations différentes de facteur de production critique (comme l'emplacement géographique, les coûts des entrants, la formation des travailleurs). L'ordre d'adhésion est important dans la mesure où les premiers adhérents ayant un accès plus facile aux facteurs critiques trouveront l'adoption profitable avant les autres.

Le choix du modèle doit se baser sur les facteurs jugés plus importants dans la diffusion de la technologie : les changements endogènes provoqués par la transmission d'information et la formation des goûts ; ou les changements exogènes de l'innovation et de l'environnement d'adoption. Les modèles épidémiques peuvent se montrer plus adaptés à la représentation de la diffusion des innovations simples et pas chères dont le facteur le plus important est la disponibilité de l'information (Kemp, 1997). Dans le cas des biens durables, les décisions économiques du type coût-bénéfice semblent plus judicieuses, les modèles probit sont adéquats – à moins que les modèles épidémiques prennent en compte des variables économiques dans la définition du taux d'infection ou « probabilité effective de contact »).

1.1.3. Modélisation de l'offre et de la demande

Les modèles de diffusion présentés ci-dessous représentent essentiellement le comportement de la demande d'innovation. Cependant, ces modèles n'offrent pas une image complète de la diffusion technologique. Une représentation plus réaliste doit aussi tenir compte des effets d'offre dans le processus de diffusion. L'aspect de l'interaction offre-demande a été souligné par les travaux de David et Olsen (1986) et d'Ireland et Stoneman (1986).³³⁶ Ces modèles soulignent l'importance des anticipations que les utilisateurs font quant à l'évolution des prix.

Nous allons considérer une industrie composée de N firmes qui maximisent leurs profits et qui possèdent toutes la même information quant à la performance de la technologie (absence d'incertitude). Cependant, celles-ci sont hétérogènes en ce qui concerne les bénéfices retirés de l'utilisation de l'innovation. Les bénéfices annuels sont constants et indépendants du nombre d'adhérents. Les adopteurs potentiels peuvent être classés en ordre décroissant de leurs bénéfices relatifs à l'adoption de la technologie (X). Les firmes n'adoptent qu'une unité d'innovation. Il s'agit alors des hypothèses du modèle *probit* (ou d'effets de rang). La firme occupant le x ème rang obtient

³³⁶ Nous reprenons ici la présentation faite dans Ireland et Stoneman (1986). Le modèle de diffusion de Metcalfe (1988) permet aussi de confronter l'offre et la demande d'innovation. Ce modèle prend en compte les effets de la diffusion sur la rentabilité et sur la sélection des firmes par le marché. Bien que les hypothèses de départ et la façon dont l'équilibre est atteint sont différents, le modèle de Metcalfe arrive à des conclusions similaires à celles de Ireland et Stoneman (1986), en termes de trajectoires de diffusion et de prix de l'innovation.

un bénéfice annuel g_x (soit $g_x < 0$). En termes statiques, l'agent adopte la technologie si les bénéfices escomptés sont supérieurs au prix payé par l'innovation. En termes dynamiques, il prend aussi en compte l'évolution des prix (P_t). Si les prix diminuent, la firme retarde l'adoption. La condition d'arbitrage s'écrit alors,

$$\frac{g_x}{r} \geq P_t - p_t$$

où p_t est le changement espéré du prix de la technologie (P_t) entre la période t et $t+1$. Cette équation peut être réécrite de la façon suivante :

$$rP_t - p_t - g_x \leq 0$$

En ce qui concerne les coûts de production, le modèle original d'Ireland et Stoneman (1986) repose sur l'hypothèse que les rendements sont croissants au début de la diffusion puis deviennent décroissants avec le temps. C'est-à-dire que le coût de production (C_t) décroît de façon exogène jusqu'au moment t^* à partir duquel il commence à augmenter. Dans le modèle de David et Olsen (1986), les coûts baissent avec la production cumulée en raison des gains d'apprentissage.

Nous considérons d'abord le cas d'anticipations myopes de la demande (la baisse de prix dans le futur n'est pas prise en compte à l'acte d'achat) et du marché de l'offre de l'innovation en monopole. Plus tard, les hypothèses de myopie de la demande puis celle de monopole sur le marché seront relâchées.

Le monopole pratique une discrimination parfaite de prix en approvisionnant le marché de manière à ce que les bénéfices actualisés du dernier adhérent soient égaux au coût marginal de production :

$$rC_t - c_t = g_x$$

Le c_t représente le coût unitaire (ou le coût marginal) de production. La trajectoire de diffusion est alors le résultat de l'interaction offre-demande :

$$rP_t - p_t = g_x = rC_t - c_t$$

Sous l'hypothèse d'anticipations myopes, le consommateur ne regarde que la condition de rentabilité d'adoption ($g_x / r = P_t$). A chaque moment t le prix d'équilibre de marché est exprimé par :

$$P_t = C_t - \frac{c_t}{r}$$

Au fur et à mesure que la diffusion progresse, les coûts de production diminuent, ce qui se traduit par une baisse de prix qui rend l'innovation accessible à un nombre plus grand de consommateurs. Ce processus se poursuit jusqu'au moment t^* où la diffusion s'arrête au niveau x^* . A la fin du processus on obtient $P^*_t = C^*_t$.

En relâchant l'hypothèse de la myopie d'anticipations et en acceptant l'hypothèse de prévisions parfaites, il est raisonnable de penser que les consommateurs attendent une réduction de prix au fur et à mesure de la diffusion. Le monopole n'est plus en mesure de discriminer par les prix en vendant plus cher aux premiers adhérents puisque ceux-ci sont incités à attendre la baisse de prix. Afin de

diminuer l'incitation des consommateurs à retarder l'adoption, le monopole va alors changer le profil de prix dans le temps en réduisant le rythme de la baisse :

$$g_x + x_t g_x = rC_t - c_t$$

Où g_x est la dérivée du bénéfice du dernier adhérent par rapport au temps. Le profil des prix est alors donné par l'expression :

$$P_t = \frac{(p_t - X_t g_x)}{r} + C_t - \frac{c_t}{r}$$

ce qui est différent du prix sous l'hypothèse de myopie en $\frac{(p_t - X_t g_x)}{r}$. Le processus de diffusion s'arrête au même moment que sous l'hypothèse de myopie, mais à un niveau plus bas : $g_x + x_t g_x = rC_m$. Cela revient à dire que le rythme de diffusion est plus lent en situation de monopole et de prévisions parfaites de la demande.

Finalement, nous considérons le cas de plusieurs firmes en situation de concurrence parfaite. Dans cette situation, les firmes pratiquent le prix concurrentiel $P_t = c_t$. Sous l'hypothèse d'anticipations parfaites de l'évolution des prix, la trajectoire de x et de p sont telles que l'on a :

$$G_x = rP_t - p_t = rC_t - c_t$$

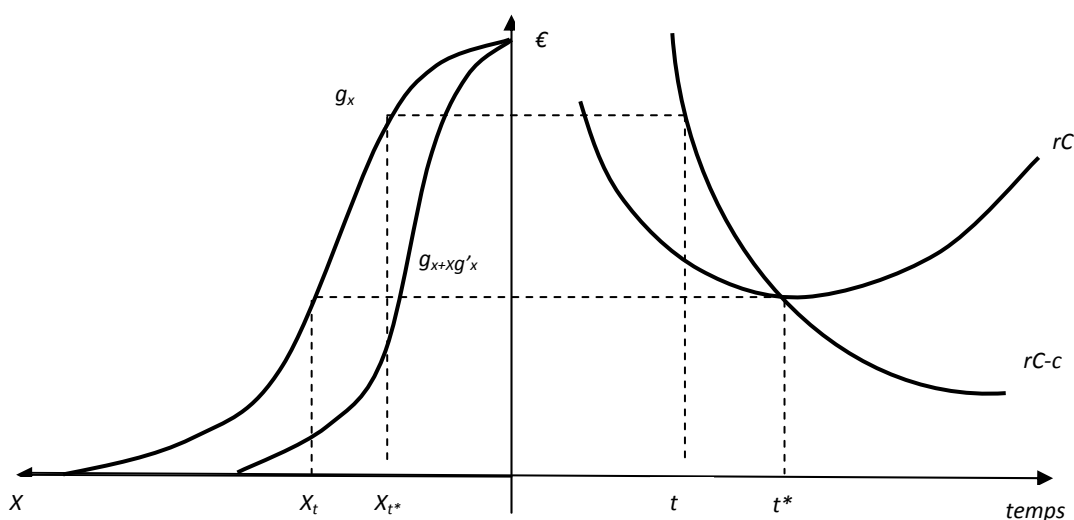
et à la fin on obtient :

$$g_{xx} = rC_m$$

ce qui coïncide avec le cas de marché en monopole et anticipations myopes de la demande. Sous l'hypothèse de myopie ($v_t = 0$), la trajectoire de diffusion sera plus rapide que dans les autres cas, trop rapide du point de vue du bien-être social. Il s'agit du même problème que le rythme optimal d'exploitation des ressources communes épuisables. Dans un cadre de concurrence entre un nombre infini de firmes se disputant le même marché de taille constante - sous l'hypothèse que le consommateur ne consomme qu'une seule unité -, lorsqu'une firme fournit un consommateur, le marché disponible pour les autres firmes se réduit dans la même mesure. Ainsi, plus il y a de firmes et plus celles-ci essayent de vendre avant leurs rivales de manière à remporter le maximum de clients. Cela mène à une exploitation du marché plus rapide que dans une situation optimale (Dasgupta et Stiglitz, 1980).

Le graphique 83 montre les trajectoires de diffusion en situation de monopole avec myopie de la demande (le même résultat que dans le cas de concurrence parfaite et prévision parfaite) et aussi sous l'hypothèse de prévision parfaite.

Graphique 83. L'interaction offre-demande et la trajectoire de diffusion



Source : Stoneman, 2002.

La prise en compte de l'offre permet d'avoir une image plus complète du processus de diffusion par rapport aux modèles qui analysent uniquement le comportement de la demande. D'abord, les conditions de production de l'innovation sont un facteur majeur de diffusion. Les coûts de production diminuent lors du processus de diffusion permettant la baisse des prix. Cette baisse des prix rend l'innovation accessible à plus d'adopteurs. Deuxièmement, les anticipations des agents jouent un rôle important dans le rythme et la trajectoire de diffusion. Enfin, l'approche retenue de formalisation explicite de l'offre permet d'effectuer des analyses en termes de bien être optimal. Les trajectoires de diffusion en monopole avec myopie et en concurrence parfaite avec prévision parfaite arrivent toutes deux à des résultats optimaux. Toutefois, il existe un problème d'équité dans la distribution de l'excédant. Le monopole parfaitement discriminant s'approprie l'excédant au détriment du consommateur, alors que le consommateur récupère son excédant dans le cas de concurrence parfaite. Au-delà des questions d'efficacité et d'équité du résultat final, les analyses de bien être sont encore utiles pour évaluer l'effet des politiques technologiques.

1.2. Concurrence et substitution multi-technologique

Les modèles précédents traitent le processus de diffusion d'une manière binaire, c'est-à-dire que par sa progression, une seule innovation sur le marché remplace une technologie ancienne. Or, la diffusion peut être aussi le résultat de la concurrence entre plusieurs technologies anciennes et nouvelles. Il s'agit alors d'un schéma de diffusion non binaire de concurrence et de multisubstitution technologique.

Deux situations de concurrence technologique seront analysées. La première est lorsque les technologies contemporaines sont en concurrence pour le marché. Dans ce cas, l'avantage acquis au début de la période peut être décisif. La seconde est lorsqu'une nouvelle technologie se substitue progressivement à l'ancienne technologie. Enfin nous conclurons par une brève analyse des facteurs qui peuvent limiter l'exercice de la domination d'une technologie au niveau local.

1.2.1. Concurrence technologique en présence d'externalités de réseau

Les modèles sur le comportement de l'adoption en présence d'effets de réseau montrent que la technologie la plus efficiente ou la plus appréciée par les agents au départ n'est par forcément retenue par le marché, notamment en raison du choix des premiers consommateurs.

A. Effets des externalités de réseau pour l'adoption

Dans le cas des biens comme le téléphone, l'internet, ou la carte bleu, l'utilité que le consommateur retire de sa consommation est *directement* liée au nombre d'agents qui font partie du réseau. L'élargissement du réseau augmente le nombre d'opportunités de contact, de paiement, etc., disponibles pour chacun des membres. Par ailleurs, l'entrée de nouveaux membres a aussi des répercussions *indirectes* sur le reste des consommateurs au niveau de la qualité et du prix de la prestation : l'augmentation des ventes d'un produit peut réduire les coûts de production (surtout lorsque les coûts fixes sont importants) ; elle peut aussi améliorer la qualité de la prestation ou augmenter la variété de biens ou services compatibles (Economides, 1996 ; Katz et Shapiro, 1985 ; Farrell et Saloner, 1986).

Lorsque les biens sont durables, le bénéfice que l'agent retire de la consommation du bien dépend du nombre de consommateurs de biens compatibles dans le futur. La décision d'adoption est alors basée sur les anticipations que l'agent fait sur la taille future du réseau. La répétition de ce comportement par tous les consommateurs rend les anticipations auto-réalisatrices. Katz et Shapiro (1985) montrent que la taille du réseau va correspondre aux anticipations formulées par les agents. La fonction d'utilité traditionnellement retenue lorsqu'un agent i achète au maximum une unité et son acceptabilité à payer pour cette unité est u_i peut se décomposer de la manière suivante :

$$U_i = a_i + b_i N^e, b_i > 0$$

Le premier terme a_i peut varier selon les consommateurs. Le second terme augmente avec N^e , la taille attendue du réseau. Il s'agit spécifiquement de l'effet de réseau. La plupart des acteurs considèrent que les consommateurs valorisent de la même manière les bénéfices d'un grand réseau, donc $b_i = b$ pour tous les i (Matutes et Regibeau, 1996). La taille du réseau, N , traduit normalement le nombre de biens compatibles. Etant donnée l'hypothèse selon laquelle chaque consommateur consomme au mieux une unité, le nombre de biens est équivalent au nombre de consommateurs.

En présence d'effets de réseau, l'adoption technologique n'est plus linéaire et une multitude d'équilibres deviennent possibles, le plus souvent, des résultats extrêmes comme la domination du marché ou l'absence de diffusion (Katz et Shapiro, 1985, 1986 ; Cabral, 1990). Entre les deux équilibres « absorbants », il existe un point de nature instable : la *masse critique*. Tant que la masse critique n'est pas dépassée, le seul équilibre est l'absence de réseau ; lorsqu'elle est franchie, le réseau se développe par un cercle vertueux de croissance auto-entretenu jusqu'à atteindre l'état de saturation (Katz et Shapiro, 1985). La masse critique fonctionne alors comme un seuil minimum : soit il est atteint d'un seul coup, soit le seul équilibre possible est l'absence de réseau. Cela est particulièrement important lorsque plusieurs technologies sont en concurrence sur le marché.

B. Concurrence technologique et dépendance de sentier

Dans le modèle de dépendance de sentier de Brian Arthur (1988, 1989), différentes alternatives technologiques sont en concurrence sur le marché. Ce modèle de concurrence technologique est basé sur l'idée que la technologie devient séduisante à partir du moment où elle est adoptée, et non pas parce qu'elle était la meilleure au départ. L'existence de rendements croissants d'adoption (*learning by doing, learning by using*, rendements croissants d'information, ou fortes interrelations technologiques) joue en faveur de la technologie adoptée. Ces avantages se renforcent au fur et à mesure qu'elle se diffuse. La technologie va graduellement s'imposer face à la concurrence et la possibilité de remettre en cause sa domination est plus difficile. Le marché devient alors verrouillé sur une technologie. Le résultat final est donc affecté par la succession d'événements historiques, ce qui empêche de prévoir par avance quelle technologie va s'imposer (Arthur, 1989). Il n'est pas possible de prédéterminer les parts de marché de chaque technologie parce que différentes séquences d'événements produisent des résultats différents – le processus est non ergodique, selon le langage mathématique ou dépendant du sentier. Ainsi il se peut que les choix des premiers consommateurs pour la technologie non efficiente bloquent le développement des autres technologies par la suite.

Arthur (1988, 1989) représente l'utilité de manière similaire à celle de Katz et Shapiro (1985) présentée dans le point précédent. Considérons deux agents (R et S) qui doivent choisir entre deux technologies (A et B) après que n_a et n_b consommateurs aient préalablement adopté la technologie A et B, respectivement. De plus, l'agent R préfère la technologie A et l'agent S penche plutôt en faveur de la technologie B. Le modèle peut être exprimé par le tableau suivant.

Tableau 45. Le choix technologique des agents R et S, connaissant la base installée de chacune des technologies A et B

	Technologie A	Technologie B
Agent R	$a_r + rn_a$	$b_r + rn_b$
Agent S	$a_s + sn_a$	$B_s + rn_b$

où par les hypothèses de départ $a_r > b_r$ et $b_s > a_s$. Tous les deux r et s sont positifs.

Source : Arthur, 1988.

L'importance du nombre d'agents qui adoptent une technologie n_i peut être telle que les effets de réseau compensent les préférences initiales de chaque type d'individu (la technologie A pour l'agent R ou B pour l'agent S). Les premiers choix peuvent traduire les préférences des consommateurs. Mais rapidement, des événements historiques mineurs ou de légères différences dans le temps permettent la répétition du choix en faveur d'une certaine technologie. Les rendements croissants d'adoption rendent cette option plus attrayante et l'avantage ainsi acquis devient insurmontable pour sa rivale. Tous les consommateurs alignent alors leur choix sur la technologie dominante, laquelle n'était pas forcément la plus performante au départ.

Ce modèle a toutefois une série de limites, notamment il s'applique surtout à la concurrence entre options technologiques contemporaines. Ceci est un handicap sérieux pour l'étude de la substitution technologique à long terme entre l'ancienne et la nouvelle technologie. Les modèles suivants permettent de mieux analyser la concurrence entre technologies non contemporaines entrant dans le marché à des moments différents dans le temps.

C. Décisions séquentielles et excès d'inertie

Le modèle précédent traite de la concurrence entre technologies alternatives comme par exemple le VHS et le Betamax, le PC et le Macintosh ou le logiciel Microsoft Office et les versions d'utilisation gratuite disponibles sur internet (« open sources »). Maintenant, nous considérons les cas de lutte entre une ancienne et une nouvelle technologie. Les deux sont mises sur le marché à des moments différents dans le temps et la structure d'adoption dépend de la séquence de décisions entre les deux périodes.

Katz et Shapiro (1986) ont analysé le cas lorsque les deux technologies sont compatibles soit par l'utilisation de convertisseurs, soit par la standardisation technologique. Ainsi, l'agent profite de la base installée, laquelle est composée de tous les consommateurs ayant acheté l'une ou l'autre des technologies dans le passé. Chaque agent acquiert alors la technologie qui lui permet d'avoir la plus grande satisfaction. Les auteurs montrent que dans ces conditions la meilleure technologie disponible triomphe.

Lorsque les technologies sont incompatibles, les agents sont incités à se coordonner pour profiter des effets de réseaux. Dans ce cas, s'il n'existe pas une technologie qui domine dans les deux périodes, la technologie émergente a tendance à avoir un avantage sur la technologie établie. Cela s'explique par le fait que la technologie ancienne ne peut s'engager de façon crédible à rassembler les consommateurs de la seconde période (Katz et Shapiro, 1986). Par conséquent, la coordination entre les agents assure la maximisation du surplus espérée dans les deux périodes. Les problèmes de coordination – provoqués par exemple par l'information incomplète - peuvent toutefois empêcher le développement de la nouvelle technologie.

Farrell et Saloner (1985, 1986) analysent les incitations à adopter une nouvelle technologie incompatible avec la technologie établie, lorsque les décisions d'adoption ne sont pas coordonnées. Au-delà de la supériorité technique, les auteurs montrent que le succès de la nouvelle technologie dépend encore de la date de lancement ; de la base installée de consommateurs de la technologie ancienne et de la rapidité avec laquelle les externalités de réseau sont réalisées.

Dans leur article de 1985, Farrell et Saloner développent un modèle théorique basé sur un jeu à deux étapes dans lequel deux entreprises décident de passer d'un standard inférieur à un autre supérieur. La norme supérieure a généralement tendance à augmenter les profits, mais la compatibilité avec l'autre entreprise est également valorisée. De ce fait, une entreprise est dans la meilleure situation lorsque les deux firmes passent à la norme supérieure. La situation est moins bonne si les deux entreprises restent à la norme inférieure, et pire encore si les entreprises sélectionnent des normes différentes, quoique dans ce dernier cas il est habituellement préférable d'être l'entreprise ayant adhéré à la nouvelle technologie. Les auteurs montrent qu'en information imparfaite et en absence de coordination, la firme n'est pas sûre que l'autre entreprise change de technologie en deuxième période. Cette éventualité est suffisante pour expliquer que les deux firmes ne changent pas de technologie, même quand elles ont une préférence pour le nouveau standard.

Il s'agit d'un phénomène d'*excès d'inertie*, caractérisé par une réticence excessive à changer pour le nouveau standard supérieur lorsque les effets de réseau sont importants. Farrell et Saloner (1986) ont considéré l'effet de l'existence d'une base installée de consommateurs de la technologie

ancienne. Les premiers adhérents à la nouvelle technologie doivent supporter les coûts de l'incompatibilité avec la base des consommateurs utilisant la technologie établie, en espérant que les bénéfices soient supérieurs aux coûts une fois que tous les agents aient basculé vers la nouvelle technologie. Les coûts de la transition sont alors au centre de l'analyse (Farrell et Klemperer, 2006). Un exemple de coûts de transfert (*switching costs*) est l'existence de stocks de technologie ancienne (p.ex. disques vinyle, cassettes magnétiques, disquettes) lesquels peuvent s'avérer un obstacle à l'entrée de nouvelles technologies dans le marché.

Mais l'adoption peut aussi se dérouler de manière trop rapide. L'effet des premières adhésions à la nouvelle technologie peut être amplifié par les externalités de réseau et ainsi déclencher une série d'adoptions en chaîne. Il peut y avoir un effet d'imitation, les autres agents adoptant la nouvelle technologie parce qu'elle est devenue plus attractive. Cela peut générer des surcoûts dans la mesure où les investissements dans la technologie ancienne et dans ses infrastructures deviennent échoués (Farrell et Saloner, 1986). Ce phénomène est appelé *l'excès de momentum* (élan).

En bref, les externalités de réseau provoquent un écart entre les incitations privées et les gains sociaux, écart qui peut être à la base de deux types d'inefficiences. L'une apparaît lorsque les incitations privées au changement sont supérieures aux bénéfices sociaux, l'adoption du meilleur standard se faisant de manière trop rapide du point de vue social. Cet excès de momentum provoque des orphelins technologiques et des actifs échoués liés à la technologie ancienne. L'autre inefficience s'observe lorsque les agents se montrent très réticents à adopter la nouvelle technologie dont l'adoption initiale serait plus efficace ; il s'agit du problème de l'excès d'inertie. Les adopteurs attendent que les autres consommateurs adoptent la nouvelle technologie. Comme tous les agents ont peur de se retrouver isolés avec la nouvelle norme, cette technologie n'est pas adoptée. Le premier à adopter la nouvelle technologie supporte l'essentiel des coûts de l'incompatibilité avec la base installée des consommateurs. C'est un bien public pour tous ceux qui cherchent à changer de technologie. Une manière de combattre l'inertie et d'inciter au changement passe par les subventions de l'Etat aux agents qui amorcent ce mouvement.

1.2.2. Modèles de substitution technologique de long terme

La transition technologique de long terme a été modélisée par Grübler (1998), Marchetti et Nakicenovic (1979), comme étant un processus de substitution et concurrence technologique. Cette analyse s'inspire du modèle simple de Fisher-Pry (1971)³³⁷ de substitution technologique de l'ancienne par la nouvelle technologie à travers un processus décrit par une courbe logistique du type

$$\frac{f}{f-1} = e^{(a+bt)}$$

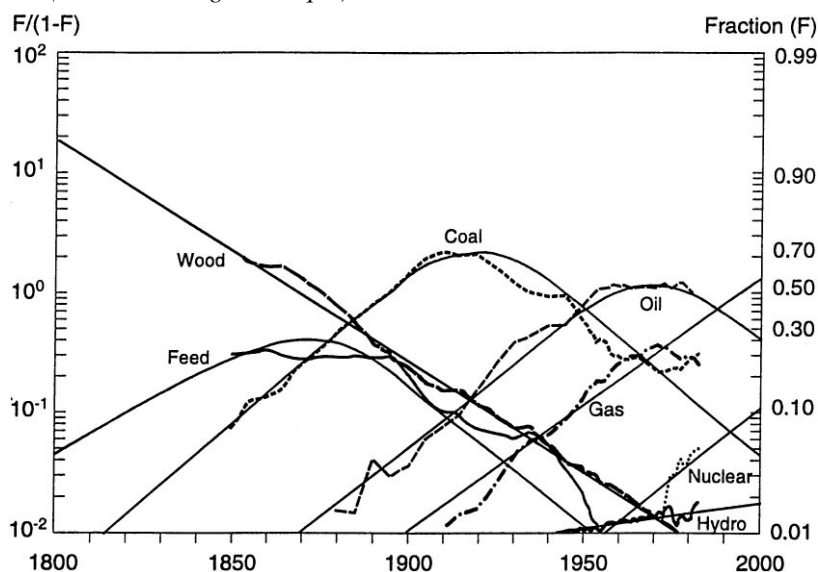
où t est la variable indépendante représentant l'unité de temps, f la part de marché du nouveau concurrent et $(f-1)$ la part de marché de l'ancienne technologie. La concurrence entre une technologie j et les autres technologies alternatives i est traduite à chaque instant par l'expression

³³⁷ Le modèle de Fisher-Pry (1971) considère que le point d'inflexion apparaît pour une part de marché de 50% ($F=0,5$).

$$F_j = 1 - \sum_{i=1}^j F_i$$

Ainsi, le modèle de Marchetti et Nakicenovic (1979) permet de représenter la concurrence entre diverses technologies. Il permet aussi d'analyser la saturation du marché par la vieille technologie et sa substitution par la nouvelle.³³⁸ Ceci était une faiblesse des modèles de substitution technologique précédents dans lesquels le vainqueur prend tout le marché en verrouillant l'entrée aux nouvelles technologies, sans prendre en compte les moments de transition technologique observés dans la pratique.

Graphique 84. Transition énergétique de long terme aux Etats-Unis vers l'utilisation de sources moins intensives en carbone (échelle semilogarithmique)



Source : Grübler et al, 1999.

Ce modèle a été appliqué aux données historiques et a fait preuve d'une grande robustesse (graphique 84). Mais l'explication par des facteurs économiques à la base de la transition est très limitée. En particulier, le processus de formation des ruptures technologies n'est que faiblement analysé par ces modèles de substitution technologique.

1.2.3. Les limites à la domination technologique : l'importance de l'espace local

Dans certaines situations, la domination technologique n'est pas totale. En effet, la décision des agents peut être influencée par des facteurs d'ordre local plutôt que par le mouvement « global » d'adoption. Cela tient à la limitation locale des effets de réseau (Foray, 2002). Par exemple, le choix de l'ordinateur personnel Macintosh au lieu du standard - plus diffusé - PC peut refléter la préférence du contexte local à la première technologie. Les bénéfices de la taille du réseau sont alors

³³⁸ Le modèle utilise les propriétés non-logistiques du modèle de transition technologique. Le moment du passage de la courbe logistique de croissance vers la courbe de déclin est identifié de la manière suivante : soit $Y_i(t) = a_i + b_i \cdot t$ où les paramètres a_i , b_i et t sont les mêmes que dans le modèle de Marchetti et Nakicenovic (1979). Le point de transition est défini par le moment où la courbure de $Y_i(t)$ relativement à la pente atteint sa moindre valeur. C'est-à-dire le minimum de l'expression $y_i''(t) / y_i'(t)$.

A partir de cet instant, la trajectoire de la technologie est représentée par une nouvelle courbe caractérisée par les paramètres suivants : $b_i = y_i'(t)$; $a_i = y_i(t) - b_i \cdot t$.

déterminés à l'échelle locale. En raison du choix technologique, les utilisateurs trouvent à proximité plus de biens complémentaires et de services pour la technologie moins diffusée au niveau global. Ainsi, lorsque les externalités positives de voisinage sont supérieures aux bénéfices d'adhésion au standard majoritaire, les agents sont incités à ne pas changer pour la technologie dominante et des petites agglomérations de technologies alternatives survivent en opposant une résistance à la domination du marché par une autre technologie. Les bénéfices des agglomérations technologiques compensent les coûts de non compatibilité au standard général.

Le succès de l'expérience brésilienne d'utilisation de l'éthanol dans les transports, malgré tous les échecs que cette filière a connu par ailleurs, est un exemple de l'importance des rétroactions positives au niveau local, lesquelles ont permis le développement de ce segment de marché.

Section 2. La concurrence entre hydrogène et électricité en présence d'effets de réseau

La pénétration de l'hydrogène dans les transports est très complexe parce qu'elle concerne la diffusion de plusieurs éléments à la fois : la plateforme de propulsion ; la source énergétique ; et l'infrastructure nécessaire à la distribution du carburant. Cela exige la coordination des décisions de plusieurs acteurs (producteurs de voitures, fournisseurs de carburants et consommateurs). Cette complexité se retrouve dans quelques exemples historiques, comme la substitution des chevaux par les automobiles, ou la diffusion des voitures diesel. La substitution de la technologie ancienne soulève des résistances de la part des agents qui ont des investissements dans l'actuel paradigme. De même, les voitures sont un bien durable et le rythme de diffusion de la nouvelle technologie est contraint par la vitesse de remplacement des véhicules. Par ailleurs, la PAC est en concurrence avec d'autres alternatives technologiques pour la succession du moteur à combustion. La voiture électrique est un sérieux candidat pour l'avenir comme elle l'a été dans le passé.³³⁹ Cette technologie s'adapte parfaitement aux nécessités des consommateurs dont la plupart des déplacements s'effectuent sur de faibles ou moyennes distances. Mais cela se fait au détriment de performances, d'un confort et d'une autonomie moindres. Spécifiquement, le rayon d'action limité continue à être un inconvénient majeur de la voiture électrique à batterie. La voiture électrique rechargeable équipée d'un petit moteur à combustion pour les grands trajets apparaît comme une solution à ces problèmes. Celle-ci serait alors une alternative à la plateforme PAC à hydrogène.

Les alternatives technologiques doivent atteindre les objectifs techniques et de coûts qui leur permettent d'être compétitives avec la voiture conventionnelle et d'entrer sur le marché. Cela est cohérent avec l'idée que la décision de commercialisation doit être prise par les entreprises. Le modèle de concurrence multitechnologique permet de simuler des sentiers de diffusion réalistes, spécialement pendant les premières années lorsque les différentes options technologiques sont en concurrence. Une des questions importantes que nous étudions maintenant est l'impact des avantages initiaux sur le résultat final. En particulier, l'analyse cherche à comprendre lequel de ces avantages est le plus significatif : l'avance initiale en termes de part de marché et de visibilité ; ou l'avantage d'une entrée plus tardive en termes d'efficience et de spillovers.

³³⁹ Voir chapitre 1.

2.1. La littérature existante sur la diffusion de l'hydrogène dans les transports

La diffusion de l'hydrogène dans les transports n'est pas possible sans la mise en place des infrastructures dont l'évolution est liée au développement de la demande. Les travaux existant montrent les difficultés pour sortir de ce paradigme de l'œuf et de la poule. Conrad (2004) analyse la transition pour les voitures PAC à partir d'un modèle du type Hotelling avec différenciation de produit entre la firme qui vend les voitures à essence (opérateur historique) et les fabricants de voitures à hydrogène (nouveaux entrants), lesquels doivent investir dans le nouveau réseau. Le modèle conclut que l'augmentation du prix du pétrole, ainsi que l'investissement dans l'infrastructure, permettent à l'hydrogène d'entrer sur le marché. L'auteur montre encore que les investissements dans les stations d'hydrogène doivent générer des pertes pendant les premières années, en particulier si les montants investis sont élevés, les effets de réseau forts, et le coût unitaire de l'hydrogène élevé. L'Etat pourrait alors subventionner les premiers projets de manière à réduire les pertes des innovateurs.

Greaker et Heggedal (2007) s'inspirent aussi des modèles de Katz et Shapiro (1985, 1986) et de Farrell et Saloner (1985, 1986) pour étudier la concurrence entre la voiture PAC à hydrogène et la voiture conventionnelle. Particulièrement, l'analyse cherche à trouver les équilibres de Nash qui rendent compatibles les intentions d'achat des voitures au nombre de stations ouvertes. Les auteurs trouvent un « lock in » seulement lorsque la voiture à hydrogène n'arrive pas à percer dans le marché en dépit d'un faible écart de coût par rapport à la voiture à combustion interne, notamment en raison de l'insuffisance du nombre de stations-service. La ligne de fond est que le marché est plus en mesure de choisir la meilleure technologie que les entités politiques. Néanmoins, rien n'est dit quant à la capacité du marché à créer des alternatives technologiques au pétrole. Par ailleurs, la prise en compte des pertes associées à la moindre utilisation de l'infrastructure actuelle en raison de la diffusion de l'hydrogène, nous semble tout de même moins importante que la réduction des externalités négatives dans les transports.

Schneider et al. (2004) analysent un système dynamique d'invention, d'innovation et d'imitation, appliqué à la voiture PAC. Le modèle essaye de comprendre le choix stratégique des firmes, en particulier les avantages des pionniers en termes de monopole et de part de marché, et des suiveurs en termes d'apprentissage et d'effets de débordement. Les firmes peuvent agir sur les dépenses en R&D, le marketing et le prix de la voiture. La variable centrale de décision est la date de lancement du véhicule. Les résultats montrent que les pionniers trouvent des avantages dans le cadre d'une politique environnementale forte. En revanche, lorsque l'influence externe est défavorable à la diffusion de l'hydrogène, la position des retardataires est plus avantageuse.

Schwoom (2006) analyse la transition vers les voitures à hydrogène à l'aide d'un modèle basé sur le comportement des agents. A la différence des travaux précédents, ce modèle tient compte de l'hétérogénéité des consommateurs. Le propos de l'étude est de comprendre l'impact des politiques de soutien à la voiture à hydrogène comme la taxe sur la voiture conventionnelle et le programme de mise à disposition des infrastructures. Il est montré que la mise en place graduelle de la taxe est moins efficace pour stimuler la diffusion des alternatives technologiques que sa mise en œuvre d'un seul coup. Cependant, il s'agit d'un modèle visant surtout à discuter des facteurs à la base de la

diffusion plutôt qu'un outil de prévision. Par exemple, le rythme trouvé de substitution technologique (40 à 70% de part de marché en 15 ans) est sans précédent dans l'histoire de l'automobile.

Un autre exercice de modélisation comportementale de systèmes dynamiques révèle encore une fois les obstacles au remplacement de la technologie actuelle. Les principales variables considérées dans l'étude de Struben et Sterman (2007) sont la probabilité de contact entre consommateurs, la disponibilité de l'infrastructure et le coût de production des voitures. La rénovation du parc automobile s'avère être une variable clé pour la transition. En outre, l'étude essaye de représenter la propension des consommateurs à considérer l'acquisition de la nouvelle voiture par le biais d'un seuil critique traduisant l'impact du cercle vicieux caractérisé par une faible adoption, une faible disponibilité du carburant, et des coûts élevés. Les auteurs estiment que le défi est alors de mettre en place des politiques durant un laps de temps suffisamment long pour pousser le marché à atteindre la taille critique. En deçà, les rétroactions négatives influencent le comportement des acheteurs de manière à ce que le seul équilibre stable est l'absence de demande pour la voiture à hydrogène. Une limite de cette approche est la non prise en compte de l'effet de la concurrence d'autres alternatives technologiques (comme la voiture électrique) sur la diffusion de la voiture à hydrogène.

Enfin, Criqui et Mima (2008) proposent une simulation prospective de l'évolution technologique dans les transports à l'aide du modèle énergétique POLES à technologie explicite.³⁴⁰ L'exercice traite notamment de la concurrence entre la voiture électrique et la voiture à hydrogène. Les effets de réseau sont modélisés de la manière suivante : une diffusion plus rapide stimule les économies d'apprentissage dans la production et dans la consommation, lesquelles déclenchent des rendements croissants d'adoption à la base d'un effet boule de neige. En présence de tels effets, la voiture électrique se diffuse en premier et gagne une position de marché importante (60% environ) avant le milieu du siècle, au moment où la voiture à hydrogène entame sa diffusion. Un autre scénario est développé pour mesurer l'impact conjoint des effets de réseau et d'importantes percées technologiques dans chacune des technologies. Le résultat est la création d'un verrouillage sur la technologie qui est la plus proche de la commercialisation, la voiture électrique ; une base installée est créée, suffisante pour empêcher la diffusion plus tardive de la voiture PAC à hydrogène, laquelle serait victime d'un effet d'inertie à la Farrell et Saloner (1985, 1986). Cette analyse soulève toutefois plusieurs questions : tout d'abord sur le type de voiture électrique considérée (voiture à batterie ou électrique rechargeable ?), la faisabilité technique, et l'acceptabilité sociale. Cette dernière est particulièrement intéressante dans le cas de la voiture électrique à batterie, qui est confrontée à l'heure actuelle à des limites de confort et de performance importantes. Un tel résultat signifierait dans la pratique un changement radical de la façon dont la mobilité personnelle est perçue par la société.

Une simulation précédente du même modèle compare l'effet de la diminution drastique des coûts de la pile à combustible, et la décision des pouvoirs publics de mettre en place l'infrastructure, en tant que service public (Kouvaritakis, 2007). La demande d'hydrogène pour les transports et le marché stationnaire augmente de 80% dans le scénario où les coûts de la pile à combustible sont réduits à

³⁴⁰ Le modèle POLES est un modèle d'équilibre partiel en simulation récursive utilisé pour la prospective énergétique à long terme.

ses limites physiques, alors que cette augmentation ne dépasse pas 20% dans le cas où l'infrastructure est prise en charge par le gouvernement.

Les travaux existant montrent bien les facteurs sous-jacents à la décision des consommateurs, constructeurs et distributeurs de carburant, d'investir dans l'hydrogène. Mais la réalité n'est pas si linéaire ; il existe plusieurs imperfections et rigidités qui augmentent l'inertie des comportements, lesquelles n'apparaissent pas dans les analyses théoriques. Les informations sur les changements technologiques dans l'automobile peuvent donner des indications pertinentes sur les sentiers faisables de diffusion pour l'hydrogène. En particulier, les modèles d'adoption avec externalités peuvent être calibrés de manière à prendre en compte cette information.

2.2. La lutte technologique entre la voiture électrique rechargeable et la voiture pile à combustible à hydrogène pour le remplacement de la voiture à combustion

A l'aide d'un modèle de diffusion simple nous essayons de comprendre la concurrence technologique entre la voiture électrique rechargeable et la voiture pile à combustible à hydrogène pour les ventes d'automobiles dans un marché comme le marché français.

2.2.1. Présentation du modèle

Le Bas et Baron-Sylvestre (1995) proposent une extension du modèle épidémique de Mansfield (1968) au cas de la mult substitution technologique. Ce modèle souligne l'importance de la vitesse de diffusion, laquelle peut être encore plus importante que la différence de parts de marché au départ.

Le modèle repose sur des hypothèses similaires à celles du modèle épidémique original : la population potentielle d'adhérents est constituée d'un nombre constant d'individus ; chacun utilise une seule technologie à la fois ; deux innovations sont en concurrence pour se substituer à la technologie ancienne (Z) moins performante ; les caractéristiques des innovations, notamment en termes de niveau d'investissement requis (I_i) et de rentabilité (r_i), sont constantes au cours de la diffusion. Les résultats sont présentés en termes de parts de marché. La vitesse de diffusion de l'innovation est représentée par l'expression (cf. Mansfield, 1968) :

$$\theta_i = \beta_1 + \beta_2 r_i + \beta_3 I_i + \varepsilon_i$$

avec $\beta_1 < 0$ et $\beta_2 > 0$.

La dynamique de diffusion est la même que dans le modèle de Mansfield, c'est-à-dire que la diffusion est déterminée par l'incertitude sur les caractéristiques de l'innovation. L'incertitude sur l'innovation Y_i est fonction de la part d'utilisateurs de cette même technologie au moment t : $\frac{Y_{i,t}}{Z_0}$. Ainsi, l'évolution de l'adoption est donnée par l'expression :

$$\lambda_{i,t} = \theta_i \frac{Y_{i,t}}{Z_0}$$

Le rythme de diffusion de l'innovation i entre le moment t et $t+1$ est défini par :

$$\lambda_{it} = \frac{Y_{it+1} - Y_{it}}{Z_t} = \frac{\dot{Y}_{it}}{Z_t}$$

A partir des deux équations précédentes, on peut écrire un système d'équations différentielles pour chacune des technologies :

$$\begin{cases} \dot{Y}_{1t} = \theta_1 Y_{1t} \frac{Z_t}{Z_0} \\ \dot{Y}_{2t} = \theta_2 Y_{2t} \frac{Z_t}{Z_0} \end{cases}$$

avec $\dot{Z}_t = -(Y'_{1t} + Y'_{2t})$.

Le modèle permet alors de représenter à la fois la substitution de l'ancienne technologie, et la dynamique concurrentielle entre les nouvelles technologies pour les parts de marché. Le principe est le même que dans la théorie de la gestion des ressources communes de Stiglitz et Dasgupta (1980) : les nouvelles technologies sont en concurrence pour chaque utilisateur de l'ancienne technologie ; au fur et à mesure que l'une est adoptée par un consommateur, le marché potentiel pour les autres technologies se réduit dans la même proportion. L'incitation est alors forte à occuper le marché le plus vite possible de manière à ne pas laisser la place aux technologies rivales.

2.2.2. Collecte de données et hypothèses structurantes

L'estimation des vitesses de diffusion (ou ratios d'imitation) pour la voiture hybride rechargeable (PHEV) et la voiture pile à combustible à hydrogène (FCV) nécessite des informations sur leur rentabilité et l'investissement initial. La rentabilité est évaluée par la diminution des coûts variables. Celle-ci est en relation directe avec l'efficacité d'utilisation : plus la technologie est efficace, plus faibles sont les coûts opérationnels. L'investissement initial représente le prix payé par le consommateur pour acheter la technologie. Celui-ci n'exprime pas seulement les coûts de production, mais aussi d'autres variables telles que les marges du vendeur. Pour rendre plus claires les hypothèses, nous avons exprimé les coûts et l'efficacité selon les termes de la voiture à essence conventionnelle. A partir d'une revue de la littérature présentée dans le chapitre 1, nous retirons l'efficacité de la voiture hybride rechargeable et de la voiture pile à combustible : 2,3 et 2,7 respectivement. Le coût de la voiture multifonctions hybride rechargeable est évalué comme étant 2 fois supérieur à celui de la voiture conventionnelle (44.000 € par rapport à 22.000 € de la voiture ICE). Dans le cas de la voiture pile à combustible, ce coût est estimé 2,3 fois plus grand, soit 50.000 €. ³⁴¹

Par spécification du modèle, les coûts et les efficacités sont censés ne pas changer pendant le processus de diffusion. Les nouvelles technologies entrent sur le marché à partir du moment où elles sont compétitives et luttent désormais pour les parts de marché. Cette hypothèse est défendable

³⁴¹ Le coût de la voiture PHEV provient de la base de données TECHPOLES et représente le coût estimé pour 2020 (€2005). Selon la même base de données, le coût de la voiture pile à combustible sera de 80.000 € en 2020, mais l'objectif européen « Snapshot 2020 » prévoit un coût situé entre 23 et 26.000 € pour la même date. Nous avons décidé de prendre l'objectif de Toyota, soit 50.000 € (1€=1\$ assumé).

dans le court et moyen termes, où les gains d'apprentissage ne doivent pas bouleverser la concurrence technologique. Cependant, pour une analyse prospective de plus long terme, les économies d'apprentissage jouent un rôle important pour le résultat final.

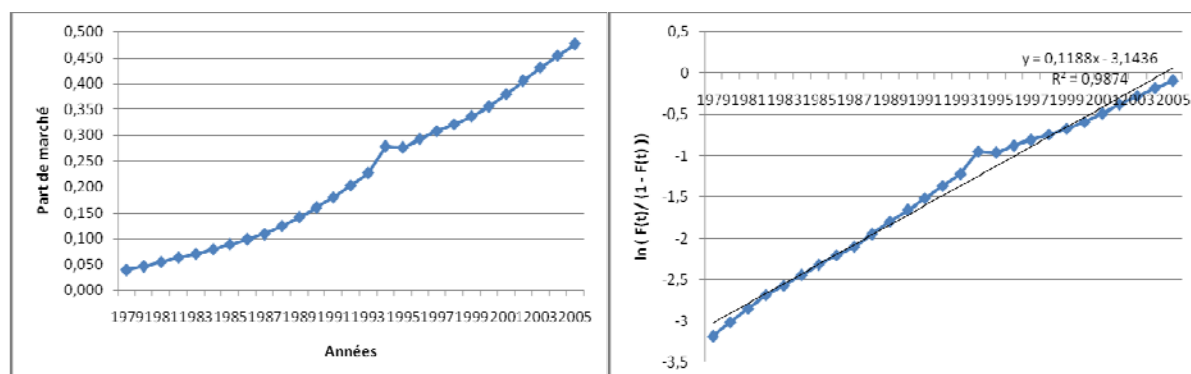
En l'absence d'informations suffisantes pour estimer les coefficients de diffusion de chacune des nouvelles technologies, nous avons pris le choix d'identifier empiriquement la vitesse de diffusion, dans le passé, des technologies qui peuvent servir de référence pour la technologie hybride rechargeable ou pour la pile à combustible. Afin de calculer de tels coefficients de diffusion, nous utilisons l'équation de base du modèle épidémique de Mansfield :

$$\ln \left[\frac{F_i(t)}{1-F_i(t)} \right] = I_i + \phi_i \cdot t$$

Mesuré en années (à partir de 1900), où $F_i(t)$ est la part de marché de la technologie i au moment t , I_i est un indicateur d'échelle de diffusion et ϕ_i représente la vitesse de diffusion. Cette équation est traitée comme une régression linéaire, et les coefficients des paramètres sont estimés à partir de la méthode des moindres carrés.

Dans cette étude, sauf indication contraire, nous faisons l'hypothèse que la diffusion de la voiture PHEV ou de la FCV suivra la même trajectoire historique que le diesel en France. L'évolution du parc automobile vers le diesel présente quelques similitudes avec le changement vers les voitures prises en compte dans la présente analyse. Tout d'abord, il s'agit d'une technologie différente de propulsion. Puis, le changement nécessite le déploiement d'une infrastructure de distribution spécifique au nouveau carburant (le plus souvent par le réaménagement des stations-service existantes). Le développement du diesel en France est un cas d'étude très intéressant parce que depuis son introduction dans les années 1970, le gasoil a gagné une position de marché significative. Actuellement la moitié du parc français utilise le diesel, et plus de 77% des voitures vendues en 2008 sont des voitures au gasoil, ce qui positionne la France comme un des leaders mondiaux dans la consommation de diesel dans les transports personnels (graphique 85).

Graphique 85. La diffusion de voitures diesel en France (à gauche) et estimation des paramètres de diffusion selon le modèle de Mansfield (à droite)



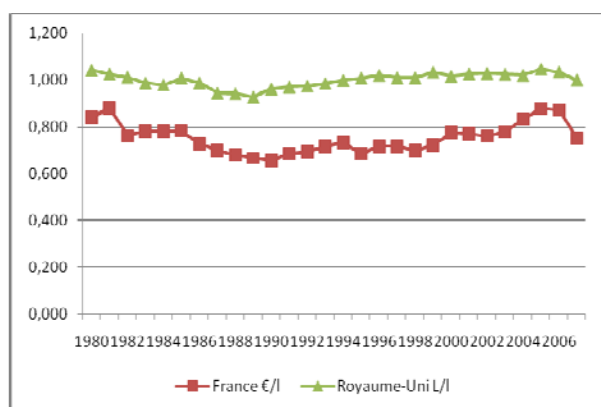
Source : Eurostat, 2009.

Cette évolution est due aussi au soutien public accordé au gasole. L'intérêt porté à la diésélisation du parc automobile s'explique par la plus grande efficacité énergétique du gasoil, ce qui permettait de réduire la facture pétrolière annuelle et les émissions de CO₂. En fait, la voiture diesel consomme en

moyenne moins d'un litre de carburant par 100 km par rapport à la voiture essence.³⁴² L'efficacité moyenne de la voiture diesel est alors de l'ordre de 15% (Schipper et al., 2002).³⁴³

Ainsi les taxes à l'achat de la voiture étaient plus faibles par rapport à la voiture à essence et l'Etat a aménagé la taxation du diesel de manière à ce que celui-ci coûte moins cher que l'essence (Schipper et al., 2002).³⁴⁴ Le prix du diesel à la pompe a même été 35% moins élevé que l'essence en France, en 1990 (graphique 86). La différence moyenne de prix entre 1980 et 2006 est de 25%. En plus de l'efficacité, le faible prix du carburant fait que la diminution du coût par kilomètre est de l'ordre de 40%.³⁴⁵ En outre, la hausse du prix de l'essence a poussé au remplacement des véhicules vers le diesel (l'élasticité croisée de la demande de diesel par rapport au prix de l'essence étant positive).

Graphique 86. Prix du diesel à la pompe exprimé en termes du prix de l'essence en France et au Royaume-Uni



Source : Enerdata, 2009.

Néanmoins, les voitures roulant au diesel émettent plus de polluants pour l'air urbain. En effet, ces voitures sont une source importante d'augmentation du taux de particules fines dans l'air, ce qui entraîne des risques pour la santé publique, tel que des maladies cardiovasculaires, l'altération des fonctions pulmonaires, le cancer du poumon et la diminution de l'espérance de vie.³⁴⁶ De plus, la diminution du coût par kilomètre induit un effet de rebond de la consommation qui efface les avantages en termes d'efficacité.³⁴⁷ Les gains de l'utilisation de la voiture diesel doivent toutefois compenser le prix additionnel à l'achat. Celui-ci a été en moyenne 15% plus cher que la version

³⁴² L'évolution de la consommation énergétique des voitures en Europe, dont la majeure partie étaient des voitures à essence, est resté stable entre les années 1980 et 2005 aux alentours de 8 litres aux 100 km, les gains d'efficacité étant compensés par l'augmentation de la taille et du poids des voitures (AIE, 2008).

³⁴³ Voir le chapitre 1 pour une revue de la littérature sur les efficacités « du réservoir à la roue » des différentes technologies de propulsion automobile.

³⁴⁴ Voir le chapitre 5 pour la taxation des carburants.

³⁴⁵ En gros, l'amélioration de l'efficacité (+15%) et le différentiel de prix face à l'essence (25%) expliquent les 40% de réduction du coût par km. Schipper et al. (2002) présente une méthode plus rigoureuse de calcul des avantages du diesel : $(\text{Prix}_{\text{Diesel}}/\text{Prix}_{\text{Essence}}) * (\text{Consommation}_{\text{Diesel}}\text{Km}/\text{Consommation}_{\text{Essence}}\text{Km})$. Les auteurs arrivent au même résultat.

³⁴⁶ La diésélisation des transports pose une question importante au niveau de la hiérarchisation des priorités environnementales des pays : est-ce qu'il vaut mieux réduire les émissions de CO₂ responsables du changement climatique et dont tous les pays bénéficient ; ou vaut-il mieux réduire les polluants de l'air local comme l'oxyde d'azote ou les particules, mais dans ce cas au prix d'une augmentation des émissions de CO₂ ?

³⁴⁷ Le kilométrage moyen en France a été de 12.015 km en 2008, dont 8.658 km pour les voitures à essence et 15.106 km pour les diesel (CCFA, 2009).

essence en raison d'un différentiel de coûts de production et de différenciation de prix par les marques (Schipper et al., 2002).

Une autre transition intéressante dans l'automobile est la progression récente des voitures hybrides. La diffusion de ces voitures donne des indications importantes quant au changement des préférences des consommateurs et donc quant à la trajectoire possible de diffusion des alternatives technologiques au couple moteur à combustion/carburants fossiles. En l'absence de données sur l'évolution des ventes de voitures hybrides en France, nous avons utilisé le cas des Etats-Unis. Dans ce pays la voiture conventionnelle est ancrée dans la culture et pratiquement tous les essais précédents pour remplacer la voiture à essence dans les transports se sont soldés par un échec (hormis quelques expériences de démonstration de voitures à gaz naturel et électriques en Californie). L'adoption de la voiture hybride (principalement la Toyota Prius) constitue ainsi un véritable tournant. La durée de dix ans de l'expérience et l'accélération presque constante des ventes pendant tout ce temps fournissent les conditions idéales pour l'étude.³⁴⁸

Le présent exercice consiste à considérer deux hypothèses alternatives pour la diffusion de la voiture FCV : le rythme historique de développement du diesel en France, ou le taux de diffusion récent des voitures hybrides aux Etats-Unis.

Le tableau suivant synthétise les postulats et le comportement de diffusion observé dans le passé pour les différentes technologies.

Tableau 46. Paramètres et estimations de la vitesse de diffusion à partir d'informations réelles

Technologies	ni	ri	li	Li	Øi (R²)*
Essence en France	105	1	1	-8,53	0,125 (98,74%)
Diesel en France	26	1,40	1,15	-3,14	0,12 (94,89%)
Hybride aux USA	9	1,5	1,25	-6,1	0,40 (94,19%)
PHEV	-	2,3	2	-	-
FCV	-	2,7	2,3	-	-

Le R² montre la qualité d'ajustement de l'équation utilisée pour obtenir le Ø à partir de données réelles $\ln(Fi(t)/(1 - Fi(t))) = li + ØL.t$ (cf. Mansfield, 1968).

2.2.3. Les résultats des simulations de la concurrence technologique

Il est peu probable que la voiture électrique rechargeable et la voiture à pile à combustible entrent simultanément sur le marché, et que leur vitesse de diffusion respective soit égale. Ainsi, notre analyse de la concurrence technologique est faite selon plusieurs hypothèses quant à la vitesse de diffusion technologique, d'une part ; et la différence initiale des parts de marché entre les nouvelles technologies, d'autre part.

A. Hypothèses de sentiers de diffusion

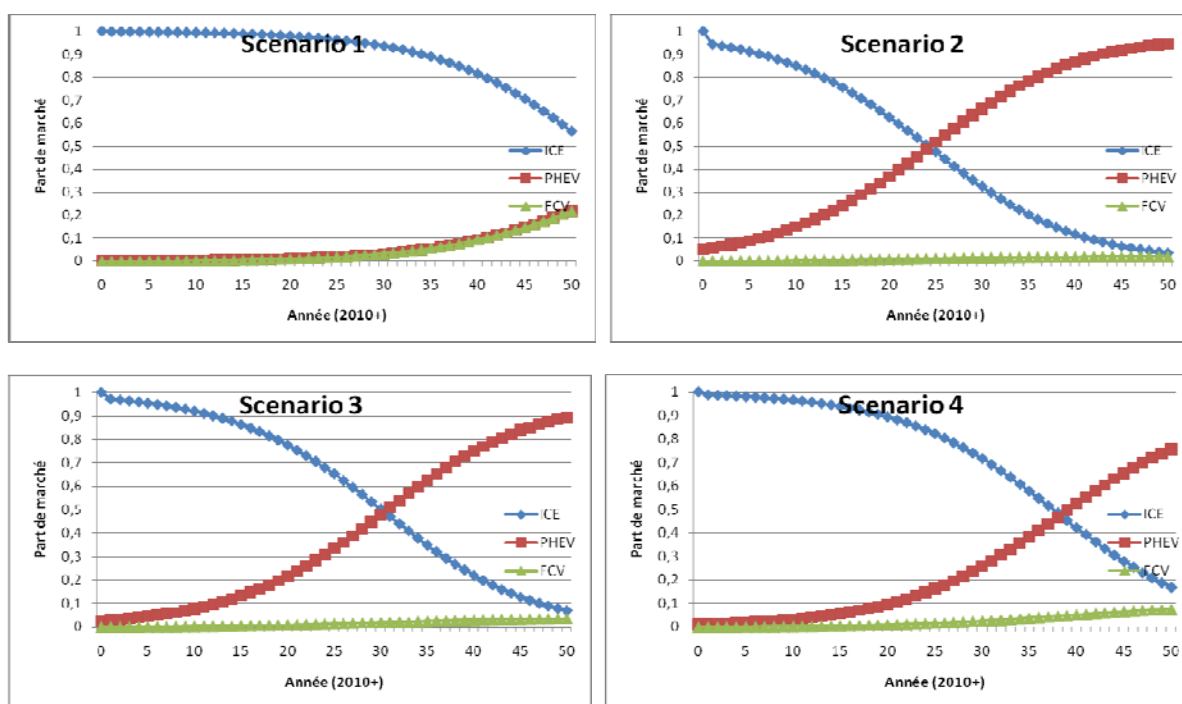
Dans cette première série de simulations, nous partons du principe que les comportements de diffusion de la voiture hybride rechargeable (PHEV) et de la voiture pile à combustible à hydrogène (FCV) sont les mêmes et sont identiques au ratio de diffusion de la voiture diesel dans le passé

³⁴⁸ Voir graphique 71 du chapitre 5.

($\phi=0,125$). Dans le cadre du modèle de Le Bas et Sylvestre, dont l'analyse est une extension du modèle original de Mansfield (1968), cela veut dire que (i) les paramètres (rentabilité et investissement) expliquant la vitesse de diffusion sont associés à des coefficients très bas, et/ou (ii) les effets positifs de la rentabilité sont compensés par l'impact négatif du coût initial (dans la même mesure).

Il est probable que la voiture hybride rechargeable – plus proche de la commercialisation - entre la première sur le marché et gagne un avantage initial. Les graphiques suivants présentent les résultats des simulations pour quatre situations différentes selon que les technologies sont dans des conditions similaires ou pas. Dans le premier scénario, l'hypothèse est avancée que les technologies entrent sur le marché au même moment ; il n'y a donc pas de différence de parts de marché au départ. Dans les trois autres cas, la voiture PAC à hydrogène doit faire face à une base déjà installée de consommateurs de la voiture hybride rechargeable (1%, 2,5% ou 5% du marché). Les résultats sont présentés en termes de parts de chaque technologie (ICE, PHEV et FCV) dans les nouvelles immatriculations annuelles (graphique 87).

Graphique 87. Parts de marché des voitures alternatives parmi les nouvelles voitures vendues. Trajectoires de diffusion construites à partir du comportement historique de la diffusion du diesel en France



Scenario 1: Pas de différence initiale entre PHEV et FCV

Scenario 2: PHEV part avec 5% de part de marché initiale

Scenario 3: PHEV part avec 2,5% de part de marché initiale

Scenario 4: PHEV part avec 1% de part de marché initiale

Le scénario 1 présente le cas où PHEV et FCV ont des vitesses de diffusion identiques et la même part de marché au départ. Le résultat final est alors évident : les nouvelles technologies se retrouvent avec le même quota de marché. Une autre caractéristique intéressante de cette situation est que la voiture conventionnelle (ICE) conserve son leadership, et le marché reste verrouillé par les carburants fossiles. Aucune des nouvelles technologies n'atteint une base installée permettant de faire jouer les effets de réseau en sa faveur et ainsi remplacer la technologie existante. En outre, ce

scenario pose des problèmes sérieux au niveau de la soutenabilité. La transition prendra plus longtemps (plus de 50 ans), ce qui soulève des questions importantes au niveau de la disponibilité du pétrole et de la réduction des émissions polluantes dans le secteur des transports.

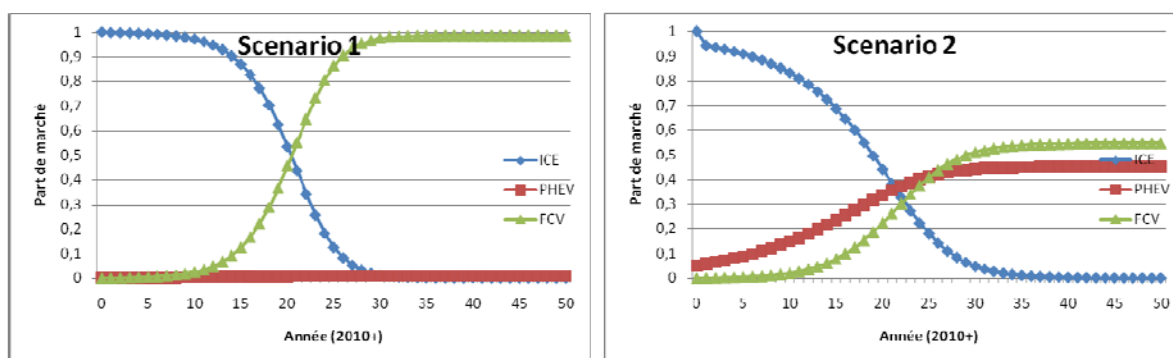
Lorsque la voiture PHEV dispose d'un avantage initial et que la trajectoire de diffusion est similaire entre les deux technologies, il va de soi que le marché se verrouille sur la technologie qui se diffuse en premier. En effet, la voiture PHEV gagne une position de marché telle qu'elle bloque l'arrivée de la nouvelle voiture FCV. Toutefois, il ne s'agit pas d'une situation de défaillance de marché ou de « lock-in » technologique parce que la vitesse de diffusion des deux technologies est identique. Dans l'optique du consommateur, la plus grande efficacité de la voiture FCV n'est pas en mesure de justifier son coût additionnel.

B. L'impact du prix du véhicule et du coût du carburant

La plus grande efficacité de la voiture FCV est susceptible d'expliquer une vitesse de diffusion plus grande que pour la technologie rivale. Dans ce modèle, la vitesse de diffusion est en relation linéaire avec la rentabilité de l'innovation et son coût initial. Toutefois, l'absence de données disponibles à ce stade - les transitions dans l'histoire de l'automobile sont plutôt rares - limite la capacité d'estimer la vitesse de diffusion des nouvelles technologies pour les transports à partir du modèle original. Une manière de contourner ce problème passe par la prise en compte de différentes vitesses de diffusion, notamment la comparaison de la trajectoire historique de diffusion du diesel en France avec celle plus récente des voitures hybrides aux Etats-Unis.

Les graphiques suivants présentent les résultats d'une simulation dans laquelle la vitesse de diffusion de la voiture pile à combustible à hydrogène (FCV) est égale à celle de la voiture hybride aux Etats-Unis dans les années 2000, tout le reste étant supposé constant.

Graphique 88. Trajectoires de diffusion de la voiture FCV construites à partir du comportement de la diffusion des voitures hybrides aux Etats-Unis, sans et avec une différence initiale de parts de marché pour la voiture PHEV



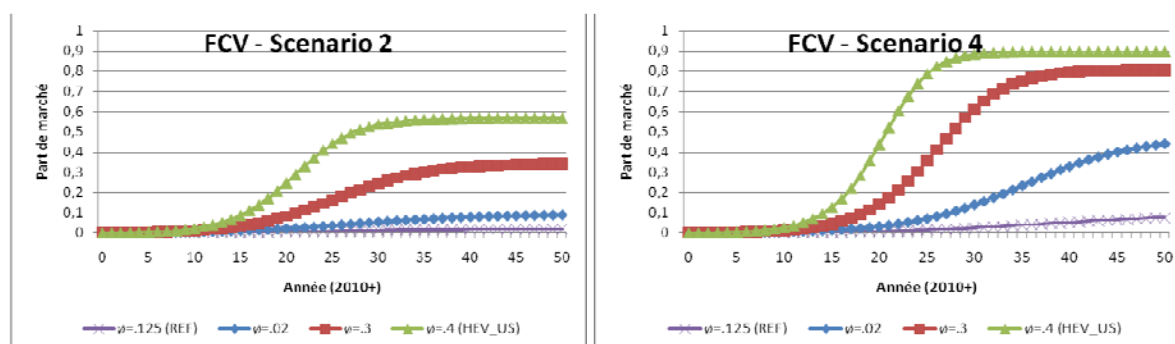
Scenario 1: Pas de différence initiale entre PHEV et FCV
 Scenario 2: PHEV part avec 5% de part de marché initiale

La voiture FCV domine les nouvelles immatriculations environ trente ans après le début de sa commercialisation. La période entre le moment où le seuil des 5% du marché est franchi et l'instant où elle atteint 95% des ventes de voitures nouvelles est de 23 ans (28-5). Lorsque la voiture PHEV a un avantage de 5% au moment de l'entrée de la voiture FCV (graphique de droite), cette dernière

réussi à rattraper le retard et à s'imposer. Mais cette fois le résultat final est le partage du marché entre les nouvelles technologies. Ce résultat n'est pas surprenant, bien que le secteur de l'automobile soit marqué dans le passé par la tendance à la standardisation sur une seule technologie. Il est possible aussi que la période d'analyse soit trop courte, ne permettant pas d'étudier le phénomène de transition et le déclin d'une technologie nouvelle. Cela peut faire l'objet de futures simulations.³⁴⁹

Nous présentons maintenant le comportement de la voiture FCV par rapport à des rythmes de diffusion différents. Ceci étant, on fait varier ϕ de 0,125 (diffusion du diesel en France) à 0,40 (diffusion de la voiture hybride aux Etats-Unis) par pas de 0,1 (graphique 89).

Graphique 89. Sensibilité aux changements de la vitesse de diffusion des voitures PAC à hydrogène pour les différents scenarios sur le désavantage initial par rapport à la voiture PHEV en termes de part de marché



Scenario 2: PHEV part avec 5% de part de marché

Scenario 4: PHEV part avec 1% de part de marché

La vitesse de diffusion conditionne fortement l'évolution des technologies dans le marché. En ce qui concerne l'hydrogène, sa supériorité technique peut se traduire sous la forme de différentes hypothèses, selon la relation entre le poids relatifs de la rentabilité et de l'investissement initial. Les graphiques montrent toutefois que le désavantage initial par rapport à la voiture PHEV (1% et 5% de part de marché, respectivement à droite et à gauche) ne peut pas être rattrapé sans une vitesse de diffusion nettement supérieure. Si l'Etat cherche à promouvoir la diffusion des voitures à hydrogène de façon à réduire la consommation de pétrole et les émissions polluantes dans le transport de personnes, il peut alors agir soit sur les coûts opérationnels, soit sur le coût de la voiture.

L'avantage en termes de coûts par kilomètre est un paramètre fondamental et dépend du prix relatif de l'hydrogène et de l'efficacité énergétique de la voiture FCV. En effet, il est probable que l'hydrogène coûte plus cher pendant les premières années de la transition en raison de la production décentralisée de petites quantités (plus onéreuse) et la faible utilisation des capacités de production. Il est important que l'hydrogène ne soit pas trop cher par rapport aux carburants fossiles. Par ailleurs, l'augmentation de la taxation sur ces derniers – pour des considérations environnementales –, contribue à améliorer la compétitivité de l'hydrogène. Quant à l'efficacité – mesurée en termes d'énergie consommée « du réservoir à la roue » –, il s'agit d'un argument essentiel pour les voitures FCV. Cela concerne fondamentalement la pile à combustible - au cœur de la propulsion du véhicule - en termes de coût, d'efficacité, de durabilité et de fiabilité. La pile s'approche des seuils de

³⁴⁹ Voir discussion à la fin du chapitre (point 2.2.4.).

commercialisation mais des progrès restent à accomplir en cette matière.³⁵⁰ Il en va de même pour les technologies de stockage à bord de l'hydrogène (AIE, 2006a). Le déploiement des premières unités est une condition primordiale pour que la voiture FCV atteigne les objectifs d'efficience et de coût nécessaires pour sa commercialisation (HyWays, 2008). Puisque les premières versions seront probablement plus onéreuses et moins performantes, un problème de demande de voitures risque de se poser. Dans ce cas, l'adoption présente une nature de bien public en raison des effets externes pour le développement de la technologie. Ainsi, le maintien de la politique de R&D afin de lever les derniers verrous technologiques, associé au soutien des projets de démonstration et à la concession de subventions à l'achat des premières unités sont des mesures susceptibles de diminuer les obstacles à l'entrée de la voiture FCV dans le marché. Ceci aussi, de manière à rendre plus acceptable par les constructeurs automobiles l'effort de supporter les pertes initiales avec les premières voitures à hydrogène.

Un autre résultat important présenté par les graphiques 89 est le fait qu'à partir d'un certain niveau, l'avantage de marché est plus important que la différence entre les vitesses de diffusion (indicateur approximative de l'efficience technologique). Il s'agit alors d'un véritable cas de « lock in » technologique. Le terrain gagné par la voiture PHEV peut être suffisant pour verrouiller le marché et empêcher l'arrivée de la nouvelle technologie. Ainsi, il existe un effet d'inertie tel que présenté par Farrell et Saloner (1985, 1986) au sens où les consommateurs ne veulent pas changer pour la technologie la plus efficiente de manière à éviter les coûts d'incompatibilité avec la base installée de la voiture PHEV. Cela justifie l'intervention publique pour compenser chez les premiers consommateurs les coûts de transition par l'intermédiaire de la subvention à l'achat ou au prix de l'hydrogène. En outre, les travaux de Katz et Shapiro (1986) ont montré que la coordination des décisions entre les différents agents (constructeurs automobiles, fournisseurs de carburant et consommateurs) est susceptible de résoudre le verrouillage et de rétablir les conditions pour que la meilleure technologie –quelle qu'elle soit - triomphe sur le marché.

C. Pile à combustible ou infrastructure ?

Une question importante est de savoir laquelle des deux joue le rôle le plus important pour l'arrivée de l'hydrogène dans le marché : la pile à combustible ou l'infrastructure. La pile à combustible est le principal responsable du coût actuel de la voiture pile à combustible. Par ailleurs, l'utilisation de l'hydrogène dans les usages mobiles requiert la construction de nouvelles capacités de production, mais aussi des infrastructures de stockage, transport et distribution pour amener le carburant sur le lieu de consommation. La couverture de la demande dépend du nombre et de la localisation des stations de ravitaillement. La reconversion de 15 à 20% des stations d'essence existantes est suffisante pour une couverture totale (Melaina, 2007). En outre, les stations-service peuvent produire l'hydrogène sur place pour les faibles quantités demandées, en supprimant la nécessité de construire l'infrastructure de transport pendant les premières années de la transition.³⁵¹

Afin de comprendre l'impact de l'infrastructure sur la diffusion de l'hydrogène, nous avons fait une extension au modèle de Le Bas et Sylvestre. Le modèle considère que les technologies évoluent sur le marché non pas comme une simple substitution de la technologie en régression, mais par un mode

³⁵⁰ Voir chapitre 1.

³⁵¹ Voir chapitre 1.

proche de la dépendance de sentier marquée par les effets des rendements croissants d'adoption. Selon une hypothèse générale, l'espace est invariant tout au long du processus ce qui nous permet d'établir l'équation suivante :

$$K = Y_1(0) + Y_2'(0) + Z(0)$$

Où $K = 1$ par définition, $Y_2'(0) = Y_2(0) + \delta$ et δ représente le pourcentage du marché qui n'est pas couvert par l'infrastructure. Ainsi, la formule précédente peut être réécrite comme suit :

$$K = Y_1(0) + [Y_2(0) + \delta] + Z(0)$$

Cette constante d'intégration représente la décomposition du nombre d'adopteurs concernés par la diffusion des innovations. L'évolution de la part de chaque technologie est donnée par l'équation différentielle suivante :

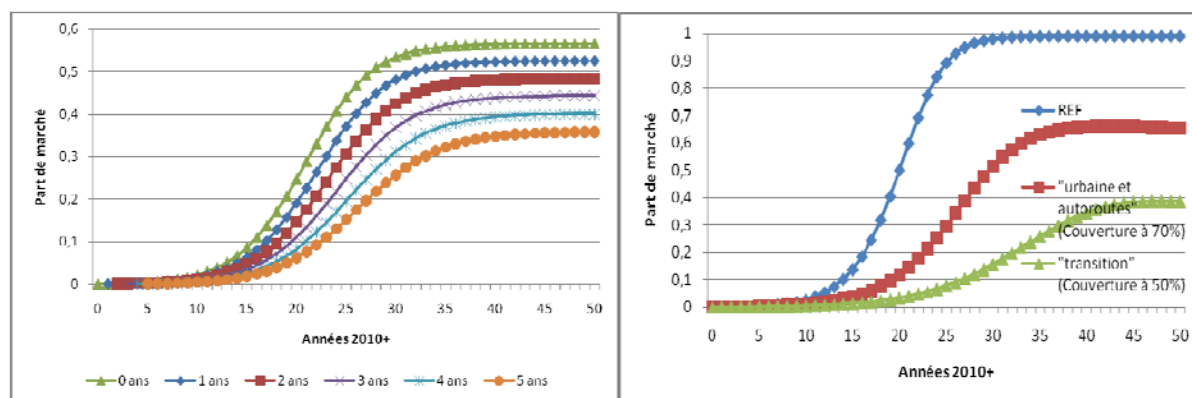
$$\dot{Y}_1(t) = a_1 \frac{Y_1(t)}{Z(0)} [k - Y_1(t) - Y_2'(t)]$$

En prenant en compte le paramètre δ associé à la technologie 2, les vitesses de diffusion sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \dot{Y}_1(t) = a_1 \frac{Y_1(t)}{Z(0)} [k - Y_1(t) - Y_2'(t)] \\ \dot{Y}_2'(t) = a_2 \frac{Y_2(t)}{Z(0)} [k - \delta - Y_1(t) - Y_2(t)] \end{cases}$$

Les résultats concernant l'effet d'une couverture insuffisante de l'infrastructure de l'hydrogène sont présentés dans le graphique suivant (à droite).

Graphique 90. Effets d'une entrée décalée de l'hydrogène sur le marché (à gauche) et l'impact de la couverture de l'infrastructure pour la diffusion (à droite)



Le graphique gauche sur l'impact du temps sur le décalage considère un scénario où la voiture PHEV part avec 5% du marché (scénario 2). La vitesse de diffusion de l'hydrogène est égale à la diffusion de la voiture hybride aux Etats-Unis (0,40)

En ce qui concerne l'analyse de l'importance de la pile à combustible, on émet l'hypothèse que les projets de démonstration existant et à venir dans les prochaines années mettent en place une

infrastructure suffisante pour permettre l'entrée de l'hydrogène sur le marché. Dans ce sens, l'éventuel retard de sa mise en place serait à chercher dans la préparation des réservoirs de stockage de l'hydrogène à bord de la voiture et surtout de la pile à combustible.³⁵² Le retard technologique est alors mesuré en termes de nombre d'années additionnelles prises par la voiture FCV pour entrer sur le marché après la voiture PHEV (graphique 90, à gauche).

Il est difficile de savoir lequel des deux est le plus important, la pile à combustible ou l'infrastructure, tout les deux étant décisifs pour la diffusion de l'hydrogène sur le marché des transports de personnes. Le temps de retard dans la préparation de la pile à combustible peut influencer de manière importante sur le potentiel de marché de la voiture FCV. Ceci peut aller jusqu'à réduire ce potentiel de moitié (de 60% à 30%) en cas de retard de 5 ans. Par ailleurs, le manque de couverture de l'infrastructure peut bloquer sérieusement la percée de l'hydrogène sur le marché. Une couverture de 70% (en gros, les espaces urbains et les autoroutes) limiterait la diffusion de la voiture FCV à moins de 70%. Une couverture restant au niveau de la période de transition aux alentours de 50% peut limiter la progression de l'hydrogène à 40% du marché dans les meilleurs des scénarios. Une couverture plus faible réduit d'avantage le potentiel de marché de la voiture à hydrogène.

Cela concerne aussi bien les endroits prioritaires dans le centre-ville que dans les autoroutes et surtout dans l'espace rural de manière à rendre possible l'utilisation de la voiture à hydrogène en dehors des villes (p.ex. grands déplacements). Il est probable que le marché ne soit pas en mesure d'induire les investissements nécessaires.³⁵³ Une coordination est donc nécessaire entre les agents publics et privés afin de permettre la mise en place de l'infrastructure. Des stratégies doivent être trouvées pour optimiser les emplacements des stations de manière à desservir une large population au moindre coût. Les premières infrastructures seront construites, probablement à perte.³⁵⁴ Des subventions seraient alors nécessaires pour entamer le processus. Mais des politiques comme l'obligation d'ouverture de stations en dehors de la ville doivent aussi être prises en considération pour assurer un réseau cohérent de distribution d'hydrogène.

En attendant, la stabilisation des normes techniques sur le stockage de l'hydrogène à bord et sur les stations-service, ainsi que l'accélération des procédures d'obtention des licences, sont des mesures susceptibles de réduire les coûts et les incertitudes de l'investissement. De même, les partenariats publics-privés peuvent se mettre en place pour construire les premières stations et coordonner la transition, à l'instar de ce qui se passe actuellement en Californie, au Japon, et à Berlin.

2.2.4. Discussion et étapes à venir

La méthodologie utilisée ci-dessus permet de simuler la diffusion de différentes technologies lorsqu'elles sont en concurrence pour remplacer une technologie existante. En présence d'effets de réseau, la probabilité est grande pour que l'une des technologies gagne d'avantage et, en raison des rendements croissants d'adoption, domine le marché.

L'adoption de la technologie la plus efficiente dans les transports permet de réduire la consommation de pétrole et les émissions polluantes de manière plus économique. Si les objectifs en

³⁵² Voir chapitre 1 et 3.

³⁵³ Voir chapitre 2.

³⁵⁴ Voir chapitre 3.

termes de coûts se concrétisent, la voiture pile à combustible sera légèrement plus onéreuse que la voiture hybride rechargeable, mais elle apportera une plus grande efficacité énergétique. Ainsi, pour un objectif donné, par exemple réduire du tiers la consommation et les émissions des transports personnels, le nombre de voitures à hydrogène nécessaires est moins important que pour les voitures hybrides (53% de part du marché contre 59% pour les voitures hybrides).³⁵⁵ Ainsi, *mutatis mutandis*, la diffusion de la voiture pile à combustible est souhaitable d'un point de vue énergétique et environnemental. Les obstacles pour atteindre cet objectif restent encore très élevés.

Il est possible que la voiture pile à combustible à hydrogène vienne remplacer la voiture conventionnelle et domine le marché. Plutôt que d'affirmer cela, nous avons essayé de montrer les conditions nécessaires pour que cette transition soit possible un jour. Premièrement, les objectifs concernant l'efficacité de la pile à combustible et le coût de la voiture doivent être confirmés. Deuxièmement, la commercialisation de la voiture à hydrogène ne doit pas se réaliser trop longtemps après celle de la voiture hybride rechargeable – la technologie la plus proche sur le marché. Une différence importante en termes de part de marché ou de temps pris avant l'entrée sur le marché risque de devenir insurmontable. Troisièmement, l'infrastructure doit permettre le développement de la demande. Une couverture insuffisante limite sérieusement la diffusion de l'hydrogène. Enfin, l'internalisation des effets externes est une condition fondamentale pour rendre la concurrence technologique plus juste et impulser la substitution du couple moteur à explosion/carburants fossiles.

Ainsi, nous avons montré que des situations de verrouillage technologique sur la technologie nouvelle la moins efficace, voire même sur la voiture conventionnelle, peuvent exister. La voiture hybride rechargeable entre en premier sur le marché et réussit à former une base importante de consommateurs, base qui peut bloquer la diffusion de l'hydrogène plus tard. Ce cas est normalement lié à l'entrée tardive de la voiture à hydrogène sur le marché.

La simulation présentée n'est pas un fait accompli mais plutôt le début d'une approche méthodologique de la concurrence technologique appliquée au secteur automobile. Les diverses limites de l'analyse ont plusieurs origines. Tout d'abord, le manque de données n'a pas permis une estimation des vitesses de diffusion pour la voiture à hydrogène et la voiture hybride rechargeable, respectivement. Dans l'avenir, la disponibilité de données sur la pénétration des technologies dans l'automobile (voitures hybrides, biocarburants, gaz naturel) pourrait permettre d'estimer de façon plus rigoureuse les vitesses de diffusion de la voiture à hydrogène et de ses concurrents. Un autre point à intégrer est l'effet de l'apprentissage, lequel n'est pas pris en compte par le modèle original. En effet, les paramètres qui conditionnent la vitesse de diffusion (rentabilité et investissement initial) restent inchangés pendant le processus. Or, si les performances ne doivent pas changer beaucoup à court terme, il est fort probable que l'augmentation de la production et de la demande à long terme contribue à réduire les coûts de manière importante. Cela a été le cas pour d'autres technologies dans le passé comme les technologies éolienne et solaire photovoltaïque.

³⁵⁵ La part de marché nécessaire pour que la nouvelle technologie à elle seule réduise la consommation de pétrole d'un tiers peut être calculée de la manière suivante : $(1 - \text{objectif}) / (1 - 1/\text{multiple de l'efficacité par rapport à la voiture conventionnelle})$. Pour la voiture PHEV, la part de marché nécessaire serait de $(1 - 0,6(6)) / (1 - 1/2,3) = 59\%$. En ce qui concerne la voiture FCV, il serait nécessaire de remplacer 53% $(1 - 0,6(6)) / (1 - 1/2,7)$ des voitures conventionnelles.

Le but du présent travail a été de montrer la manière dont les nouvelles technologies se mettent en concurrence pour se substituer à l'ancienne technologie. En l'état actuel des choses, les spécifications du modèle n'autorisent cependant pas la diminution de la part de marché d'une technologie nouvelle, voire même sa substitution par l'autre technologie nouvelle. Des améliorations peuvent être apportées aussi à ce niveau pour une analyse technologique prospective à plus long terme.³⁵⁶

L'impact de l'augmentation de la demande sur les ressources et les émissions globales du parc automobile ne peut pas non plus être mesuré directement par le modèle. Ce dernier donne les résultats quant à la part de marché de chaque technologie, de manière relative, et non pas le nombre absolu de voitures vendues. De plus, la transformation du parc automobile est lente et évolue selon la durée de vie moyenne des voitures. Une estimation peut toutefois être réalisée avec une prévision de la progression de la demande de voitures dans le futur.

³⁵⁶ Une méthode possible est la manière utilisée par Grübler et al. (1998) pour modéliser la substitution des sources primaires d'énergie au long des siècles, par deux courbes logistiques différentes : l'une pour la phase de croissance ; et l'autre pour représenter la période de déclin.

Conclusion du chapitre 6

Les modèles de diffusion technologique ont beaucoup progressé au cours des dernières années. Les modèles existants ont des natures différentes et peuvent se diviser entre ceux qui mettent l'accent sur la transmission de l'information et ceux qui expliquent le comportement de la diffusion à travers l'hétérogénéité des agents. Les premiers ont fait montre d'une certaine robustesse pour l'analyse des diffusions technologiques *ex post*. Les seconds apportent des explications économiques à l'adoption technologique, donc ils sont plus appropriés dans le cas des biens durables. Des modèles de synthèse ont été développés avec des caractéristiques propres aux deux types de modèle (p.ex. le modèle de Mansfield). En outre, les modèles de concurrence multitechnologique sont plus complexes dans la mesure où ils essaient aussi de représenter les interactions entre les différentes technologies sur le marché.

A l'aide d'un modèle simple de concurrence technologique, nous avons montré que l'hydrogène peut prétendre à un rôle important dans les transports. Mais cela ne se fera pas sans un effort pour le développement des technologies de l'hydrogène qui puissent les mettre en condition de lutter pour le marché. Les politiques doivent continuer à soutenir la recherche, le développement et la démonstration des technologies de l'hydrogène et piles à combustible, de manière à ce que les obstacles techniques soient résolus et que les coûts continuent à baisser. Les codes et normes doivent être stabilisés de façon à diminuer l'incertitude sur les investissements. Des incitations fiscales peuvent être mises en place de façon à dynamiser la demande pour les technologies d'hydrogène. Enfin, les gouvernements peuvent aider à la mise en place de l'infrastructure de manière à permettre le développement de la demande. Une politique technologique permettra des progrès au niveau des technologies existantes et nouvelles, lesquelles encouragent la formation de projets privés pour la commercialisation de l'innovation, ce qui en retour favorise la croissance de la demande pour l'hydrogène.

Entretemps, la voiture hybride électrique rechargeable – la seule technologie électrique qui peut concurrencer la voiture pile à combustible dans le domaine des voitures multifonctions – est plus proche de la commercialisation. Son déploiement précoce risque de fermer le marché à la voiture à hydrogène. L'Etat doit s'assurer que les technologies ont l'occasion de montrer tout leur potentiel et que le marché présente les conditions pour retenir le meilleur standard.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

La technologie de l'hydrogène et des piles à combustible est une innovation de rupture qui permet un saut qualitatif important en termes d'efficience dans la consommation d'énergie et de réduction des émissions de CO₂. Son application dans les transports ouvre des possibilités importantes pour la réduction des émissions dans ce secteur très dépendant du pétrole.

La pile à combustible est actuellement en phase pré-commerciale. Elle doit encore résoudre quelques obstacles techniques en termes de durabilité et de fiabilité, et aussi diminuer le contenu en matériaux rares de manière à réduire les coûts. Ceci demande un investissement en R&D pour surmonter les derniers verrous technologiques, mais aussi un investissement en démonstrations réelles pour augmenter la production et permettre des gains d'apprentissage.

Cependant, la domination de la technologie traditionnelle est une barrière au développement de nouvelles alternatives sur le marché. Les acteurs potentiellement impliqués dans la nouvelle filière de l'hydrogène n'ont pas tous le même intérêt dans le changement. Les constructeurs automobiles peuvent connaître des avantages en étant les premiers à présenter des voitures propres et innovantes ; les compagnies pétrolières et les distributeurs de carburants commencent à s'interroger sur l'évolution de leur activité dans un avenir sans pétrole, mais ils ont intérêt à court terme à amortir les investissements réalisés dans le passé.

Une stratégie permettant de démarrer la transition passe par la transformation graduelle du marché. La pile à combustible est introduite dans des niches de marché où elle est plus proche de la commercialisation ce qui permet d'augmenter la production, de baisser les coûts, et d'ouvrir ainsi

progressivement de nouveaux marchés. En outre, l'internalisation des avantages environnementaux par des taxes ou marchés de carbone est une condition fondamentale pour l'émergence de technologies plus propres.

La transition vers l'économie de l'hydrogène peut être accélérée par une politique de soutien à la R&D, de stimulation de la demande et de collaboration avec les agents privés pour la mise en place des infrastructures. Ces mesures devront avoir comme objectif de permettre aux technologies de l'hydrogène d'être en mesure de disputer le marché avec les anciennes et les nouvelles technologies.

La voiture électrique, en particulier la voiture hybride rechargeable, est actuellement le concurrent le plus sérieux à la diffusion de la voiture pile à combustible à hydrogène. Bien que cette voiture ne permette pas de se passer totalement de la consommation de carburants fossiles, ses performances énergétiques et environnementales se rapprochent de celles de la voiture à hydrogène. Le fait d'avoir l'opportunité d'entrer en premier dans le marché peut permettre à la voiture hybride rechargeable de constituer une base suffisante de consommateurs pour empêcher la diffusion de la voiture pile à combustible dans le futur.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette thèse est de *comprendre quels sont les facteurs favorables ainsi que les obstacles à la transition d'un système énergétique grand émetteur de carbone basé sur les sources fossiles vers une économie de l'hydrogène en Europe, et la manière dont celle-ci peut être organisée.*

Dans la première partie, nous avons montré l'importance de l'existence des *infrastructures* pour le développement de l'hydrogène, ainsi que la manière dont les investissements peuvent être mis en place.

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique permet de transformer le système énergétique par l'usage de sources non polluantes et à terme renouvelables, dans tous les secteurs et en particulier dans les transports. L'infrastructure de transport et de distribution est au centre de la *chaîne hydrogène-énergie*, sans laquelle la demande ne peut se développer. Des investissements de grande envergure sont nécessaires, dont le coût pèsera sur le prix final de l'hydrogène. Initialement l'hydrogène doit être produit dans les stations-service de manière à desservir une demande encore faible. Progressivement, la croissance de la demande justifie la construction des infrastructures qui acheminent de l'hydrogène moins coûteux produit de manière centralisée. Afin de surmonter le dilemme de l'« œuf et de la poule », les investissements doivent être déployés en avance de manière à permettre le développement de la demande et ainsi engager un cycle où les perspectives de débouchés poussent à la construction de capacités.

Dans le deuxième chapitre, nous avons analysé la manière dont les investissements en infrastructure peuvent se mettre en place. Pour cela, nous avons étudié le développement historique de l'électricité et du gaz naturel en Europe. L'*installation des réseaux* d'électricité et de gaz naturel dans le passé atteste bien l'importance de la coordination des acteurs. Dans le cas du gaz naturel, les investissements nécessaires sont tellement élevés qu'ils ne peuvent être réalisés sans garantie de débouchés. L'exemple de l'électricité met essentiellement en évidence le problème de la standardisation et de l'interconnexion des régions les moins profitables. La formation des grands réseaux nationaux de gaz naturel et d'électricité a été possible grâce à l'intervention de l'Etat à un moment donné, intervention qui a permis d'unifier le réseau en construisant les interconnexions entre les maillons locaux. Le dépassement de la taille critique a permis de déclencher les dynamiques d'expansion (type « boule de neige ») qui ont rendu possible la diffusion universelle.

L'impact de l'évolution de la *demande* sur les décisions initiales de construction de stations-service a été traité dans le troisième chapitre. Seule une demande suffisante et stable peut garantir la

rentabilité des projets. Pour cela, la voiture pile à combustible doit être compétitive par rapport à la voiture traditionnelle. En particulier, la demande d'hydrogène dépend de la résolution des problèmes techniques et de la réduction du prix de la pile à combustible. Mais les décisions basées sur l'actualisation des flux de trésorerie iront probablement rejeter les investissements en stations d'hydrogène car non rentables. La perspective de développement du marché justifie toutefois les investissements exploratoires permettant aux entreprises de gagner des avantages de pionnier. L'incertitude relative au comportement de ces dernières peut être diminuée si l'Etat contribue à rendre le contexte des investissements plus favorable, en stabilisant les codes et normes, et en internalisant les effets externes des technologies conventionnelles. Cela est nécessaire pour donner la possibilité pour les innovations radicales d'accéder au marché et de montrer leur potentiel.

La deuxième partie a cherché à saisir les éléments du *changement technologique* pour les technologies de l'hydrogène et piles à combustible.

Le quatrième chapitre a analysé les défis du changement du *paradigme technologique actuel dominé par le pétrole*. La pile à combustible est trois fois plus efficace que les moteurs à explosion ; lorsque l'hydrogène est produit à partir de sources non émettrices de gaz à effet de serre, le bilan carbone est neutre. Cependant, cette innovation radicale est encore dans la phase pré-commerciale et des progrès restent à faire, notamment dans : les nouvelles configurations de la pile utilisant moins de matériaux nobles ; la durabilité du système ; et le stockage d'hydrogène. De plus, la réduction du coût de la technologie relative aux applications mobiles et stationnaires ne peut se concrétiser sans les premiers projets de démonstration grandeur nature. Cela demande une action coordonnée entre acteurs, mais le remplacement de l'actuel système énergétique basé sur le pétrole éveille des intérêts contradictoires parmi les agents concernés. Bien que le moteur classique soit au cœur de leur métier, les constructeurs automobiles trouvent un intérêt dans le changement vers une nouvelle génération de voitures plus propres et innovantes. En ce qui concerne les distributeurs de carburant, particulièrement les compagnies pétrolières, ils sont conscients de l'importance de préparer l'avenir de leur activité après le pétrole. Mais l'amortissement des investissements existants et la logique de maximisation du profit à plus court terme freinent une implication plus engagée dans les nouvelles filières alternatives.

Dans le cinquième chapitre, nous abordons la question de la transformation du système technologique. Les *stratégies* déployées pour lever le verrou technologique doivent ouvrir la porte à l'entrée des innovations radicales dans les premiers marchés et permettre une rupture technologique graduelle. La pile à combustible est actuellement compétitive dans les marchés de niche que sont les applications portables et stationnaires. A mesure que la production et l'utilisation augmentent, les coûts tendent à réduire, ce qui rend la technologie compétitive sur les marchés plus importants comme la génération décentralisée d'électricité et les transports. Pour cela, les avantages en termes environnementaux doivent être pris en compte par le marché. De plus, des dépenses en R&D sont encore nécessaires afin de rendre disponibles des technologies plus performantes et moins onéreuses, susceptibles d'attirer plus de partenariats privés pour le développement et la commercialisation à venir. En outre, des incitations fiscales peuvent être mises en place pour dynamiser la demande et engendrer ainsi le cercle vertueux du développement technologique. Le soutien public devrait garantir les conditions pour que la technologie puisse contourner le lock in et pénétrer sur le marché. Mais la diffusion de l'hydrogène doit compter aussi avec la concurrence des autres alternatives technologiques.

Dans le dernier chapitre, nous avons développé une analyse de la *concurrence technologique* pour le marché du transport individuel, entre la voiture pile à combustible à hydrogène et la voiture électrique qui seule peut concurrencer l'hydrogène pour les usages multifonctions : la voiture hybride rechargeable. L'entrée précoce de la voiture hybride rechargeable sur le marché peut lui permettre de constituer une base de consommateurs importante qui empêcherait, ultérieurement, le développement des solutions plus efficaces. Par ailleurs, la voiture pile à combustible à hydrogène peut pénétrer le marché à condition que la technologie confirme les objectifs techniques et en termes de coût - l'hydrogène ne doit pas être trop cher et doit disposer d'une infrastructure ayant une couverture suffisante pour permettre le développement de la demande.

La démarche méthodologique engagée dans cette thèse a permis de dévoiler les principaux enjeux technico-économiques d'une diffusion de l'hydrogène en large échelle en Europe. Ainsi, les acteurs privés concernés ont été identifiés (constructeurs automobiles, compagnies pétrolières, fournisseurs de gaz industriel, entreprises d'électricité et de gaz), mais nous avons montré que l'acteur public joue un rôle déterminant en ce qui concerne les questions de recherche fondamentale et surtout la question de la mise en place de l'infrastructure.

A la suite, nous synthétisons les éléments créant un contexte favorable au développement du marché pour l'hydrogène :

- Les facteurs susceptibles d'accélérer le *remplacement* de la technologie conventionnelle :
 - o Les prix élevés du pétrole, reflétant l'épuisement des réserves (peak oil), sont à l'origine d'une instabilité politique et de problèmes géopolitiques. L'Europe, encore vulnérable sur le plan énergétique, a tout l'intérêt à exploiter les voies alternatives au pétrole.
 - o L'accélération du phénomène du changement climatique et la nécessité de réductions drastiques des émissions de GES dans les transports. Un accord international est signé qui ouvre la voie à une valeur stable pour le carbone (taxes/marché de carbone).
 - o La réglementation plus stricte de la pollution de l'air et du bruit dans les villes.
 - o Les préoccupations des Etats en ce qui concerne la compétitivité de leurs économies.
- Les éléments qui peuvent *épauler* l'introduction sur le marché de la voiture pile à combustible à hydrogène :
 - o La pile à combustible atteint les coûts et les performances (efficacité, durabilité, fiabilité) espérées. Elle est compétitive pour entrer dans des niches de marchés, et progressivement, s'imposer sur le marché principal des transports. En outre, le problème de stockage de l'hydrogène embarqué est résolu.
 - o Le financement de l'infrastructure initiale et le soutien à la production de l'hydrogène vert.
 - o La subvention à l'achat de piles à combustible pour la production électrique et les transports.
 - o Le déploiement à grande échelle des énergies renouvelables, des smart grids et de la capture et séquestration du carbone pour la production de l'hydrogène.

- Les facteurs qui peuvent *décourager* la diffusion de l'hydrogène
 - o Des avancées majeures dans la technologie et l'économie des batteries.

Une question demeure ouverte, cependant, quant au nombre de technologies qui persisteront sur le marché automobile : l'avenir sera-t-il constitué de plusieurs technologies adaptées à chaque usage spécifique, ou bien le processus va-t-il se dérouler comme au début des années 1900 lorsque la voiture électrique, la voiture à vapeur et la voiture à combustion étaient en concurrence, lorsque le fordisme a été le catalyseur qui a amené à la domination de la dernière technologie. Les contraintes techniques ne sont plus les mêmes et l'utilisation de chaque type de voiture peut se faire aujourd'hui de manière plus ou moins aisée. De plus, la forte augmentation du nombre de véhicules par ménage permet d'entrevoir une spécialisation des voitures par type de conduite ou de déplacement. Il est probable que la voiture électrique à batterie fasse valoir à la fois une plus grande efficacité pour les petits déplacements urbains et satisfasse la volonté du décideur public de baisser la pollution locale. Pour les grands déplacements, une voiture multifonctions du type hybride ou pile à combustible devrait permettre une réduction de la consommation et des émissions.

Néanmoins, la recherche de standardisation et de gains d'échelle destinée à faire baisser les coûts comme dans le passé peut se révéler plus importante que la volonté des constructeurs à différencier l'offre. Cela doit être analysé dans le cadre des nouvelles régions qui s'équipent en voitures comme la Chine et l'Inde, où la demande doit augmenter le plus dans les prochaines décennies. Mais un monde d'une seule technologie n'est pas une fatalité. Nous pouvons considérer un scénario où les régions plus pauvres – désireuses d'améliorer leur mobilité - chercheront les moyens les plus économiques pour ce faire ; à côté, les zones les plus riches, ont pour objectif de réduire les impacts négatifs des transports. Ces derniers peuvent alors changer la réglementation de manière à ce que la voiture conventionnelle intègre les dégâts externes et devienne moins économique face aux alternatives technologiques. La force de la réglementation ne doit pas, en effet, être sous-estimée, comme le montre le cas brésilien du soutien aux biocarburants, lesquels occupent aujourd'hui une part substantielle du marché dans ce pays d'Amérique du Sud.

Une autre question se pose quant au sens du progrès technique. Les changements technologiques dans le passé ne sont pas allés dans le sens de restreindre les possibilités du consommateur. Dans son analyse des grandes transformations énergétiques de l'histoire, Smil (1994, 2009) suggère le concept de « prime movers » (instruments opérant la conversion des sources primaires d'énergie en force mécanique, électricité ou chaleur). Le sens du progrès serait alors la recherche de « prime movers » permettant une utilisation plus intensive, plus efficace et plus confortable des énergies primaires. A défaut d'une percée technologique dans les batteries, les limites de la petite voiture électrique en termes de performance et d'autonomie imposent un changement significatif dans la manière de concevoir la mobilité des personnes. Les solutions innovantes qui ont été annoncées (p.ex. échange des batteries) altèrent peu le fond de la question : la voiture électrique à batterie n'aura pas les mêmes performances que la voiture conventionnelle, au moins dans un avenir proche. Est-ce que les préférences des consommateurs sont en train de changer profondément ?

La voiture est plus qu'un simple outil du quotidien. Elle porte aussi une charge *symbolique* très importante notamment en termes de statut social, valeurs de liberté, etc (Kurani et al., 2004). La

culture de la voiture a été à la base de l'impressionnante montée des performances au cours des dernières années. La puissance et l'accélération des derniers modèles de voiture familiale n'ont rien à envier aux voitures sportives d'une vingtaine d'années auparavant. Cette tendance a été confortée par l'action des pouvoirs publics, principalement dans les pays où l'industrie automobile a un poids important dans l'économie (p.ex. la vitesse libre dans les autoroutes allemandes 'Bundesautobahnen' favorise la vente de voitures puissantes dans lesquelles les constructeurs nationaux sont spécialisés). Le nouveau paradigme durable exige précisément que ce trend soit inversé. Il est probable que les alternatives technologiques plus respectueuses de l'environnement n'atteignent pas de tels niveaux de performance, au moins dans un premier temps. Pour que ces alternatives percent, les motivations qui président au choix des consommateurs doivent être tout autres que celles qui dominent actuellement : la protection de l'environnement ou la préoccupation pour l'indépendance énergétique. Un changement concernant les valeurs personnelles devrait être promu, afin de rendre celles-ci plus cohérentes avec une utilisation raisonnable et soutenable de la voiture.

En outre, les défis environnementaux et énergétiques ne sauront être relevés uniquement grâce aux changements technologiques. L'expérience montre que l'augmentation de la demande de voitures est supérieure aux gains d'efficacité. La croissance de la population urbaine ne fera qu'exacerber les problèmes environnementaux et de gestion des transports dans les villes. Un changement profond au niveau de la *perception sociale de la mobilité* est nécessaire, en particulier pour ce qui est de la mobilité urbaine. Il ne s'agit pas seulement de repenser la place accordée aux transports en commun, mais aussi celle des moyens de transports alternatifs comme le vélo ou la marche à pied. Pour cela, il faut remettre en question le mouvement pour l'étalement horizontal des villes et prendre le choix de l'augmentation de la densité démographique. Il s'agit de choix de société complexes, qui doivent être pris dans un cadre collectif, de plus en plus démocratique et participatif. Voilà des thèmes qui ouvrent tout un nouveau champ d'investigations, qui va bien plus loin que la question déjà complexe des choix technologiques.

ANNEXES

Table des matières des annexes

1. Equivalences énergétiques et propriétés de l'hydrogène (et quelques comparaisons avec le gaz naturel)
2. Les réseaux d'hydrogène gérés par Air Liquide au nord de l'Europe

1. Equivalences énergétiques et propriétés de l'hydrogène (et quelques comparaisons avec le gaz naturel)

Propriété	Valeur
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	10 800 kJ/Nm ³ 119 930 kJ/kg (gaz naturel 50 020 kJ/kg) 3.00 kWh/Nm ³ 33.33 kWh/kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur : inclut l'énergie de la vapeur d'eau)	12 770 kJ/Nm ³ 141 860 kJ/kg 3.55 kWh/Nm ³ 39.41 kWh/kg
Densité gazeuse à 273K (CNTP)	0.08988 kg/Nm ³ (gaz naturel 0.6512 kg/Nm ³)
Densité liquide à 20.3K (-253°C)	70.79 kg/m ³
Température d'auto inflammation dans l'air	858K (gaz naturel 813K)
Température de flamme dans l'air à 300K	2 318K (gaz naturel 2 148K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol %)	4-75 (gaz naturel 5.3-15)
Limites de détonation dans l'air (vol %)	13-65 (gaz naturel 6.3-13.5)
Energie minimale d'inflammation (mJ)	0.02 (gaz naturel 0.29)
Energie explosive théorique (kg de TNT/m ³ de gaz)	2.02 (gaz naturel 7.03)
Surpression de détonation (mélange stœchiométrie)	14.7 bar (gaz naturel 16.8 bar)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm ² /s (gaz naturel 0.16)
Vitesse de flamme dans l'air	260 cm/s (7 fois le gaz naturel)
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 km/s (gaz naturel 1.8 km/s)
Mélange stœchiométrique dans l'air (vol)	29.53% (gaz naturel 9.48%)

Source : <http://www.afh2.org>

Règles simples : (Contenus énergétiques mesurés en pouvoir calorifique inférieur PCI)

1 kWh=3,6 MJ

1 gal=3,785 L

1 kg H₂=120 MJ~1gge(gallon essence equivalente)

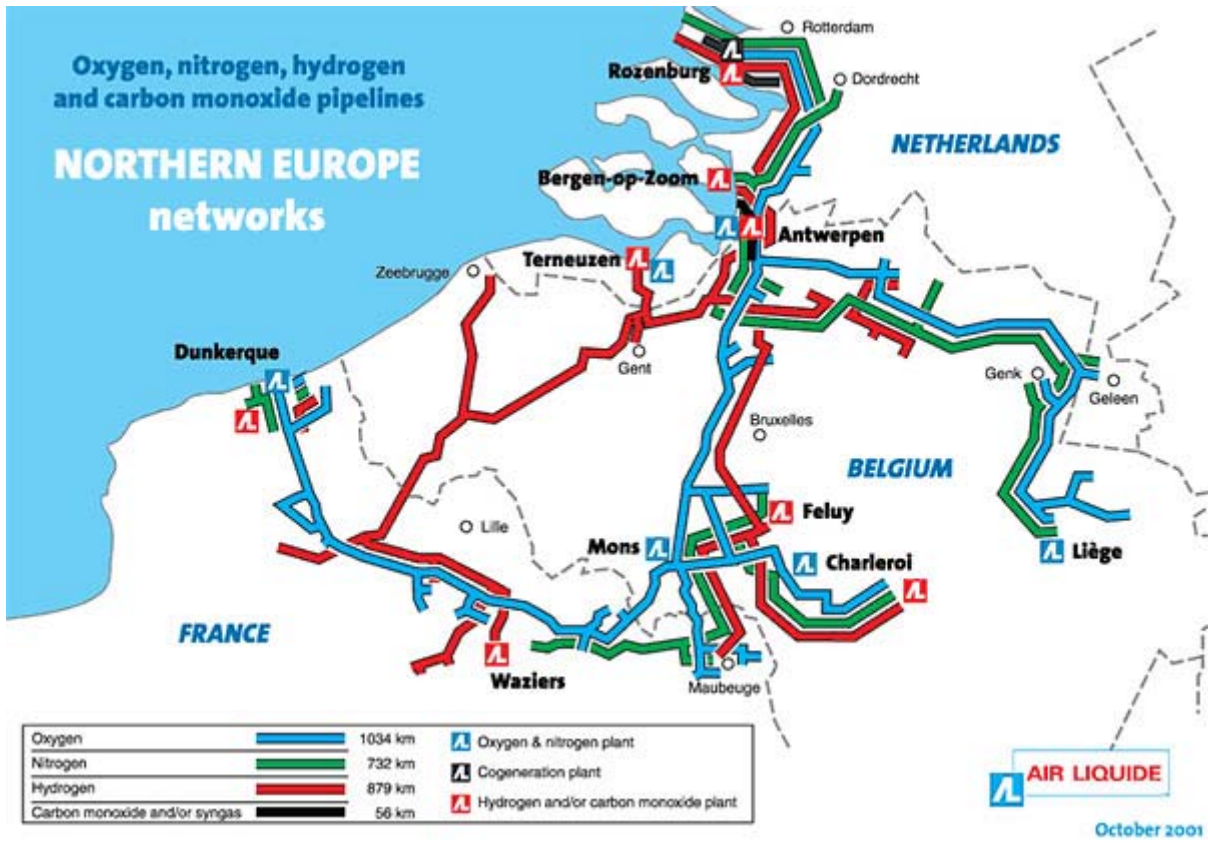
1 mmBtu=1,055 GJ

1 ft³=28,32 L

1 L H₂=2,7 MJ

1 gge=121,3 MJ

2. Les réseaux d'hydrogène gérés par Air Liquide au nord de l'Europe



Source : Air Liquide, www.airliquide.com

BIBLIOGRAPHIE

Abernathy W.J., Clark K.B. (1985), « Innovation: Mapping the winds of creative destruction », *Research Policy* 14 : 3-22.

Abernathy W.J., Utterback J.M. (1978), "Patterns of industrial innovation", *Technology Review* 80, 40-47.

Agence Européenne de l'Environnement – AEE (2008), « Climate for a transport change - TERM 2007: indicators tracking transport and environment in the European Union, » EEA Report No 1/2008, Communautés Européennes, Luxembourg.

AEE (2008), « Climate for a transport change - TERM 2007: indicators tracking transport and environment in the European Union, » EEA Report N° 1/2008, Communauté Européenne, Luxembourg.

AEE (2006), « Transport and environment: facing a dilemma. Term 2005: indicators tracking transport and environment in the European Union, » Copenhagen.

AEE (2005), « L'environnement en Europe: état et perspectives 2005 », EEA Report N° 1/2005, Communauté Européenne, Luxembourg.

Agence Internationale de l'Energie - AIE (2003), *Creating Markets for Energy Technologies*, AIE/OCDE, Paris.

AIE (2008a), *World Energy Outlook*, OCDE/AIE, Paris.

AIE (2008b), *CO2 Capture and Storage: A Key Carbon Abatement Option*, Energy Technology Analysis, AIE/OCDE, Paris.

AIE (2008c), *Energy Technology Perspectives – Scenarios & Strategies to 2050*, AIE/OCDE, Paris.

AIE (2008d), « Energy prices and taxes », In: *Quarterly statistics 2008*, AIE/OCDE, Paris.

- AIE (2008e), « Review Of International Policies For Vehicle Fuel Efficiency », IEA Information Paper, août, OCDE/AIE, Paris.
- AIE (2007), *Natural Gas Review 2007*, IEA/OCDE: Paris.
- AIE (2006a), *Hydrogen Production and Storage : R&D priorities and gaps*, AIE/OCDE, Paris.
- AIE (2006b), *World Energy Outlook*, AIE/OCDE, Paris.
- AIE (2005), *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, OCDE/AIE, Paris.
- AIE (2004), *Hydrogen and Fuel Cells – Review of National R&D Programs*, Paris: OCDE/AIE.
- Aghion P., Howitt P. (1998), *Endogenous growth theory*, Cambridge: MIT Press.
- Agnolucci P. (2007a), “Economics and market prospects of portable fuel cells,” *International Journal of Hydrogen Energy* 32, pp.4319-4328.
- Agnolucci P. (2007b), “Infrastructure of Hydrogen in the Transport Sector,” *International Journal of Hydrogen Energy* 32, pp.3526-3544.
- Ahmad, S. (1966), « On the Theory of Induced Invention », *The Economic Journal* 76 (302), pp. 344-357.
- Åhman M., Nilsson L.J. (2008), « Path dependency and the future of advanced vehicles and biofuels », *Utilities Policy* 16 : 80-89.
- Alleau T. (2007), *L’Hydrogène, énergie du futur?*, Collection Bulles de Sciences, EDP Sciences, Paris, 206 p.
- Amos W. (1998), « Costs of Storing and Transporting Hydrogen », NREL/TP-570-25106, November, NREL, Golden, Colorado.
- Andersen P.D. (2003), « *Sources of experience in wind energy technology* », EU/EIA workshop « Experience Curves: a tool for energy policy analysis and design », OCDE/AIE, Paris.
- Anderson, P., Tushman, M. (1990), « Technological discontinuities and dominant designs: a cyclical model of technological change », *Administrative Science Quarterly* 35 (4), 604–635.
- Angelier J.-P. (2007), *Economie des Industries de Réseau*, Presses Universitaires de Grenoble, 124 p.
- Angelier J.-P. (2005), “Electricité et gaz naturel: du monopole public à la concurrence réglementée ; une perspective historique », PEPSE, avril, Grenoble.
- Angelier J.-P. (1997), *Calcul Economic et Financier*, L’économie en plus, PUG, Grenoble.
- Angelier J.-P. (1994), *Le gaz naturel*, Cyclope, Paris.
- Angelier J.-P., Hadjsaïd N., Sabonnadière J.-C. (2008), « La distribution de l’électricité face aux défis ouverts par la concurrence », Laboratoire d’économie de la production et de l’intégration internationale, Note de Travail 17, Décembre, Grenoble.

- Angelier J.-P., Lalanne E. (1979), « L'Evolution des relations entre l'industrie électrique et les pouvoirs publics ; comparaison historique de l'Allemagne, de la France, de l'Italie et du Royaume-Uni », Institut Economique et Juridique de l'Energie, Grenoble, 164 p.
- Angelis D.I. (2000), "Capturing the Option Value of R&D," *Research Technology Management* 43 (4), 31-34.
- Aoki M. (2007), "Endogeneizing Institutions and Institutional Changes," *Journal of Institutional Economics* 3 (1), 1-31.
- Aoki M. (2001), *Toward a Comparative Institutional Analysis*, The MIT Press, Cambridge, MA.
- Arena R., Lazaric N. (2003), « La théorie évolutionniste du changement économique de Nelson et Winter : Une analyse économique rétrospective », *Revue économique* 54 (2), pp.329-354.
- Arnason B., Sigfusson T.I. (2000), "Iceland – a future hydrogen economy", *International Journal of Hydrogen Energy*, 25 (5), 389-394.
- Arrow K. J. (1962a), "The Economic Implications of Learning by Doing", *Review of Economic Studies*, 29 (20), p. 155-173.
- Arrow K.J. (1962b), "Economic welfare and the allocation of resources for innovation," in Richard Nelson. ed., *The Rate and Direction of Inventive Activity*, Princeton University Press, Princeton.
- Arrow K., Lind R. (1970): 'Uncertainty and the evaluation of public investment decisions', *American Economic Review*, 60: 364-78
- Arrow K.J., Fischer A.C. (1974), « Environmental preservation, uncertainty and irreversibility, *Quarterly Journal of Economics* 88 (2), 312-319.
- Arthur W. B. (1989), « Competing Technologies: Increasing Returns and Lock-in by Historical Events, » *The Economic Journal* 99 (1), p. 116-131.
- Arthur W.B. (1988), « Competing technologies : an overview », in Dosi G. et al (ed) (1988), *Technological Change and Economic Theory* », New York, Pinter Publishers, pp. 590-607.
- Artigues A., Percebois J., Vignolo T. (2007), « The time-inconsistency of alternative energy policy, » European University Institute, Department of Economics, EUI Working paper ECO 2007/32, 15p.
- Association Française de l'Hydrogène - AFH2 (2006a), « Pourquoi l'hydrogène ? », Version 4.4 - Octobre, <http://www.afh2.org/f/index.php?c=81> (accédé avril 2009)
- AFH2 (2006b), « Etude Technico-économique Prospective sur le Coût de l'Hydrogène, » *Mémento de l'Hydrogène*, Fiche 10, <http://www.afh2.org/uploads/memento/Fiche%2010%20Etude%20economique%20cout%20H2%20avril%202006.pdf> (accédé août 2009)

- AFH2 (2003), « Liquéfaction, Stockage et Transport de l'hydrogène sous Forme Cryogénique, » *Mémento de l'hydrogène*, Fiche 4.3, Novembre, <http://www.afh2.org/uploads/memento/Fiche4.3cryogenique.pdf> (accédé avril 2009)
- Bain A. (1964), *The Growth of Television Ownership in the UK since the War : A Lognormal Model*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Bain J.S. (1956), *Barriers to New Competition: Their Character and Consequences in Manufacturing Industries*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Baker E., Clarke L., Weyant J. (2006), « Optimal technology R&D in the face of climate uncertainty », *Climate Change* 78 (1), 157-179.
- Ball M., Wietschel M. (2009), "The future of hydrogen—opportunities and challenges", *International Journal of Hydrogen Energy* 34: 615 – 627.
- Bancel F., Richard A. (1995), *Les choix d'investissement : méthodes traditionnelles, flexibilité et analyse stratégique*, Economica, Paris, 203 p.
- Banks F.E. (2008), *Emissions Trading : A Brief Résumé*, novembre, 5 p.
- Barro R. (1990), "Government Spending in a Simple Model of Endogenous Growth", *Journal of Political Economy* 98, 5, p.103-125.
- Barthel L. P., Betz M., P. Eyerer (2004) Cost Analysis of Hydrogen Infrastructure in Europe, http://www.lcacenter.org/InLCA2004/papers/Barthel_L_paper.pdf
- Bass F. (1969), « A New Product Growth Model for Consumer Durables », *Management Science* 15, 215-27.
- Baumol W. J., Oates W. E. (1988), *The Theory of Environmental Policy*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Baumol W. J., Panzar J., Willig R. (1982), *Contestable markets and the theory of industrial structure*, Harcourt-Brace-Jovanovich Publishers.
- Bergougnoux J. (2000), *Les Services Publics en Réseaux*, Rapport au Commissariat Général du Plan, La Documentation française, Paris.
- Berle A.A., Means G.C. (1932), *The Modern Corporation and Private Property*, The MacMillan Co, New York.
- Beuzit P., Meillaud L. (2007), *Hydrogène : L'avenir de la voiture ?*, Editions l'Archipel, Paris, 203 p.
- Black F., Scholes M. (1973), 'The Pricing of Options and Corporate Liabilities,' *Journal of Political Economy* 81 :637-659.

Bleischwitz R., Bader N. (2008), 'The Policy Framework for the Promotion of Hydrogen and Fuel Cells in Europe: a Critical Assessment,' BEEP briefing n° 19, September, Bruges European Economic Policy briefings, <http://www.coleurop.be/eco/publications.htm>

Blesl M., Ohl M. (2003), « *Fuel Cells : Bottom-up interpretation of the experience curve* », Workshop of EU-EXTOOL and IEA EXCEPT Paris, January 22-24.

Bockris, J. (1999), « Hydrogen economy in the future, » *International Journal of Hydrogen Energy* 24, 1–15.

Bohm P., Russell C.S. (1985), « Comparative Analysis of Alternative Policy Instruments, » In A.V. Kneese, J.L. Sweeney (eds.), *Handbook of Natural Resource and Energy Economics*, vol. I, Chapter 10.

Boiteux M. (2007), « Les ambiguïtés de la concurrence – EDF et la libéralisation du marché de l'électricité », *Futuribles*, 331, juin.

Bossel U., Eliasson B., Taylor G. (2003), "The future of the hydrogen economy: bright or bleak?", European Fuel Cell Forum Report, 22nd october, Lucerne, <http://www.efcf.com/reports/E08.pdf>

Bougnoux B., Douaud A.(2009), « Final Workshop Report », Energy Foresight Network, Efonet : Technologies for Hydrogen and Fuel Cell Vehicles, Enerdata, CCFA Paris, 9 avril.

Bouneau C., Derdevet M., Percebois J. (2007), *Les Réseaux Electriques au Coeur de la Civilisation Industrielle*, Timée-éditions.

Bourgeois B. (2004), « FRANCE –Document 3 : CASE STUDY – FUEL CELLS, » Country Report Outline – TIP Energy Focus Group, CNRS, UPMF/LEP/IEP, Draft version, March.

Bourgeois B., Finon D., Martin J.-M. (2000), *Energie et Changement Technologique: Une approche évolutionniste*, Bibliothèque des matières-premières, Economica, Paris.

Bourgeois B., Mima S. (2003), « Rationales for co-operation between firms and States within an emerging radical innovation , » in Avadikyan A., Cohendet P., Heraud J.A. (Eds.), *The Economics Dynamics of Fuel Cell Technologies*, Springer, Berlin, pp. 43-79.

Bouwkamp N. (2004), "Understanding Technological Transitions in History and Lessons for a Hydrogen-Refueling Infrastructure," Proceeding for the National Hydrogen Association (NHA) Conference, April.

BP (2009), *Statistical Review of World Energy*, June 2009.

BP (2007), *Statistical Review of World Energy*, June, <http://www.bp.com/statisticalreview>

Braeutigam R.R. (1989), "Optimal Policies for Natural Monopolies", in Schmalensee R. et Willig R.D. (éd.), *Handbook of Industrial Organization*, Amsterdam, vol.II, pp. 1289-1346.

Buchanan J. M. (1965), "An Economic Theory of Club", *Economica* 32, p. 1-14.

Buchanan J., Tullock G. (1962), *The Calculus of Consent. Logical Foundations of Constitutional Democracy*, Ann Arbor, University of Michigan.

- Buchanan J.M., Stubblebine W.C. (1967), « Externality », *Economica* XXIX (November) : 371-84.
- Buchanan J.M., Tullock G. (1975), « 'Polluters' Profits and Political Response: Direct Controls Versus Taxes », *American Economic Review* 65, 139-147.
- Buchanan J.M., Tullock G. (1965), *The Calculus of Consent*, Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Buzneck I. (2009), « Market perspectives of H₂ vehicles : Analysis of current status and requirements », Energy Research Centre of the Netherlands, March.
- Cabral L.M.B. (1990), "On the Adoption of Innovations with 'Network' Externalities," *Mathematical Social Sciences* 19: 299-308.
- Calderini M., Garrone P. (2001), « Liberalisation, market turmoil and the balance of R&D activities, » *Information Economics and Policy* 13 : 199-230.
- California Air Resource Board (CARB) (2008), "The Zero Emission Vehicle Program – 2008."
- California Fuel Cell Partnership (CaFCP) (2009), « Hydrogen Fuel Cell Vehicle and Station Deployment Plan: A Strategy for Meeting the Challenge Ahead, » Action Plan, February, <http://www.cafcp.org>
- Callon M. (1993), « Society in the making : The study of technology as a tool for sociological analysis », In : Bijker W.E., Hughes T., Pinch T. (eds.), *The Social Construction of Technological Systems*, Seventh edition, MIT Press, Cambridge, MA, pp.83-107.
- Carlsson, B., Jacobsson, S. (1991), « What makes the automation industry strategic? », *Economics of Innovation and New Technology* 1(4), 257-269.
- Cassidy R. (1979), *Gas : Natural Energy*, Frederik Muller Ltd, London.
- Castello P., Tzimas E., Moretto P., Peteves S.D. (2005), "Techno-economic Hydrogen Transmission and Distribution Systems in Europe in the Medium and Long Term," Report EUR 21586EN, March
- CE Delft (2008), « Internalisation measures and policy for the external cost of transport », Produced within the study Internalisation Measures and Policies for all external cost of Transport (IMPACT) – Deliverable 3, Version 1.0 , June, Delft.
- Chamberlin, E.H., (1933) *The Theory of Monopolistic Competition*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Chevalier J-M. (2004), *Les grandes batailles de l'énergie*, Gallimard, Paris.
- Christensen C.M. (2006), "The Ongoing Process of Building a Theory of Disruption." *Journal of Product Innovation Management* 23, January, pp. 39-55.
- Christensen C.M. (1997), *The Innovator's Dilemma*, Harvard Business School Press, Boston.
- Clark II W.W., Rifkin J. (2006), « A green hydrogen economy », *Viewpoint, Energy Policy* 34, 2630-2639.

Clark II, W.W., J. Rifkin, T. O'Connor, J. Swisher, T. Lipman, G. Rambach, Clean Hydrogen Science and Technology Team (2005), 'Hydrogen energy stations: along the roadside to a hydrogen economy,' *Utilities Policy* 13:41-50.

Clark N., Juma C. (1988), « Evolutionary Theories in Economic Development Thought », in Dosi G. et al (ed) (1988), *Technological Change and Economic Theory* », New York, Pinter Publishers, pp 197-218.

Clarke L., Weyant J., Birky A. (2006), "On the sources of technological change", *Energy Economics* 28 579-595.

Clarke L.E. (2002), « Emerging Environmental Technologies and Environmental Technology Policy », PhD Dissertation, Stanford University, 121p.

Clerides S., Zachariadis T. (2008), « The effect of standards and fuel prices on automobile fuel economy: An international analysis », *Energy Economics* 30 : 2657–2672.

Coase R.H. (1960), "The Problem of Social Cost", *Journal of law and Economics*, n°3, pp. 1-44.

Coase R.H. (1937), « The Nature of the Firm », *Econometrica*, Vol.4, p. 386-485.

Cohen L.R., Noll R.G. (1991), *The technology pork barrel*, Brookings Institutions Press, Washington DC.

Cohen W. M., Klepper S. (1996), "A reprise of size and R&D," *The Economic Journal*, Vol. 106, No. 437, July, 925-951.

Comité des Constructeurs Français d'Automobiles - CCFA (2009), *L'industrie automobile française : Analyse et Statistiques*, Disponible sur <http://www.ccfa.fr/publications/analyse-statistiques/edition-2009.html>

Commissariat à l'Énergie Atomique - CEA (2005), « L'Hydrogène et les Nouvelles Technologies de l'Énergie », *Clefs CEA*, n°50-51.

Commission Européenne (2009), « Excise Duty Tables. Part II: Energy Products and Electricity », European Commission, Directorate General Taxation and Customs Union Tax Policy, Ref. 1.028, January, Bruxelles.

Commission Européenne (2007), *Energy Sector Inquiry*, DG Competition report on energy sector inquiry (SEC(2006)1724, 10 January 2007), Brussels.

Commission Européenne – Direction Générale de la Recherche (2006), *European Fuel Cell and Hydrogen Projects 2002-2006*, Directorate-General for Research - Sustainable Energy Systems, EUR 22398.

Commission Européenne Direction Générale des Transports et Energie - DG Tren (2008), *European Energy and Transport Trends to 2030 – Update 2007*, Communautés Européennes, Luxembourg.

- Conrad K. (2004), "Network effects, Compatibility and the Environment: The Case of Hydrogen Powered Cars", Paper presented at European Conference of Environmental and Resource Economists, Bremen.
- Conseil d'Analyse Stratégique - CAS (2008a), "Perspectives concernant le véhicule « grand public » d'ici 2030", coordination Jean Syrota, Conseil d'Analyse Stratégique, 18 septembre, <http://www.strategie.gouv.fr>
- CAS (2008b), « La valeur tutélaire du carbone », Rapport final, juin, www.strategie.gouv.fr
- Coombs R., Green K., Richards A., Walsh V. (Eds.) (2001), *Technology and the Market: Demand, Users and Innovation*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham.
- Criqui P., Bureau D. (2009), « Ecotaxes et quotas d'émission échangeables CO₂ », Conseil économique pour le développement durable, n°6, www.developpement-durable.gouv.fr
- Criqui P., Mima S. (2009), "SECURE scenarios preliminary description", LEPII, Grenoble.
- Criqui, P., Mima S. (2008), « D.8 Results of the Climate and Energy Policy Analyses with the Poles Models, » Mengtech – European Commission, LEPII-CNRS-UPMF, Grenoble.
- Cropper M.L., Oates W.E. (1992), "Environmental Economics: a survey", *Journal of Economics Literature*, vol. XXX, p. 675-740.
- Cunningham J., Gronich S., Nicholas M. (2009), « Why Hydrogen and Fuel Cells are Needed to Support California Climate Policy, » Institute of Transportation Studies (ITS)-University of California Davis, UCD-ITS-RR-08,06
- Curien N. (2005), *Les Economies des Réseaux*, Editions La Découverte, coll. « Repères » : n° 293, Paris.
- Dahl C., Sterner T. (1991), « Analysing gasoline demand elasticities: a survey », *Energy Economics* 13, 203–210.
- Dales J.H. (1968), *Pollution, Property and Prices*, University of Toronto Press, Toronto.
- Damodaran A. (2006), "Dealing with Intangibles: Valuing Brand Names, Flexibility and Patents", Stern School of Business, January.
- Dasgupta P., Stiglitz J. (1980), « Uncertainty, Industrial Structure and the Speed of R&D », *The Bell Journal of Economics* 11, 1-28.
- David P.A. (1988), « Technology Diffusion, Public Policy and Industrial Competitiveness », in L. Landau and N. Rosenberg (ed) (1988), « The Positive Sum Strategy: Harnessing Technology for Economic Growth », National Academies Press, Washington, pp. 373-391.
- David P.A. (1985), "Clio and the economics of Qwerty", *American Economic Review* 75 (2), 332-337.
- David P. (1975), *Technical Change, Innovation and Economic Growth*, Cambridge University Press, Cambridge.

David P.A., Olsen T. (1986), 'Equilibrium Dynamics of Diffusion when Incremental Technological Innovation are Foreseen', *Recherche Economique*, 40, 738-70.

Davies S. (1979), *The Diffusion of Process Innovations*, Cambridge University Press, Cambridge.

Defeuilley C., Furtado A. T. (2000), "Impacts de l'ouverture à la concurrence sur la R&D dans le secteur électrique," *Annals of Public and Cooperative Economics*, 71:1, 5-28.

Demirdoven N., Deutch J. (2004), "Hybrid cars now, fuel cell cars later", *Science* 305, 974-976.

Demsetz H. (1970), "The Private Production of Public Goods", *Journal of Law and Economics* 13 (2): 293-306.

Demsetz, H. (1968), «Why regulate utilities?», *Journal of Law and Economics*, 11 (55).

Department of Trade and Industry's - DTI (2007), "Natural gas and colliery methane production and consumption, 1970 to 2006", http://stats.berr.gov.uk/energystats/dukes4_1_1.xls

Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières – DGEMP (2007), « Observatoire de l'Energie », in : <http://www.industrie.gouv.fr/energie>

Dixit A.K., Pindyck R.S. (1994), *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press.

Dixon R. (1980), « *Hybrid corn revisited* », *Econometrica* 48, 1451-1461.

Dosi G. (1988a), "Sources, Procedures and Microeconomic Effects of Innovations", *Journal of Economic Literature* 36 : 1126-1171.

Dosi G. (1988b), "The Nature of the Innovative Process", in G. Dosi, C. Freeman et al. (éd.) *Technical Change and Economic Theory*, London.

Dosi G. (1982), « Technological paradigms and technological trajectories », *Research Policy* 11: 147-162.

DTI (2004), "Implementing a demonstration of enhanced oil recovery using carbon dioxide", *Cleaner Fossil Fuels Programme*, May, London.

Dunn S. (2002), "Hydrogen futures: towards a sustainable energy system", *International Journal of Hydrogen Energy* 27 (3): 235-264.

Dunn S. (2000), "The hydrogen experiment", *Worldwatch* 13(6), 14-25.

E4Tech (2005), "The Economics of a European Hydrogen Automotive Infrastructure", A study for Linde AG, Final Report, February.

Eames M., McDowall W. (2006), "Systems innovation and the transition to a sustainable hydrogen economy: a multi-level perspective", *SPRU 40th Anniversary Conference*, September.

Eames M., McDowall W. (2005), *UKSHEC Hydrogen Visions*, UKSHEC Social Science Working Paper No. 10. Policy Studies Institute, London.

- Economides N. (1996), "The Economics of Networks", *International Journal of Industrial Organization*, vol. 14, pp 673-699.
- Edquist, C. (1997), *Systems of Innovation: Technologies, Institutions and Organizations*, Pinter, London.
- EIA (2006), *Annual Energy Review 2006*, in <http://www.eia.doe.gov>
- Ellerman A.D. (1999), 'The Next Restructuring : Environmental Regulation », *The Energy Journal* 20 (1), 141-147.
- Enerdata (2009), *Global Energy & CO2 Data*, December.
- Eskeland G.S., Mideksa T.K. (2008), « Transportation Fuel Use, Technology and Standards : The Role of Credibility and Expectations », The World Bank, Policy Research Working Paper 4695.
- Estrada J., Moe A., Martinsen K.D. (1995), *The Development of European Gas Markets: Environmental, Economic and Political Perspectives*, John Wiley.
- EUCAR-CONCAWE-JRC (2006), « Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, » Version 2b, May (<http://ies.jrc.cec.eu.int/wtw.html>)
- EUCAR-CONCAWE-JRC (2007), « Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, » WELL-TO-TANK Report Version 2c, March, http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/WTT_App_2_010307.pdf
- EUCAR-CONCAWE-JRC (2008), « Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, » TANK-to-WHEELS Report Version 3, October 2008, <http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/V3.1%20TTW%20Report%2007102008.pdf>
- European Commission - High Level for Hydrogen and Fuel Cells (HLG) (2003), "Hydrogen Energy and Fuel Cells : A Vision for Our Future", Summary Report, Brussels, June.
- European Communities (2007), *World Energy Technology Outlook - WETO H2*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, 161pp.
- European Energy Exchange (2009), "EEX, 2009 Figures".
- Eurostat (2009), online database <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>
- Eurostat (2008), « EU energy and transport in figures: Statistical pocketbook 2009, » http://ec.europa.eu/energy/publications/statistics/statistics_en.htm
- Farrell A.E., Keith D.W., Corbett J.J. (2003), "A strategy for introducing hydrogen into transportation", *Energy Policy* 31, 1357-1367.
- Farrell J., Klemperer P. (2006), « Coordination and Lock-In : Competition with Switching Costs and Network Effects, » May, www.pauklempere.org

- Farrell J., Saloner G. (1985), "Standardization, compatibility, and innovation", *Round Journal of Economics*, 16 (1), Spring 85, pp. 70-83.
- Farrell J., Saloner G. (1986), "Installed base and compatibility: innovations product, preannouncements, and predation", *The American Economic Review* 76 (5), pp. 940-975.
- Faucheux S., Noël J.F. (1995), *Economie des Ressources Naturelles et de l'Environnement*, Armand Colin, Paris.
- Finon D., Midttun A. (2004), *Reshaping European Gas and Electricity Industries: Regulation, Markets and Business Strategies*, Elsevier, Paris.
- Fischer C., Newell R. (2004), « Environmental and Technology Policies for Climate Change », Resources for the Future, RFF Discussion Paper 04-05, Washington, DC.
- Fisher J.C., Pry R.H. (1971), « A Simple Substitution Model of Technological Change, » *Technological Forecasting and Social Change* 3, 75- 88.
- Flacher D., Lestage R. (2009), « Les Politiques de Libéralisation et l'Innovation : Le Cas du Secteur des Télécommunications, » in Lorenzi J.-H., Villemeur A. (eds.) *L'Innovation au Cœur de la Nouvelle Croissance*, Ed. Economica, Paris, pp. 261-297.
- Flynn P.C. (2002), "Commercializing an alternate vehicle fuel: lessons learned from natural gas for vehicles", *Energy Policy* 30 :613 – 619.
- Foray D. (1989), « Les modèles de compétitions technologiques : une revue de la littérature », *Revue d'Economie Industrielle* 48, pp.16-34.
- Foray D. (2002), « Innovation et concurrence dans les industries de réseau, » *Revue Française de Gestion* 139(juillet-août): 131-154.
- Foxon T.J. (2002), "Technological and institutional 'lock-in' as a barrier to sustainable innovation", Imperial College Centre for Energy and Technology, ICCEPT Working paper, November, <http://www.iccept.ic.ac.uk/public.html>
- Foxon T.J., Gross ., Chase A., Howes J., Arnall A., Anderson D. (2005), "UK innovation systems for new and renewable energy technologies: drivers, barriers and system failures", *Energy Policy* 33, pp. 2123-2137.
- Freeman C. (1982), *The Economics of Industrial Innovation*, 2nd edition, Pinter, London.
- Freeman C. (1986), "Technologies nouvelles, cycles économiques longs et avenir de l'emploi", in: Salomon J.-J., Schmeder G. (eds.), *Les enjeux du changement technologique*, Ed. Economica, Paris, pp. 91-108.
- Freeman, C., C. Perez (1988), "Structural crises of adjustment: Business cycles and investment behaviours", in Dosi et al, *Technical change and Economic Theory*, Pinter, London, pp. 38-66.

- Frenette G., Forthoffer D. (2009), « Economic & commercial viability of hydrogen fuel cell vehicles from an automotive manufacturer perspective », *International Journal of Hydrogen Energy* 34 : 3578-3588.
- Fri, R. W. (2003), The role of knowledge: Technological innovation in the energy system, *The Energy Journal*, Vol. 24, No. 4, 51-74.
- Fuel Cell Today (2007), Fuel Cell Today Niche Transport Survey 2007, Volume 1
- Fuel Cell Today (2008a), 2008 Niche Transport Survey, Volume 1.
- Fuel Cell Today (2008b), 2008 Niche Transport Survey, Volume 2.
- Fuel Cell Today (2008c), 2008 Large Stationary Survey.
- Fuel Cell Today (2008d), 2008 Hydrogen Infrastructure Survey.
- Fuel Cell Today (2009a), 2009 Light Duty Vehicle Survey.
- Fuel Cell Today (2009b), Small Stationary Survey 2009.
- Gallagher K.S., Holdren J.P., Sagar A.D. (2006), « Energy-Technology Innovation », *Annual Review Environment Ressource* 31 : 193-237.
- Garanina O. (2009), *La Russie dans l'économie mondiale*, Ed. L'Harmattan, Série Le monde en questions, Collection L'esprit économique, Paris, 327p.
- Geels F.W. (2005), *Technological Transitions and System Innovations: A Co-evolutionary and Socio-Technical Analysis*, Cheltenham: Edward Elgar.
- Geels F.W. (2002), "Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case study", *Research Policy* 31 , 1257-1274.
- Geels F.W., Schot J. (2007), « Typology of sociotechnical transition pathways », *Research Policy* 36 : 399-417.
- Gerlagh R., van der Zwaan B. (2006), « Options and Instruments for a Deep Cut in CO2 Emissions : Carbon Dioxide Capture or Renewables, Taxes or Subsidies ? », *The Energy Journal* 27 (3) :25 :48.
- Geroski P.A. (2000), "Models of technology diffusion", *Research Policy* 29:603–626.
- Gilbert R.J., Newbery D.M. (1982), 'Pre-emptive Patenting and the Persistence of Monopoly,' *American Economic Review* 72, 514-26.
- Gollier C. (2001), *The Economics of Risk and Time*, MIT Press, MA.
- Goltsov, V.A., Veziroglu, T.N. (2001), « From hydrogen economy to hydrogen civilisation, » *International Journal of Hydrogen Energy* 26, 909–915.
- Gordon, R.B. et al. (2006), « Metal stocks and sustainability », *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103 (5) :1209–1214.

- Goulder L.H., Parry I.W.H. (2008), « Instrument Choice in Environmental Policy », Resources For the Future, Discussion Paper RFF DP 08-07, April, Washington, D.C.
- Graham D., Glaister S. (2004), « Road traffic demand: a review », *Transport Review* 24, 261–274.
- 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.
- Green R., Hu H. (2009), « Making Markets for Hydrogen Vehicles: Lessons from LPG, » 5th European Congress on Economics and Management of Energy in Industry, 14-17 April, Vilamoura.
- Green R., Lorenzoni A., Pérez Y., Pollitt M. (2009), « Policy assessment and good practices, » In : J.-M. Glachant, F. Lévêque, eds., *Electricity Reform in Europe: Towards a Single Energy Market*, Edward Elgar, Cheltenham, pp. 172-206.
- Greene D.L., Patterson P.D., Singh M., Li J. (2005), « Feebates, rebates and gas-guzzler taxes: a study of incentives for increased fuel economy », *Energy Policy* 33 : 757–775.
- Griliches, Z. (1992), “The search for R&D spillovers”, *Scandinavian Journal of Economics* 94:S29–S47.
- Griliches Z. (1979), « Issues in assessing the contribution of research and development to productivity growth », *Bell Journal of Economics* 10 (1), 92-116.
- Griliches Z. (1957), « Hybrid Corn : An Explanatory in the Economics of Technological Change », *Econometrica* 48, 501-22.
- Groupe Intergouvernemental d’experts sur l’Evolution du Climat-GIEC (2007a), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*, 10th Session of Working Group I (WG I), Paris, February, <http://www.ipcc.ch>
- Groupe d’Experts Intergouvernemental sur l’Evolution du Climat – GIEC (2007b), « Mitigation from a cross-sectoral perspective », Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the IPCC, chapter 11 « Mitigation of Climate Change », www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter11.pdf
- Grubb M. (2004), 'Technology innovation and climate change policy: an overview of issues and options', Keio Economic Studies, Vol.XLI (2) <http://www.econ.cam.ac.uk/faculty/grubb/publications/J38.pdf>
- Grübler A. (1999), *The Rise and Fall of Infrastructures*, Physica-Verlag, Heidelberg.
- Grübler A. (1998), *Technology and Global Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Grübler A., Nakicenovic N. (1996), « Decarbonizing the global energy system », *Technological Forecasting and Social Change* 53, 97–100.
- Grübler, A., Nakićenović N., Victor D.G. (1999), 'Dynamics of energy technologies and global change', *Energy Policy* 27 (5), 247-280.

Guerrien B. (2002), - sous la direction de - *Dictionnaire d'analyse économique: microéconomie, macroéconomie, théorie des jeux, etc.*, 3^e. éd. augm., Editions La Découverte, Dictionnaires Repères, Paris.

Haeseldonckx D., D'haeseleer (2006), "The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure", *International Journal of Hydrogen Energy* 32:10-1110-11, 1381-1386.

Hammar H., Löfgren A., Sterner T. (2004), « Political economy obstacles to fuel taxation », *Energy Journal* 25 (3), 1–17.

Hansen A.C. (2009), "Will hydrogen be competitive in Europe without tax favours ?," *Energy Policy*, In Press, doi:19.1016/j.enpol.2009.03.035

Hardin G. (1968), « The Tragedy of the Commons », *Science* 162 : 1243-1248.

Hawkins S. (2006), "Technological Characterisation of Hydrogen Storage as Distribution Technologies", UKSHEC Social Science, Working Paper n° 21, PSI.

Heal G., Kriström B. (2002), "Uncertainty and climate change", *Environmental and Resource Economics* 22, 3-39.

Heywood J.B., Weiss M.A. (2003), « The Performance of Future ICE and Fuel Cell Powered Vehicles and Their Potential Fleet Impact, » LFEE2003-004 (2003), MIT.

Hicks, J. R. (1932), *The Theory of Wages*, Macmillan, London.

Hoffmann P. (2001), *Tomorrow's Energy - Hydrogen, fuel cells and the prospects of a cleaner planet*, MIT Press.

Hotelling H. (1931), « The Economics of Exhaustible Resources, » *Journal of Political Economy* 39 : 137-175.

Høyer K.G. (2008), « The history of alternative fuels in transportation : The case of electric and hybrid buses », *Utilities Policy* 16 : 63-71.

Hughes J.E., Knittel C.R., Sperling D. (2008), « Evidence of a Shift in the Short-Run Price Elasticity of Gasoline Demand », *The Energy Journal* 29 (1) : 113-134.

Hughes T.-P. (1998), "L'histoire comme systèmes en évolution", *Annales HSS*, n° 4-5, pp. 839-857.

Hughes T.-P. (1993), "The Evolution of Large Technological Systems", In : Bijker W.E., Hughes T., Pinch T. (eds.), *The Social Construction of Technological Systems*, Seventh edition, MIT Press, Cambridge, MA, pp.83-107.

Hughes T.J. (1983), *Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930*, The John Hopkins University Press, Baltimore and London.

Hulten C.R., Schwab R.M. (1993), « Infrastructure Spending : Where Do We Go From Here ? », *National Tax Journal*, 46(3), September, 261-273.

- Hydrogen and Fuel Cell Platform - HFP (2007), « Implementation Plan – Status 2006, » The European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform, <https://www.hfpeurope.org>
- HFP (2005), *Deployment Strategy Foundation*, The European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform, in <https://www.hfpeurope.org>
- Hynet (2004), “Towards a European Hydrogen Roadmap: Preface to HyWays – The European Hydrogen Energy Roadmap”, Executive Report, May, <http://www.hyways.de>
- HySociety (2004), « Technology Database for Hydrogen Pathways and Analysis of Hydrogen Pathways”, Electronic database of the HySociety project, prepared by the HySociety consortium, Result of the Work Package 2 (Task2.1), June, <http://www.eu.fhg.de/h2database/indexx.html>
- HyWays (2008), *The European Hydrogen Energy Roadmap*, Final Report, February, <http://www.hyways.de>
- Infras (2004), « External cost of transport –update study », Infras/IWW, Zürich/Karlsruhe.
- Ireland N.J., Stoneman P. (1986), ‘Technological Diffusion, Expectations and Welfare’, *Oxford Economic Papers*, 283-304.
- Islas, J. (1997), “Getting round the lock-in in electricity generating systems: the example of the gas turbine”, *Research Policy* 26 (1), 49–66.
- Isoard S., Soria, A. (2001), « Technical change dynamics : evidence from the emerging renewable energy technologies », *Energy Economics* 23 : 619-636.
- Jacobsson S., Bergek A., Finon D., Lauber V., Mitchell C., Toke D., Verbruggen A. (2009), « EU renewable energy support policy : Faith or facts ? », *Viewpoint, Energy Policy* 37 : 2143-2146.
- Jacobsson S., Johnson A. (2000), « The diffusion of renewable energy technology : an analytical framework and key issues for research », *Energy Policy* 28 : 625-640.
- Jaffe A.B., Newell R.G., Stavins R.N. (2005), ‘A tale of two market failures : technology and environmental policy’, *Ecological Economics* 54 : 164-174.
- Jaffe A.B., Newell R.G., Stavins R.N. (2003), “Technological Change And The Environment”, in Mäler K.-J., Vincent J.R. (eds.) *Handbook of Environmental Economics*, Vol. 1, Elsevier Science B.V.
- Jamasb T., Pollitt M. (2005a), « Deregulation and R&D in Network Industries: The Case of the Electricity Industry », Electricity Policy Research Group EPRG0502.
- Jamasb T., Pollitt M. (2005b), “Electricity Market Reform in the European Union: Review of Progress towards Liberalisation and Integration”, *The Energy Journal Special Issue on the European Electricity Liberalisation*, 11-42.
- Japan Hydrogen and Fuel Cell - JHFC (2008), « Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project, » <http://www.jhfc.jp>
- JHFC (2006), « JHFC Well-to-Wheel Efficiency Analysis Results, »Tsukuba, JARI.

- Jeeninga H., Ros M., Godfroij P. (2008), « Policy support for large scale demonstration projects for hydrogen use in transport », Summary report HyLights phase I, Deliverable D 5.1 (Part A), July.
- Jensen M.C., Meckling W.H. (1976), "The theory of the firm : managerial behaviour agency costs and ownerships structure", *Journal of Financial Economics*, Vol.3, n°4, Oct., p.305-360.
- Johnson K.C. (2006), « Feebates: An effective regulatory instrument for cost-constrained environmental policy », *Energy Policy* 34 :3965–3976.
- Julius D., Mashayekhi A. (1990), *The Economics of Natural Gas: Pricing, Planning and Policy*, Oxford University Press, Oxford.
- Kahn Ribeiro, S., S. Kobayashi, M. Beuthe, J. Gasca, D. Greene, D. S. Lee, Y. Muromachi, P. J. Newton, S. Plotkin, D. Sperling, R. Wit, P. J. Zhou (2007), "Transport and its infrastructure," In: B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds), *Climate Change 2007: Mitigation*, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- Katz M. L., Shapiro C. (1985), "Network externalities, competition and Compatibility », *American Economic Review* 75 (3), 424-440.
- Katz M. L., Shapiro C. (1986), "Technology Adoption in the Presence of Network Externalities", *Journal of Political Economy*, vol. 94, n°4, pp 822-841.
- Kemp R, Schot J., Hoogman R. (1998), "Regime Shifts to Sustainability Through Processes of Niche Formation: the Approach of Strategic Niche Management", *Technology Analysis & Strategic Management* 10 (2), p. 175-195.
- Kemp R. (1994), "Technology and the Transition to Environmental Sustainability. The Problem of Technological Regime Shifts", *Futures* 26 (10), p. 1023-46.
- Kemp R. (1997), *Environmental Policy and Technical Change – A Comparison of the Technological Impact of Policy Instruments*, Edward Elgar, Cheltenham.
- Keohane, N.O., Revesz R., Stavins R.N. (1998), 'The Choice of Regulatory Instruments in Environmental Policy', *Harvard Environmental Law Review* 22 : 313-367.
- Kline S., Rosenberg N. (1986), « An Overview of Innovation », In : Landau R., Rosenberg N., eds., *The Positive Sum : Harnessing the Technology for Economic Growth*, National Academies, Washington DC, pp. 275-306.
- Knight F.H. (1921), *Risk, Uncertainty, and Profit*, Houghton Mifflin and Co, New York.
- Kobayashi S., Plotkin S., Kahn Ribeiro S. (2009), « Energy efficiency technologies for road vehicles », *Energy Efficiency* 2: 125–137.
- Kouvaritakis N. (cord.) (2007), « Case Study Comparisons and Development of Energy Models Integrated Technology Systems – CASCADE MINTS », Part 1 : Final Activity Report, European Commission, SSP6-CT-2003-502445.

Kromer, M.A., Heywood J.B. (2007), *Electric Powertrains: Opportunities and Challenges in the U.S. Light-duty Vehicle Fleet*, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA.

Kuhn T.S. (1962), *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press.

Kurani K.S., Sperling D. (1988), "The Rise and Fall of Diesel Cars in the USA: A Consumer Choice Analysis," *Transportation Research Record* 1175. Transportation Research Board: Washington, D.C.

Kurani K.S., Turrentine T.S., Heffner R.R., Congleton C. (2004), « Prospecting the future for hydrogen fuel cell vehicle markets, » in: Sperling D., Cannon J.S. (Eds.), *The Hydrogen Transition*, The Academic Press, Burlington, MA, pp. 33–58.

Laffont J.-J., Tirole J. (1993), *A Theory of Incentives in Procurement and Regulation*, MIT Press, Cambridge, MA.

Lanthier P. (2006), « Les autorités publiques et l'électrification, de 1870 à 1940 : Une comparaison européenne », *Annales Historiques de l'Electricité*, n°4, pp. 125-146.

Lattin W.C., Utgikar V.P. (2007), « Transition to hydrogen economy in the United States: A 2006 status report », *International Journal of Hydrogen Energy* 32, pp.3230-3237.

Le Bas C. (1991), *Economie du Changement Technique*, Coll. Technologie(s), Ed. L'Interdisciplinaire, Limonest.

Le Bas C., Sylvestre-Baron P. (1995), « Diffusion technologique non binaire et schéma épidémiologique. Une reconsidération, » *Economie Appliquée*, tome XLVIII, n°3, pp.71-101.

Le Thiez P., Rojey A. (2007), « Captage, Transport et Stockage Géologique du CO₂ », IFP, Paris , p.10-12.

Leiby P., Rubin J. (2004), "Understanding the transition to new fuels and vehicles: lessons learned from experience of alternative fuel and hybrid vehicles", In: Sperling, D., Cannon, J., (Eds.). *The hydrogen energy transition—moving toward the post petroleum age in transportation*, Elsevier, Burlington, MA.

Lévêque F. (2004), *Economie de la réglementation*, Editions: La Découverte, Repères n°238, Paris.

Liebowitz S.J., Margolis S.E. (1994), "Network externality: an uncommon tragedy", *Journal of Economic Perspectives* 8 (2), pp. 133-150.

Liebowitz S.J., Margolis S.E. (2000), "Path Dependence, Lock-In, and History", <http://www.utdallas.edu/~liebowit/palgrave/palpd.html> .

Lipman T.E., Edwards J.L., Kammen D.M. (2002), « Economic Analysis of Hydrogen Energy Station Concepts: Are 'H₂E-Stations' a Key Link to a Hydrogen Fuel Cell Vehicle Infrastructure? », Renewable and Appropriate Energy Laboratory, Energy and Resources Group, University of California, Berkeley, CA.

Lovins A.B. (2003), « Twenty Hydrogen Myths, » Rocky Mountain Institute, June, http://www.rmi.org/images/other/Energy/E03-05_20HydrogenMyths.pdf

- Lovins A.B., Williams B.D. (1999), *A Strategy for the Hydrogen Transition*, Rocky Mountain Institute, RMI Publication T99-07, presented to the 10th Annual US Hydrogen Meeting, National Hydrogen Association, Vienna, Virginia, 7-9 April.
- Lundvall B.-A. (ed.) (1992), *National Systems of Innovations: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning*, Pinter Publishers, London.
- MacAvoy P.W. (2001), *The Natural Gas Market: Sixty Years of Regulation and Deregulation*, Yale University Press, New Haven and London.
- Magat, W.A. (1979), "The effects of environmental regulation on innovation", *Law and Contemporary Problems* 43:3-25.
- Mansfield E. (1968), *Industrial Research and Technological Innovation*, New York : Norton.
- March J.G., Olsen J.P. (1989), *Rediscovering Institutions : the organizational basis of politics*, The Free Press, New York.
- Marchetti C. (1985), « Nuclear plants and nuclear niches », *Nuclear Science and Engineering* 90, 521-526.
- Marchetti C., Nakicenovic N. (1979), « The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model, » International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), RR-79-13, Laxenburg.
- Margolis, R., Kammen, D., (1999), "The Energy Technology and R&D Policy Challenge," *Science* 285 (July 30), pp. 690-692.
- Marques V., Soares I., Fortunato A. (2008), « Uniform Price Market and Behaviour Pattern : What Does the Iberian Electricity Market Point Out ? », Grupo de Estudos Monetarios e Financeiros, Estudos do GEMF, n°8, 40p.
- Marshall A. (1959), *Principles of Economics*, MacMillan, London.
- Marshall A. (1884), "Where to House Them;" *Contemporary Review*, 45 (Jan./June): 224-31.
- Martin J.-M. (1998), « Energie et changement technologique », *Revue de l'Energie*, n°497.
- Martin J.-M. (1996), "Energy technologies: systemic aspects, technological trajectories and institutional frameworks", *Technological Forecasting and Social Change* 53, 81-95.
- Matutes C., Regibeau P. (1996), « A selective review of the economics of standardization : Entry deterrence, technological progress and international competition, » *European Journal of Political Economy* 12 : 183-209.
- McDonald A., Schrattenholzer L. (2001), « Learning rates for energy technologies », *Energy Policy* 29 : 255-261.
- McDowall W., Eames M. (2006), "Forecasts, scenarios, visions, backcasts and roadmaps to hydrogen economy: A review of the hydrogen futures literature," *Energy Policy* 34, 1236-1250.

McDowall W., Eames M. (2005), "UK-SHEC Hydrogen Transitions Workshop Report", October, UK-SHEC Social Science Working Paper n°11, www.psi.org.uk/ukshec

McKinsey (2008), *Carbon Capture & Storage: Assessing the Economics*, McKinsey&Company http://www.mckinsey.com/client/service/ccsi/pdf/CCS_Assessing_the_Economics.pdf (accédé le 22.2.2009)

McNutt B., Rodgers D. (2004), "Lessons Learned from 15 Years of Alternative Fuels Experience - 1988 to 2003," In: D. Sperling, J. S. Cannon, eds., *The Hydrogen Energy Transition: Moving toward the Post Petroleum Age in Transportation*, Burlington, MA, Elsevier.

Meijer I., Hekkert M., Faber J., Smits R. (2005), "Perceived uncertainties regarding socio-technological transformations: towards a typology", Working paper for the Druid Winter 2005 PhD Conference.

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.

Melaina M.W. (2005), "Initiating hydrogen infrastructures: analysis of technology dynamics during the introduction of hydrogen fuel for passenger vehicles," PhD dissertation, Center for Sustainable Systems, School of Natural Resources and Environment, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.

Melaina M.W. (2003), "Initiating hydrogen infrastructures: preliminary analysis of a sufficient number of initial hydrogen stations in the US," *International Journal of Hydrogen Economics* 28 743-755.

Menanteau P., Finon D., Lamy M. (2003) 'Prices versus Quantities: Choosing Policies for Promoting the Development of Renewable Energy', *Energy Policy* 31(8) pp. 799-812.

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

Mercuri R., Bauen A., Hart D. (2002), "Options for refuelling hydrogen fuel cell vehicles in Italy", *Journal of Power Sources* 106, 353-363

Metcalf G.E. (2007), « A Green Employment Tax Swap: Using A Carbon Tax To Finance Payroll Tax Relief », Taxe Reform, Energy and the Environment, Policy Brief, June, The Brookings Institution, World Resources Institute, MA.

Metcalf S. (1988), « The diffusion of innovation: an interpretative Survey, » In: Dosi, G., et al. (eds.), *Technical Change and Economic Theory*, Frances Pinter, London.

Milgrom P., Roberts J. (1990), « Bargaining costs, influence activities, and the organization of economic activity, » In : J. Alt, K. Shepsle, eds., *Perspectives on Political Economy*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 57-89.

Mima S., Criqui P. (2003), "The future of fuel cells in a long-term intertechnology competition framework", in Avadikyan A., Cohendet P., Heraud J.A. (Eds.), *The Economics Dynamics of Fuel Cell Technologies*, Springer, Berlin, pp. 42-78.

Mintz M., Folga S., Gillette J., Molburg J. (2002), "Hydrogen: On the Horizon or Just a Mirage?", Argonne National Laboratory.

Mitchell B.R. (1980), *European Historical Statistics 1750-1975*, 2nd edition, The MacMillan Press LTD, London.

Mokyr J. (1991), « Evolutionary Biology, Technological Change and Economic History », *Bulletin of Economic Research* 43 (2), 127-149.

Morris D. (2003), "A Better Way to Get From Here to There: A Commentary on the Hydrogen Economy and a Proposal for an Alternative Strategy", Institute for Local Self-Reliance, Minneapolis, MN.

Mowery D., Rosenberg N. (1982), « *The Influence of Market Demand Upon Innovation: A Critical Review of Some Recent Empirical Studies*, » In: Rosenberg N. (ed) *Inside the black-box - technology and economics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982, p. 193-241.

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.

Musgrave R.A., Musgrave P.B. (1973), *Public Finance in Theory and Practice*, McGraw-Hill, New York.

Myers D.B., Ariff G.D., James B.D., Lettow J.S., Thomas C.E.S., Kuhn R.C. (2002), 'Cost and Performance Comparison of Stationary Hydrogen Fueling Appliances', Directed Technologies Inc., Paper prepared for the Hydrogen Program Office, Office of Power Technologies, US Department of Energy, Washington DC.

National Research Council – NRC (2008a), « 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.

NRC (2008b), « Review of the Research Program of the FreedomCAR and Fuel Partnership: Second Report, » Board on Energy and Environmental Systems, The National Academies Press, Washington, DC.

NRC (2004), "The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs, Board on Energy and Environmental Systems," The National Academies Press, Washington, DC.

Nelson R.R. (1992), « National innovation systems: a retrospective on a study », *Industrial and Corporate Change* 1 (2), 347-74.

Nelson R., Winter S. (2002), "Evolutionary Theorizing in Economics," *The Journal of Economic Literature*, Vol.16, n°2, pp. 23-46.

Nelson R., Winter S. (1982), *An Evolutionary Theory of Economic Change*, The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, 437 p.

Nelson R., Winter S. (1977), « In Search of a Useful Theory of Innovation », *Research Policy* 6 (1), p. 36-76.

- Nemet G.F. (2009), "Interim monitoring of cost dynamics for publicly supported energy technologies", *Energy Policy* 37: 825–835.
- Nesbitt K., Sperling D. (1998), "Myths Regarding Alternative Fuel Vehicle Demand by Light-Duty Vehicle Fleets", *Transportation Research D*. 3(4) : 259-269.
- Neuhoff K. (2008), "Tackling Carbon: How to Price for Climate Policy," version 1.0, Electricity Policy Research Group, University of Cambridge, May, 110p.
- Newbery D. (1999), *Privatization, Restructuring, and Regulation of Network Utilities*, The MIT Press, Cambridge, MA.
- Newbery D. (2005), "Refining Market Design", Sustainable Energy Specific Support Assessment (Sessa) – Conference "Implementing the International Market of Electricity : Proposals and Timetables", september, Brussels.
- Newell, R.G., Jaffe, A.B., Stavins, R.N. (1999), "The Induced Innovation Hypothesis and Energy-Saving Technological Change", *The Quarterly Journal of Economics* 114, pp. 941-975.
- Noam E.M. (2001), *Interconnecting the Network of Networks*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Noam E.M. (1992), "Network Tipping: The Rising and Fall of the Public Network Monopoly", in *Telecommunications in Europe*, Oxford University Press, Oxford, point 3, pp.26-43.
- Norberg-Bohm, V. (2003), "The Role of Government in Technology Innovation: Insights for Government Policy in the Energy Sector." Working Paper 14, Energy Technology Innovation Policy, Belfer Center, Harvard Kennedy School.
- Nordhaus W.D. (2009), « The Perils of the Learning Model for Modeling Endogenous Technological Change », Cowles Foundation Discussion Paper N° 1685, January.
- Nordhaus W.D. (2006), « Life After Kyoto: Alternative Approaches to Global Warming Policies », *American Economic Review* 96: 31-34.
- Nordhaus W.D. (1973a), « The Allocative of Energy Reserves », *Brookings Papers* 3, 529-570.
- Nordhaus W.D. (1973b), « Some Skeptical Thoughts on the Theory of Induced Innovation », *The Quarterly Journal of Economics* 87 (2), pp. 208-219.
- North D.C. (2005), *Le processus du développement économique*, Ed. d'Organisation, Paris.
- North D.C. (1995), « Some fundamental puzzles in economic history/development, » Working paper, Washington University, St.Louis.
- North D.C. (1991), "Institutions," *Journal of Economic Perspectives*, vol. 5, n° 1, winter, pp. 97-112.
- North D.C. (1990), *Institutions, Institutional Change and Economic Performance*, Cambridge University Press.

Organisation de Coopération et de Développement Economiques - OCDE (2002), *Dynamising National Innovation Systems*, OCDE, Paris.

OCDE (1997), *National Innovation Systems*, OCDE, Paris.

Odell P.R. (2001), *Oil and Gas: Crises and Controversies 1961-2000*, Multi-Science Publishing Company Ltd, Brentwood.

Ogden J. (1999a), 'Prospects for Building a Hydrogen Energy Infrastructure', *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 24, pp. 227-279.

Ogden J. (1999b), "Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study", *International Journal of Hydrogen Energy* 24, 709-730.

Ogden J. (2006), « High Hopes for Hydrogen », *Scientific American*, September, 94-101.

Ogden J., Williams R.H., Larson E.D. (2004), "Societal lifecycle costs of cars with alternative fuels/engines", *Energy Policy* 32 (1), pp. 7-27.

Ogden, J.M., (2002), "Modeling Infrastructure for a Fossil Hydrogen Energy System with CO2 Sequestration", Paper prepared for the Sixth Greenhouse Gas Control Technologies Conference, Kyoto, Japan.

Olson M. (1965), *The Logic of Collective Action*, Harvard University Press, Cambridge, MA.

Padró, C.E.G., Putsche, V. (1999), *Survey of the Economics of Hydrogen Technologies*, NREL, Golden, CO.

Paquier S., Williot J-P. (2005), (sous la direction de) *L'Industrie du Gaz en Europe aux XIXe et XXe Siècles : L'innovation Entre Marchés Privés et Collectivités Publiques*, PIE Peter Lang, Bruxelles.

Parlement Européen (2007), « Support Statement: Written Declaration On Establishing a Distributed Green Hydrogen Economy and Advancing a Third Industrial Revolution in Europe Through Partnership with the Connected Regions and Cities, SME's, and Civil Society Organizations », Brussels.

Parry I, Walls M., Harrington W. (2007), « Automobile Externalities and Policies », Resources for the Future, RFF Discussion Paper 06-26, Washington, DC.

Patil, A.C.; Herder P.M., Weijnen M.P.C. (2005), « Actionable Solutions to Tackle Future Energy Uncertainties, » In: Proceedings of the IEEE 2005 International Conference on Systems, Man & Cybernetics, October 10-12, Waikoloa, Hawaii, USA.

Peebles M. (1992), *Natural Gas Fundamentals*, Shell International Gas Limited.

Peltzman S. (1976), "Towards a More General Theory of Regulation", *Journal of Law and Economics*, n°19 (2), n° 92-01, Londres, pp. 211-240.

Percebois J. (2008), « Electricity liberalization in the European Union: Balancing benefits and risks », *The Energy Journal* 29 (1), pp. 1-20.

Percebois J. (2006), « Dépendance et vulnérabilité : deux façons connexes mais différentes d'aborder les risques énergétiques », Cahiers de Recherche n° 06.03.64, CREDEN, Montpellier I.

Percebois J. (1999), « L'apport de la théorie économique aux débats énergétiques », Cahier n° 99.11.15 CREDEN, Site internet : <http://www.sceco.univ-montp1.fr/creden>

Percebois J. (1989), *Economie de l'Energie*, Economica, Paris.

Pérez-Arriaga I., Barquin J. (2009), « Investing for sustainability, » In : J.-M. Glachant, F. Lévêque, eds., *Electricity Reform in Europe: Towards a Single Energy Market*, Ed. Edward Elgar, Cheltenham, pp. 132-171.

Pigou A. C. (1920), *The Economics of Welfare*, Macmillan, London.

Pizer W. (1999), « The optimal choice of climate change policy in the presence of uncertainty, » *Resource and Energy Economics* 21 (3/4) : 255–287.

Pizer W.A., Popp D. (2008), « Endogenizing technological change : Matching evidence to modeling needs », *Energy Economics* 30(6) : 2754-2770.

Plotkin S. (2007), «Examining Hydrogen Transitions,» Energy Systems Division, Argonne National Laboratory for the U.S. Department of Energy, ANL-07/09, February.

Popp, D. (2002), «Induced innovation and energy prices», *American Economic Review*, March, 160-180.

Porter M.E. (1980), *Competitive Strategy*, The Free Press, McMillan, London.

Porter M.E. (1982), *Choix stratégiques et concurrence, techniques d'analyse des secteurs et de la concurrence dans l'industrie*, Economica, 426p.

Porter M.E. (1986), *L'avantage concurrentiel*, InterEditions, Paris.

Porter M. (1990), *The Competitive Advantage of Nations*, The Free Press, New York, NY.

Porter M.E., van der Linde C. (1995), «Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship», *Journal of Economic Perspectives* 9:97-18.

Powell J., Peters M., Ruddell A., Halliday J. (2004), *Fuel Cells for a Sustainable Future ?*, Tyndall Centre for Climate Change Research, Working Paper 50, March.

Quast O. (1997), «Les fondements des modèles successifs d'organisation de l'industrie gazière: analyse des conditions d'introduction de la concurrence dans une industrie de réseau», sous la direction de D. Finon, Novembre, Grenoble.

Raven (2007), « Niche accumulation and hybridisation strategies in transition processes towards a sustainable energy system: An assessment of differences and pitfalls, » *Energy Policy* 35 (2007) 2390–2400.

- Reinganum J. (1989), « The timing of innovation: research, development and diffusion, » In: Schmalensee R., Willing, R. (eds.), *Handbook of Industrial Organization*, Vol. I. Elsevier, Amsterdam.
- Rifkin J. (2007), « Leading the way to the hydrogen economy and a Third Industrial Revolution: a New Energy Agenda for the European Union in the 21st Century », Présenté au Parlement UE en hiver 2007.
- Rifkin J. (2002), *L'Economie Hydrogène. Après la Fin du Pétrole, la Nouvelle Révolution Economique*, Ed. La découverte, Paris.
- Roads2HyCom (2009a), « Fuel Cells and Hydrogen in a Sustainable Energy Economy: Final Report of the Roads2HyCom Project, » April, Document number: R2H8500PU.6
- Roads2HyCom (2009b), « Well To Tank Technology Pathways And Carbon Balance », R2H4003PU.2
- Roads2Hycom (2007a), "Hydrogen and Fuel Cells - A Handbook for Communities: Volume A: Introduction", European Commission, Community Research, October, www.roads2hy.com
- Roads2Hycom (2007b), « R&D expenditure for hydrogen and fuel cells as indicator for political will », Workpackage 1, Task 1.6, Deliverable 1.6, May, <http://www.roads2hycom.com>
- Rogers E. M. (1995), *Diffusion of Innovations*, 4th edition, New York: Simon and Schuster.
- Romer P. (1986), « Increasing returns and long run growth, » *Journal of Political Economy* 94 : 1002-1037.
- Romm J. (2004), *The Hype About Hydrogen – Fact and Fiction in the Race to Save the Climate*, Island Press.
- Romm J.J., Frank A.A. (2006), « Hybrid vehicles get traction », *Scientific American* 294 (4), April, p.72-79.
- Roques F., Newbery, D., Nuttall, W. J. (2006), "Fuel Mix Diversification Incentives in Liberalised Electricity Markets: A Mean-Variance Portfolio Theory Approach", European University Institute, Robert Schuman Centre for Regulation Studies, Working Paper 2006/33, Florence School of Regulation.
- Rosenberg N. (1998), "Uncertainty and technological change", In: Neef D., Siesfeld G.A., Cefola J. (eds), *The Economic Impact of Knowledge*, Oxford, pp. 17-35.
- Rosenberg N. (1992), "Science and technology in the twentieth century", In : Dosi G.; Giannetti R., Toninelli P.A. (Eds.), *Technology and Enterprise in a Historical Perspective*, Clarendon press, Oxford, pp.63-92.
- Rosenberg N. (1982), *Inside the black box: Technology and economics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Rosenberg N. (1976), *Perspective on Technology*, Cambridge University Press.

- Rotmans, J., Kemp, R., & Van Asselt, M. (2001), "More evolution than revolution: transition management in public policy", *Foresight* 3(1), 15-31.
- Samuelson (1954), « The Pure Theory of Public Expenditure », *Review of Economics and Statistics*, vol.XXXVI, pp.387-389.
- Santini, D.J., Vyas A.D. (2005), « Introduction of Hybrid and Diesel Vehicles: Status within the Life Cycle of Technology Adoption, » *Transportation Research Record* 1941 : 18–25.
- Saviotti P.P. (1996), *Technological Evolution, Variety and the Economy*, Edward Elgar, Cheltenham, 223p.
- 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 : 2064–2087.
- Scherer F. M. (1999), *New Perspectives on Economic Growth and Technological Innovation*, Brookings Institution Press, Washington, D.C.
- Schipper L., Marie-Lilliu C., Fulton L. (2002), « Diesels in Europe: Analysis of Characteristics, Usage Patterns, Energy Savings and Co₂ Emission Implications, » *Journal of Transport Economics and Policy* 36 (2) : 305-340.
- Schlapbach L., Zuttel A. (2001), "Hydrogen-storage materials for mobile applications", *Nature* 414, 353-358.
- Schmookler, J. (1966), *Invention and economic growth*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Schneider F., Volkert J. (1999), 'No Chance for Incentive-Oriented Environmental Policies in Representative Democracies?', *Ecological Economics* 31, 123-138.
- Schneider M., Shade B., Grupp H. (2004), « Innovation Process 'Fuel Cell Vehicle' : What Strategy Promises to Be the Most Successful ?, » Institute for Economic Policy Research, University of Karlsruhe.
- Schumpeter, J. (1942), *Capitalism, Socialism, and Democracy*, New York: Harper and Row.
- Schumpeter J. (1912), *The Theory of Economic Development*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Schwoom M. (2007), « »Managing the Transition to Fuel Cell Vehicles- Policy Implications of an Agent Based Approach », Research Unit Sustainability and Global Change, Hamburg, 35p.
- Shapiro C., Varian H.R. (1998), *Information Rules: A Strategic Guide to the Network Economy*, Harvard Business School Press, Boston.
- Shayegan S., Hart D., Pearson P., Joffe D. (2006), "Analysis of the cost of hydrogen infrastructure for buses in London", *Journal of Power Sources* 157, pp. 862-874.
- Shell (2001), "Energy needs, choices and possibilities : scenarios to 2050", Global Business Environment, Shell International.

- Simbeck D., Chang E. (2002), "Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways—Scoping Analysis", SFA Pacific, Inc., NREL, NREL/SR-540-32525, Golden, Colorado.
- Simon H.A. (1991), « *Rationality in Political Behavior* », February, Carnegie Mellon University.
- Simon H.A. (1976), « From Substantive to Procedural Rationality », In : Latsis (ed.), *Method and Appraisal in Economics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Simon H.A. (1959), « Theories of Decision-Making in Economics and Behavioral Science », *American Economic Review* 49 (1), pp.253-283.
- Simonnet A. (2005), Technical options for distributed hydrogen refueling stations in a market driven situation, Poster and report, In: Proceedings of the 15th annual NHA hydrogen conference, March.
- Small K.A., Van Dender K. (2007), « Fuel efficiency and motor vehicle travel: the declining rebound effect », *The Energy Journal* 28 : 25–51.
- Smil V. (2009), « Les limites de l'innovation énergétique, » <http://www.project-syndicate.org/commentary/smil1/French>
- Smil V. (2000), « Energy in the Twentieth Century : Resources, Conversions, Costs, Uses, and Consequences », *Annual Review of Energy Environment* 25 :21-51.
- Smil V. (1994), *Energy in World History*, Westview Press, Boulder (Colo.).
- Smit M. (2006), "Developing Gas Markets: Lessons Learned from the Netherlands", 23rd World Gas Conference, Amsterdam.
- Solomon B.D., Banerjee A. (2006), « A Global Survey of Hydrogen Energy Research, Development and Policy », *Energy Policy* 34, pp.781-792.
- Sørensen B. (2005), *Hydrogen and Fuel Cells: Emerging Technologies and Applications*, Elsevier Academic Press.
- Sperling D. (1990), *New Transportation Fuels: A Strategic Approach to Technological Change*, University of California Press, Berkeley, CA.
- Sperling D., Cannon J. (2004), *The Hydrogen Energy Transition*, Elsevier, Burlington, MA.
- Sperling D., Gordon D. (2008), « Advanced Passenger Transport Technologies, » *Annual Review of Environment and Resources* 33 : 63-84.
- Sperling, D., Ogden J. (2006), 'The Bumpy Road to Hydrogen,' Proceedings of the World Hydrogen Energy Conference, June 26, Lyon.
- Stavins R. (2004), « Environmental Economics », Resources For the Future, Discussion Paper RFF DP 04-54, December, Washington, D.C.

- Stavins R.N. (2003), "Experience With Market-Based Environmental Policy Instruments", in Karl-Göran Mälern et Jeffrey Vincent (éd.) *Handbook of Environmental Economics*, vol. I, Elsevier Science, Amsterdam, pp. 355-435.
- Stern N. (2007), «The Economics of Climate Change. The Stern Review, » Cambridge University Press.
- Stern T. (2007), « Fuel taxes: An important instrument for climate policy, » *Energy Policy* 35 : 3194–3202.
- Stigler G.J. (1971), 'The Theory of Economic Regulation', *Bell Journal of Economics and Management Science* 2 (1), 3-21.
- Stoffaës C. (1994), (dir.) *Entre Monopole et Concurrence, la régulation de l'énergie en perspective historique*, Éditions P.A.U., Paris, 1994, 340 p.
- Stoft S. (2008), *Carboneconomics: How to Fix the Climate and Charge It to OPEC*, Diamond Press, MA.
- Stoneman P. (2002), *The Economics of Technological Diffusion*, Blackwell Publishers Ltd., Oxford.
- StorHy (2007), "Hydrogen Storage Systems for Automotive Application", European Commission, Integrated Project n° 502667, Hydrogen and Fuel Cell Review Days 2007, Brussels 10th-11th October
- Struben J., Sterman J. (2007), « Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems », MIT Sloan Working Paper 4587-06, May, <http://ssrn.com/abstract=881800>
- Syrota J. (2008), « Mission 'Véhicule 2030' : Perspectives concernant le Véhicule 'grand public' d'ici 2030 », Rapport au Conseil d'Analyse Stratégique, octobre.
- TechPoles (2008), Basé de données de technologies énergétiques, Grenoble, juillet.
- Teece D. J. (1990), "Structure and Organization of the Natural Gas Industry: Differences Between the United States and the Federal Republic of Germany and Implications for the Carrier Status of Pipelines", *Energy Journal* 11(3), 1-36.
- Teece D.J. (1987), *The Competitive challenge: Strategies for industrial innovation and renewal*, Ballinger Pub. Co., Cambridge, MA.
- Teece, D., Pisano G.P. (1994), "The Dynamic Capabilities of Firms: An Introduction", *Journal of Economic Behavior and Organization* 27 (3), pp. 537-556.
- Thirtle, C.G., V.W. Ruttan (1987), "The role of demand and supply in the generation and diffusion of technical change", *Fundamentals of Pure and Applied Economics*, Vol. 21, Harwood Academic Publishers, New York.
- Thomas C.E., James B.D., Lomax F.D. (1998), « Market penetration scenarios for fuel cell vehicles », *International Journal of Hydrogen Energy* 23 (10), 949-966.
- Tirole J. (1988), *The Theory of Industrial Organization*, MIT Press.
- Toyota (2008), « Worldwide Prius Sales Top 1 Million Mark », News Release, 15 mai, <http://www.toyota.co.jp/en/news/08/0515.html> (accédé le 6 mai 2008).

Turvey R. (1963), « On Divergences Between Social Cost and Private Cost », *Economica* XXX (August) : 309-13.

Tzimas, E., Castello, P., Peteves, S. (2006), « The evolution of size and cost of a hydrogen delivery infrastructure in Europe in the medium and long term, » *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (10–11), 1369–1380.

U.S. Department of Energy - DOE (2007), “Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan: Technical Plan – Technological Validation”, Hydrogen Program, <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/mypp>

DOE (2007), « Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan: Technical Plan – Technological Validation, » Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Washington, D.C., <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/mypp> .

United States Government Accountability Office - GAO (2008), « Hydrogen Fuel Initiative : DOE Has Made Important Progress and Involved Stakeholders but Needs to Update What It Expects to Achieve by Its 2015 Target », Report to Congressional Requesters, GAO-08-305, January, Washington, D.C.

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.

Utterback, J.M. (1994), *Mastering the Dynamics of Innovation*, Harvard Business School Press, Boston.

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

Van den Berg, J., Kemp. R. (2006), “Economics and Transitions: Lessons from Economic Sub-disciplines,” Working Paper Series n°38, UNU-MERIT, October, Maastricht, 34 p.

Wang M.Q. (2008), “Well-to-Wheels Energy and Greenhouse Gas Emission Results and Issues of Fuel Ethanol”, The Lifecycle Carbon Footprint of Biofuels, Proceedings of a conference January 29, Miami Beach, FL.

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

Weinert J.X., Lipman T.E. (2006), “An assessment of the near-term costs of hydrogen refuelling stations and station components”, University of California Davis, Institute of Transportation Studies, CA.

Weitzman M. L. (1974), “Prices vs. Quantities”, *The Review of Economic Studies*, vol. 41 (4), p. 477-491, October.

Wietschel M., Hasenauer U., de Groot A. (2006), “Development of a European hydrogen infrastructure scenarios—CO₂ reduction potential and infrastructure investment”, *Energy Policy* 34 pp. 1284-1298.

- Williams B.D., Kurani K.S. (2006), « Estimating the early household market for light-duty hydrogen-fuel-cell vehicles and other 'Mobile Energy' innovations in California : A constraints analysis », *Journal of Power Sources* 160 : 446-453.
- Williamson O.E. (2005), "The Economics of Governance", *The American Economic Review*, (95) 2, pp. 1-18.
- Williamson O.E. (1993), "Transaction costs and organisation theory", *Industrial and Corporate Change*, Vol. 2, n°2, p. 107-156.
- Williamson O.E. (1991), "Comparative Economic Organization: The Analysis of Discrete Structural Alternatives", *Administrative Science Quarterly* 36 (2), pp. 171-195.
- Williamson O.E. (1985), *The Economic Institutions of the Capitalism*, New York: The Free Press.
- Williamson O.E. (1971), "The Vertical Integration of Production: Market Failure Considerations", *The American Economic Review*, vol. 61, n°2, May, pp 112-123.
- Williot J-P. (2005), « Du déclin au renouveau : la seconde moitié du XXe siècle », in S. Paquier et J-P. Williot (eds.), *L'Industrie du Gaz en Europe aux XIXe et XXe Siècles : L'innovation Entre Marchés Privés et Collectivités Publiques*, PIE Peter Lang, Bruxelles.
- Wittneben B.B.F. (2009), « Exxon : Let us re-examine our choice for a cap-and-trade system over a carbon tax », Communication, *Energy Policy* 37 : 2462–2464.
- World Business Council for Sustainable Development - WBCSD (2004), « Mobility 2030: Meeting the Challenges to Sustainability, » The Sustainable Mobility Project 2004, <http://www.wbcds.ch>
- Wright T.P. (1936), « Factors Affecting the Cost of Airplanes », *Journal of Aeronautical Sciences* 3 :122-128.
- Yang C. (2008), « Hydrogen and electricity: Parallels, interactions, and convergence, » *Energy Policy* 33 : 1977 – 1994.
- Yang C., Ogden J. (2007), "Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode", *International Journal of Hydrogen Energy* 32, 268-286.
- Yang C.-J. (2009), « An impending platinum crisis and its implications for the future of the automobile », *Energy Policy*, doi:10.1016/j.enpol.
- Yang M., Blyth W. (2007), "Modeling Investment Risks and Uncertainties with Real Options Approach," International Energy Agency Working Paper Series, LTO/2007/WP O1, February, IEA/OECD, Paris.
- Yergin D. (1991), *The Prize: The Epic Quest for Oil, Money and Power*, Touchstone Books.

Webographie sélective

<http://www.iphe.net> - International Partnership for the Hydrogen Economy
<http://iahe.org> - International Association for Hydrogen Energy
<http://www.ieahia.org> - Instance de collaboration technologique sur hydrogène et PAC de l'AIE
<http://www.ec.europa.eu/eurostat> - Eurostat
<http://www.europa.eu.int> - Commission Européenne
http://ec.europa.eu/research/fch/index_en.cfm - Site de la JTI "Fuel Cells and Hydrogen"
<http://www.hyways.de> – feuille de route européenne sur l'hydrogène (projet HyWays)
<http://www.roads2hy.com> - Programme de recherche européen sur l'hydrogène « Roads2HyCom »
http://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/index.php/Main_Page - Base de données sur hydrogène et piles à combustible animée par le projet « Roads2HyCom »
<http://h2moves.eu> – projets de démonstration en Europe
<http://www.hychain.org> – projet de démonstration « HyChain »
<http://www.h2euro.org/> - EHA : European Hydrogen Association
<http://www.afh2.org> - Association Française de l'Hydrogène
<http://www.cea.fr> - Commissariat à l'Energie Atomique
<http://www-anr-hpac.cea.fr> - Programme HPAC
<http://www.eia.doe.gov> - *United States Energy Information Administration*
<http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells> - Programme du DOE sur les PAC
<http://www.hydrogen.energy.gov> - Programme du DOE sur hydrogène
<http://www.hydrogenus.com> - National Hydrogen Association (NHA)
<http://www.jhfc.jp/> - Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project (JHFC)
<http://www.cafcp.org> - California Fuel Cell Partnership
<http://www.airliquide.com> - Air Liquide
<http://innovation.gazdefrance.com> - Centre de Recherche de Gaz de France
<http://www.h2mobility.org> - Base de données LBST sur véhicules à PAC et stations-service hydrogène
<http://www.linde.com/hydrogen> - Linde, site dédié à l'hydrogène
<http://www.ballard.com/> - Ballard Power Systems
<http://www.daimlerchrysler.com> - DaimlerChrysler
<http://www.plugpower.com> - Plug Power
<http://www.usfcc.com> - US Fuel Cell Council
<http://www.axanefuelcell.com/> - AXANE
<http://www.helion-hydrogen.com> - HELION
<http://www.fuelcells.dupont.com> - Dupont Fuel Cell
<http://www.utcpower.com> - UTC Power
<http://www.fuelcelltoday.com> - Fuel Cell Today
<http://www.toyota.com> - Toyota
<http://www.honda.com/> - Honda
<http://www.gm.com/> - GM
<http://www.hfcletter.com> - The Hydrogen & Fuel Cell Letter
<http://www.fuelcells.org/> - Fuel Cells 2000
<http://steps.ucdavis.edu> - Groupe de recherche spécialisé en Hydrogène et PAC à l'Université de Californie Davis
<http://www.rff.org> - Ressources For the Future
<http://www.newenergy.is> - Iceland New Energy Ltd.

<http://www.cleanenergypartnership.de> - Partenariat berlinois pour la démonstration
d'hydrogène et des piles à combustible
<http://www.total.fr/> - Total
<http://www.bp.com> – BP
www.shell.com/hydrogen - Royal/Dutch/Shell (H2)

Liste des tableaux, graphiques et encadrés

Tableaux

Tableau 1. Dépendance européenne aux importations énergétiques en 2006 (en %).....	7
Tableau 2. Synthèse des principales technologies de production d'hydrogène	37
Tableau 3. Comparaison entre l'hydrogène et le méthane en termes de caractéristiques de volume et de densité.....	48
Tableau 4. Synthèse des caractéristiques des technologies de stockage de l'hydrogène.....	51
Tableau 5. Coûts de capital des pipelines, “tube trailers” et camions cryogéniques	56
Tableau 6. Matrice de coûts de distribution optimaux pour les différentes situations.....	58
Tableau 7. Synthèse des principales techniques de transport et distribution d'hydrogène	59
Tableau 8. Indicateurs relatifs à la sécurité de l'hydrogène, méthane et essence	63
Tableau 9. Comparaison entre les différents types de Piles à Combustible.....	69
Tableau 10. Perspectives d'amélioration de l'efficacité technologique par rapport à la voiture à essence conventionnelle (2002-2005)	74
Tableau 11. Coût actuel des PAC stationnaires et objectifs pour le futur.....	82
Tableau 12. Synthèse de l'état de commercialisation des PAC dans les différents marchés ...	84
Tableau 13. Coût de l'hydrogène à la pompe en fonction de la technologie de production (€2007/GJ).....	88
Tableau 14. Synthèse des estimations du coût de l'infrastructure pour l'hydrogène.....	92
Tableau 15. Le nombre de voitures prévues dans les projets de démonstration	104
Tableau 16. Comparaison de la structure et de la performance des industries électriques des quatre pays européens et Etats-Unis entre 1880-1980	134
Tableau 17. Synthèse du développement de l'industrie électrique en Europe depuis 1880 ...	139
Tableau 18. Taille du réseau de gazoducs à haute pression en Europe (1000 km).....	150
Tableau 19. Synthèse du développement de l'industrie gazière en Europe.....	153
Tableau 20. Le développement des principales industries gazières nationales en Europe et aux Etats-Unis.....	154
Tableau 21. Synthèse des besoins en infrastructures des différentes transitions	156
Tableau 22. Les différentes technologies d'hydrogène et pile à combustible pour les transports : coûts et performances actuels, objectifs officiels.....	163
Tableau 23. Les solutions alternatives aux carburants pétroliers dans les transports	164
Tableau 24. Innovation de produit et stratégie compétitive de l'entreprise.....	174

Tableau 25. Hypothèses de base pour une station fournissant 20 tonnes d'hydrogène comprimé par an.....	177
Tableau 26. L'effet des différents types d'incertitudes sur la valeur d'attente.....	182
Tableau 27. Le degré d'incertitude associé aux différents types d'innovations.....	217
Tableau 28. Les ratios de progression (PR) des composantes de la voiture à hydrogène.....	228
Tableau 29. Les barrières au développement de nouveaux systèmes technologiques.....	241
Tableau 30. Les sources de verrouillage technologique au carbone.....	242
Tableau 31. Plans actuels pour l'essai et la commercialisation de voitures pile à combustible.....	250
Tableau 32. Capitaux levés par les sociétés privées de technologies d'hydrogène et piles à combustible.....	256
Tableau 33. Capital investi dans les sociétés fabricantes de piles à combustible cotées en bourse.....	256
Tableau 34. Ventes annuelles de voitures aux Etats-Unis.....	268
Tableau 35. Production annuelle de voitures dans le monde : 1900-1924.....	269
Tableau 36. Les facteurs de création de niches et les premiers marchés pour les piles à combustible.....	278
Tableau 37. L'impact de la taxe carbone sur les prix de l'énergie à court terme.....	297
Tableau 38. Dépenses nationales en R&D dans les piles à combustible par usage (moyenne 2003-2005).....	308
Tableau 39. Evolution des budgets de R&D dans les HPAC, 1996-2008 (prix courants).....	308
Tableau 40. Les catégories de voitures ZEV.....	311
Tableau 41. Types de barrières et mesures correctives.....	316
Tableau 42. Comparaison des instruments de soutien à la recherche et au déploiement des technologies de l'hydrogène aux Etats-Unis et en Europe.....	319
Tableau 43. Les Instruments de promotion de la demande et de l'offre d'hydrogène dans les transports.....	320
Tableau 44. Résultats de l'analyse empirique de Santini (2004).....	327
Tableau 45. Le choix technologique des agents R et S, connaissant la base installée de chacune des technologies A et B.....	335
Tableau 46. Paramètres et estimations de la vitesse de diffusion à partir d'informations réelles.....	346

Graphiques

Graphique 1. La consommation énergétique mondiale à l'horizon 2050.....	2
Graphique 2. L'augmentation de la température moyenne depuis la révolution industrielle.....	2
Graphique 3. Répartition des émissions mondiales de GES par secteur.....	4
Graphique 4. La reprise de la volatilité des cours du pétrole.....	5
Graphique 5. Ratio réserves/production pour différentes sources d'énergie primaire.....	6
Graphique 6. Evolution du ratio réserves sur Production et composition par origine.....	6
Graphique 7. Dépendance européenne des importations de pétrole.....	8

Graphique 8. Consommation finale d'énergie en Europe (UE27) par secteur	8
Graphique 9. Deux questions critiques à résoudre pendant la transition vers l'économie de l'hydrogène	19
Graphique 10. Principe de la pile à combustible.....	20
Graphique 11. Réduction de coûts des piles à combustible du type PEM.....	21
Graphique 12. Le cadre analytique de la thèse.....	26
Graphique 13. Présentation schématique de l'organisation de la thèse	29
Graphique 14. La chaîne hydrogène-énergie dans le cas de production centralisée.....	37
Graphique 15. Processus thermochimiques de production d'hydrogène.....	38
Graphique 16. Principales options de captage du CO ₂	40
Graphique 17. Coût de production d'hydrogène selon les principales techniques disponibles à court et moyen termes (contenu énergétique mesuré en Pouvoir Calorifique Inférieur PCI)	45
Graphique 18. Emissions de gaz à effet de serre des différentes méthodes de production d'hydrogène comprimé	46
Graphique 19. Estimations des coûts de production de l'hydrogène en 2030 (PCI)	47
Graphique 20. Comparaison de différentes méthodes de transport par rapport à la distance ..	55
Graphique 21. Les coûts de transport de l'hydrogène.....	57
Graphique 22. Configurations possibles de la station à hydrogène	60
Graphique 23. Densité énergétique par volume (MJ/litre).....	64
Graphique 24. Etat de l'art des différents systèmes de stockage d'hydrogène à bord de la voiture.....	65
Graphique 25. Le principe de fonctionnement de la pile à combustible.....	68
Graphique 26. Le concept de châssis "skateboard" de GM	72
Graphique 27. Comparaison du rendement des voitures à explosion (ICE), hybrides (HEV) et PAC (FCV).....	73
Graphique 28. Bilan environnemental et coût de plusieurs méthodes de production d'hydrogène en Europe et comparaison avec l'essence et le gasoil	77
Graphique 29. Six scénarios pour l'économie de l'hydrogène (Eames et McDowall, 2005) ..	85
Graphique 30. Dates estimées pour la transition vers les voitures piles à combustible dans les transports	89
Graphique 31. Les stations d'hydrogène en Europe	101
Graphique 32. La diffusion d'un bien-réseau en présence des effets de club.....	112
Graphique 33. La structure des coûts et la rente du monopole naturel avec rendements constants	114
Graphique 34. La détermination de la taille optimale d'un club	116
Graphique 35. La taille critique du réseau	118
Graphique 36. Le modèle de Noam (1992).....	119
Graphique 37. Courbe en U inversée et changements structurels des dépenses en R&D.....	126
Graphique 38. L'évolution de la production électrique en Europe: 1885-1980	129
Graphique 39. De l'interconnexion régionale à l'interconnexion nationale entre 1925 et 1935	131
Graphique 40. L'évolution des prix au comptant de l'électricité sur les marchés de gros européens entre 2000 et 2009 (base annuelle, en €/MWh)	136
Graphique 41. Les principales compagnies électriques en part du marché européen de 2006 (en %).....	137
Graphique 42. La chaîne classique du gaz naturel	141
Graphique 43. La formation du prix de gaz naturel	142
Graphique 44. Planification d'un investissement dans un gazoduc.....	143

Graphique 45. La part du gaz naturel dans la consommation énergétique primaire en Europe	148
Graphique 46. Identification des incertitudes dans l'investissement en infrastructures de l'hydrogène	161
Graphique 47. Les forces concurrentielles de Porter (1986).....	169
Graphique 48. Analyse de sensibilité	178
Graphique 49. Les taux d'utilisation de la station en fonction des différents scénarios	179
Graphique 50. Flux de trésorerie actualisés cumulés selon les différents scénarios d'évolution de la demande.....	180
Graphique 51. Décision séquentielle d'investissement avec les options réelles	184
Graphique 52. Innovations incrémentales et de rupture.....	198
Graphique 53. Les dépenses publiques en R&D dans le domaine de l'énergie des pays membres de l'AIE	204
Graphique 54. Le modèle de « liaison en chaîne » de Kline et Rosenberg (1986)	206
Graphique 55. La chaîne d'innovation dans les industries énergétiques	215
Graphique 56. L'évolution des différents types d'incertitudes pendant la phase de développement de l'innovation selon Sherrer (1999)	216
Graphique 57. Le financement public et privé pour l'émergence d'une innovation radicale: le cas de la pile à combustible.....	220
Graphique 58. La "vallée de la mort" comme fonction du temps de développement, les phases d'innovation et les investisseurs typiques à stage de développement.....	221
Graphique 59. Le partenariat entre le secteur public et l'innovateur privé peut raccourcir la « vallée de la mort »	222
Graphique 60. Les courbes d'apprentissage pour différentes technologies de production électrique	225
Graphique 61. L'effet de l'augmentation du taux d'apprentissage	226
Graphique 62. L'effort de déploiement de la technologie et le prix du carbone	227
Graphique 63. Réduction des coûts de la voiture à hydrogène pour les deux ratios de progression	229
Graphique 64. La réduction du temps moyen de diffusion des innovations de produit aux Etats-Unis	230
Graphique 65. L'évolution des infrastructures aux Etats-Unis.....	231
Graphique 66. La courbe de diffusion de l'innovation (Rogers, 1995).....	233
Graphique 67. L'adoption technologique en présence de rendements croissants	235
Graphique 68. La probabilité d'adoption comme fonction de la part de marché	236
Graphique 69. Le cadre institutionnel de base de l'analyse de North	238
Graphique 70. La dynamique de la transition technologique selon la perspective multi-niveau	265
Graphique 71. Nombre de chevaux utilisés pour le transport et nombre de voitures aux Etats-Unis (échelle semi-logarithmique)	267
Graphique 72. La dynamique des innovations de rupture dans le marché.....	274
Graphique 73. Le processus de diffusion des PAC par l'accumulation des niches de marché	280
Graphique 74. Le diamant de Porter : les déterminants de l'avantage compétitif des nations.....	281
Graphique 75. Les ventes annuelles de la Toyota Prius dans le monde.....	284
Graphique 76. La taxation de l'essence sans plomb dans les pays de l'OCDE.....	292
Graphique 77. Le prix du permis d'émission dans l'UE entre août 2005 et mars 2009 en €/tCO ₂	295
Graphique 78. Evolution de la consommation de carburant des voitures nouvelles aux États-Unis et dans les pays de l'Union européenne	303

Graphique 79. Une estimation des dépenses publiques en R&D pour les piles à combustible en 2005	309
Graphique 80. La dynamique de diffusion et les instruments de soutien aux innovations environnementales.....	318
Graphique 81. Courbe de diffusion en S	325
Graphique 82. La distribution de la population avec un seuil séparant les adhérents des non-adhérents.....	329
Graphique 83. L'interaction offre-demande et la trajectoire de diffusion	333
Graphique 84. Transition énergétique de long terme aux Etats-Unis vers l'utilisation de sources moins intensives en carbone (échelle semilogarithmique).....	338
Graphique 85. La diffusion de voitures diesel en France (à gauche) et estimation des paramètres de diffusion selon le modèle de Mansfield (à droite)	344
Graphique 86. Prix du diesel à la pompe exprimé en termes du prix de l'essence en France et au Royaume-Uni	345
Graphique 87. Parts de marché des voitures alternatives parmi les nouvelles voitures vendues. Trajectoires de diffusion construites à partir du comportement historique de la diffusion du diesel en France.....	347
Graphique 88. Trajectoires de diffusion de la voiture FCV construites à partir du comportement de la diffusion des voitures hybrides aux Etats-Unis, sans et avec une différence initiale de parts de marché pour la voiture PHEV	348
Graphique 89. Sensibilité aux changements de la vitesse de diffusion des voitures PAC à hydrogène pour les différents scénarios sur le désavantage initial par rapport à la voiture PHEV en termes de part de marché	349
Graphique 90. Effets d'une entrée décalée de l'hydrogène sur le marché (à gauche) et l'impact de la couverture de l'infrastructure pour la diffusion (à droite).....	351

Encadrés

Encadré 1. Les propriétés de l'hydrogène	17
Encadré 2. Une révolution gazière rendue possible par la coopération entre l'Etat et les entreprises privées aux Pays-Bas	149
Encadré 3. L'internalisation du coût du carbone accélère la compétitivité des innovations propres.....	226
Encadré 4. Le projet « Voiture Electrique » en France	270
Encadré 5. La construction du leadership danois dans l'industrie éolienne.....	282
Encadré 6. Les étapes de la commercialisation d'une innovation automobile radicale.....	306
Encadré 7. L'obligation "Zero emissions vehicle requirement" (ZEV) en Californie.....	311
Encadré 8. La version française du système bonus/malus	315
Encadré 9. Diffusion par fonctions épidémiques	327

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
PREMIERE PARTIE. LE DEVELOPPEMENT DES INFRASTRUCTURES NECESSAIRES A L'ECONOMIE DE L'HYDROGENE	31
INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE	33
CHAPITRE 1. L'ECONOMIE DE L'HYDROGENE : CLE DE L'AVENIR OU REVE D'INGENIEUR ?	35
SECTION 1. LA CHAINE INDUSTRIELLE DE L'HYDROGENE-ENERGIE	36
1.1. <i>La production d'hydrogène</i>	37
1.1.1. Les méthodes thermochimiques.....	38
1.1.2. Lélectrolyse de l'eau	43
1.1.3. Comparaison des coûts de production, efficacités et émissions.....	45
1.2. <i>Les infrastructures de stockage, transport et distribution</i>	48
1.2.1. Le stockage	48
1.2.2. Le transport et la distribution	52
1.2.3. Choix optimal de l'infrastructure et coûts de transport et de distribution.....	55
1.3. <i>Station d'hydrogène</i>	59
1.3.1. Configurations possibles	60
1.3.2. Sécurité et risques propres à l'hydrogène.....	62
1.3.3. Le stockage de l'hydrogène à bord du véhicule	64
SECTION 2. LA PILE A COMBUSTIBLE.....	67
2.1. <i>Principes de fonctionnement et différents types de piles à combustible</i>	67
2.2. <i>Applications mobiles</i>	71
2.2.1. Efficacité énergétique	73
2.2.2. L'impact environnemental.....	76
2.2.3. Coût et compétitivité dans les transports.....	77
2.2.4. Les marchés potentiels	79
2.3. <i>Applications portables et stationnaires</i>	81
2.3.1. Efficacité et impact environnemental	81
2.3.2. Coût des piles à combustible	82
2.3.3. Marchés à court et moyen termes.....	82
SECTION 3. ORGANISATION DE LA NOUVELLE FILIERE HYDROGENE POUR APPROVISIONNER LES PILES A COMBUSTIBLE	84
3.1. <i>Coût de l'hydrogène à la pompe selon les différents sentiers technologiques</i>	85
3.1.1. Scénarios envisageables pour l'infrastructure	85
3.1.2. Le coût de l'hydrogène livré.....	87
3.2. <i>Le développement de la demande et de l'infrastructure</i>	89
3.2.1. Horizons temporels.....	89
3.2.2. Estimations du coût de l'infrastructure	90
3.2.3. Stratégies envisageables pour démarrer la transition	93
3.3. <i>La transition dans le monde</i>	97
3.3.1. Les grands programmes d'hydrogène et piles à combustible dans le monde	97
3.3.2. La coordination au niveau international.....	99
3.3.3. Les partenariats publics-privés pour l'ouverture des stations de démonstration	100
CONCLUSION DU CHAPITRE 1	105

CHAPITRE 2. ANALYSE PROSPECTIVE DE LA MISE EN PLACE DES INFRASTRUCTURES POUR L’HYDROGENE A PARTIR DES EXEMPLES HISTORIQUES DE L’ELECTRICITE ET DU GAZ NATUREL 107

SECTION 1. LES INDUSTRIES DE RESEAU ENERGETIQUE	108
1.1. <i>Caractérisation économique des industries de réseau</i>	109
1.1.1. Externalités de réseau.....	110
1.1.2. Le monopole naturel.....	113
1.2. <i>La dynamique de croissance des réseaux</i>	115
1.2.1. Interactions entre l’offre et la demande.....	115
1.2.2. Le moment critique du démarrage du réseau	117
1.2.3. Le problème de la construction et de l’expansion de réseaux privés : Le modèle de Noam (1992).....	118
1.3. <i>Changement institutionnel et nouveaux défis pour l’investissement</i>	120
1.3.1. Les facteurs à la base du changement institutionnel.....	120
1.3.2. Les défis posés par la libéralisation.....	125
SECTION 2. LE DEVELOPPEMENT HISTORIQUE DES RESEAUX ELECTRIQUE ET GAZIER EN EUROPE	128
2.1. <i>La mise en place d’un réseau universel : le cas de l’électricité</i>	128
2.1.1. La naissance de l’industrie : 1880 - 1913	129
2.1.2. L’élargissement de l’industrie électrique : 1913-1938.....	129
2.1.3. La croissance des industries électriques nationales : 1945 - 1980.....	131
2.1.4. L’arrivée à maturité et la déréglementation à partir des années 1980	134
2.2. <i>L’importance de la coordination des acteurs pour la réalisation des investissements : le cas de l’industrie gazière</i>	139
2.2.1. L’économie du gaz naturel.....	140
2.2.2. La spécificité des investissements et la recherche d’arrangements institutionnels hybrides.....	144
2.2.3. Démarrage et évolution de l’industrie gazière en Europe	146
2.3. <i>Perspectives pour la transition vers l’hydrogène</i>	155
CONCLUSION DU CHAPITRE 2	158

CHAPITRE 3. LES INCERTITUDES RELATIVES A L’INVESTISSEMENT EN INFRASTRUCTURE DE DISTRIBUTION DE L’HYDROGENE POUR LES TRANSPORTS : L’IMPORTANCE DE LA DEMANDE 159

SECTION 1. LES INCERTITUDES RELATIVES AU DEVELOPPEMENT DE LA FILIERE	160
1.1. <i>Les incertitudes d’ordre technologique</i>	161
1.2. <i>Les incertitudes relatives à l’évolution de l’infrastructure et de la demande</i>	165
1.2.1. Les incertitudes liées à l’infrastructure	165
1.2.2. Les incertitudes relatives au comportement de la demande.....	166
1.3. <i>L’incertitude d’ordre politique</i>	167
1.4. <i>L’incertitude concurrentielle</i>	169
1.4.1. Analyse de l’environnement concurrentiel à l’aide du modèle des cinq forces de Porter	169
1.4.2. L’incertitude face aux ressources disponibles et au comportement des fournisseurs	171
1.4.3. Avantages et inconvénients associés à une stratégie de premier entrant.....	173
SECTION 2. LA DECISION D’INVESTISSEMENT EN ENVIRONNEMENT INCERTAIN : LE CAS DE LA STATION D’HYDROGENE.....	175
2.1. <i>L’impact de l’incertitude sur les indicateurs économiques</i>	175
2.1.1. La période de récupération.....	175
2.1.2. L’actualisation des flux de trésorerie et le choix de la prime de risque	175
2.1.3. Le profil des flux de trésorerie de l’investissement dans l’infrastructure pour l’hydrogène.....	176
2.2. <i>La valeur actualisée nette</i>	176
2.3. <i>La théorie des options réelles et l’évaluation de la rentabilité de la station à hydrogène</i>	181
2.3.1. L’effet des différentes sources d’incertitude sur la valeur d’option	181
2.3.2. L’investissement en options réelles	183
2.3.3. Etude de rentabilité d’un réseau de distribution d’hydrogène à l’aide de la théorie des options réelles	185
2.3.4. Les limites de la théorie des options réelles pour l’évaluation du projet	186
CONCLUSION DU CHAPITRE 3	187

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE.....	189
DEUXIEME PARTIE. LES BARRIERES A LA DIFFUSION DE L’HYDROGENE ET DES PILES A COMBUSTIBLE SUR LE MARCHÉ	191
INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE	193
CHAPITRE 4. L’EMERGENCE DE TECHNOLOGIES DE RUPTURE EN PRESENCE D’UN VERROUILLAGE SUR LE PETROLE	195
SECTION 1. LES RUPTURES TECHNOLOGIQUES : CAUSES ET DIRECTIONS	196
1.1. <i>Les grandes vagues technologiques dans l’histoire</i>	196
1.2. <i>La typologie du changement technique</i>	197
1.3. <i>Les déterminants des innovations majeures</i>	202
1.3.1. L’hypothèse néoclassique du changement technique induit.....	203
1.3.2. Le « push » de la science versus le « pull » du marché.....	205
1.3.3. La perspective évolutionniste du changement technique	207
SECTION 2. LA DYNAMIQUE D’INNOVATION DANS LES TECHNOLOGIES ENERGETIQUES.....	213
2.1. <i>Les étapes du changement technologique</i>	214
2.2. <i>La recherche et développement (R&D)</i>	215
2.2.1. L’incertitude associée à l’innovation.....	216
2.2.2. Le problème de l’appropriation	217
2.2.3. Les dépenses privées en R&D en environnement concurrentiel	218
2.2.4. Le financement public de la recherche fondamentale.....	219
2.3. <i>Du laboratoire au marché : dépasser la « vallée de la mort »</i>	220
2.4. <i>L’apprentissage technologique</i>	223
2.4.1. La courbe d’apprentissage.....	223
2.4.2. Les ratios d’apprentissage des piles à combustible en comparaison avec d’autres technologies énergétiques nouvelles.....	227
2.4.3. Les limites de l’utilisation des courbes d’expérience	229
2.5. <i>La diffusion technologique</i>	230
2.5.1. La régularité empirique de la diffusion des innovations : la courbe en S.....	230
2.5.2. La diffusion par la transmission de l’information entre groupes sociaux différents.....	232
2.5.3. La diffusion comme un processus cumulatif et dynamique.....	233
2.5.4. La concurrence technologique en présence de rendements croissants d’adoption.....	234
SECTION 3. STRATEGIES DES ACTEURS DANS LE CADRE DU VERROUILLAGE TECHNIQUE ET INSTITUTIONNEL SUR LE PETROLE.....	237
3.1. <i>Le verrouillage institutionnel sur le pétrole</i>	237
3.1.1. Stabilité institutionnelle et changement graduel.....	237
3.1.2. Les défaillances institutionnelles bloquent l’émergence de nouveaux systèmes technologiques	240
3.1.3. Le « lock in » aux énergies fossiles.....	242
3.2. <i>La stratégie des acteurs potentiels de l’hydrogène</i>	244
3.2.1. Les constructeurs automobiles	245
3.2.2. Les investisseurs dans l’infrastructure pour l’hydrogène.....	251
3.2.3. Les fabricants de technologies d’hydrogène.....	255
3.2.4. Le besoin de coopération entre les acteurs privés et publics	258
CONCLUSION DU CHAPITRE 4	261
CHAPITRE 5. STRATEGIES DE SOUTIEN A LA TRANSITION TECHNOLOGIQUE VERS L’ECONOMIE DE L’HYDROGENE	263
SECTION 1. LE PROCESSUS DE TRANSITION TECHNOLOGIQUE : THEORIE ET APPLICATION AU CAS DE L’AUTOMOBILE	264
1.1. <i>L’approche multi-niveaux de la transition technologique</i>	265
1.2. <i>La diffusion de l’automobile à essence dans le passé</i>	267
1.3. <i>Les défis pour les alternatives technologiques au moteur à explosion</i>	270

SECTION 2. LES MECANISMES DE TRANSFORMATION DU MARCHÉ	272
2.1. <i>La dynamique des innovations de rupture</i>	273
2.2. <i>La gestion stratégique des niches de marché</i>	275
2.2.1. La difficulté pour le marché à générer des innovations de rupture.....	275
2.2.2. La progression des innovations dans les niches de marché.....	276
2.2.3. Création de niches de marché pour l'hydrogène et les piles à combustibles	277
2.3. <i>Les stratégies concurrentielles pour les innovations vertes</i>	280
2.3.1. Compétitivité internationale des nations dans les nouvelles filières technologiques	281
2.3.2. Les projets entrepreneuriaux existant pour développer les alternatives au pétrole.....	283
SECTION 3. LES INSTRUMENTS DE PROMOTION DE LA SOUTENABILITE.....	286
3.1. <i>L'internalisation des externalités environnementales</i>	287
3.1.1. Les instruments économiques : intervenir par les prix ou par les quantités ?.....	287
3.1.2. L'instrument réglementaire : les normes technologiques	298
3.2. <i>Les instruments de soutien spécifique à l'hydrogène</i>	304
3.2.1. Le financement de la R&D et les démonstrations.....	305
3.2.2. La création des premiers marchés pour l'hydrogène.....	310
3.2.3. Les mesures d'incitation financière	312
3.3. <i>Quels instruments employer en fonction de la maturité technologique ?</i>	315
3.3.1. Combinaison des instruments de soutien technologique selon les défaillances de marché	316
3.3.2. Comparaison des incitations mises en place aux Etats-Unis et en Europe	319
CONCLUSION DU CHAPITRE 5	321
CHAPITRE 6. DYNAMIQUE DE DIFFUSION DE L'HYDROGENE ET CONCURRENCE TECHNOLOGIQUE SUR LE MARCHÉ DE L'AUTOMOBILE	323
SECTION 1. TRAITEMENT THEORIQUE DE LA DIFFUSION TECHNOLOGIQUE	324
1.1. <i>Les modèles de diffusion technologique</i>	324
1.1.1. Les modèles épidémiques de diffusion.....	324
1.1.2. Les modèles probit de l'hétérogénéité des agents.....	328
1.1.3. Modélisation de l'offre et de la demande.....	330
1.2. <i>Concurrence et substitution multi-technologique</i>	333
1.2.1. Concurrence technologique en présence d'externalités de réseau.....	334
1.2.2. Modèles de substitution technologique de long terme.....	337
1.2.3. Les limites à la domination technologique : l'importance de l'espace local	338
SECTION 2. LA CONCURRENCE ENTRE HYDROGENE ET ELECTRICITE EN PRESENCE D'EFFETS DE RESEAU	339
2.1. <i>La littérature existante sur la diffusion de l'hydrogène dans les transports</i>	340
2.2. <i>La lutte technologique entre la voiture électrique rechargeable et la voiture pile à combustible à hydrogène pour le remplacement de la voiture à combustion</i>	342
2.2.1. Présentation du modèle	342
2.2.2. Collecte de données et hypothèses structurantes.....	343
2.2.3. Les résultats des simulations de la concurrence technologique	346
2.2.4. Discussion et étapes à venir.....	352
CONCLUSION DU CHAPITRE 6	355
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE	357
CONCLUSION GENERALE.....	359
ANNEXES	365
BIBLIOGRAPHIE	369
LISTE DES TABLEAUX, GRAPHIQUES ET ENCADRES	401
TABLE DES MATIERES	407

